

# Diseño de envolventes térmicamente eficientes: optimización multiobjetivo y simulación energética

## Thermally efficient envelope design: multi-objective optimization and energy simulation

Presentación: 23/10/2025

### **María Cecilia Demarchi**

Centro de Investigación en Métodos Computacionales, CONICET - UNL, Col. Ruta 168 s/n, Predio CONICET Santa Fe, Argentina.  
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina.  
[ingmcdemarchi@gmail.com](mailto:ingmcdemarchi@gmail.com)

### **Alejandro E. Albanesi**

Centro de Investigación en Métodos Computacionales, CONICET - UNL, Col. Ruta 168 s/n, Predio CONICET Santa Fe, Argentina.  
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina.  
[aalbanesi@cimec.santafe-conicet.gov.ar](mailto:aalbanesi@cimec.santafe-conicet.gov.ar)

### **Resumen**

En el contexto actual de crisis energética y ambiental, el desarrollo de soluciones habitacionales sostenibles y eficientes resulta prioritario. Este trabajo presenta una metodología para el diseño de envolventes térmicamente eficientes, basada en el acople entre simulación computacional del comportamiento térmico- energético de edificios y algoritmos de optimización multiobjetivo. La propuesta permite identificar configuraciones óptimas de los elementos de la envolvente, siendo además flexible y adaptable a diferentes tipologías edilicias y condiciones climáticas. El objetivo central es avanzar hacia una herramienta que oriente lineamientos de diseño arquitectónico eficientes y sustentables. Como casos de aplicación, se analiza una vivienda familiar de en donde, se analizan orientaciones, materiales opacos y transparentes de la envolvente y terminaciones exteriores óptimas para el diseño energéticamente eficiente del edificio.

**Palabras clave:** Eficiencia energética en viviendas, EnergyPlus, optimización multiobjetivo, NSGAll, diseño óptimo de envolventes.

### **Abstract**

In the current context of energy and environmental crises, the development of sustainable and efficient housing solutions is a priority. This work presents a methodology for the design of thermally efficient building envelopes, based on the coupling of computational simulation of the thermal and energy behavior of buildings and multi- objective optimization algorithms. The proposal allows for the identification of optimal configurations of building envelope elements, and is also flexible and adaptable to different building typologies and climatic conditions. The central objective is to advance toward a tool that guides efficient and sustainable architectural design guidelines. As application cases, a family home is analyzed, where orientations, opaque and transparent materials of the envelope, and optimal exterior finishes for the energy-efficient design of the building are analyzed.

**Keywords:** Energy efficiency in housing, EnergyPlus, multi-objective optimization, NSGAll, optimal building envelope design.

## Introducción

En respuesta a la crisis energética que se manifiesta tanto a nivel nacional como internacional, impulsada por el crecimiento poblacional, la expansión de las actividades humanas, el incremento en las demandas de confort y la escasa diversificación de la matriz energética, se han intensificado los esfuerzos científicos orientados al desarrollo de tecnologías capaces de mitigar esta problemática. En este contexto, el sector de la construcción representa aproximadamente el 30% del consumo energético total, considerando tanto la etapa de edificación como la de operación (Ministerio de Economía de Argentina, 2022). De allí surge la necesidad urgente de implementar estrategias que mejoren su eficiencia energética.

Desde la perspectiva del diseño arquitectónico, tanto en proyectos de obra nueva como en intervenciones sobre edificaciones existentes, la simulación térmica y energética se ha consolidado como una herramienta fundamental. Esta técnica permite predecir el nivel de confort térmico, las emisiones contaminantes y el consumo energético de las edificaciones. Además, al combinarse con algoritmos de optimización en procesos iterativos, que permiten explorar un amplio rango de alternativas, se transforma en un recurso altamente valioso para profesionales e investigadores en la búsqueda de soluciones eficientes y sostenibles (Yanfei Li, 2024).

En este marco, el objetivo del presente trabajo es analizar una vivienda unifamiliar mediante un bucle iterativo que acopla EnergyPlus (Office, s.f.), como motor de simulación térmica y energética, con un optimizador estocástico (NSGA-II) (Konstantinos Alexakis, 2025). El fin es obtener el diseño óptimo de la orientación y de los materiales de la envolvente opaca y transparente utilizando los años meteorológicos típicos (TMY) de tres ciudades de la provincia de Santa Fe: Sauce Viejo, Rosario y Reconquista (Climate.OneBuilding.Org, s.f.).

## Metodología

La metodología propuesta para el análisis del diseño óptimo desde la perspectiva de la eficiencia energética en edificios consiste en un bucle iterativo (Figura 1) que acopla un optimizador estocástico, en este caso, el Algoritmo Genético NSGA-II, con el motor de simulación EnergyPlus, a fin de evaluar el desempeño térmico y energético de las variables definidas mediante el consumo de energía para calefacción y refrigeración de tal manera que las temperaturas interiores se mantengan en el rango de confort de 20°C a 27°C. El objetivo del trabajo, es mediante la metodología propuesta, obtener el conjunto de materiales óptimos de la envolvente que maximice las horas de confort térmico en el rango definido y minimice el consumo de energía anual para climatización.

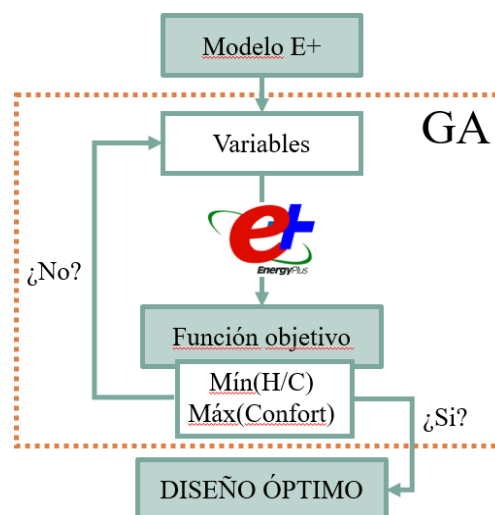


Figura 1: Bucle iterativo para el diseño óptimo de envolventes de edificios

El proceso comienza con la creación del modelo computacional en EnergyPlus y la selección de las variables de análisis. De manera aleatoria, el optimizador NSGA-II asigna valores a dichas variables, se reescribe el modelo y se ejecuta la simulación térmica y energética, obteniendo los resultados consumo de calefacción y refrigeración. Posteriormente, se verifica si los resultados cumplen con los criterios establecidos en la función objetivo: maximizar las horas de confort térmico y minimizar el consumo de energía para calefacción y refrigeración. Este ciclo se repite hasta identificar el conjunto de soluciones que equilibren ambas funciones.}

## Caso de estudio

Se analiza una vivienda unifamiliar compuesta por estar-comedor, cocina, baño y dos dormitorios. Las dimensiones y la distribución de los ambientes se presentan en la Figura 2.

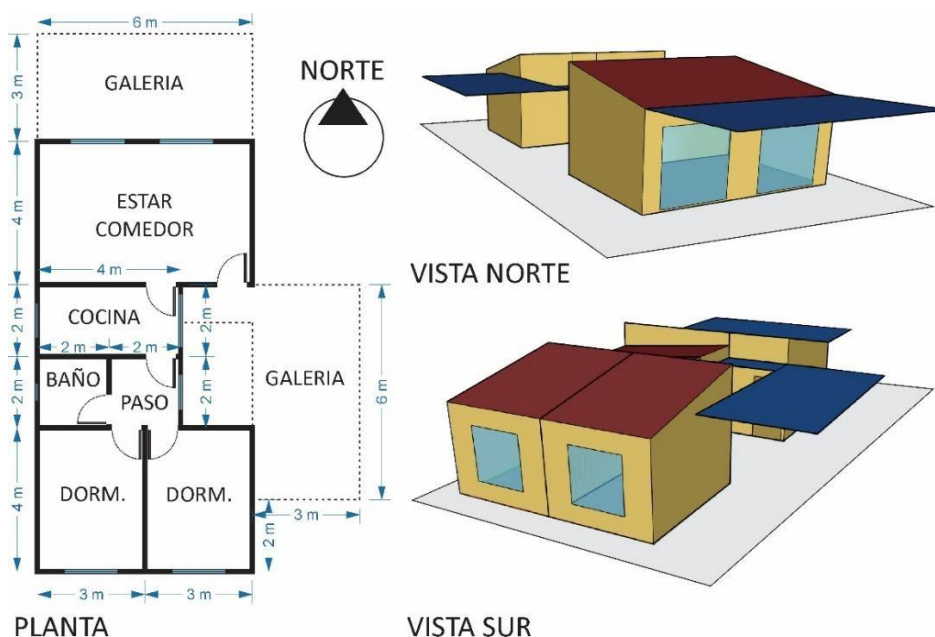


Figura 2: Arquitectura de la vivienda analizada como caso de estudio

En cuanto al uso de la vivienda, se considera un grupo familiar compuesto por dos adultos y dos niños. Los espacios de uso común se asumen ocupados entre las 8:00 y las 22:00 hs, mientras que los dormitorios entre las 22:00 y las 8:00 hs. Respecto a los electrodomésticos, se contemplan: cocina, horno eléctrico y heladera en la cocina; lavarropa y calefón eléctrico en el área de paso; y televisor en la sala de estar.

La climatización se realiza prioritariamente de manera pasiva, mediante ventilación natural; en caso de resultar insuficiente, se recurre al acondicionamiento activo con sistemas de aire acondicionado en estar, comedor, cocina y dormitorios. Para la iluminación se consideran lámparas LED.

## Modelo computacional

La construcción del modelo computacional comienza con la definición de la geometría de la vivienda (Figura 2), seguida de la programación de materiales, sistemas constructivos y modelos de resolución de los fenómenos de transferencia de calor. La vivienda se divide en seis zonas térmicas: Zona 1: estar-comedor; Zona 2: cocina; Zona 3: baño; Zona 4: paso/lavadero; Zona 5: dormitorio 1; y Zona 6: dormitorio 2. El acondicionamiento térmico se modela mediante ventilación natural con el bloque AirFlowNetwork y sistemas ideales de climatización con ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem. Se adopta un rango de confort entre 20°C y 27 °C: cuando la temperatura de una zona se encuentra fuera de este intervalo, y las condiciones exteriores lo permiten, es decir, si la velocidad del viento no supera los 10 m/s y la temperatura exterior se encuentra en un rango de 19°C y 28°C, se activa primero la ventilación natural (G. Barone, 2023). Si esta resulta insuficiente, se cierran las aberturas y se encienden los equipos de aire acondicionado. Estos últimos se consideran como “sistemas ideales”, es decir, sin incorporar la eficiencia de los equipos ni el tipo de suministro energético, con el fin de obtener resultados comparables entre alternativas (Energy, 2023).

En el bloque AirFlowNetwork se cuantifican las infiltraciones no deseadas mediante la ecuación  $Q = C \Delta P^n$ , donde  $C$  es el coeficiente de infiltración,  $\Delta P$  la diferencia de presión a través de la grieta y  $n$  el exponente de flujo (Malcolm Orne, 1994). Estos coeficientes se asignan a uniones entre muros y techos, encuentros entre aberturas y muros, así como a las pérdidas propias de la hermeticidad de las carpinterías.

En cuanto a las cargas internas, se incorporan las ganancias térmicas derivadas de los electrodomésticos y del patrón de uso de la vivienda: 150 W en las Zonas 2 y 3, 75 W en la Zona 4 y en la Zona 6, y 100 W en la Zona 4. Para la iluminación, se consideran 6 W/m<sup>2</sup> en las Zonas 2 y 3, y 4 W/m<sup>2</sup> en las Zonas 5 y 6.

## Variables de análisis

Dado el objetivo planteado, las variables de análisis corresponden a materiales, espesores, secuencia de capas y terminaciones superficiales exteriores de muros, techos y pisos (elementos opacos de la envolvente), materiales, espesor y secuencia de capas de vidrios (elementos transparentes de la envolvente) y orientación de la vivienda.

A continuación, en las Tablas 1, 2, 3, 4 y 5 se muestran los materiales utilizados y sus correspondientes propiedades térmicas. Luego, en la Tabla 6 se detallan las propiedades ópticas de las superficies externas. Estos materiales fueron combinados en diferentes secuencias de capas para generar 90 tipos de muros, 60 tipos de techos, y 10 tipos de pisos para la vivienda con tipología de construcción tradicional. Los detalles de las combinaciones se encuentran en el Anexo 1.

| LADRILLOS Y REVOQUES          |                |                      |                               |                          |
|-------------------------------|----------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Material                      | Espesor (cm)   | Conductividad (Wm/K) | Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Calor específico (J/KgK) |
| Ladrillo común                | 5, 11.5 y 23.5 | 0.70                 | 1800                          | 840                      |
| Ladrillo cerámico tabique 12  | 12             | 0.38                 | 1100                          | 840                      |
| Ladrillo cerámico tabique 18  | 18             | 0.40                 | 1100                          | 840                      |
| Ladrillo cerámico portante 12 | 12             | 0.70                 | 1600                          | 840                      |
| Ladrillo cerámico portante 18 | 18             | 0.75                 | 1650                          | 840                      |
| Ladrillo bloque Hº 14         | 14             | 0.70                 | 1500                          | 840                      |
| Ladrillo bloque Hº 19         | 19             | 0.70                 | 1700                          | 840                      |
| Revoque impermeable           | 0.5            | 1.05                 | 2000                          | 920                      |
| Revoque grueso                | 2.5            | 0.95                 | 1900                          | 920                      |
| Revoque fino                  | 0.5            | 0.70                 | 1600                          | 920                      |

Tabla 1: Propiedades térmicas de ladrillo y revoques

| PISOS                 |              |                      |                               |                          |
|-----------------------|--------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Material              | Espesor (cm) | Conductividad (Wm/K) | Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Calor específico (J/KgK) |
| Contrapiso HºPº       | 10           | 0.70                 | 1800                          | 900                      |
| Carpeta de nivelación | 2            | 1.00                 | 2000                          | 900                      |
| Platea HºAº llaneado  | 15           | 1.60                 | 2400                          | 900                      |
| Cerámico beige        | 1            | 1.2                  | 2100                          | 840                      |

Tabla 2: Propiedades térmicas de materiales utilizados en pisos

| TECHOS             |              |                      |                               |                          |
|--------------------|--------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Material           | Espesor (cm) | Conductividad (Wm/K) | Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Calor específico (J/KgK) |
| Chapa cincalum     | 0.2          | 55                   | 7850                          | 475                      |
| Chapa galvanizada  | 0.2          | 55                   | 7850                          | 475                      |
| Chapa gris pizarra | 0.2          | 55                   | 7850                          | 475                      |
| Chapa gris silver  | 0.2          | 55                   | 7850                          | 475                      |
| Chapa negra        | 0.2          | 55                   | 7850                          | 475                      |
| Teja roja          | 1.5          | 0.72                 | 1900                          | 840                      |
| Teja negra         | 1.5          | 0.72                 | 1900                          | 840                      |

Tabla 3: Propiedades térmicas de chapas y tejas para techo

| MATERIALES AISLANTES |                                                                                       |                      |                               |                          |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Material             | Espesor (cm)                                                                          | Conductividad (Wm/K) | Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Calor específico (J/KgK) |
| Cámara de aire       | Resistencia térmica: 3.85 m <sup>2</sup> K/W (10 cm) y 1.15 m <sup>2</sup> K/W (3 cm) |                      |                               |                          |
| EPS                  | 3, 5, 6, 10                                                                           | 0.035                | 15                            | 1300                     |

Tabla 4: Materiales aislantes utilizados en paredes, pisos y techos

| MATERIALES DE TERMINACIÓN |              |                      |                               |                          |
|---------------------------|--------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Material                  | Espesor (cm) | Conductividad (Wm/K) | Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Calor específico (J/KgK) |
| Machimbre                 | 1.9          | 0.15                 | 500                           | 1700                     |
| Placa de yeso             | 1.2          | 0.27                 | 900                           | 1700                     |

Tabla 5: Propiedades térmicas de materiales utilizados en terminaciones de muros y techos

| PROPIEDADES SUPERFICIALES DE LAS DISTINTAS TERMINACIONES |                      |                    |
|----------------------------------------------------------|----------------------|--------------------|
| Material                                                 | Absortividad térmica | Absortividad solar |
| Ladrillo común visto                                     | 0.90                 | 0.65               |
| Revoque fino                                             | 0.90                 | 0.40               |
| Placa de yeso                                            | 0.90                 | 0.40               |
| Machimbre                                                | 0.70                 | 0.70               |
| Cerámico beige                                           | 0.90                 | 0.38               |
| Placa de H <sup>9</sup> A <sup>9</sup> llaneado          | 0.90                 | 0.60               |
| Chapa cincalum                                           | 0.25                 | 0.35               |
| Chapa galvanizada                                        | 0.25                 | 0.35               |
| Chapa gris pizarra                                       | 0.85                 | 0.70               |
| Chapa gris silver                                        | 0.85                 | 0.40               |
| Chapa negra                                              | 0.95                 | 0.95               |
| Teja roja                                                | 0.90                 | 0.65               |
| Teja negra                                               | 0.90                 | 0.85               |

Tabla 6: Propiedades ópticas de las superficies expuestas a la radiación

En cuanto a los acristalamientos, se utilizaron vidrios claros de 3 y 6 mm, combinándolos con cámaras de aire de 6 y 13 mm de espesor, formando acristalamientos simples, dobles y triples obteniendo un total de 8 tipos de acristalamientos.

En términos generales, la combinación propuesta tanto para muros como para techos es, con los elementos definidos, distintas secuencias de capas: 1) ladrillo – aislante – ladrillo, 2) ladrillo – aislante – placa de yeso, 3) chapa – cámara de aire – aislante - cielorraso.

## Resultados

Los resultados obtenidos se presentan en dos instancias: en primer lugar, la identificación de las configuraciones constructivas óptimas de manera general; en segundo lugar, el análisis particular para cada localidad considerada.

### Envolventes óptimas

En las Tablas 7, 8 y 9, se muestran las construcciones óptimas comunes a todas las localidades. Se observa que los diseños seleccionados para minimizar el consumo de energía de acondicionamiento presentan rangos de transmitancia térmica (U) desde 0.46 K/Wm<sup>2</sup> a 0.77 K/Wm<sup>2</sup> para muros, con colores correspondientes a ladrillo visto y pintura color claro como terminación, 0.15 K/Wm<sup>2</sup> a 0.47 K/Wm<sup>2</sup> para techos, con colores de chapas en tonos grises, especialmente gris silver cuya absortividad solar es 0.25, y 0.53 K/Wm<sup>2</sup> a 10.67 K/Wm<sup>2</sup> para pisos, siendo que los rangos de variación de U van de 0.24 K/Wm<sup>2</sup> a 4.23 K/Wm<sup>2</sup> en muros, 0.15 K/Wm<sup>2</sup> a 0.47 K/Wm<sup>2</sup> en techos y 0.33 K/Wm<sup>2</sup> a 10.67 K/Wm<sup>2</sup> en pisos. Se puede ver que, en función de las tipologías de construcciones propuestas que, la elección de muros está directamente relacionada con el valor U, que regula la conducción de calor, la elección de techos está directamente relacionada con el color de la chapa, que regula la ganancia de calor, y la elección de pisos, por el valor U, que regula la pérdida de calor por piso. Estas variables están fuertemente interrelacionadas, por lo que su efecto en la respuesta térmica del edificio se verá en detalle a continuación.

| Categoría | N° | Descripción                                                                                                                                   | U<br>(W/m <sup>2</sup> K) | $\alpha t$ | $\alpha s$ |
|-----------|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------|------------|
| MUROS     | 14 | Ladrillo común visto 5 cm + cámara aire 3 cm + revoque impermeable + ladrillo común 24 cm + revoque grueso + revoque fino                     | 0.46                      | 0.9        | 0.65       |
| MUROS     | 17 | Ladrillo común visto 5 cm + EPS 5 cm + revoque impermeable + ladrillo común 24 cm + revoque grueso + revoque fino                             | 0.59                      | 0.9        | 0.65       |
| MUROS     | 23 | Ladrillo común visto 12 cm + EPS 3 cm + revoque impermeable + ladrillo portante 18 cm + revoque grueso + revoque fino                         | 0.77                      | 0.9        | 0.65       |
| MUROS     | 25 | Ladrillo común visto 12 cm + EPS 5 cm + revoque impermeable + ladrillo común 24 cm + revoque grueso + revoque fino                            | 0.51                      | 0.9        | 0.65       |
| MUROS     | 26 | Ladrillo común visto 12 cm + EPS 5 cm + revoque impermeable + ladrillo portante 12 cm + revoque grueso + revoque fino                         | 0.56                      | 0.9        | 0.65       |
| MUROS     | 27 | Ladrillo común visto 12 cm + EPS 5 cm + revoque impermeable + ladrillo portante 18 cm + revoque grueso + revoque fino                         | 0.53                      | 0.9        | 0.65       |
| MUROS     | 28 | Ladrillo común visto 12 cm + revoque grueso + revoque fino + ladrillo común 12 cm + EPS 5 cm + revoque impermeable + revoque fino             | 0.48                      | 0.9        | 0.65       |
| MUROS     | 36 | Ladrillo cerámico tabique 12 cm + revoque grueso + revoque fino + ladrillo común 12 cm + EPS 5 cm + revoque impermeable + revoque fino        | 0.47                      | 0.9        | 0.65       |
| MUROS     | 49 | Ladrillo común 24 cm + revoque grueso + revoque fino                                                                                          | 0.64                      | 0.9        | 0.65       |
| MUROS     | 41 | Revoque fino + revoque grueso + revoque impermeable + ladrillo común 12 cm + EPS 5 cm + ladrillón común 12 cm + revoque grueso + revoque fino | 0.48                      | 0.9        | 0.7        |

Tabla 7: Construcciones óptimas para muros

| Categoría | N° | Descripción                                                                               | U<br>(W/m <sup>2</sup> K) | $\alpha t$ | $\alpha s$ |
|-----------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------|------------|
| TECHOS    | 15 | Perfiles C + chapa galvanizada + cámara aire 10 cm + EPS 10 cm + cielorraso yeso          | 0.15                      | 0.25       | 0.35       |
| TECHOS    | 19 | Perfiles C + chapa pizarra + cámara aire 10 cm + EPS 6 cm + cielorraso yeso               | 0.18                      | 0.85       | 0.7        |
| TECHOS    | 20 | Perfiles C + chapa gris silver + cámara aire 10 cm + EPS 10 cm + cielorraso yeso          | 0.15                      | 0.85       | 0.4        |
| TECHOS    | 21 | Perfiles C + chapa gris silver + cámara aire 10 cm + cielorraso yeso                      | 0.26                      | 0.85       | 0.4        |
| TECHOS    | 22 | Perfiles C + chapa gris silver + cámara aire 10 cm + EPS 3 cm + cielorraso yeso           | 0.21                      | 0.85       | 0.4        |
| TECHOS    | 23 | Perfiles C + chapa gris silver + cámara aire 10 cm + EPS 5 cm + cielorraso yeso           | 0.19                      | 0.85       | 0.4        |
| TECHOS    | 24 | Perfiles C + chapa gris silver + cámara aire 10 cm + EPS 10 cm + cielorraso yeso          | 0.18                      | 0.85       | 0.4        |
| TECHOS    | 25 | Perfiles C + chapa gris silver + cámara aire 10 cm + EPS 6 cm + cielorraso yeso           | 0.15                      | 0.85       | 0.4        |
| TECHOS    | 31 | Estructura madera + chapa zincalú + cámara aire 10 cm + madera machimbreada               | 0.25                      | 0.85       | 0.4        |
| TECHOS    | 36 | Estructura madera + chapa zincalú + cámara aire 10 cm + madera machimbreada               | 0.25                      | 0.85       | 0.4        |
| TECHOS    | 40 | Estructura madera + chapa galvanizada + cámara aire 10 cm + madera machimbreada           | 0.24                      | 0.25       | 0.35       |
| TECHOS    | 46 | Estructura madera + chapa gris silver + cámara aire 10 cm + madera machimbreada           | 0.25                      | 0.85       | 0.4        |
| TECHOS    | 47 | Estructura madera + chapa gris silver + cámara aire 3 cm + EPS 3 cm + madera machimbreada | 0.47                      | 0.85       | 0.4        |
| TECHOS    | 48 | Estructura madera + chapa gris silver + cámara aire 3 cm + EPS 5 cm + madera machimbreada | 0.37                      | 0.85       | 0.4        |
| TECHOS    | 49 | Estructura madera + chapa gris silver + cámara aire 3 cm + EPS 6 cm + madera machimbreada | 0.33                      | 0.85       | 0.4        |

Tabla 8: Construcciones óptimas para techos

| Categoría | N° | Descripción                                                                      | U<br>(W/m <sup>2</sup> K) | $\alpha t$ | $\alpha s$ |
|-----------|----|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------|------------|
| PISOS     | 3  | Contrapiso hormigón pobre + EPS 5 cm + carpeta nivelación + piso cerámico beige  | 0.63                      | 0.9        | 0.38       |
| PISOS     | 4  | Contrapiso hormigón pobre + EPS 6 cm + carpeta nivelación + piso cerámico beige  | 0.53                      | 0.9        | 0.38       |
| PISOS     | 5  | Contrapiso hormigón pobre + EPS 10 cm + carpeta nivelación + piso cerámico beige | 0.33                      | 0.9        | 0.38       |
| PISOS     | 6  | Plataforma hormigón armado sobre suelo                                           | 10.67                     | 0.9        | 0.6        |
| PISOS     | 7  | Plataforma hormigón armado + EPS 3 cm                                            | 1.05                      | 0.9        | 0.6        |

Tabla 9: Construcciones óptimas para pisos

| Categoría        | N° | Descripción                                 | U<br>(W/m <sup>2</sup> K) | SHGC  | $\alpha_s$ |
|------------------|----|---------------------------------------------|---------------------------|-------|------------|
| ACRISTALAMIENTOS | 2  | Vidrio claro simple 3 mm                    | 5.778                     | 0.819 | 0.775      |
| ACRISTALAMIENTOS | 3  | Doble vidrio claro 3 mm + cámara aire 6 mm  | 2.72                      | 0.764 | 0.705      |
| ACRISTALAMIENTOS | 4  | Doble vidrio claro 3 mm + cámara aire 13 mm | 2.556                     | 0.764 | 0.812      |
| ACRISTALAMIENTOS | 5  | Doble vidrio claro 6 mm + cámara aire 6 mm  | 2.67                      | 0.703 | 0.604      |
| ACRISTALAMIENTOS | 6  | Doble vidrio claro 6 mm + cámara aire 13 mm | 2.511                     | 0.704 | 0.604      |
| ACRISTALAMIENTOS | 7  | Triple vidrio claro 3 mm + cámara aire 6 mm | 1.765                     | 0.684 | 0.595      |

Tabla 10: Construcciones óptimas para acristalamientos

## Rosario

En la Tabla 11 se detallan las envolventes seleccionadas como óptimas para Rosario. En ellas se incluyen las propiedades térmicas y ópticas de los elementos de la envolvente (coeficiente de transmitancia térmica U (W/m<sup>2</sup>K), absorptividad térmica  $\alpha_T$  y solar  $\alpha_S$ , y coeficiente de ganancia solar en acristalamientos SGHC), así como los consumos de energía asociados a calefacción, refrigeración y demanda total. En la Figura 3 se relacionan los valores U de cada elemento con el consumo de energía total para cada localidad.

| N° | Orientación | Muro |      |     |      | Techo |      |      |      | Piso |      | Acristalamientos |       |       | Consumo de energía |        |         |
|----|-------------|------|------|-----|------|-------|------|------|------|------|------|------------------|-------|-------|--------------------|--------|---------|
|    |             | Nº   |      | αT  | αS   | Nº    | U    | αT   | αS   | Nº   | U    | Nº               | U     | SGHC  | Ref.               | Calef. | Total   |
| 1  | 247.5       | 85   | 2.85 | 0.9 | 0.65 | 11    | 0.26 | 0.85 | 0.4  | 1    | 5.84 | 1                | 5.778 | 0.905 | 1690.80            | 559.37 | 2250.17 |
| 2  | 247.5       | 87   | 3.21 | 0.9 | 0.65 | 11    | 0.26 | 0.85 | 0.4  | 1    | 5.84 | 1                | 5.778 | 0.905 | 1814.86            | 511.05 | 2325.91 |
| 3  | 104.11      | 26   | 0.55 | 0.9 | 0.65 | 21    | 0.26 | 0.85 | 0.40 | 6    | 10.7 | 5                | 2.67  | 703   | 1261.81            | 0.70   | 1331.48 |
| 4  | 104.23      | 26   | 0.55 | 0.9 | 0.65 | 21    | 0.26 | 0.85 | 0.40 | 6    | 10.7 | 6                | 2.511 | 704   | 1301.58            | 0.70   | 1359.01 |
| 5  | 79.91       | 23   | 0.77 | 0.9 | 0.65 | 21    | 0.26 | 0.85 | 0.40 | 6    | 10.7 | 5                | 2.67  | 703   | 1241.18            | 0.70   | 1395.04 |
| 6  | 115.57      | 25   | 0.51 | 0.9 | 0.65 | 22    | 0.21 | 0.85 | 0.40 | 6    | 10.7 | 7                | 1.765 | 684   | 1382.14            | 0.68   | 1402.82 |
| 7  | 241.35      | 25   | 0.51 | 0.9 | 0.65 | 15    | 0.15 | 0.25 | 0.35 | 6    | 10.7 | 6                | 2.511 | 704   | 1416.81            | 0.70   | 1429.28 |
| 8  | 39.27       | 17   | 0.59 | 0.9 | 0.65 | 22    | 0.21 | 0.85 | 0.40 | 6    | 10.7 | 2                | 5.894 | 905   | 1182.84            | 0.91   | 1436.68 |
| 9  | 180.68      | 25   | 0.51 | 0.9 | 0.65 | 19    | 0.18 | 0.85 | 0.70 | 6    | 10.7 | 7                | 1.765 | 684   | 1614.15            | 0.68   | 1622.83 |
| 10 | 188.99      | 28   | 0.55 | 0.9 | 0.65 | 24    | 0.18 | 0.85 | 0.40 | 7    | 1.07 | 7                | 1.765 | 684   | 2699.82            | 0.68   | 2704.05 |
| 11 | 182.47      | 25   | 0.51 | 0.9 | 0.65 | 20    | 0.15 | 0.85 | 0.70 | 7    | 1.07 | 7                | 1.765 | 684   | 2843.37            | 0.68   | 2845.67 |
| 12 | 123.54      | 25   | 0.51 | 0.9 | 0.65 | 21    | 0.26 | 0.85 | 0.40 | 5    | 0.33 | 7                | 1.765 | 684   | 3661.41            | 0.68   | 3663.18 |
| 13 | 247.5       | 72   | 0.31 | 0.9 | 0.70 | 25    | 0.15 | 0.85 | 0.40 | 5    | 0.33 | 7                | 1.765 | 684   | 5103.25            | 24.94  | 5128.18 |

Tabla 11: Comparación de consumo de energía en función de las propiedades de la envolvente para Rosario

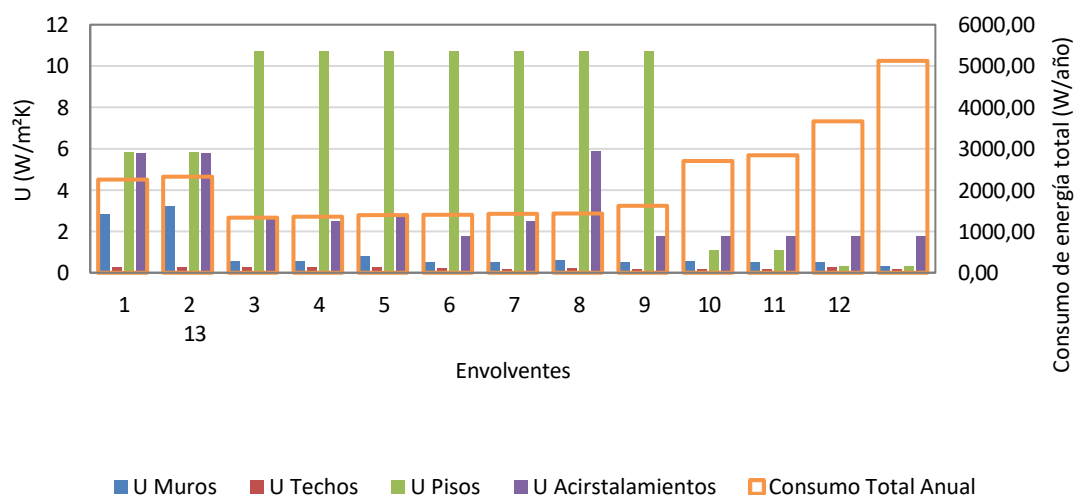


Figura 3: Comparación de consumo de energía en función de la transmitancia térmica de los elementos de la envolvente para Rosario

En Rosario, las estrategias de envolvente buscan optimizar el rendimiento energético, destacando que el mayor consumo se produce en refrigeración debido a la ganancia de radiación solar por acristalamiento. Las envolventes óptimas (envolventes n° 3 a 9 de la Tabla 10) presentan valores de transmitancia térmica U de aproximadamente  $0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  en muros,  $0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$  en techos y  $10.7 \text{ W/m}^2\text{K}$  en pisos. Esto significa que techos y muros regulan la ganancia de calor, mientras que el piso regula la pérdida de calor hacia el terreno. En muros, la configuración ladrillo-aislante-ladrillo es óptima, ya que desacopla las masas térmicas para reducir la transferencia de calor y mantener temperaturas interiores

estables. Se encontró que las construcciones tradicionales (envolventes n° 1 y 2 de la Tabla 10) aumentan el consumo al perder y ganar calor fácilmente. Por otro lado, las viviendas muy aisladas (envolventes n° 10 a 13 de la Tabla 10) pueden duplicar a quintuplicar el consumo óptimo, dado que el calor solar ganado por las ventanas no puede disiparse por la alta aislación de los demás elementos constructivos.

## Sauce Viejo

La Tabla 12 presenta las propiedades térmicas (U, absorptividad térmica y solar, SGHC) de los componentes de la envolvente que resultaron óptimos para la localidad de Sauce Viejo, junto con el consumo energético resultante (calefacción, refrigeración y total). En la Figura 4 se muestra la relación entre el coeficiente de transmitancia térmica U de cada elemento constructivo y el consumo de energía total en cada localidad.

| N° | Orientación | Muro |      |            |            | Techo |      |            |            | Piso |       | Acristalamientos |       |       | Consumo de energía |        |         |
|----|-------------|------|------|------------|------------|-------|------|------------|------------|------|-------|------------------|-------|-------|--------------------|--------|---------|
|    |             | N°   | U    | $\alpha_T$ | $\alpha_S$ | N°    | U    | $\alpha_T$ | $\alpha_S$ | N°   | U     | N°               | U     | SGHC  | Ref.               | Calef. | Total   |
| 1  | 202.5       | 85   | 2.85 | 0.9        | 0.65       | 11    | 0.26 | 0.85       | 0.4        | 1    | 5.84  | 1                | 5.778 | 0.905 | 1998.20            | 360.47 | 2358.67 |
| 2  | 202.5       | 87   | 3.21 | 0.9        | 0.65       | 11    | 0.26 | 0.85       | 0.4        | 1    | 5.84  | 1                | 5.778 | 0.905 | 2091.51            | 347.88 | 2439.39 |
| 3  | 58.41       | 49   | 0.63 | 0.9        | 0.4        | 47    | 0.49 | 0.85       | 0.4        | 6    | 10.66 | 7                | 1.765 | 0.684 | 1189.20            | 18.40  | 1207.60 |
| 4  | 60.43       | 49   | 0.63 | 0.9        | 0.4        | 47    | 0.49 | 0.85       | 0.4        | 6    | 10.66 | 7                | 1.765 | 0.684 | 1195.20            | 18.40  | 1213.60 |
| 5  | 64.34       | 49   | 0.63 | 0.9        | 0.4        | 48    | 0.38 | 0.85       | 0.4        | 6    | 10.66 | 7                | 1.765 | 0.684 | 1213.50            | 14.50  | 1228.00 |
| 6  | 56.65       | 51   | 0.54 | 0.9        | 0.4        | 48    | 0.38 | 0.85       | 0.4        | 6    | 10.66 | 7                | 1.765 | 0.684 | 1224.90            | 13.90  | 1238.80 |
| 7  | 60.66       | 51   | 0.54 | 0.9        | 0.4        | 49    | 0.35 | 0.85       | 0.4        | 6    | 10.66 | 7                | 1.765 | 0.684 | 1232.70            | 11.40  | 1244.10 |
| 8  | 250.76      | 17   | 0.59 | 0.9        | 0.65       | 21    | 0.26 | 0.85       | 0.4        | 6    | 10.66 | 5                | 2.67  | 0.703 | 1314.10            | 3.40   | 1317.50 |
| 9  | 80.74       | 36   | 0.47 | 0.9        | 0.65       | 47    | 0.49 | 0.85       | 0.4        | 6    | 10.66 | 7                | 1.765 | 0.684 | 1331.40            | 7.80   | 1339.20 |
| 10 | 194.51      | 25   | 0.51 | 0.9        | 0.65       | 19    | 0.18 | 0.85       | 0.7        | 6    | 10.66 | 7                | 1.765 | 0.684 | 1560.70            | 0.70   | 1561.40 |
| 11 | 195.86      | 25   | 0.51 | 0.9        | 0.65       | 25    | 0.15 | 0.85       | 0.4        | 7    | 1.05  | 5                | 2.67  | 0.703 | 2869.10            | 0.40   | 2869.50 |
| 12 | 202.29      | 25   | 0.51 | 0.9        | 0.65       | 36    | 0.26 | 0.85       | 0.4        | 8    | 0.66  | 7                | 1.765 | 0.684 | 3453.30            | 0.10   | 3453.40 |
| 13 | 202.5       | 72   | 0.31 | 0.9        | 0.70       | 25    | 0.15 | 0.85       | 0.40       | 5    | 0.33  | 7                | 1.765 | 0.684 | 4838.88            | 20.93  | 4859.81 |

Tabla 12: Comparación de consumo de energía en función de las propiedades de la envolvente para Sauce Viejo

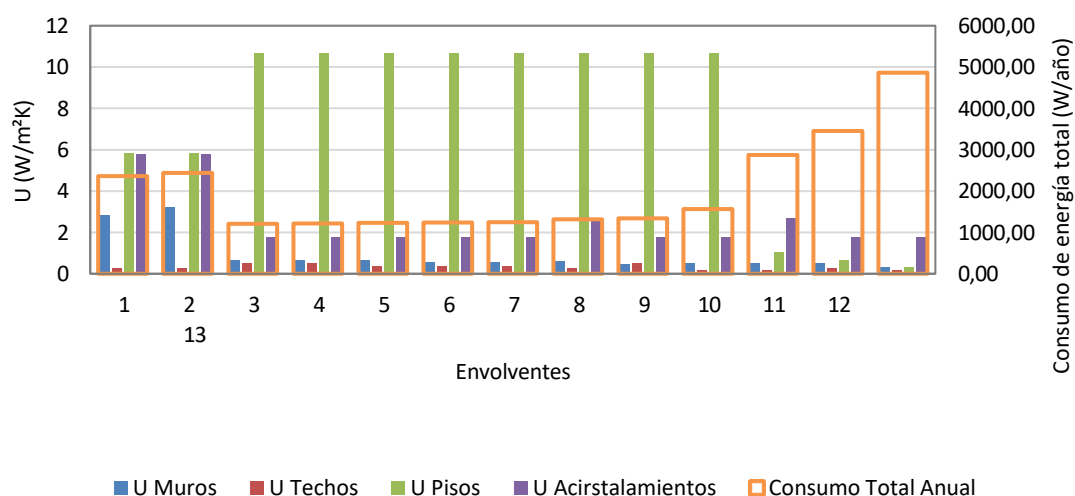


Figura 4: Comparación de consumo de energía en función de la transmitancia térmica de los elementos de la envolvente para Sauce Viejo

En Sauce Viejo, la optimización de la envolvente (envolventes n° 3 a 10 de la Tabla 11) sigue un patrón similar al de Rosario, aunque con valores de transmitancia  $U$  ligeramente superiores en muros ( $0.47 \text{ W/m}^2\text{K}$  a  $0.63 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) y techos ( $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$  a  $0.49 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Estos valores sugieren una pequeña variación en el compromiso óptimo con otras variables, como la absorptividad solar. La estrategia constructiva en muros mantiene la disposición de la capa de aislante entre masas térmicas para desacoplar el intercambio de calor con el exterior. Se confirma la tendencia clave en pisos: la reducción del consumo energético se logra con un aumento en la transmitancia térmica ( $U$ ) del piso. Esta característica potencia la disipación de calor hacia el terreno, consolidándola como una estrategia pasiva de climatización altamente eficiente. Respecto a construcciones tradicionales (envolventes n° 1 y 2 de la Tabla 11) y envolventes con aislación en todos sus elementos (envolventes n° 11 a 13 de la Tabla 11), siguen la misma tendencia vista en Rosario.

## Reconquista

La Tabla 13 detalla las propiedades térmicas óptimas (U, absorptividades y SGHC) de la envolvente en Reconquista, junto con su consumo energético total y parcial (calefacción/refrigeración). Adicionalmente, la Figura 5 relaciona el coeficiente de transmitancia térmica U de los elementos constructivos con el consumo de energía total de la localidad.

| N° | Orientación | Muro |      |            |            | Techo |      |            |            | Piso |      | Acristalamientos |       |       | Consumo de energía |        |         |
|----|-------------|------|------|------------|------------|-------|------|------------|------------|------|------|------------------|-------|-------|--------------------|--------|---------|
|    |             | Nº   | U    | $\alpha_T$ | $\alpha_S$ | Nº    | U    | $\alpha_T$ | $\alpha_S$ | Nº   | U    | Nº               | U     | SGHC  | Ref.               | Calef. | Total   |
| 1  | 270         | 85   | 2.85 | 0.9        | 0.65       | 11    | 0.26 | 0.85       | 0.4        | 1    | 5.84 | 1                | 5.778 | 0.905 | 2194.12            | 318.80 | 2512.92 |
| 2  | 270         | 87   | 3.21 | 0.9        | 0.65       | 11    | 0.26 | 0.85       | 0.4        | 1    | 5.84 | 1                | 5.778 | 0.905 | 2305.90            | 293.21 | 2599.11 |
| 3  | 269.87      | 14   | 0.53 | 0.9        | 0.65       | 47    | 0.49 | 0.85       | 0.4        | 6    | 10.7 | 7                | 1.765 | 0.684 | 1455.13            | 30.73  | 1485.86 |
| 4  | 260.23      | 25   | 0.51 | 0.9        | 0.65       | 47    | 0.49 | 0.85       | 0.4        | 6    | 10.7 | 7                | 1.765 | 0.684 | 1465.11            | 22.81  | 1487.92 |
| 5  | 269.59      | 14   | 0.53 | 0.9        | 0.65       | 46    | 0.26 | 0.85       | 0.4        | 6    | 10.7 | 7                | 1.765 | 0.684 | 1501.02            | 13.15  | 1514.17 |
| 6  | 258.03      | 25   | 0.51 | 0.9        | 0.65       | 46    | 0.26 | 0.85       | 0.4        | 6    | 10.7 | 7                | 1.765 | 0.684 | 1513.71            | 8.95   | 1522.68 |
| 7  | 241.35      | 25   | 0.51 | 0.9        | 0.65       | 50    | 0.25 | 0.85       | 0.4        | 6    | 10.7 | 7                | 1.765 | 0.684 | 1561.44            | 7.45   | 1568.90 |
| 8  | 183.09      | 25   | 0.51 | 0.9        | 0.65       | 50    | 0.25 | 0.85       | 0.4        | 6    | 10.7 | 7                | 1.765 | 0.684 | 1769.80            | 6.57   | 1776.36 |
| 9  | 189.53      | 25   | 0.51 | 0.9        | 0.65       | 48    | 0.38 | 0.85       | 0.4        | 7    | 1.05 | 7                | 1.765 | 0.684 | 3214.32            | 2.78   | 3217.10 |
| 10 | 276.57      | 25   | 0.51 | 0.9        | 0.65       | 24    | 0.17 | 0.85       | 0.4        | 7    | 1.05 | 3                | 2.72  | 0.764 | 3664.55            | 1.27   | 3665.83 |
| 11 | 266.55      | 25   | 0.51 | 0.9        | 0.65       | 31    | 0.26 | 0.25       | 0.35       | 7    | 1.05 | 4                | 2.556 | 0.764 | 3988.87            | 0.89   | 3989.76 |
| 12 | 281.03      | 14   | 0.53 | 0.9        | 0.65       | 50    | 0.25 | 0.85       | 0.4        | 4    | 0.53 | 7                | 1.765 | 0.684 | 4015.79            | 0.42   | 4016.21 |
| 13 | 270         | 72   | 0.31 | 0.9        | 0.70       | 25    | 0.15 | 0.85       | 0.40       | 5    | 0.33 | 7                | 1.765 | 0.684 | 5607.05            | 10.63  | 5617.68 |

Tabla 13: Comparación de consumo de energía en función de las propiedades de la envolvente para Sauce Viejo

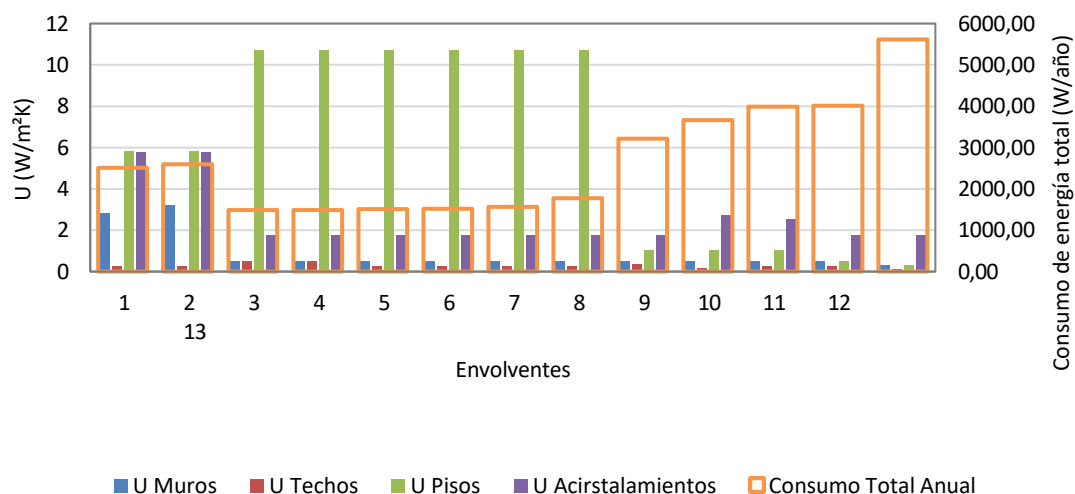


Figura 5: Comparación de consumo de energía en función de la transmitancia térmica de los elementos de la envolvente para Sauce Viejo

En la localidad de Reconquista, los resultados de optimización siguen la misma tendencia constructiva observada en Rosario y Sauce Viejo. Los valores de transmitancia térmica U para muros y techos se mantienen consistentemente en el mismo rango óptimo que el de Rosario. Esto sugiere un comportamiento constructivo equivalente y una sensibilidad similar a las condiciones climáticas locales, donde las estrategias de aislamiento y control de ganancia solar funcionan de manera óptima dentro de los mismos umbrales de U.

## Orientación de la vivienda

La Figura 6 resume las orientaciones óptimas determinadas por el optimizador para cada localidad. Aun considerando la interdependencia entre materiales y orientación, se identifican tres criterios principales: la orientación oeste del estar-comedor, donde el alero protege del sobrecalentamiento en verano y permite ganancias solares en invierno; la orientación sur, que favorece el ingreso solar en dormitorios y cocina, mejorando las condiciones de confort; y la disposición que posibilita ventilación cruzada, optimizando el flujo de aire natural y reduciendo la dependencia de sistemas activos.

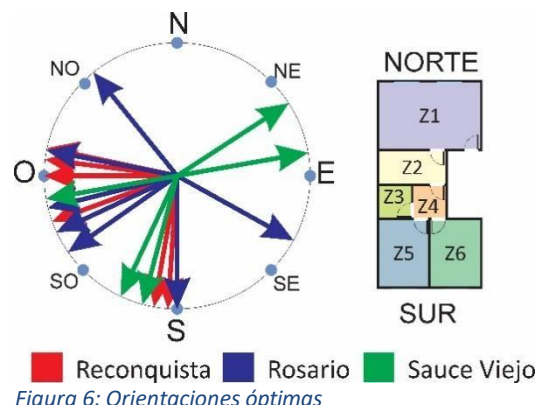


Figura 6: Orientaciones óptimas

## Consumo total de energía

La Figura 7 muestra los consumos energéticos de calefacción, refrigeración y consumo total anual para las distintas localidades analizadas y 4 tipologías constructivas:

| Tipología       | Localidad   | Componente      | Descripción de la Envolvente                                                                                      | U (W/m²K) |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 (Clásica)     | Todas       | Muro            | Ladrillos comunes de 24 cm de espesor con revoque grueso y fino interior y exterior.                              | 2.45      |
|                 |             | Techo           | Chapa galvanizada con cielorraso de placa de yeso.                                                                | 0.26      |
|                 |             | Piso            | Cerámico sobre carpeta y contrapiso de H° pobre.                                                                  | 5.84      |
|                 |             | Acristalamiento | Vidrio simple de 3 mm                                                                                             | 5.778     |
| 2 (Clásica)     | Todas       | Muro            | Ladrillos cerámicos portantes de 18 cm de espesor con revoque grueso y fino interior y exterior.                  | 3.21      |
|                 |             | Techo           | Chapa galvanizada con cielorraso de placa de yeso.                                                                | 0.23      |
|                 |             | Piso            | Cerámico sobre carpeta y contrapiso de H° pobre.                                                                  | 5.84      |
|                 |             | Acristalamiento | Vidrio simple de 3 mm                                                                                             | 5.778     |
| 3 (Óptima)      | Rosario     | Muro            | Ladrillo portante cerámico (12 cm) + EPS (5 cm) + Ladrillo común a la vista (12 cm). Revoque interior.            | 0.55      |
|                 |             | Techo           | Chapa gris silver sobre estructura metálica, cámara de aire (10 cm) y cielorraso de placa de yeso.                | 0.26      |
|                 |             | Piso            | Platea de H°A° sobre suelo.                                                                                       | 10.7      |
|                 |             | Acristalamiento | Doble vidrio (6+6)                                                                                                | 2.67      |
|                 | Sauce Viejo | Muro            | Ladrillo portante cerámico (12 cm) + cámara de aire (3 cm) + Ladrillo común (12 cm). Revoque interior y exterior. | 0.49      |
|                 |             | Techo           | Chapa gris pizarra sobre estructura de madera, cámara de aire (3 cm) + EPS (3 cm) y cielorraso de madera.         | 0.49      |
|                 |             | Piso            | Platea de H°A° sobre suelo.                                                                                       | 10.7      |
|                 |             | Acristalamiento | Doble vidrio (6+6)                                                                                                | 2.67      |
|                 | Reconquista | Muro            | Ladrillo común (24 cm) + EPS (6 cm) + Ladrillo común de canto a la vista. Revoque interior.                       | 0.53      |
|                 |             | Techo           | Chapa gris pizarra sobre estructura de madera, cámara de aire (3 cm) + EPS (3 cm) y cielorraso de madera.         | 0.49      |
|                 |             | Piso            | Platea de H°A° sobre suelo.                                                                                       | 10.7      |
|                 |             | Acristalamiento | Doble vidrio (6+6)                                                                                                | 2.6       |
| 4 (Muy Aislada) | Todas       | Muro            | Ladrillo portante (18 cm) + EPS (10 cm) interior con placa de yeso. Revoque exterior.                             | 0.31      |
|                 |             | Techo           | Chapa sobre estructura metálica, cámara de aire (10 cm) + EPS (10 cm) sobre cielorraso de placa de yeso.          | 0.15      |
|                 |             | Piso            | Cerámico sobre carpeta y contrapiso de H° pobre, aislado del suelo con EPS (10 cm).                               | 0.33      |
|                 |             | Acristalamiento | Triple vidrio (3+3+3).                                                                                            | 1.765     |

Tabla 14: Tipologías constructivas

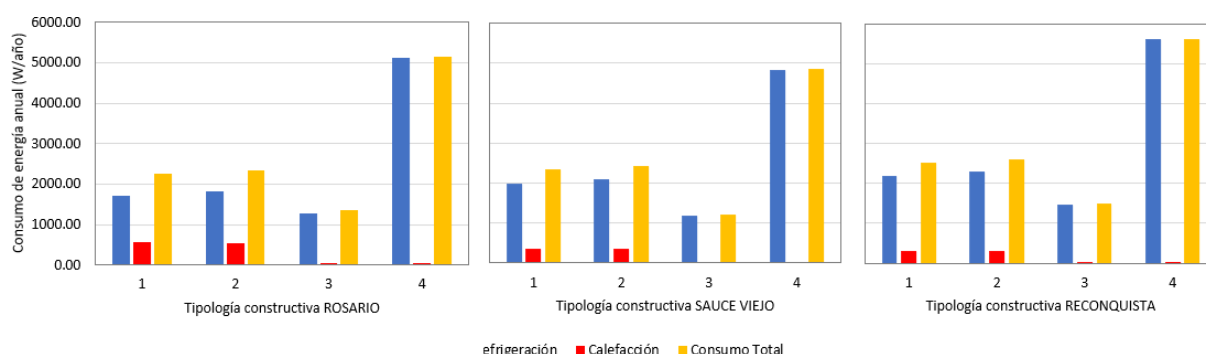


Figura 7: Consumo de energía total para cada localidad en función de las envolventes

En la Figura 7 se puede como se reduce el consumo de energía total entre 40% y 50% de los componentes clásicos de construcción a envolventes optimizadas. Por otra parte, cuando se opta por aislar la vivienda, en este tipo de climas, el consumo es entre 450% y 500% mayor, y es únicamente de refrigeración. Esto pone en evidencia aún más el análisis hecho con anterioridad. Con esto se concluye que, colocar aislantes no es

sinónimo de eficiencia energética, si no que buscar el equilibrio entre pérdidas y ganancias de calor es lo correcto.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten establecer lineamientos generales para el diseño de envolventes energéticamente eficientes en viviendas unifamiliares. En primer lugar, se confirma la conveniencia de emplear cubiertas con chapas de colores claros, ya que contribuyen a reducir las cargas térmicas por radiación. Asimismo, se observa que los valores de transmitancia térmica en techos y pisos se mantienen en rangos similares, pero el orden de las capas resulta determinante: la disposición del aislante entre masas térmicas constituye una estrategia clave para desacoplar el intercambio de calor y mantener condiciones interiores de confort. En cuanto a los acristalamientos, la selección óptima corresponde a sistemas dobles o triples según la orientación, garantizando un adecuado balance entre ganancias solares y pérdidas térmicas. Un hallazgo relevante es que el menor consumo de energía se obtiene cuando el piso permite liberar calor hacia el terreno, particularmente en configuraciones con platea de hormigón armado directamente sobre el suelo.

Es importante destacar que este análisis se ha desarrollado considerando únicamente viviendas aisladas, sin incorporar el efecto del entorno urbano ni variables adicionales como sombreados, vegetación u otros dispositivos pasivos. La inclusión de dichos elementos podría potenciar aún más la eficiencia energética alcanzada, lo que plantea líneas futuras de investigación orientadas a escenarios de mayor complejidad y realismo.

Estos resultados demuestran que la optimización en etapas tempranas de diseño no solo permite reducir la demanda energética, sino que también ofrece lineamientos concretos y aplicables para construir viviendas más eficientes y sostenibles.

## Referencias

Climate.OneBuilding.Org. <https://climate.onebuilding.org/>.

Energy, 2023. Input Output Reference.

G. Barone, 2023. 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.

Konstantinos Alexakis, 2025. Genetic algorithm-based multi-objective optimisation for energy-efficient building retrofitting: A systematic review. Energy and Buildings.

Malcolm Orne, 1994. Numerical Data for Air Indiltration & Natural Ventilation Calculations. International Energy Agency.

Ministerio de Economía de Argentina, 2022. Informe Estadístico Anual 2022. Office,

s.f. <https://energyplus.net/>.

Yanfei Li, 2024. Multitarget control models for building thermal comfort and indoor air quality - A critical review. Results in Engineering.