UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL



DOCTORADO EN INGENIERÍA

Optimización basada en simulación de la eficiencia energética de edificios

María Cecilia Demarchi

FICH

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS HÍDRICAS

INTEC

INSTITUTO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA LA INDUSTRIA QUÍMICA

CIMEC

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE MÉTODOS COMPUTACIONALES

sinc(*i*)

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN SEÑALES, SISTEMAS E INTELIGENCIA COMPUTACIONAL

Tesis de Doctorado **2026**

Doctorado en Ingeniería

Mención Mecánica Computacional

Título de la obra:

Optimización basada en simulación de la eficiencia energética de edificios

Autor: María Cecilia Demarchi

Lugar: Santa Fe, Argentina

Palabras Claves:

Eficiencia energética regionalizada,
simulación BES acoplada a MOO, EnergyPlus, NSGA-II,
calibración de modelos, optimización bioclimática de envolventes.



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química
Centro de Investigación de Métodos Computacionales
Instituto de Investigación en Señales, Sistemas e Inteligencia Computacional

Optimización basada en simulación de la eficiencia energética de edificios

María Cecilia Demarchi

Tesis remitida al Comité Académico del Doctorado
como parte de los requisitos para la obtención del grado de

DOCTORA EN INGENIERÍA
Mención Mecánica Computacional

de la
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

2026

Secretaría de Posgrado, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Ciudad Universitaria,
Paraje "El Pozo", S3000, Santa Fe, Argentina.



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química

Centro de Investigación de Métodos Computacionales

Instituto de Investigación en Señales, Sistemas e Inteligencia Computacional

Optimización basada en simulación de la eficiencia energética de edificios

María Cecilia Demarchi

Lugar de trabajo:
CIMEC – Centro de Investigación de Métodos Computacionales
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (UNL)

Director:
Alejandro E. Albanesi — CIMEC (CONICET-UNL) / FICH - UNL

Co-directores:
Juan Carlos Álvarez Hostos — CIMEC (CONICET - UNL) / FICH - UNL
Federico D. Favre — IIMPI (UDELAR)

Jurado Evaluador:
Dr. Ítalo Bove Vanzulli — IFFI (UDELAR)
Dr. Santiago Corzo — CIMEC (CONICET - UNL)
Dr. Bruno Arballo — IRPHa (FAUD - UNSJ)

2026

ACTA DE DEFENSA DE TESIS DE DOCTORADO

En la sede de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, a los veintidós días del mes de junio del año dos mil veintiséis, se reúnen en forma online sincrónica los miembros del Jurado designado para la evaluación de la Tesis de Doctorado en Ingeniería, Mención Mecánica Computacional, titulada ***"Optimización basada en simulación de la eficiencia energética en edificios"***, desarrollada por la **Ing. María Cecilia DEMARCHI**, DNI: 34.541.123, bajo la dirección del Dr. Alejandro Albanesi y la codirección del Dr. Juan Álvarez Hostos. Ellos son: Dr. Italo Bove Vanzulli, el Dr. Santiago Corzo, y el Dr. Bruno Arballo.----------

La Presentación oral y defensa de la Tesis se efectúan bajo la modalidad online sincrónica según lo establecido por Resolución CS N° 382/21.

Luego de escuchar la Defensa Pública y de evaluar la Tesis, el Jurado considera:

Que la tesis aborda la temática de simulación térmica de viviendas y el uso de algoritmos genéticos en la reducción de incertezas asociada a la eficiencia energética. En la misma se destaca la cantidad de trabajo presentado, la metodología del modelado inverso y la contrastación para la calibración por pasos. Se remarca la rigurosidad en el ajuste experimental de datos para la calibración del modelo y la variabilidad de casos de estudio en la diversidad climática argentina.
La presentación oral fue sumamente clara y concisa, y las preguntas del Jurado fueron respondidas con claridad y solvencia.
El Jurado sugiere, por último, que en la versión final de la tesis se incorporen todas las observaciones enviadas con anterioridad.
Por lo antes expuesto, el Jurado aprueba la tesis con calificación 10 (Diez) Sobresaliente.

Sin más, se da por finalizado el Acto Académico con la firma de los miembros del Jurado al pie de la presente. ----------

Dr. Italo Bove Vanzulli	Dr. Santiago Corzo	Dr. Bruno Arballo

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS HÍDRICAS · SANTA FE

Dr. José Luis Macor
Director de Posgrado
FICH - UNL

Universidad Nacional del Litoral
Facultad de Ingeniería y
Ciencias Hídricas

Secretaría de Posgrado

Ciudad Universitaria
C.C. 217
Ruta Nacional Nº 168 – Km. 472,4
(3000) Santa Fe
Tel: (54) (0342) 4575 229
Fax: (54) (0342) 4575 224
E-mail: posgrado@fich.unl.edu.ar

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Santa Fe, 22 de junio de 2026

Como miembros del Jurado Evaluador de la Tesis de Doctorado en Ingeniería titulada ***"Optimización basada en simulación de la eficiencia energética en edificios."***, desarrollada por la **Ing. María Cecilia DEMARCHI**, en el marco de la Mención "Mecánica Computacional", certificamos que hemos evaluado la Tesis y recomendamos que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Doctor en Ingeniería.

La aprobación final de esta disertación estará condicionada a la presentación de la versión digital final de la Tesis ante el Comité Académico del Doctorado en Ingeniería.

Dr. Italo Bove Vanzulli	Dr. Santiago Corzo	Dr. Bruno Arballo

Santa Fe, 22 de junio de 2026

Certifico haber leído la Tesis, preparada bajo mi dirección en el marco de la Mención "Mecánica Computacional" y recomiendo que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Doctor en Ingeniería.

…….	…….
Dr. Juan Álvarez Hostos	Dr. Alejandro Albanesi
Codirector de Tesis	Director de Tesis

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS HÍDRICAS * SANTA FE *

Dr. José Luis Macor
Director de Posgrado
FICH - UNL

Universidad Nacional del Litoral
Facultad de Ingeniería y
Ciencias Hídricas

Secretaría de Posgrado

Ciudad Universitaria
C.C. 217
Ruta Nacional Nº 168 – Km. 472,4
(3000) Santa Fe
Tel: (54) (0342) 4575 229
Fax: (54) (0342) 4575 224
E-mail: posgrado@fich.unl.edu.ar

Declaración legal del autor

Esta Tesis ha sido remitida como parte de los requisitos para la obtención del grado de Doctor ante la Universidad Nacional del Litoral y ha sido depositada en la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas para que esté disponible a sus lectores bajo las condiciones estipuladas por el Reglamento de la mencionada Biblioteca.

Citaciones breves de esta disertación son permitidas sin la necesidad de un permiso especial, en la suposición de que la fuente sea correctamente citada. Solicitudes de permiso para una citación extendida o para la reproducción de este manuscrito en un todo o en parte serán exigidas por el portador legal del derecho de propiedad intelectual de la misma.



María Cecilia Demarchi

A Clelia y Rogelio, pilares de mi educación y ejes de mi perseverancia.

Agradecimientos

Mi gratitud hacia las instituciones que facilitaron el desarrollo de esta investigación. Al **Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)**, por el financiamiento otorgado mediante la beca doctoral, permitiendo la dedicación necesaria para este trabajo científico. Al **Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC)**, por brindarme no solo la infraestructura técnica indispensable, sino también un excelente clima profesional y humano. Asimismo, agradezco al **Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial (IIMPI)** de la Universidad de la República (Uruguay) por los intercambios académicos, los cuales aportaron conocimiento y nuevas perspectivas al análisis de los resultados obtenidos.

Agradezco a quien dirigió esta Tesis en sus inicios, **Dr. Víctor D. Fachinotti**, y a quienes continuaron con su labor el **Dr. Alejandro Albanesi** y el **Dr. Federico Favre**. Para ellos un reconocimiento especial por haber asumido el desafío en una instancia determinante. Agradezco profundamente su compromiso y generosidad para guiar este proceso hacia su culminación; su guía profesional y calidad humana fueron los motores que permitieron asegurar la continuidad del trabajo y llevar este proyecto a un cierre exitoso.

A mis colegas, compañeros de oficina y personal de la institución, por la cotidianidad compartida y la buena predisposición al intercambio de ideas, factores que enriquecieron el entorno de trabajo y el aprendizaje mutuo durante estos años.

A mi familia y amigos, por el acompañamiento y la comprensión a lo largo de este proceso. De forma muy especial, a **José Luis**, por su apoyo incondicional y presencia constante; su compañía fue el sostén fundamental para transitar las etapas de mayor complejidad de este trabajo.

Resumen

En un escenario de crisis climática y demandas crecientes de habitabilidad, la presente investigación aborda la problemática del consumo energético en el sector residencial proponiendo un cambio de paradigma en el uso de la Simulación Energética de Edificios (*Building Energy Simulation*) (BES). Se propone un marco metodológico de modelado termo-energético de edificios acoplado a algoritmos de optimización (SBO), sustentado en el acoplamiento dinámico de Algoritmos Genéticos (GA) con el motor de simulación EnergyPlus ($E+$). Este marco se implementa en dos fases críticas: primero, para la calibración de modelos BES mediante modelado inverso y, segundo, para el diseño de envolventes bioclimáticas y el análisis de sensibilidad regional en Argentina.

A través del modelado inverso y el análisis de dos casos de estudio experimentales (MEVIR y SOFIA), se desarrollan metodologías de calibración avanzada. Se demuestra que el enfoque multiobjetivo y el monitoreo detallado, junto al desacople secuencial de las variables de la envolvente y la inclusión de parámetros de alta sensibilidad e incertidumbre, permiten mitigar el fenómeno de la equifinalidad. Este proceso logra precisiones de 0.15°C, garantizando la integridad termofísica de los modelos resultantes.

Posteriormente, se emplean modelos directos para evaluar el desempeño de un prototipo teórico (VERA) a través de las diversas zonas bioambientales de la República Argentina ($IRAM$ 11603). Los resultados demuestran que la eficiencia energética residencial no reside en la aplicación de soluciones tecnológicas universales ni en grandes inversiones de capital, sino en la gestión del equilibrio térmico dinámico mediante estrategias bioclimáticas optimizadas.

En conclusión, este trabajo aporta conocimiento científico de transferencia esencial para que proyectistas y organismos gubernamentales alcancen metas de sustentabilidad fundamentadas en evidencia cuantitativa y un desempeño energético verificado.

Palabras claves: Eficiencia energética regionalizada, simulación BES acoplada a MOO, EnergyPlus, NSGA-II, calibración de modelos, optimización bioclimática de envolventes.

Abstract

In a context of climate crisis and growing demands for habitability, this research addresses the issue of energy consumption in the residential sector by proposing a paradigm shift in the use of BES. A methodological framework for building thermal-energy modeling coupled with optimization algorithms (SBO) is proposed, supported by the dynamic coupling of Genetic Algorithms (GA) with the EnergyPlus ($E+$) simulation engine. This framework is implemented in two critical phases: first, for the calibration of BES models through inverse modeling; and second, for the design of bioclimatic envelopes and regional sensitivity analysis in Argentina.

Through inverse modeling and the analysis of two experimental case studies (MEVIR and SOFIA), advanced calibration methodologies are developed. It is demonstrated that a multi-objective approach and granular monitoring, combined with the sequential decoupling of envelope variables and the inclusion of high-uncertainty parameters, effectively mitigate the phenomenon of equifinality. This process achieves accuracies of 0.15°C, ensuring the thermo-physical integrity of the resulting models.

Subsequently, forward models are employed to evaluate the performance of a theoretical prototype (VERA) across the various bio-environmental zones of Argentina ($IRAM$ 11603). The results demonstrate that residential energy efficiency does not rely on the application of universal technological recipes or capital-intensive investments, but rather on the management of dynamic thermal equilibrium through optimized bioclimatic strategies.

In conclusion, this work provides essential scientific knowledge for transfer, enabling designers and government agencies to achieve sustainability goals based on quantitative evidence and verified energy performance.

Keywords: Regionalized energy efficiency, BES coupled with Optimización Multi-objetivo (MOO), EnergyPlus, Algoritmo genético de ordenamiento no dominado II ($NSGA-II$), model calibration, bioclimatic envelope optimization.

Índice General

Agradecimientos

Resumen

Abstract

I INTRODUCCIÓN **1**

1. Introducción **3**
1.1. Contexto: Crisis energética y ambiental, y el rol del Sector Edilicio 3
1.2. Optimización del desempeño energético en sistemas edilicios: Un enfoque hacia la sostenibilidad 5
1.2.1. Simulación Energética Edilicia (BES): Del cálculo estático a la modelización dinámica 5
1.2.2. Optimización Basada en Simulación (SBO): Integración de algoritmos heurísticos en el diseño de envolventes 6
1.2.3. Modelado multiobjetivo y optimización avanzada: Estado del arte en la evaluación del desempeño edilicio integral 6
1.2.4. Hitos regulatorios y técnicos en la ciencia del hábitat nacional: De las normas IRAM al Índice de Prestación Energética 7
1.2.5. Desafíos pendientes y horizontes de desarrollo en el campo 7
1.3. Objetivos y Aportes de esta tesis 7
1.4. Estructura de la tesis 8

II FUNDAMENTOS Y MARCO METODOLÓGICO **11**

2. Fundamentos teóricos **13**
2.1. Transferencia de calor y masa 14
2.1.1. Mecanismos de intercambio energético 14
2.2. Conceptos del modelado energético 15
2.2.1. EnergyPlus: motor de simulación térmica y energética dinámica 16
2.2.2. Arquitectura de modelado de EnergyPlus 17
2.2.3. Balance de calor y masa en el aire de la zona 18
2.2.4. Balance de calor en las superficies opacas de la zona 19
2.2.5. Balance de calor en superficies transparentes 20
2.3. Conceptos de Optimización 21
2.3.1. Algoritmo Genético (GA) 21
2.4. Estrategia SBO 22
2.4.1. Modelos inversos: Integración computacional para la calibración de modelos BES 23

2.4.2. Modelos directos: Integración computacional para el diseño óptimo de la envolvente . . . 23

III CALIBRACIÓN DE ALTA FIDELIDAD 25

3. Introducción a la calibración de modelos BES 27
3.1. Incertidumbre y calibración de modelo BES . . . 28
3.1.1. Incertidumbre en la caracterización de la envolvente térmica . . . 28
3.1.2. Incertidumbre en los sistemas activos de climatización (HVAC) . . . 29
3.1.3. Incertidumbre en los patrones de ocupación y uso . . . 30
3.2. Metodología de calibración . . . 31
3.3. Variables de calibración . . . 32
3.4. Parámetros de ajuste . . . 33
3.4.1. Interdependencia entre variables de desempeño y parámetros de ajuste . . . 34
3.5. Métricas de evaluación . . . 35
3.6. Conclusiones . . . 36
3.7. Objetivos . . . 37
3.7.1. Objetivo General . . . 37
3.7.2. Objetivos Específicos . . . 37

4. Caso de aplicación I: Edificio MEVIR 39
4.1. Edificio MEVIR . . . 40
4.1.1. Configuración arquitectónica y caracterización de la envolvente . . . 40
4.1.2. Protocolo de monitoreo y adquisición de datos . . . 42
4.1.3. Implementación del modelo computacional . . . 42
4.2. Metodología y casos de estudio . . . 43
4.2.1. Caso 1: Modelo Base (No Calibrado) . . . 43
4.2.2. Caso 2: Calibración Mono-Objetivo (Enfoque Convencional) . . . 44
4.2.3. Caso 3: Calibración Multi-objetivo (Enfoque Detallado) . . . 45
4.3. Análisis y discusión de resultados . . . 46
4.3.1. Evaluación del desempeño estadístico: RMSE, CVRMSE, NMBE y MAE 46
4.3.2. Análisis de la precisión en la predicción de temperaturas . . . 49
4.3.3. Análisis de los parámetros de ajuste . . . 50
4.3.4. Análisis de sensibilidad en el balance de cargas térmicas . . . 52
4.4. Conclusiones y aportes del capítulo . . . 54
4.4.1. Aportes al estado del arte . . . 55

5. Caso de aplicación II: Edificio SOFIA 57
5.1. Edificio SOFIA . . . 58
5.1.1. Descripción del edificio y su envolvente . . . 58
5.1.2. Protocolo de monitoreo y procesamiento de datos . . . 59
5.2. Modelo de simulación . . . 60
5.2.1. Evaluación de la sensibilidad paramétrica y fuentes de incertidumbre . . . 60
5.2.2. Modelado computacional detallado . . . 65
5.2.3. Definición de parámetros de ajuste . . . 65
5.3. Metodología de calibración . . . 66
5.3.1. Calibración 1 (Cal. 1): Metodología Secuencial Detallada . . . 67
5.3.2. Calibración 2 (Cal. 2): Enfoque Clásico Mono-objetivo . . . 68
5.3.3. Calibración 3 (Cal. 3): Enfoque Mono-objetivo Detallado . . . 68
5.3.4. Calibración 4 (Cal. 4): Enfoque Multi-objetivo Global . . . 69
5.4. Análisis y discusión de resultados . . . 70

5.4.1. Análisis directo . . . 70
5.4.2. Análisis cruzado . . . 76
5.4.3. Validación . . . 81
5.4.4. Análisis de parámetros . . . 82
5.5. Conclusiones y aporte del capítulo . . . 89
5.5.1. Aportes al estado del arte . . . 90

6. Conclusiones y Aportes del Módulo II **91**
6.1. Síntesis de hallazgos obtenidos . . . 91
6.1.1. La insuficiencia de la calibración mono-objetivo . . . 91
6.1.2. La validación de la optimización multi-objetivo y el ajuste de parámetros avanzados . . . 92
6.1.3. Superación de la equifinalidad mediante el desacople físico . . . 92
6.2. Aportes al Estado del Arte . . . 92

IV DISEÑO DE ENVOLVENTES BIOCLIMÁTICAS EN ARGENTINA **95**

7. Introducción al diseño eficiente de envolventes **97**
7.1. El diseño de envolventes edilicias como un problema de optimización . . . 98
7.2. El confort higrotérmico como métrica de desempeño . . . 98
7.2.1. Evaluación del confort y la transición a sistemas activos . . . 99
7.3. Metodología de diseño . . . 99
7.3.1. Vector de variables de diseño . . . 100
7.3.2. Definición de las funciones objetivo y criterios de optimización . . . 100
7.4. Estado del arte . . . 101
7.4.1. Metodología de diseño . . . 101
7.4.2. Estrategias de diseño . . . 103
7.4.3. Funciones objetivo . . . 104
7.4.4. Interacción sistémica entre variables y funciones objetivo . . . 106
7.5. Estado del arte . . . 107
7.5.1. Metodologías de optimización y simulación dinámica . . . 107
7.5.2. Parámetros de decisión . . . 107
7.5.3. Análisis de los avances científicos según la zona bioclimática . . . 108
7.5.4. Análisis de los avances científicos según metodologías implementadas y objetivos de desempeño . . . 109
7.6. Conclusiones de la revisión del estado del arte en diseño de envolventes . . . 110
7.7. Objetivos y aportes del Módulo III . . . 111
7.7.1. Objetivo General . . . 111
7.7.2. Objetivos Específicos . . . 111

8. Diseño óptimo de envolventes: Prototipo VERA **113**
8.1. Descripción del caso de estudio: Prototipo VERA . . . 114
8.1.1. Configuración arquitectónica y funcional del prototipo . . . 114
8.1.2. Condiciones de operación y perfiles de uso . . . 115
8.2. Modelo computacional . . . 115
8.3. Simulación basada en optimización . . . 117
8.4. Escenarios climáticos . . . 120
8.5. Vera 1 y Vera 2 . . . 125
8.6. Análisis y discusión de resultados . . . 127
8.6.1. Evaluación del compromiso técnico-económico entre demanda energética y costo de inversión en el prototipo VERA . . . 127

8.6.2. Zona I: Muy cálido . . . 127
8.6.3. Zona II: Cálido . . . 133
8.6.4. Zona III: Templado cálido . . . 138
8.6.5. Zona IV: Templada Fría . . . 143
8.6.6. Zona V: Fría . . . 149
8.6.7. Zona VI: Muy Fría . . . 152
8.6.8. Análisis comparativo de desempeño térmico de VERA 2 vs el Individuo Óptimo por zona . . . 157
8.7. Conclusiones del análisis y discusión de resultados . . . 169

9. Conclusiones y Aportes del Módulo III **171**
9.1. Síntesis de hallazgos para el diseño óptimo . . . 171
9.2. Aportes al Estado del Arte . . . 172

V SÍNTESIS, CONCLUSIONES Y APORTES CIENTÍFICOS **173**

VI Apéndices **181**

A. Producción Científica y Transferencia **183**
A.1. Aportes científicos del Capítulo III . . . 183
A.2. Aportes científicos del Capítulo IV . . . 183
A.3. Aportes científicos del Capítulo VII . . . 184

B. Tablas Auxiliares y Datos de Soporte **185**
B.1. Datos complementarios al Capitulo III . . . 185
B.2. Datos complementarios al Capitulo IV . . . 186
B.3. Datos complementarios al Capitulo VII . . . 186

Bibliografía **189**

Lista de Acrónimos

ACA	Adaptive Convection Algorithm
AFN	Air Flow Network
$ASHRAE\ 14$	ASHRAE Guideline 14: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings
$ASHRAE\ 55$	Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy
BES	Simulación Energética de Edificios (*Building Energy Simulation*)
CA	Cámara de Aire
Q_i	Cargas Internas de las zonas
CI	Costo de Inversión $[USD]$
E_{total}	Consumo de energía total $[kWh]$
E_{cal}	Consumo de energía para calefacción $[kWh]$
E_{ref}	Consumo de energía para refrigeración $[kWh]$
$E+$	EnergyPlus (Software de simulación térmica y energética)
EPW	Archivo de datos meteorológicos (*EnergyPlus Weather*)
FF	Régimen de Flotación Libre (*Free-floating*)
FO	Función Objetivo
GA	Algoritmo Genético
$HVAC$	Calefacción, Refrigeración y Ventilación
$IPMVP$	International Performance Measurement and Verification Protocol
$IRAM\ 11603$	Clasificación bioambiental de la Rep. Argentina
$IRAM\ 11605$	Valores admisibles de transmitancia térmica
$IRAM\ 11900$	Etiquetado de eficiencia energética en viviendas
$ISO\ 52000$	Energy performance of buildings: Overarching EPB assessment
MO	Optimización Mono-objetivo
MOO	Optimización Multi-objetivo
$NSGA-II$	Algoritmo genético de ordenamiento no dominado II
PMV	Voto Medio Predicho
PPD	Porcentaje de Personas Insatisfechas
SBO	Optimización Basada en Simulación
TMY	Año Meteorológico Típico (*Typical Meteorological Year*)
ZT	Zona Térmica

N	Orientación Norte
S	Orientación Sur
E	Orientación Este
O	Orientación Oeste
T	Superficie Techo

Nomenclatura y Símbolos

α	Absortividad de la superficie
α_S	Absortividad solar de las superficies
α_T	Absortividad térmica de las superficies
$\alpha^{int}_{T,muro}$	Absortividad térmica de muro interior
$\alpha^{ext}_{T,muro}$	Absortividad térmica de muro exterior
$\alpha^{ext}_{T,zoc}$	Absortividad térmica de zócalo exterior
$\alpha^{int}_{T,piso}$	Absortividad térmica de piso interior
$\alpha^{int}_{T,techo}$	Absortividad térmica de techo interior
$\alpha^{ext}_{T,techo}$	Absortividad térmica de techo exterior
$\alpha^{int}_{S,muro}$	Absortividad solar de muro interior
$\alpha^{ext}_{S,muro}$	Absortividad solar de muro exterior
$\alpha^{ext}_{S,zoc}$	Absortividad solar de zócalo exterior
$\alpha^{int}_{S,piso}$	Absortividad solar de piso interior
$\alpha^{int}_{S,techo}$	Absortividad solar de techo interior
$\alpha^{ext}_{S,techo}$	Absortividad solar de techo exterior
ρ	Reflectividad de la superficie
ρ_{suelo}	Reflectividad del suelo (Albedo)
ρ_{EPS}	Densidad del poliestireno expandido [kg/m^3]
ρ_{LCP}	Densidad del ladrillo cerámico portante [kg/m^3]
ρ_M	Densidad de la madera [kg/m^3]
ρ_{LHA}	Densidad de la losa de hormigón armado [kg/m^3]
τ	Transmitancia o Transmisividad del material
τ_{Sombra}	Transmitancia solar de la cortina
A_{inf}	Área de fuga de infiltración de aire [cm^2]

C_{inf}	Coeficiente de infiltración
C_p	Calor específico de los materiales $[J/(kg \cdot K)]$
D_{vidrio}	Coeficiente de suciedad de los vidrios
F_{suelo}	Factor de acoplamiento térmico con el suelo
h_{int}	Coeficiente convectivo de superficies interiores $[W/(m^2 \cdot K)]$
$h_{int,muro}$	Coeficiente convectivo interior en muros $[W/(m^2 \cdot K)]$
$h_{int,piso}$	Coeficiente convectivo interior en pisos $[W/(m^2 \cdot K)]$
$h_{int,techo}$	Coeficiente convectivo interior en techos $[W/(m^2 \cdot K)]$
$h_{int,vidrio}$	Coeficiente convectivo interior en vidrios $[W/(m^2 \cdot K)]$
h_{ext}	Coeficiente convectivo de superficies exteriores $[W/(m^2 \cdot K)]$
$h_{ext,muro}$	Coeficiente convectivo exterior en muros $[W/(m^2 \cdot K)]$
$h_{ext,techo}$	Coeficiente convectivo exterior en techos $[W/(m^2 \cdot K)]$
HR	Humedad relativa del aire $[\,\%]$
k	Conductividad térmica $[W/(m \cdot K)]$
k_{EPS}	Conductividad térmica del poliestireno expandido $[W/(m \cdot K)]$
k_{LHA}	Conductividad térmica de la losa de hormigón armado $[W/(m \cdot K)]$
K	Transmitancia térmica $[W/(m^2 \cdot K)]$
K_{muro}	Transmitancia térmica del muro $[W/(m^2 \cdot K)]$
K_{techo}	Transmitancia térmica del techo $[W/(m^2 \cdot K)]$
$L_{galeria}$	Longitud de la profundidad de la galería $[m]$
L_{alero}	Longitud de la profundidad del alero $[m]$
m	Coeficiente m de McAdams para el cálculo del coeficiente convectivo
n	Coeficiente n de McAdams para el cálculo del coeficiente convectivo
m_{muro}	Coeficiente m de McAdams para muros
n_{muro}	Coeficiente n de McAdams para muros
m_{techo}	Coeficiente m de McAdams para techos
n_{techo}	Coeficiente n de McAdams para techos
Q_{inf}	Caudal de infiltración de aire $[m^3/s]$
Q_{sens}	Carga térmica sensible $[W]$
Q_{lat}	Carga térmica latente $[W]$
R	Resistencia térmica $[m^2 \cdot K/W]$
R_{aire}	Resistencia térmica del aire $[m^2 \cdot K/W]$

R_{F1} Resistencia térmica de aire de la fachada 1 [$m^2 \cdot K/W$]

R_{F2} Resistencia térmica de aire de la fachada 2 [$m^2 \cdot K/W$]

R_{F3} Resistencia térmica de aire de la fachada 3 [$m^2 \cdot K/W$]

R_{F4} Resistencia térmica de aire de la fachada 4 [$m^2 \cdot K/W$]

R_{muro} Resistencia térmica total del muro [$m^2 \cdot K/W$]

R_{techo} Resistencia térmica total del techo [$m^2 \cdot K/W$]

$SHGC$ Factor de Ganancia de Calor Solar

T_{aire} Temperatura de aire de la zona [$°C$]

T_{sup} Temperatura superficial de los elementos de la zona [$°C$]

T_{sup}^{int} Temperatura superficial interior [$°C$]

T_{sup}^{ext} Temperatura superficial exterior [$°C$]

T_{muro}^{int} Temperatura superficial interior de muro [$°C$]

T_{muro}^{ext} Temperatura superficial exterior de muro [$°C$]

T_{piso}^{int} Temperatura superficial interior de piso [$°C$]

T_{techo}^{int} Temperatura superficial interior de techo [$°C$]

T_{techo}^{ext} Temperatura superficial exterior de techo [$°C$]

U Transmitancia térmica [$W/(m^2 \cdot K)$]

Materiales y Componentes Constructivos

EPS Poliestireno Expandido

LCM Ladrillo Cerámico Macizo

LHC Ladrillo Hormigón Celular

LCP Ladrillo Cerámico Hueco Portante

LCT Ladrillo Cerámico Hueco Tabique

LHA Losa de Hormigón Armado

VS Vidrio Simple

DVH Doble Vidriado Hermético

TVH Triple Vidriado Hermético

Indicadores Estadísticos

$CV(RMSE)$ Coeficiente de Variación del Error Cuadrático Medio [%]

MAE Error Absoluto Medio

$NMBE$ Error de Sesgo Medio Normalizado [%]

R^2 Coeficiente de Determinación

$RMSE$ Error Cuadrático Medio

Casos de Estudio y Prototipos

$Caso\ 1$ Modelo Computacional Teórico del Edificio MEVIR

$Caso\ 2$ Calibración Mono-Objetivo BES (MEVIR)

$Caso\ 3$ Calibración Multi-Objetivo BES (MEVIR)

Cal_1 Metodología de Calibración por Pasos (SOFIA)

$Cal_{1,P1}$ Metodología de Calibración por Pasos (SOFIA), Paso 1

$Cal_{1,P2}$ Metodología de Calibración por Pasos (SOFIA), Paso 2

Cal_2 Calibración Mono-Objetivo Enfoque Clásico (SOFIA)

Cal_3 Calibración Mono-Objetivo Enfoque Detallado (SOFIA)

Cal_4 Calibración Multi-Objetivo Enfoque Detallado (SOFIA)

$V1$ Prototipo VERA 1

$V2$ Prototipo VERA 2

G_1 Zona 1 (Estar-Comedor) del Prototipo VERA

G_2 Zonas 2, 3 y 4 (Servicios) del Prototipo VERA

G_3 Zonas 5 y 6 (Dormitorios) del Prototipo VERA

Índice de figuras

1.1. Consumo de energía a nivel global por sector 3
1.2. Matriz de oferta de energía primaria global [157] 4

2.1. Esquema de los mecanismos de transferencia de calor y masa que intervienen en el balance energético de una zona térmica. 14
2.2. Arquitectura de simulación integrada de $E+$: interacción entre los balances de calor de superficie, aire y sistemas. 16
2.3. Representación esquemática de la red nodal de una zona térmica para la aplicación del método de balance de calor. 16
2.4. Estrategia de zonificación térmica: agrupación de múltiples espacios físicos en volúmenes de control homogéneos para la simulación energética. 17
2.5. Esquema de los componentes del balance de calor superficial en un elemento opaco de la envolvente. 19
2.6. Esquema del balance de calor en elementos transparentes mediante el enfoque de nodos múltiples. 21
2.7. Diagrama de flujo del algoritmo GA. 22
2.8. Esquema del modelo inverso aplicado a la calibración de modelos BES. 24
2.9. Esquema del modelo directo para el diseño óptimo de envolventes. 24

3.1. Clasificación de las metodologías de calibración desarrolladas en la literatura científica. 31
3.2. Clasificación de las variables de calibración empleadas en los estudios revisados según su naturaleza física y operativa. 32
3.3. Jerarquía y frecuencia de uso de los parámetros de calibración identificados en la literatura técnica. 33
3.4. Matriz de relación entre los parámetros de ajuste y las variables de desempeño térmico en la literatura técnica. 35

4.1. Ubicación del Edificio MEVIR. 40
4.2. Arquitectura del Edificio MEVIR. 40
4.3. Materiales del Edificio MEVIR. 41
4.4. Sistema de monitoreo del Edificio MEVIR. 42
4.5. Modelo de Simulación Computacional en EnergyPlus del Edificio MEVIR. . . . 43
4.6. $Caso\ 2$: Pseudocódigo de Calibración Mono-Objetivo Edificio MEVIR. 44
4.7. Caso 3: Pseudocódigo de Calibración Multi-objetivo Edificio MEVIR. 45
4.8. errores de Temperatura de Aire para los tres casos evaluados en el Edificio MEVIR. 48
4.9. errores de Temperatura de Techo Interior para los tres casos evaluados en el Edificio MEVIR. 48
4.10. errores de Temperatura de Techo Exterior para los tres casos evaluados en el Edificio MEVIR. 48
4.11. Comparativa de Temperatura de Aire medida y simulada para los tres casos evaluados en el Edificio MEVIR. 49

4.12. Comparativa de Temperatura de Muro Interior medida y simulada para los tres casos evaluados en el Edificio MEVIR. 50
4.13. Comparativa de Temperatura de Piso Interior medida y simulada para los tres casos evaluados en el Edificio MEVIR. 50
4.14. Comparativa de Temperatura de Techo Interior medida y simulada para los tres casos evaluados en el Edificio MEVIR. 50
4.15. Comparativa de Temperatura de Techo Exterior medida y simulada para los tres casos evaluados en el Edificio MEVIR. 51
4.16. Cargas térmicas durante el periodo estival en el Edificio MEVIR. 53
4.17. Cargas térmicas durante el periodo invernal en el Edificio MEVIR. 53

5.1. Ubicación e imágenes de los edificios de demostración construidos en Sofía, Bulgaria. 58
5.2. Geometría y materiales del Edificio SOFIA. 59
5.3. Sistema de monitoreo del Edificio SOFIA. 59
5.4. Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones de la R_{aire} en las superficies opacas del Edificio SOFIA. 60
5.5. Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones de α_S y α_T en el techo del Edificio SOFIA. 61
5.6. Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones de α_S y α_T en el cielorraso del Edificio SOFIA. 61
5.7. Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones de α_S y α_T en el piso del Edificio SOFIA. 61
5.8. Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones de α_S y α_T en la superficie interior de muros del Edificio SOFIA. 62
5.9. Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones de α_S y α_T en la superficie exterior de muros del Edificio SOFIA. 62
5.10. Análisis de sensibilidad del RMSE ante la variación de los modelos de coeficientes h_{int} y h_{ext} en el Edificio SOFIA. 62
5.11. Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones de U, SHGC y absortividad visible en las superficies vidriadas. 63
5.12. Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones del Q_{inf} en el Edificio SOFIA. 63
5.13. Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones del Q_{inf} en el Edificio SOFIA. 64
5.14. Modelo de simulación computacional en EnergyPlus del Edificio SOFIA. 65
5.15. Paso 1 de la metodología escalonada propuesta: aislamiento de componentes opacos. 67
5.16. Paso 2 de la metodología escalonada propuesta: calibración del balance global. . 67
5.17. Metodología de calibración en dos pasos (*Step-wise*) para el Edificio SOFIA. . . 68
5.18. Metodología de calibración Mono-Objetivo. 69
5.19. Metodología de calibración Multi-Objetivo con enfoque global. 69
5.20. Temperaturas resultantes de las distintas calibraciones en el mes de febrero. . . . 71
5.21. Temperaturas resultantes de las distintas calibraciones en el mes de junio. 72
5.22. Residuos de temperatura en el mes de agosto para el Edificio SOFIA. 74
5.23. Evolución de temperaturas en el mes de noviembre. 75
5.24. Temperaturas resultantes del cruce de parámetros entre Febrero y Noviembre. . . 77
5.25. Temperaturas resultantes del cruce de parámetros entre Junio y Agosto. 79
5.26. Resultados del cruce de parámetros estacional (Verano vs. Invierno). 81
5.27. Temperaturas resultantes de la validación en los meses de Enero y Julio. 82
5.28. Dispersión de la resistencia térmica del aire R_{aire} (Rango: 0.00–1.00 m^2K/W). 88
5.29. Dispersión del coeficiente convectivo interior (Rango: 0.00–20.00 W/m^2K). . . 88
5.30. Dispersión del área de infiltración A_{inf} (Rango: 50–1500 cm^2). 88

7.1. Frecuencia de metodologías de optimización en la literatura revisada. 102

7.2. Frecuencia de las combinaciones de variables de diseño identificadas a partir de la revisión sistemática. 103
7.3. Frecuencia de funciones objetivo identificadas a partir de la revisión sistemática. . 105
7.4. Diagrama de flujo que relaciona los conjuntos de variables de entrada con los objetivos de optimización multiobjetivo identificados. 106

8.1. Zonificación funcional y esquema arquitectónico del prototipo VERA. 114
8.2. Zonificación térmica y modelo computacional del prototipo VERA en $E+$. . . . 116
8.3. Acople entre $E+$ y $NSGA-II$ para el diseño óptimo de envolvente del prototipo VERA. 117
8.4. Configuraciones de capas y posición del aislante en muros del prototipo VERA. . 118
8.5. Configuraciones de montaje y posición del aislante en cubiertas. 118
8.6. Configuraciones de aislación en pisos en contacto con el suelo. 119
8.7. Dimensiones de aleros y galerías. 119
8.8. Mapa bioclimático según Norma $IRAM$ 11603 y ubicación de las localidades seleccionadas. 121
8.9. Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Rivadavia (Zona Ia) 127
8.10. Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Rivadavia (Zona Ia) 128
8.11. Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Iguazu (Zona Ib) 130
8.12. Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Iguazú (Zona Ib) 131
8.13. Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Chilecito (Zona IIa) 133
8.14. Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Chilecito (Zona IIa) 133
8.15. Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Sauce Viejo (Zona IIb) 136
8.16. Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Sauce Viejo (Zona IIb) 136
8.17. Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Córdoba (Zona IIIa) 139
8.18. Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Córdoba (Zona IIIa) 139
8.19. Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Ezeiza (Zona IIIb) 141
8.20. Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Ezeiza (Zona IIIb) 141
8.21. Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Mendoza (Zona IVa) 143
8.22. Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Mendoza (Zona IVa) 144
8.23. Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Bahia Blanca (Zona IVb) 146
8.24. Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Bahia Blanca (Zona IVb) . . . 147
8.25. Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Comodoro Rivadavia (Zona V) . . 149
8.26. Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Comodoro Rivadavia (Zona V) 150
8.27. Relación entre el CI y el consumo E_{total} para San Carlos de Bariloche (Zona VI) 152
8.28. Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para San Carlos de Bariloche (Zona VI) 152
8.29. Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Ushuaia (Zona VI) 154
8.30. Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Ushuaia (Zona VI) 155
8.31. Balance térmico en Enero y Julio para Rivadavia (Zona Ia) 157
8.32. Balance térmico en Enero y Julio para Iguazú (Zona Ib) 158
8.33. Balance térmico en Enero y Julio para Chilecito (Zona IIa) 159
8.34. Balance térmico en Enero y Julio para Sauce Viejo (Zona IIb) 160
8.35. Balance térmico en Enero y Julio para Córdoba (Zona IIIa) 161
8.36. Balance térmico en Enero y Julio para Ezeiza (Zona IIIb) 162
8.37. Balance térmico en Enero y Julio para Mendoza (Zona IVa) 164
8.38. Balance térmico en Enero y Julio para Bahia Blanca (Zona IVb) 165
8.39. Balance térmico en Enero y Julio para Comodoro Rivadavia (Zona V) 166
8.40. Balance térmico en Enero y Julio para San Carlos de Bariloche (Zona VI) 167
8.41. Balance térmico en Enero y Julio para Ushuaia (Zona VI) 168

Índice de tablas

1.1. Distribución del consumo de energía por instalaciones en un edificio residencial. 5

3.1. Métricas estadísticas y criterios de aceptación para la validación de modelos en resolución horaria. 36

4.1. Espacio de búsqueda para los parámetros de calibración del Caso 2. 44
4.2. Definición del espacio de búsqueda para los parámetros de calibración del Caso 3. 46
4.3. RMSE (°C) de las variables térmicas para los tres casos. 46
4.4. CVRMSE (%) de las variables térmicas para los tres casos. 47
4.5. NMBE (%) de las variables térmicas para los tres casos. 47
4.6. MAE (°C) de las variables térmicas para los tres casos. 47
4.7. Valores de los parámetros obtenidos tras la calibración para los tres casos. 51
4.8. Valores de absortividad térmica α_T obtenidos tras la calibración. 52
4.9. Valores de absortividad solar α_S obtenidos tras la calibración. 52
4.10. Comparación de los coeficientes de transferencia de calor por convección medios $(W/m^2 \cdot K)$. 52

5.1. Vector de parámetros de calibración y rangos del espacio de búsqueda (Ω) para el Edificio SOFIA. 66
5.2. RMSE del mes de Febrero para los distintos escenarios de calibración. 70
5.3. RMSE del mes de Junio para los distintos escenarios de calibración. 72
5.4. RMSE del mes de Agosto para los distintos escenarios de calibración. 73
5.5. RMSE del mes de Noviembre para los distintos escenarios de calibración. 75
5.6. RMSE Febrero con parámetros calibrados en Noviembre. 76
5.7. RMSE Noviembre con parámetros calibrados en Febrero. 77
5.8. RMSE Junio con parámetros calibrados en Agosto. 78
5.9. RMSE Agosto con parámetros calibrados en Junio. 78
5.10. RMSE Junio con parámetros calibrados en Febrero. 80
5.11. RMSE Noviembre con parámetros calibrados en Agosto. 80
5.12. RMSE para los meses de Enero y Julio: T_{aire}, T_{muro}^{int} y T_{muro}^{ext} $[°C]$. 81
5.13. Parámetros de elementos opacos de la envolvente - Febrero. 83
5.14. Parámetros generales del edificio - Febrero. 83
5.15. Parámetros de elementos opacos de la envolvente - Junio. 84
5.16. Parámetros generales del edificio - Junio. 84
5.17. Parámetros de elementos opacos de la envolvente - Agosto. 85
5.18. Parámetros generales del edificio - Agosto. 86
5.19. Parámetros de elementos opacos de la envolvente - Noviembre. 87
5.20. Parámetros generales del edificio - Noviembre. 87

7.1. Comparativa de investigaciones sobre estrategias de envolvente por Zona Bioambiental en Argentina. 108

7.3. Sistematización de metodologías de simulación e indicadores de desempeño en la literatura nacional. 109

8.1. Localidades de evaluación y clasificación bioambiental según norma $IRAM$ 11603. 121
8.2. Parámetros climáticos de diseño y condicionantes para Rivadavia, Salta (Zona Ia). 122
8.3. Parámetros climáticos de diseño para Iguazú, Misiones (Zona Ib). 122
8.4. Parámetros climáticos de diseño para Chilecito, La Rioja (Zona IIa). 122
8.5. Parámetros climáticos de diseño para Sauce Viejo, Santa Fe (Zona IIb). 123
8.6. Parámetros climáticos de diseño para Córdoba Capital (Zona IIIa). 123
8.7. Parámetros climáticos de diseño para Ezeiza, Buenos Aires (Zona IIIb). 123
8.8. Parámetros climáticos de diseño para Mendoza Capital (Zona IVa). 124
8.9. Parámetros climáticos de diseño para Bahía Blanca, Buenos Aires (Zona IVc). . . 124
8.10. Parámetros climáticos de diseño para Comodoro Rivadavia, Chubut (Zona V). . . 124
8.11. Parámetros climáticos de diseño para San Carlos de Bariloche, Río Negro (Zona VI). 125
8.12. Parámetros climáticos de diseño para Ushuaia, Tierra del Fuego (Zona VI). . . . 125
8.13. Comparativa de transmitancia térmica (K): Modelo $V1$ frente a exigencias Nivel A de $IRAM$ 11605 (Invierno). 126
8.14. Comparativa de transmitancia térmica (K): Modelo $V2$ frente a exigencias Nivel A de $IRAM$ 11605 (Invierno). 126
8.15. Definición de transmitancia térmica (K) en modelos de referencia para condición de verano. 127
8.16. Individuos óptimos para Rivadavia (Terminaciones y Orientación) 129
8.17. Individuos óptimos para Rivadavia (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías) 129
8.18. Individuos óptimos para Iguazu (Terminaciones y Orientación) 132
8.19. Individuos óptimos para Iguazu (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías) . 132
8.20. Individuos óptimos para Chilecito (Terminaciones y Orientación) 135
8.21. Individuos óptimos para Chilecito (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías) 135
8.22. Individuos óptimos para Sauce Viejo (Terminaciones y Orientación) 137
8.23. Individuos óptimos para Santa Fe (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías) 137
8.24. Individuos óptimos para Córdoba (Terminaciones y Orientación) 140
8.25. Individuos óptimos para Córdoba (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías) 140
8.26. Individuos óptimos para Ezeiza (Terminaciones y Orientación) 142
8.27. Individuos óptimos para Ezeiza (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías) . 142
8.28. Individuos óptimos para Mendoza (Terminaciones y Orientación) 145
8.29. Individuos óptimos para Mendoza (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías) 145
8.30. Individuos óptimos para Bahia Blanca (Terminaciones y Orientación) 148
8.31. Individuos óptimos para Bahia Blanca (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías) 148
8.32. Individuos óptimos para Comodoro Rivadavia (Terminaciones y Orientación) . . 151
8.33. Individuos óptimos para Comodoro Rivadavia (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías) 151
8.34. Individuos óptimos para San Carlos de Bariloche (Terminaciones y Orientación) . 153
8.35. Individuos óptimos para San Carlos de Bariloche (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías) 153
8.36. Individuos óptimos para Ushuaia (Terminaciones y Orientación) 156
8.37. Individuos óptimos para Ushuaia (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías) 156

B.1. Propiedades termofísicas de los materiales de mampostería de la vivienda MEVIR 185
B.2. Propiedades termofísicas de los materiales del piso de la vivienda MEVIR 185
B.3. Propiedades termofísicas de los materiales de techo de la vivienda MEVIR 185
B.4. Propiedades ópticas y térmicas del material de acristalamiento de la vivienda MEVIR 185

B.5. Propiedades termofísicas de componentes de mampostería del edificio SOFIA . . 186
B.6. Propiedades termofísicas de los materiales del piso edificio SOFIA 186
B.7. Propiedades termofísicas de los materiales del techo del edificio SOFIA 186
B.8. Propiedades ópticas y térmicas del vidrio, Acristalamiento TVH, edificio SOFIA 186
B.9. Propiedades termofísicas de materiales fijos de la envolvente (Muros, Pisos y Techos). 186
B.11. Propiedades termofísicas del material aislante (EPS) y su ubicación en la envolvente. 187
B.13. Propiedades ópticas de las terminaciones de pared del prototipo VERA 187
B.14. Propiedades termofísicas de ladrillos para el prototipo VERA 187
B.15. Propiedades termofísicas de los materiales para el techo prototipo VERA 187
B.16. Propiedades térmicas de acristalamientos para el prototipo VERA. 187
B.17. Costos de construcción Prototipo VERA. 188

Parte I

INTRODUCCIÓN

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto: Crisis energética y ambiental, y el rol del Sector Edilicio

En la actualidad, el crecimiento demográfico sostenido y el modelo de desarrollo basado en el consumo intensivo de recursos ha precipitado una crisis ambiental y energética de escala global. Este fenómeno no responde únicamente al aumento numérico de la población, sino a la sofisticación y diversificación de las actividades humanas, las cuales se desarrollan predominantemente en espacios interiores. Esta forma de vida ha traído consigo exigencias de confort térmico cada vez más estrictas: lo que históricamente se resolvía mediante la adaptación biológica o el ajuste de la vestimenta, hoy se delega de forma casi exclusiva en sistemas mecánicos de climatización, elevando el umbral de demanda energética mínima para considerar un espacio como habitable y productivo. Como Alexakis et al., [8], Hashempour et al. [145] y Wu et al. [303] mencionan en sus investigaciones, estos factores han consolidado un incremento anual sostenido del 1 % en el consumo energético y en las emisiones de CO_2 asociadas al sector de la construcción. En este panorama, la edificación desempeña un papel determinante, siendo responsable de aproximadamente el 40 % del consumo de energía primaria (Figura 1.1) y de entre el 32 % y el 36 % de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial.

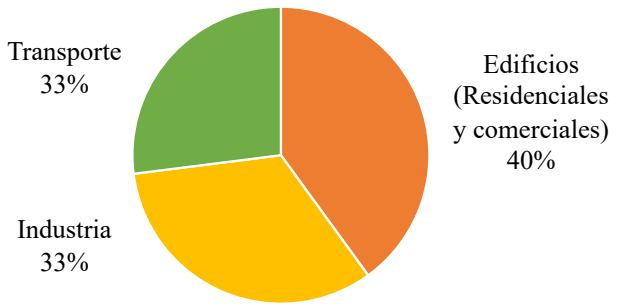


Figura 1.1: Consumo de energía a nivel global por sector

A la ineficiencia estructural de la edificación se suma un factor que agrava la fragilidad del sistema: la escasa diversificación de la matriz energética. Actualmente se basa en una infraestructura de suministro que depende mayoritariamente de fuentes de origen fósil. Esto, no solo exacerba la crisis climática mediante la emisión sostenida de gases de efecto invernadero, sino que introduce una variabilidad en los precios de la energía y el agotamiento de recursos no renovables. Como ilustra la Figura 1.2, más del 80 % de la oferta de energía primaria proviene de fuentes no

renovables (petróleo, carbón y gas natural). Esta rigidez implica que cualquier incremento en la demanda, traccionado por el crecimiento urbano y las exigencias de confort mencionadas anteriormente, tensiona el sistema hasta sus límites operativos. La falta de una integración efectiva de fuentes renovables y sistemas de generación distribuida impide una respuesta flexible ante los picos de consumo, transformando la matriz en un sistema poco resiliente. En consecuencia, esta dependencia no solo compromete la seguridad energética nacional, sino que encarece el costo de vida y dificulta la transición hacia un modelo de desarrollo verdaderamente sostenible.

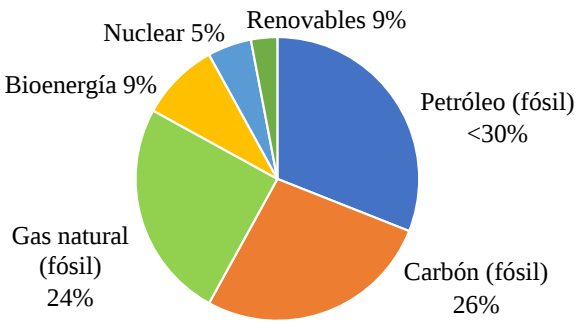


Figura 1.2: Matriz de oferta de energía primaria global [157]

Alexakis et al. [8] y Kumar et al. [178] explican que el crecimiento poblacional genera un círculo vicioso de degradación ambiental. El aumento de la población exige una expansión proporcional de la superficie construida, lo que deriva en la sustitución de ecosistemas naturales por materiales de alta inercia térmica y baja reflectancia, como el hormigón y el asfalto. Esta alteración del suelo da origen al efecto de Isla de Calor Urbano, que eleva significativamente las temperaturas en las ciudades. El incremento de la temperatura exterior, a su vez, fuerza a los edificios a intensificar el uso de sistemas de aire acondicionado para mantener los estándares de confort. El calor residual expulsado por estos equipos hacia el exterior contribuye a exacerbar el microclima urbano, cerrando un ciclo donde el intento de refrigerar el interior calienta progresivamente el entorno colectivo.

Dentro de este esquema, el sector de la edificación se identifica como una de las fuentes principales de impacto ambiental, siendo responsable de aproximadamente el 30 % del consumo de energía final y de cerca del 40 % de las emisiones globales de CO_2 relacionadas con la energía. Al desglosar el consumo por instalación, se observa que los sistemas de climatización (HVAC) representan el componente más crítico (Tabla 1.1), superando frecuentemente el 50 % de la carga energética total en climas con severidad térmica. Esta dependencia tecnológica es el síntoma de una arquitectura que ha descuidado su función como reguladora climática, transformando a los edificios en sistemas vulnerables que requieren una inyección constante de energía primaria para compensar las deficiencias de su envolvente térmica.

A pesar de las cifras mencionadas, los edificios poseen el mayor potencial de mitigación para enfrentar la crisis climática. La transición de ver al edificio como un problema a entenderlo como la solución reside en diseño térmicamente eficiente de su envolvente. Una envolvente diseñada con criterios de alta fidelidad física —que integre de forma equilibrada la resistencia térmica, la inercia de los materiales, el control de infiltraciones y la gestión de la radiación solar— permite reducir drásticamente la demanda energética para acondicionamiento (E_{cal} y E_{ref}). Al actuar como un filtro dinámico y no solo como una barrera estática, la envolvente eficiente minimiza la necesidad de intervención de sistemas activos, permitiendo que las estrategias pasivas absorban la mayor parte de las fluctuaciones ambientales y posicionando a la arquitectura como el pilar fundamental de la sostenibilidad energética. Según Lind et al. [190] y Alexakis et al. [8], estas acciones son imperativas para cumplir con las directivas internacionales que aspiran a la implementación de

Tabla 1.1: Distribución del consumo de energía por instalaciones en un edificio residencial.

Instalación / Sistema	**Rango (%)**	**Factores de Influencia**
HVAC	42 % – 68 %	El diseño de la envolvente determina hasta el 60 % de esta carga térmica.
Iluminación y Electrodomésticos	16 % – 32 %	Depende del comportamiento del usuario y la eficiencia de los equipos.
Agua Caliente Sanitaria	14 % – 26 %	Mayor peso relativo en el sector residencial frente al comercial.

Edificios de Energía Neta Casi Nula (NZEB) y a la descarbonización total para el año 2050.

1.2. Optimización del desempeño energético en sistemas edilicios: Un enfoque hacia la sostenibilidad

Ante la magnitud de los desafíos energéticos y ambientales descritos, resulta necesario trascender a soluciones con un enfoque preventivo. Si se pretende que el entorno construido evolucione desde su rol actual, consumidor desmesurado de energía y emisor de carbono, hacia un modelo de eficiencia operativa, es fundamental desarrollar capacidades de análisis que permitan anticipar el comportamiento de los edificios antes de su ejecución o rehabilitación. La necesidad de cuantificar el desempeño térmico ha motivado a la comunidad científica a explorar fronteras donde la arquitectura converja con la ciencia de datos, la termodinámica aplicada y el desarrollo de nuevas tecnologías para la edificación. Es en este punto donde surge la necesidad de herramientas capaces de virtualizar la realidad física, permitiendo evaluar estrategias de mitigación en un entorno controlado y a bajo costo. La necesidad de transformar la intuición proyectual en conocimiento verificable constituye el punto de partida para el desarrollo de las metodologías y tecnologías que han definido la evolución del campo en las últimas décadas.

1.2.1. Simulación Energética Edilicia (BES): Del cálculo estático a la modelización dinámica

Ante la complejidad de los fenómenos térmicos en la edificación, se han adoptado de forma masiva las herramientas de simulación energética de edificios (BES), tales como EnergyPlus o TRNSYS. Estos motores de cálculo permiten realizar balances térmicos detallados, integrando variables climáticas, propiedades de los materiales y sistemas de acondicionamiento.
La complejidad intrínseca de los modelos de simulación energética reside en la fuerte interdependencia de los parámetros que rigen el balance térmico de la edificación. Variables como la inercia térmica y la conductividad de la envolvente, las tasas de infiltración de aire y la absortividad solar de las superficies no operan de manera independiente, sino que presentan un acoplamiento no lineal que afecta simultáneamente el comportamiento global del modelo. Esta interconexión implica que un ajuste en un parámetro específico puede minimizar o potenciar otro, tornando los métodos manuales en procesos ineficientes, subjetivos y propensos a sesgos críticos. Bajo esta premisa, se justifica la adopción de métodos iterativos de optimización, los cuales poseen la capacidad de explorar espacios de búsqueda multidimensionales de forma sistemática y robusta. Estos algoritmos permiten procesar las interacciones cruzadas entre variables, identificando combinaciones óptimas que equilibran el peso de cada factor dentro del modelo. La optimización iterativa

se presenta, por tanto, como una herramienta de automatización capaz de resolver la complejidad de un sistema garantizando que la solución final responda a la convergencia de todas sus partes interdependientes.

1.2.2. Optimización Basada en Simulación (SBO): Integración de algoritmos heurísticos en el diseño de envolventes

La adopción de la Optimización Basada en Simulación (SBO) representa un cambio de paradigma en la ingeniería térmica de edificios, consolidándose como una herramienta transversal capaz de abordar tanto el diseño teórico como la validación de construcciones reales. En la fase de diseño, este enfoque permite la exploración sistemática de amplios espacios de búsqueda multidimensionales para identificar configuraciones óptimas de envolvente, orientación y sistemas antes de su ejecución, garantizando que el proyecto alcance niveles de eficiencia superiores a los derivados de métodos convencionales o intuitivos. Paralelamente, en el ámbito de la validación y la rehabilitación de edificaciones existentes o prototipos experimentales, la Optimización Basada en Simulación (SBO) actúa como el motor fundamental del modelado inverso. Al ajustar iterativamente los parámetros de entrada del modelo para que coincidan con los datos térmicos monitorizados, estos métodos automatizados permiten reducir la incertidumbre y asegurar que la simulación sea un reflejo fiel del comportamiento operativo real. Esta dualidad convierte a la optimización en el eje metodológico que vincula la precisión del diagnóstico con la excelencia en el diseño, proporcionando una base científica robusta tanto para proyectar el futuro parque edilicio como para transformar la eficiencia de las construcciones actuales.

1.2.3. Modelado multiobjetivo y optimización avanzada: Estado del arte en la evaluación del desempeño edilicio integral

La ciencia de la edificación ha transitado desde modelos estáticos basados en el método de grados-día hacia simulaciones dinámicas de alta resolución temporal. Los avances en el desarrollo de motores de cálculo como EnergyPlus han permitido integrar fenómenos complejos como el intercambio radiativo de onda larga, la conducción transitoria en cerramientos multicapa y el acoplamiento de sistemas de ventilación natural. No obstante, el avance científico más significativo no reside solo en la capacidad de cálculo, sino en la integración de archivos climáticos detallados ($TMY3$) y el uso de datos de satélite, lo que ha permitido que la simulación teórica se aproxime con mayor precisión a la realidad de los microclimas urbanos.

El campo del diseño bioclimático ha experimentado una revolución gracias a la implementación de algoritmos evolutivos, destacando el Algoritmo Genético (GA) por su robustez en problemas con objetivos contrapuestos. La literatura científica ha pasado de buscar una Solución Única a generar Frentes de Pareto, donde se cuantifica el compromiso técnico-económico entre el ahorro de energía operativa, el confort térmico y el impacto ambiental. Este avance ha permitido desmitificar la eficiencia basada solo en el aislamiento térmico masivo, demostrando que la gestión inteligente de la inercia térmica, el control solar dinámico y de flujos de aire son factores determinantes. Para validar estos modelos, las metodologías de calibración han experimentado una transformación desplazando el enfoque desde datos de facturación global hacia el despliegue de sensores de alta resolución. Esta transición permite capturar la dinámica térmica de las superficies y el aire interior a escalas sub-horarias. Como resultado, la calibración trasciende el ajuste de métricas energéticas tradicionales para convertirse en un proceso de validación del desempeño térmico real, asegurando una replicación fiel de la inercia y los flujos de calor en periodos de tiempo críticos.

1.2.4. Hitos regulatorios y técnicos en la ciencia del hábitat nacional: De las normas IRAM al Índice de Prestación Energética

En Argentina, el avance en la ciencia del hábitat ha estado históricamente regido por la labor del Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), específicamente a través de la serie de normas IRAM 11600. Este marco ha permitido que la investigación nacional transite desde recomendaciones cualitativas generales hacia exigencias técnicas específicas de transmitancia térmica (K) y riesgos de condensación superficial e intersticial. Los avances recientes en la literatura local han comenzado a cuestionar la rigidez de estos estándares, proponiendo una evolución desde el cumplimiento de límites estáticos hacia la evaluación del desempeño dinámico mediante simulación energética, reconociendo que la respuesta térmica de un edificio en el Noroeste Argentino requiere estrategias distintas a las aplicadas en la Patagonia.
Un punto de inflexión es el desarrollo del Programa Nacional de Etiquetado de Viviendas [PRONEV]. Este avance ha impulsado la creación de un Índice de Prestación Energética (IPE), permitiendo cuantificar la demanda de energía primaria para calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria e iluminación. La investigación académica ha acompañado este proceso mediante la validación de herramientas de cálculo simplificadas frente a motores de simulación dinámica como EnergyPlus. Este esfuerzo nacional no solo ha profesionalizado el diagnóstico del parque edilicio existente, sino que ha generado una base de datos sobre la eficiencia real de las tipologías constructivas regionales, sentando las bases para futuras políticas públicas basadas en el desempeño energético verificado.

1.2.5. Desafíos pendientes y horizontes de desarrollo en el campo

La complejidad intrínseca del comportamiento térmico edilicio, regida por variables acopladas y no lineales, exige trascender el análisis convencional. En este sentido, la integración de herramientas de simulación dinámica con algoritmos de optimización SBO surge como la respuesta metodológica necesaria para resolver y optimizar estos sistemas de manera sistémica.
Sin embargo, para que este acoplamiento resulte en una herramienta de diseño confiable, la fase de calibración debe evolucionar más allá del simple ajuste de resultados globales. Actualmente, se identifica una limitación en las validaciones convencionales, las cuales suelen centrarse de forma exclusiva en la temperatura del aire (T_{aire}) o en la facturación energética. Esta simplificación omite enfoques multifactoriales que integren temperaturas superficiales (T_{sup}) y parámetros de alta sensibilidad, lo que a menudo deriva en modelos estadísticamente aceptables pero con una física interna distorsionada. Resulta imperativo, por tanto, desarrollar protocolos de calibración que aseguren la integridad termofísica del modelo, transformándolo en un instrumento de diagnóstico y predicción robusto.
Bajo este marco de precisión y optimización, se presenta la necesidad de abordar el diseño óptimo de envolventes con un enfoque regional. Resulta fundamental avanzar hacia estudios que empleen modelos dinámicos para evaluar prototipos de vivienda en las diversas zonas bioambientales de Argentina. Este enfoque permite identificar sensibilidades y comportamientos térmicos que los métodos estáticos omiten, representando un avance científico esencial para comprender el desempeño real del hábitat en contextos de alta variabilidad ambiental.

1.3. Objetivos y Aportes de esta tesis

En función de la problemática expuesta y con el fin de ampliar el conocimiento científico en la predicción del comportamiento térmico de los edificios, el objetivo general de esta tesis es desarrollar y aplicar un marco metodológico basado en el acoplamiento de Simulación Energética de Edificios (BES) y Optimización Metaheurística con Algoritmo Genético (GA). Esta integración está destinada específicamente a la creación de modelos de alta fidelidad física mediante el mode-

lado inverso y a la posterior optimización del diseño de envolventes, para el análisis de estrategias de diseño en el contexto argentino.
Para alcanzar el objetivo general propuesto, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- **Desarrollar un flujo de trabajo de optimización de alta fidelidad.** Se pretende establecer un marco de trabajo que acople dinámicamente el algoritmo GA con el motor de simulación EnergyPlus (Software de simulación térmica y energética) ($E+$). Se priorizará el acoplamiento directo para asegurar la fidelidad física en el cálculo de transferencias de calor y masa, permitiendo procesar la interdependencia sistémica de las variables del edificio.

- **Estructurar un procedimiento sistemático de calibración térmica avanzada.** Mediante técnicas de modelado inverso, se propone desarrollar y validar una metodología secuencial que trascienda el ajuste estadístico convencional. El protocolo se fundamenta en el desacoplamiento lógico de las variables de masa térmica, infiltraciones y sistemas, utilizando de forma simultánea la temperatura del aire (T_{aire}) y las temperaturas superficiales (T_{sup}) como funciones objetivo. Este enfoque busca mitigar el fenómeno de la equifinalidad e integrar parámetros de alta sensibilidad y frecuente incertidumbre, tales como la absortividad térmica (α_T) y solar (α_S), y los coeficientes de transferencia superficial (h_{int} y h_{ext}), como variables de decisión clave. De este modo, se garantiza la integridad física de los flujos de calor en la envolvente y la robustez del modelo resultante.

- **Formular un marco metodológico para el diseño avanzado basado en simulación dinámica y análisis multiobjetivo.** Mediante la implementación de modelado directo, se propone evaluar el desempeño térmico de un prototipo teórico en las distintas zonas bioambientales de la norma Clasificación bioambiental de la Rep. Argentina ($IRAM$ 11603). El objetivo es minimizar simultáneamente la demanda energética para acondicionamiento (E_{total}) y los costos de inversión inicial (CI), trascendiendo el cumplimiento normativo estático para analizar la respuesta dinámica de la edificación frente a la variabilidad climática del territorio nacional. Este estudio sistematiza el impacto de las propiedades de la envolvente y las estrategias pasivas en el balance energético del edificio, permitiendo identificar las variables determinantes, como la inercia térmica, el control solar, la ventilación y el acoplamiento con el suelo, estableciendo una jerarquía científica de estrategias según cada contexto bioambiental.

1.4. Estructura de la tesis

Para cumplir con el propósito de esta investigación, el documento se estructura en cuatro módulos interconectados que detallan el recorrido desde los fundamentos teóricos hasta la aplicación metodológica práctica:

- **Parte I: Fundamentos y Marco Metodológico.** En esta sección se establecen las bases teóricas de la investigación. Se analiza la envolvente de edificios vinculada a los principios de la termodinámica aplicada. Asimismo, se describe la arquitectura del marco metodológico propuesto, detallando el flujo de trabajo para el acople dinámico entre herramientas BES y el algoritmo de optimización metaheurística GA.

- **Parte II: Calibración de Alta Fidelidad.** Este bloque aborda la creación y validación de simulaciones térmicamente íntegras. Se desarrolla el protocolo de calibración secuencial y multifactorial orientado a reducir la incertidumbre en parámetros de la envolvente. A través de casos de estudio, MEVIR y SOFIA, se demuestra cómo los enfoques multiobjetivos, la integración de parámetros sensibles e inciertos, y el desacople de variables permite superar el riesgo de equifinalidad, garantizando que los modelos virtuales posean una validez física superior al ajuste estadístico convencional.

- **Parte III: Diseño de Envolventes Bioclimáticas en Argentina.** Se utiliza el marco metodológico aplicado al prototipo VERA para el análisis de estrategias de diseño pasivas en contexto nacional. Se evalúa la sensibilidad del equilibrio térmico en las diversas zonas de la Norma $IRAM$ 11603. Este módulo profundiza en el análisis de las variables de diseño (inercia, aislamiento, control solar, ventilación e interacción con el suelo) para evaluar las estrategias que garantizan la eficiencia y el confort en cada región del territorio argentino.
- **Parte IV: Síntesis, Conclusiones y Aportes Científicos** Se integran los hallazgos de los módulos anteriores para consolidar las conclusiones generales de la tesis. Se destaca la viabilidad del flujo de trabajo propuesto y se discuten las líneas de investigación futura.

Finalmente, el cuerpo principal de la tesis se complementa con dos secciones de soporte documental. El Anexo 1: Producción Científica y Transferencia compendia los artículos publicados en revistas especializadas, las ponencias presentadas en congresos y los desarrollos generados durante el periodo de investigación; estos documentos constituyen el respaldo académico y la validación por pares de la metodología aquí desarrollada. Por su parte, el Anexo 2: Tablas Auxiliares y Datos de Soporte que incluye información técnica detallada.

Parte II

FUNDAMENTOS Y MARCO METODOLÓGICO

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

El presente Capítulo establece el marco conceptual y teórico que sustenta el desarrollo de esta tesis, proporcionando los conocimientos esenciales para la interpretación de la metodología y los resultados obtenidos. Se abordan los principios de transferencia de calor y masa en edificaciones, junto con los fundamentos de la Simulación Energética de Edificios (BES) y los algoritmos de Optimización, específicamente Algoritmo Genético (GA). La integración de estos conceptos resulta clave para comprender la aplicación de la Optimización Basada en Simulación (SBO), tanto en la calibración de modelos computacionales como en el diseño óptimo de envolventes.

2.1. Transferencia de calor y masa en edificios

El comportamiento térmico de un edificio está intrínsecamente ligado a los flujos de energía que atraviesan su **envolvente**. Esta se define como la interfaz física compuesta por muros, cubiertas, pisos, elementos de sombreado y superficies vidriadas que separa el ambiente interior del exterior. Su función primordial es regular los intercambios de energía y masa entre ambos medios, contribuyendo al mantenimiento de las condiciones de confort requeridas por los ocupantes.
El desempeño energético de la envolvente se rige por los principios de la termodinámica, constituyendo el balance de transferencia de calor y masa el pilar fundamental de la Simulación Energética de Edificios (BES). Dicho balance cuantifica las cargas térmicas netas, tanto sensibles como latentes, que los sistemas de climatización ($HVAC$) deben compensar activamente para garantizar la habitabilidad de los espacios.
Para el análisis computacional, se introduce el concepto de **zona térmica**, definida como un volumen de control que agrupa espacios con características constructivas, perfiles de uso y condiciones ambientales homogéneas, tal como se esquematiza en la Figura 2.1. Los mecanismos físicos que gobiernan este intercambio higrotérmico se clasifican en: **conducción**, **convección** y **radiación**, y un componente de transferencia de masa, asociado a los fenómenos de **infiltración** y **ventilación**.

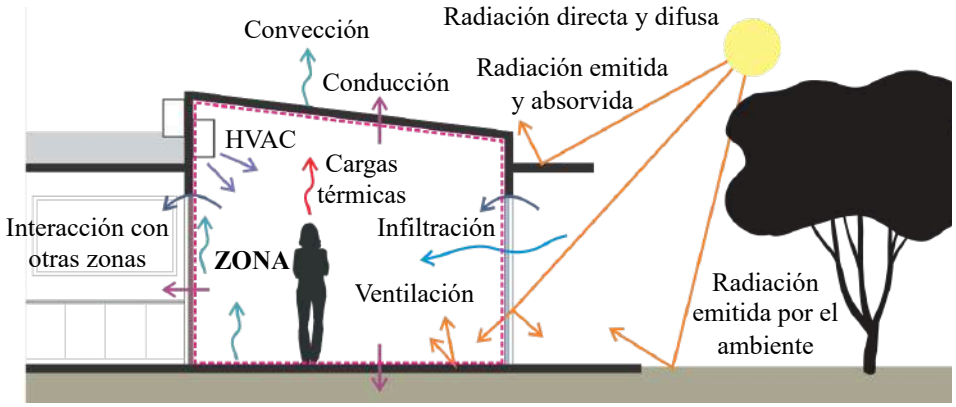


Figura 2.1: Esquema de los mecanismos de transferencia de calor y masa que intervienen en el balance energético de una zona térmica.

2.1.1. Mecanismos de intercambio energético

Conducción e inercia térmica. Es el mecanismo de transferencia de calor sensible que opera a través de los componentes sólidos de la envolvente, tales como muros, cubiertas, soleras y acristalamientos. En condiciones de estado estacionario, la magnitud de este flujo es inversamente proporcional a la resistencia térmica de los materiales, propiedad que depende directamente de su conductividad térmica (λ). Este fenómeno define la capacidad de la envolvente para limitar la pérdida o ganancia de calor por unidad de área ante una diferencia de temperatura constante. Bajo condiciones dinámicas o de régimen transitorio, el comportamiento térmico de la envolvente se ve modificado por su inercia térmica. A diferencia de la conducción pura, esta propiedad está vinculada a la capacidad calorífica y la densidad de los materiales, permitiendo que la masa constructiva actúe como un acumulador de energía. Este fenómeno genera un amortiguamiento de las oscilaciones térmicas exteriores y un desfase temporal en la transmisión del flujo hacia el espacio interior, factores críticos para la estabilidad térmica y el confort higrotérmico.

Radiación. Este fenómeno abarca los intercambios energéticos mediante ondas electromagnéticas, dividiéndose en dos espectros principales. Por un lado, la radiación de onda corta (solar directa y difusa) incide sobre la envolvente, generando ganancias térmicas significativas tanto por

absorción en elementos opacos como por transmisión a través de acristalamientos. Por otro lado, la radiación de onda larga refiere al intercambio térmico entre las superficies interiores de la zona, y entre la superficie exterior del edificio y la bóveda celeste o el entorno circundante, influyendo directamente en el balance superficial de temperaturas.

Convección. Constituye el intercambio de calor sensible entre las superficies sólidas (interiores o exteriores) y el fluido adyacente (aire). Este mecanismo resulta fundamental para la distribución del calor dentro del espacio habitable y la interacción de la envolvente con el ambiente exterior, estando su magnitud fuertemente condicionada por el régimen de movimiento del aire y la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido.

Transferencia de masa (Flujo de aire). Este mecanismo impacta tanto el balance de calor sensible como el latente y se manifiesta a través de dos vías. La infiltración comprende el flujo de aire no controlado que atraviesa fisuras o deficiencias en la estanqueidad de la envolvente, afectando negativamente la eficiencia energética. En contraste, la ventilación corresponde a la renovación controlada del aire (natural o mecánica), estrategia esencial para la disipación de calor acumulado, la gestión de la humedad y el aseguramiento de la calidad del aire interior.

Cargas internas. Sumado a los flujos a través de la envolvente, las cargas internas representan las ganancias de calor sensible y latente generadas dentro de la zona térmica por la actividad metabólica de los ocupantes, la operación de equipos y la iluminación artificial.

2.2. Fundamentos de la simulación térmica y energética de edificios

La evaluación rigurosa del desempeño térmico en edificaciones requiere superar las limitaciones de los métodos estáticos o de régimen permanente. Estos enfoques simplificados resultan insuficientes para capturar fenómenos dinámicos esenciales, tales como la inercia térmica de la masa constructiva, la variabilidad temporal de las cargas internas y la naturaleza fluctuante de la radiación solar. En consecuencia, la simulación BES se establece como la herramienta metodológica indispensable, al permitir la resolución iterativa de los balances de energía y masa en función del tiempo, cuantificando así el comportamiento del edificio bajo condiciones reales y transitorias de operación.
Desde una perspectiva termodinámica, el balance energético de una **zona térmica** puede expresarse mediante la Ecuación 2.1:

$$Q_{\text{alm}} = Q_{\text{env}} + Q_{\text{aire}} + Q_{\text{int}} + Q_{\text{HVAC}} \tag{2.1}$$

donde:

- Q_{alm}: representa la tasa de almacenamiento de energía de la zona ($C_z \frac{dT_z}{dt}$).
- Q_{env}: contribución neta de calor a través de la envolvente (conducción, convección y radiación).
- Q_{aire}: flujo de energía asociado al intercambio de masa por ventilación e infiltración.
- Q_{int}: ganancias de calor por cargas internas (ocupantes, equipos, luces).
- Q_{HVAC}: flujo de energía sensible y latente aportado o extraído por el sistema mecánico para mantener el confort.

La construcción de un modelo de simulación robusto exige la integración precisa de múltiples dominios de información. Estos incluyen la definición del **modelo geométrico y material** (propiedades termofísicas de la envolvente), la caracterización del **clima y entorno** (mediante archivos

climáticos estandarizados como EPW), la determinación de las **cargas internas** (perfiles de uso y ocupación) y, finalmente, la especificación de los **sistemas activos** $HVAC$ con sus respectivas estrategias de control.

2.2.1. EnergyPlus: motor de simulación térmica y energética dinámica

EnergyPlus ($E+$) se define como una herramienta modular de simulación dinámica, orientada a la cuantificación rigurosa de las demandas energéticas mediante el cálculo detallado del balance térmico. Su funcionamiento se estructura sobre un esquema de solución integrada, en el cual la respuesta del edificio y los sistemas $HVAC$ se resuelven de manera simultánea en cada paso de tiempo, empleando un método iterativo **predictor-corrector** (ver Figura 2.2 [94]). El programa calcula la carga necesaria para alcanzar el *setpoint*, ignorando momentáneamente las limitaciones reales del equipo. El módulo de sistemas y acondicionamiento de aire intenta satisfacer esa carga considerando sus restricciones físicas, curvas de eficiencia y caudales de aire disponibles. Si el sistema no logra cubrir la demanda, el gestor recalcula el balance de calor del aire de la zona, determinando la temperatura real que resultará de ese déficit.

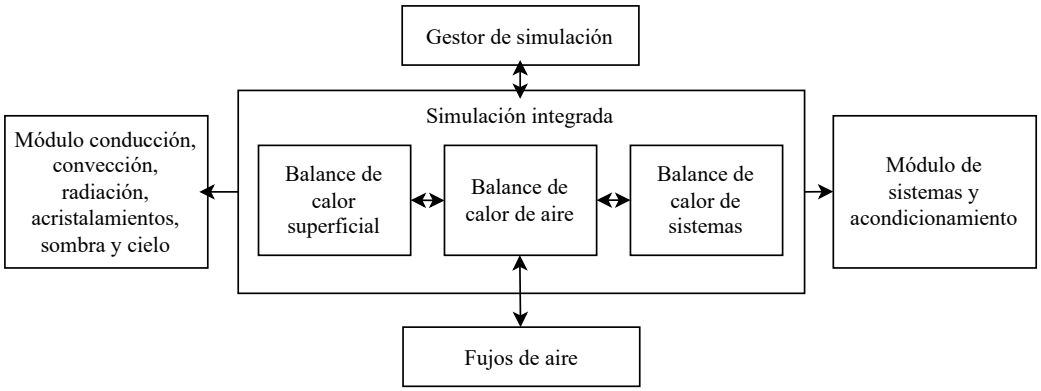


Figura 2.2: Arquitectura de simulación integrada de $E+$: interacción entre los balances de calor de superficie, aire y sistemas.

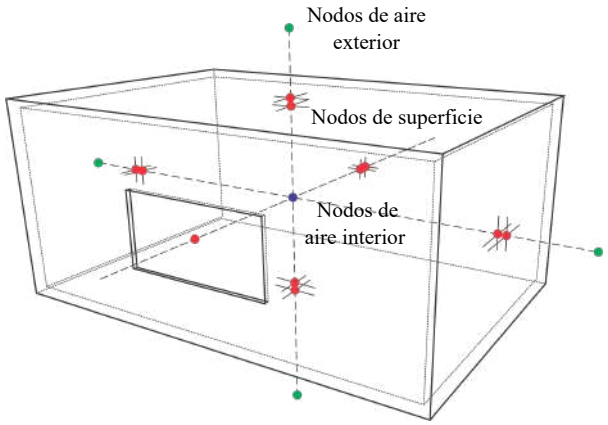


Figura 2.3: Representación esquemática de la red nodal de una zona térmica para la aplicación del método de balance de calor.

El enfoque nodal constituye el fundamento para la discretización de los sistemas continuos de transferencia de energía y masa en el motor de cálculo. Este método se aplica de forma integral

a la envolvente térmica, al balance de aire de la zona y a los circuitos de los sistemas $HVAC$, conforme se esquematiza en la Figura 2.3.

2.2.2. Arquitectura de modelado de EnergyPlus

El modelo de un edificio en $E+$ se estructura en torno a cuatro elementos jerárquicos y conectados que definen cómo se distribuyen la geometría, las cargas y los balances de energía: **superficies**, **espacios**, **zonas** y **recintos**, como se muestra en la Figura 2.4.

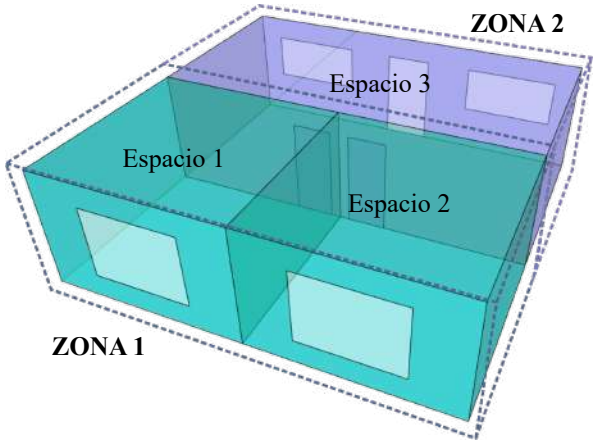


Figura 2.4: Estrategia de zonificación térmica: agrupación de múltiples espacios físicos en volúmenes de control homogéneos para la simulación energética.

Superficie. Entidad geométrica elemental (ya sea opaca, transparente o una frontera virtual de aire) que define los límites físicos de la envolvente. Es la unidad sobre la cual se asignan las construcciones y propiedades termofísicas de los materiales, y actúa como interfaz para el acoplamiento de los balances de energía. En ella se establecen las condiciones de borde térmicas el balance de energía superficial, asumiendo una temperatura uniforme en toda su área para el cálculo de la transferencia de calor y el almacenamiento de humedad.

Espacio. Unidad de agrupación geométrica y de cargas. Un espacio agrupa un conjunto de superficies y contiene las fuentes de ganancias internas (ocupación, iluminación y equipos) específicas de esa área. Es fundamental notar que, aunque las cargas se definen a este nivel, el motor de cálculo no resuelve el balance térmico en esta instancia; en su lugar, todas las cargas del espacio se consolidan y se transfieren a la zona térmica a la que pertenece obligatoriamente.

Zona Térmica. Representa la unidad funcional principal de la simulación. Se define como un volumen de control que encierra una masa de aire sobre la cual se resuelve el balance de energía y masa. Una zona se compone de uno o más espacios y actúa como el nodo de conexión y control para los sistemas de climatización $HVAC$.

Recinto. Corresponde a un volumen geométrico continuo delimitado por superficies, cuyo propósito específico es la gestión del intercambio de energía radiante (cálculo de factores de visión y radiación de onda larga). Generalmente, la geometría de un espacio constituye su propio recinto radiativo, cuyos flujos de energía se incorporan posteriormente al balance térmico global de la zona.

2.2.3. Balance de calor y masa en el aire de la zona

El comportamiento térmico dinámico del aire en una zona se modela mediante el principio de conservación de la energía. Este establece que la variación de la energía interna del aire en función del tiempo debe ser igual a la suma algebraica de los flujos de calor convectivos y de masa que ingresan y egresan del volumen de control. Este balance constituye la base para determinar la evolución temporal de la temperatura del aire de la zona (T_z).
La formulación matemática se expresa mediante la Ecuación 2.2 [94]:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{n_{si}} \dot{q}_i + \sum_{i=1}^{n_{surf}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{n_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{\text{inf}} C_p (T_\infty - T_z) + \dot{q}_{\text{sys}} \quad (2.2)$$

donde los términos que rigen la dinámica térmica son:

- $C_z \frac{dT_z}{dt}$: Tasa de cambio de la energía interna almacenada en la masa de aire de la zona ($C_z = \rho_{\text{aire}} V_z C_p$).
- $\sum_{i=1}^{n_{si}} \dot{q}_i$: Sumatoria de cargas internas convectivas liberadas directamente al aire (iluminación, equipos y fracción convectiva de ocupantes).
- $\sum_{i=1}^{n_{surf}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$: Transferencia de calor por convección entre el aire de la zona (T_z) y las superficies interiores (T_{si}) de la envolvente.
- $\sum_{i=1}^{n_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$: Transferencia de calor por mezcla de aire entre la zona de interés y zonas adyacentes (T_{zi}), denominada transferencia interzonal.
- $\dot{m}_{\text{inf}} C_p (T_\infty - T_z)$: Ganancia o pérdida de calor sensible debido al intercambio de aire con el exterior (T_∞) por infiltración y ventilación.
- $\dot{q}_{\text{sys}}$: Aporte térmico del sistema $HVAC$. Representa el calor sensible suministrado (o extraído) por el sistema de acondicionamiento para satisfacer la demanda de confort.

De forma análoga, el balance de masa de vapor de agua resulta crucial para el modelado higrotérmico y la predicción de la humedad específica (W_z). Este fenómeno se rige por la Ecuación 2.3 [94]:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{aire}} V_z C_w \frac{dW_z}{dt} = & \sum_{i=1}^{n_{sl}} \dot{m}_{\text{lat},i} + \sum_{i=1}^{n_{surf}} A_i h_{mi} \rho_{\text{aire}} (W_{\text{surf},si} - W_z) \\ & + \sum_{i=1}^{n_{zones}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z) + \dot{m}_{\text{inf}} (W_\infty - W_z) + \dot{m}_{\text{sys}} (W_{\text{sup}} - W_z) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Los componentes de flujo de masa de vapor de agua se definen como:

- $\rho_{\text{aire}} V_z C_w \frac{dW_z}{dt}$: Tasa de acumulación de humedad en el volumen de aire de la zona (V_z).
- $\sum_{i=1}^{n_{sl}} \dot{m}_{\text{lat},i}$: Ganancias latentes internas (ocupantes y equipos).
- $\sum_{i=1}^{n_{surf}} A_i h_{mi} \rho_{\text{aire}} (W_{\text{surf},si} - W_z)$: Transferencia de masa convectiva en las superficies (adsorción/desorción).
- $\sum_{i=1}^{n_{zones}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z)$: Flujo de masa interzonal.
- $\dot{m}_{\text{inf}} (W_\infty - W_z)$: Flujo de humedad por infiltración y ventilación exterior.
- $\dot{m}_{\text{sys}} (W_{\text{sup}} - W_z)$: Aporte de humedad del sistema $HVAC$.

Aproximación por diferencias finitas de los balances en el aire de la zona

La resolución de las ecuaciones gobernantes se efectúa mediante un algoritmo numérico **predictor - corrector**. Para cada paso de tiempo, la derivada temporal se aproxima mediante una fórmula de diferencias finitas hacia atrás de tercer orden (`Third Order Backward Difference`):

$$\left.\frac{dT_z}{dt}\right|_t \approx \frac{1}{\delta t}\left(\frac{11}{6}T_z^t - 3T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2}T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3}T_z^{t-3\delta t}\right) + O(\delta t^3) \tag{2.4}$$

2.2.4. Balance de calor en las superficies opacas de la zona

Como se muestra en la Figura 2.5 [94], el balance de calor en superficies opacas se divide en tres procesos:

1. Balance de calor en la superficie exterior.
2. Balance de calor en la superficie interior.
3. Conducción de calor a través del elemento.

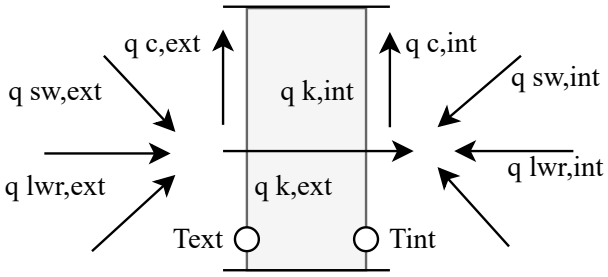


Figura 2.5: Esquema de los componentes del balance de calor superficial en un elemento opaco de la envolvente.

Balance de calor a través de las superficies

Para modelar la conducción transitoria a través de los opacos evitando el alto costo computacional de las diferencias finitas, $E+$ emplea el método de `Funciones de Transferencia de Conducción` [94]. Este enfoque permite calcular los flujos de calor actuales basándose en series temporales de temperaturas y flujos anteriores.
Las ecuaciones que rigen los flujos conductivos en la cara interior ($q^t_{k,\text{int}}$) y exterior ($q^t_{k,\text{out}}$) son:

$$\begin{aligned} q^t_{k,\text{int}} &= \sum_{j=0}^{n_z} z_j T_{si}^{t-j\delta t} - \sum_{j=0}^{n_z} y_j t_{so}^{t-j\delta t} + \sum_{j=1}^{n_q} \phi_j q_{k,\text{int}}^{t-j\delta t} \\ q^t_{k,\text{out}} &= \sum_{j=0}^{n_z} x_j t_{so}^{t-j\delta t} - \sum_{j=0}^{n_z} y'_j T_{si}^{t-j\delta t} + \sum_{j=1}^{n_q} \phi'_j q_{k,\text{out}}^{t-j\delta t} \end{aligned} \tag{2.5}$$

donde T_{si} y t_{so} son las temperaturas superficiales históricas (según el paso de tiempo δt). Los términos x_j, y_j, z_j y ϕ_j son coeficientes constantes de la función de transferencia; estos se precalculan una única vez durante la inicialización mediante el método del espacio de estados (*State Space*), dependiendo exclusivamente de las propiedades termofísicas y la geometría del cerramiento.

Balance de calor en la superficie exterior

El balance térmico de la superficie exterior vincula la envolvente con el entorno climático, determinando la temperatura superficial (t_{so}) mediante la suma algebraica de los flujos incidentes y salientes. La condición de equilibrio se expresa en la Ecuación 2.6 [94], donde el flujo neto resultante se transfiere por conducción hacia el interior del material ($q_{k,\text{out}}$):

$$q_{\text{sw,out}} + q_{\text{lwr,out}} + q_{\text{c,out}} - q_{k,\text{out}} = 0 \tag{2.6}$$

La resolución de este balance en $E+$ integra modelos detallados para cada componente:

- **Convección ($q_{\text{c,out}}$):** Se determina mediante un coeficiente de película (h_{out}) dinámico. El software emplea el `Adaptive Convection Algorithm`, el cual selecciona automáticamente la correlación más adecuada (ej. Sparrow, Nusselt-Jurges) según la dirección del viento y la clasificación de la superficie.
- **Radiación de Onda Corta ($q_{\text{sw,out}}$):** Corresponde a la radiación solar global absorbida. El cálculo incorpora la detección de sombras mediante algoritmos de recorte de polígonos (`Polygon Clipping`), determinando la fracción del área expuesta ante obstrucciones del entorno.
- **Radiación de Onda Larga ($q_{\text{lwr,out}}$):** Representa el intercambio radiante con el cielo, el suelo y el entorno. Su magnitud depende de la emisividad del material (ϵ), los factores de visión y las diferencias de temperatura con la bóveda celeste.
- **Conducción ($q_{k,\text{out}}$):** Flujo calculado según se describe en la Sección 2.2.4.

Balance de calor en la superficie interior

El balance térmico en la interfaz interior acopla la conducción proveniente de la envolvente con los fenómenos dentro de la zona. La condición de equilibrio se establece en la Ecuación 2.7 [94]:

$$q_{\text{lw,int}} + q_{\text{sw,int}} + q_{\text{c,int}} + q_{k,\text{int}} = 0 \tag{2.7}$$

La resolución de cada componente se basa en los siguientes modelos:

- **Convección ($q_{\text{c,int}}$):** Determina el intercambio con el aire de la zona (T_z). El software utiliza correlaciones dinámicas según el régimen de flujo (natural o forzado) y la orientación de la superficie.
- **Radiación de Onda Corta ($q_{\text{sw,int}}$):** Integra la radiación solar transmitida por las aberturas y la generada por iluminación artificial, contabilizando las múltiples reflexiones internas.
- **Radiación de Onda Larga ($q_{\text{lw,int}}$):** Representa el intercambio neto entre superficies interiores mediante el `Método ScriptF` (basado en Hottel y Sarofim), resolviendo el flujo en función de la diferencia de temperaturas a la cuarta potencia ($T_i^4 - T_j^4$).
- **Conducción ($q_{k,\text{int}}$):** Flujo calculado según se describe en la Sección 2.2.4.

2.2.5. Balance de calor en superficies transparentes

El modelado de los elementos vidriados constituye un aspecto crítico de la simulación debido a la preponderancia de la radiación solar. El enfoque metodológico empleado es el de balances de energía de nodos múltiples. Este método discretiza el sistema considerando la capacitancia térmica de cada capa material, resolviendo el balance energético en el centro de las capas de vidrio y en las cámaras de gas (ver Figura 2.6 [94]).

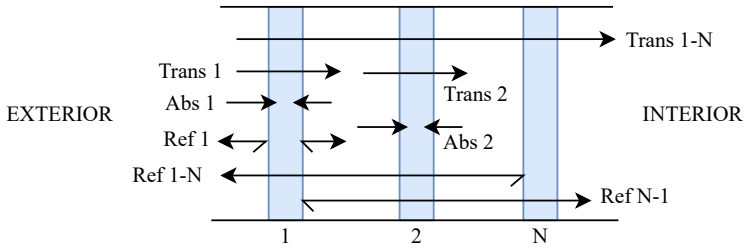


Figura 2.6: Esquema del balance de calor en elementos transparentes mediante el enfoque de nodos múltiples.

El modelo determina la distribución de la radiación solar incidente en transmisividad (τ), reflectividad (ρ) y absortividad (α) basándose en propiedades espectrales que varían dinámicamente según el ángulo de incidencia. La energía absorbida ($q_{\text{solar, abs}}$) se incorpora al balance nodal de cada capa, disipándose posteriormente mediante mecanismos térmicos convencionales:

$$q_{\text{cond, net}} + q_{\text{conv}} + q_{\text{lw, net}} + q_{\text{solar, abs}} = 0 \tag{2.8}$$

La resolución simultánea de este sistema permite determinar las dos métricas fundamentales de desempeño en régimen transitorio: la transferencia de calor conductiva-convectiva, asociada a la Resistencia Térmica (U) y el Coeficiente de Ganancia de Calor Solar ($SHGC$).

2.3. Principios de Optimización y Algoritmos de Búsqueda

La optimización computacional es la disciplina orientada a la determinación rigurosa de un vector de variables de decisión ($\mathbf{x}$) que minimice (o maximice) una función objetivo $f(\mathbf{x})$, sujeta a un conjunto de restricciones. Este proceso formaliza la búsqueda del óptimo global dentro de un espacio de soluciones factibles ($\mathbf{S}$).
La formulación matemática general de un problema de minimización se expresa como:

$$\begin{aligned} &\min_{\mathbf{x}} && f(\mathbf{x}) \\ &\text{sujeto a} && g_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \text{(desigualdad)} \\ & && h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad \text{(igualdad)} \end{aligned} \tag{2.9}$$

El núcleo del proceso reside en el algoritmo de búsqueda, el cual define la estrategia de exploración del espacio de soluciones. Estos se clasifican en dos categorías principales:

- **Métodos determinísticos (basados en gradiente):** Exigen que la función objetivo sea continua y diferenciable. Utilizan el cálculo del gradiente para descender iterativamente. Son eficientes en dominios convexos, pero tienden a estancarse en óptimos locales en problemas complejos.
- **Métodos estocásticos y metaheurísticos:** Constituyen la opción predilecta para problemas con funciones objetivo no convexas o "ruidosas", características típicas de las simulaciones BES. Estos algoritmos (como los Algoritmos Genéticos o la Optimización por Enjambre de Partículas) incorporan mecanismos probabilísticos para explorar el espacio globalmente y escapar de óptimos locales.

2.3.1. Algoritmo Genético (GA)

El GA (*Genetic Algorithm*) se consolida como uno de los pilares de la computación evolutiva en el campo de la optimización tanto mono-objetivo (MO) y multi-objetivo (MOO). Propuesto

originalmente por Deb et al. [87], su éxito reside en su notable capacidad para navegar espacios de búsqueda discontinuos, no convexos y altamente complejos, donde los métodos basados en el gradiente suelen presentar limitaciones críticas.
Algorítmo Genético GA es un método de optimización metaheurística que emulan la evolución biológica para hallar soluciones óptimas. A través de sucesivas generaciones, una población de individuos es sometida a procesos de selección, cruzamiento y mutación hasta alcanzar la convergencia en espacios de búsqueda complejos (Figura 2.7).

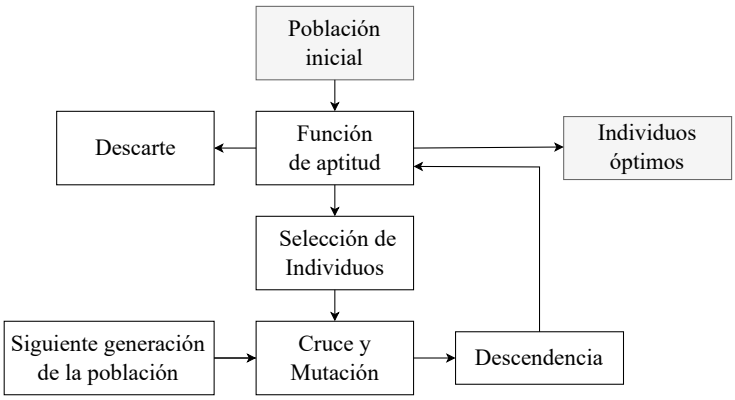


Figura 2.7: Diagrama de flujo del algoritmo GA.

El funcionamiento de un GA se fundamenta en la iteración de los siguientes elementos clave:

Población e individuos. Representan el conjunto de soluciones potenciales dentro del espacio de búsqueda. Cada individuo constituye un punto específico en dicho espacio y la población evoluciona colectivamente hacia regiones de mayor rendimiento.

Selección. Proceso estocástico que prioriza a los individuos con mejor fitness para actuar como progenitores. Esto asegura que las características ventajosas tengan una mayor probabilidad de transmitirse a la siguiente generación.

Cruzamiento y Mutación. El Cruzamiento (*Crossover*) combina la información genética de dos progenitores para generar descendencia, con el objetivo de converger hacia soluciones superiores. La Mutación (*Mutation*) introduce variaciones aleatorias en los individuos. Su función es garantizar la diversidad genética de la población evitando que el algoritmo quede atrapado en óptimos locales.

Evolución y Criterio de Parada. El ciclo de evaluación, selección y aplicación de operadores se repite a través de sucesivas generaciones hasta que se alcanza un criterio de convergencia o un número máximo de iteraciones.

2.4. Estrategia de Optimización Basada en Simulación (SBO)

La arquitectura metodológica central de esta tesis se fundamenta en el acople funcional y dinámico entre el motor de simulación térmica $E+$ y el algoritmo metaheurístico GA. Esta integración, denominada Optimización Basada en Simulación (SBO), se establece como el recurso indispensable para abordar la naturaleza no lineal y la alta dimensionalidad de los problemas termofísicos en la edificación. A diferencia de los métodos de diseño tradicionales, la SBO permite explorar

de forma automatizada miles de configuraciones posibles, identificando interdependencias entre variables que resultarían invisibles mediante un análisis convencional.
El flujo de trabajo se estructura en un ciclo iterativo de cuatro fases interconectadas:

1. **Codificación y generación de individuos:** El algoritmo GA inicializa una población de candidatos, donde cada individuo representa una combinación única de variables de decisión.

2. **Evaluación y ejecución del motor de cálculo:** Cada individuo es traducido automáticamente a un archivo de entrada de $E+$ (`.idf`). El motor $E+$ resuelve los balances térmicos dinámicos para cada configuración bajo las condiciones climáticas específicas, transformando los parámetros de diseño en una respuesta de desempeño físico medible.

3. **Extracción de indicadores y evaluación de objetivos:** Una vez finalizadas las simulaciones, se procesan los archivos de salida para extraer las métricas de desempeño. Estos indicadores actúan como las **función objetivo** que el GA utilizará para evaluar la aptitud de cada solución.

4. **Selección natural y evolución sistémica:** El GA clasifica la población. Los individuos con mejor desempeño tienen una mayor probabilidad de ser seleccionados para el proceso de cruce y mutación, generando una nueva generación de candidatos que heredan y combinan las características más eficientes.

Este ciclo se repite de manera iterativa hasta alcanzar un criterio de convergencia predefinido, momento en el cual el algoritmo devuelve un vector con las soluciones óptimas. Este enfoque garantiza que las soluciones no sean solo intuitivas, sino que posean una base de evidencia científica y una fidelidad termodinámica verificada.

2.4.1. Modelos inversos: Integración computacional para la calibración de modelos BES

La calibración de modelos energéticos se fundamenta en la resolución de un problema inverso. En este enfoque, las salidas del sistema (datos medidos del comportamiento real del edificio) son conocidas, mientras que los parámetros de entrada que generaron dicho comportamiento son inciertos o desconocidos. El objetivo es, por tanto, inferir el valor real de estos parámetros físicos y operativos para minimizar la discrepancia entre la realidad y la simulación.
Como se esquematiza en la Figura 2.8, el algoritmo GA asume el control del bucle de simulación, modificando sistemáticamente las variables inciertas hasta satisfacer los rigurosos criterios estadísticos exigidos por normativas internacionales.

2.4.2. Modelos directos: Integración computacional para el diseño óptimo de la envolvente

En contraposición al enfoque anterior, el diseño de la envolvente se aborda como un problema de optimización directo. Aquí, los parámetros de entrada (variables de diseño) son manipulados deliberadamente para encontrar la configuración que maximice o minimice las métricas de desempeño deseadas (objetivos).
Dada la complejidad combinatoria, la naturaleza no lineal de la transferencia de calor y el conflicto inherente entre mejorar el confort y reducir costos, el uso de métodos de búsqueda exhaustiva es inviable. Por ello, se implementa una estrategia basada en algoritmos genéticos (Figura 2.9), donde el GA explora inteligentemente el espacio de soluciones. El algoritmo evalúa el impacto termofísico de cada combinación en $E+$, convergiendo progresivamente hacia un Frente de Pareto que revela las mejores soluciones de compromiso.

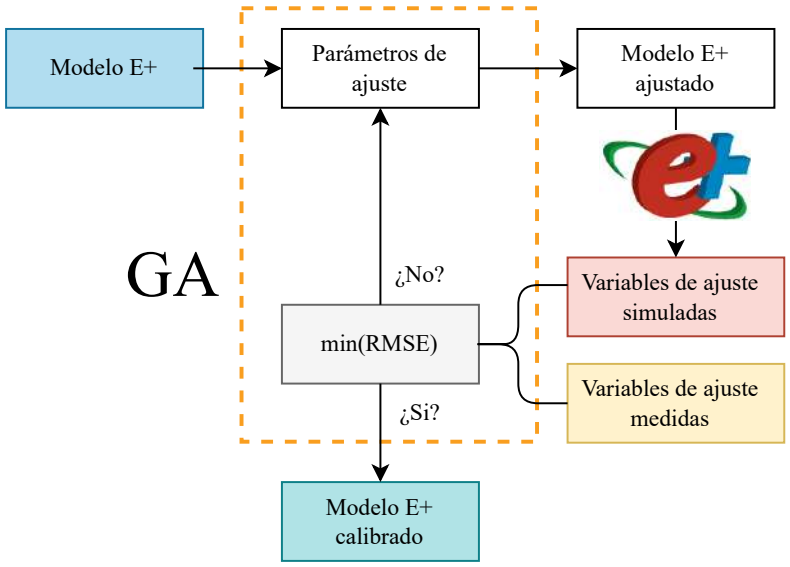


Figura 2.8: Esquema del modelo inverso aplicado a la calibración de modelos BES.

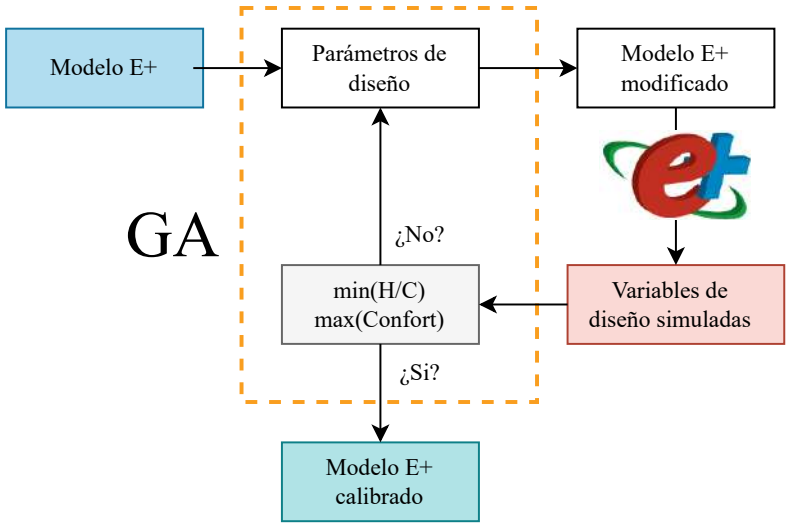


Figura 2.9: Esquema del modelo directo para el diseño óptimo de envolventes.

Parte III

CALIBRACIÓN DE ALTA FIDELIDAD

Capítulo 3

Introducción a la calibración de modelos BES

Tras haber definido los fundamentos termodinámicos y los algoritmos de optimización en el Capítulo previo, en este Capítulo se aborda la discrepancia inherente entre los modelos teóricos y el comportamiento operativo real de los edificios. Este capítulo se centra en la calibración de modelos BES como el proceso metodológico crítico para cerrar la denominada brecha de rendimiento (*performance gap*). A continuación, se examinan las fuentes de incertidumbre que comprometen la fidelidad de las simulaciones, se clasifican las metodologías de ajuste existentes en la literatura y se analizan las variables clave que definen una estrategia de calibración robusta y físicamente coherente. Finalmente, se analiza la relación entre las variables objetivo y los parámetros de ajuste reportados en la literatura reciente, sentando las bases para la propuesta metodológica de calibración multiobjetivo y escalonada que constituye el núcleo de este Módulo.

3.1. Incertidumbre en la simulación energética y la necesidad de la calibración

En el ámbito de la simulación térmica, la calibración se define como el proceso sistemático de ajuste de los parámetros de entrada de un modelo con el fin de minimizar las discrepancias entre los resultados predichos y los datos de rendimiento medidos en la edificación real [71; 76]. Más que un simple ajuste empírico, este procedimiento constituye una técnica avanzada de **modelado inverso** o inferencia. Su propósito fundamental es identificar y reducir la incertidumbre asociada a variables desconocidas o insuficientemente caracterizadas, transformando una representación teórica en un instrumento de diagnóstico preciso.

Al abordar la calibración desde esta perspectiva, garantizamos que el modelo no solo presente una coincidencia matemática o estadística con las mediciones, sino que represente con fidelidad la física del comportamiento térmico del edificio. Esta distinción es crítica: un modelo ajustado pero físicamente incoherente fallará al predecir el comportamiento bajo condiciones climáticas distintas al periodo de medición. Por el contrario, un modelo calibrado bajo principios de alta fidelidad resulta indispensable para asegurar la robustez de las predicciones durante la evaluación de futuras medidas de conservación de energía. En este sentido, la calibración se alinea con los lineamientos de protocolos internacionales de referencia, tales como el $IPMVP$ (*International Performance Measurement and Verification Protocol*) [158] y la normativa $ASHRAE\ 14$ (*ASHRAE Guideline 14: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*) [36].

Bajo este marco, la denominada brecha de rendimiento (*performance gap*) no deriva generalmente de deficiencias en los motores de simulación, sino de la incertidumbre inherente a los datos de entrada [187]. Estas fuentes de incertidumbre, que comprometen la integridad del modelo, se pueden categorizar en tres ejes determinantes: (1) Incertidumbre en la física de la envolvente, (2) Incertidumbre en los sistemas activos y $HVAC$, y (3) Incertidumbre en los perfiles de uso y ocupación.

3.1.1. Incertidumbre en la caracterización de la envolvente térmica

La precisión de un modelo computacional está intrínsecamente ligada a la calidad de sus datos de entrada. En el ámbito edilicio, la literatura científica identifica la caracterización de la física del edificio como una de las fuentes primordiales de incertidumbre. Diversas investigaciones señalan que, a pesar de la existencia de documentación técnica y estándares de proyecto, la realidad constructiva, la heterogeneidad en la ejecución de obra y la degradación cronológica de los materiales introducen desviaciones significativas respecto al desempeño teórico [287]. A partir de la revisión del estado del arte, se identifican tres ejes fundamentales donde la incertidumbre sistémica compromete la fidelidad de los modelos BES.

Dinámica de la infiltración y hermeticidad edilicia. La infiltración de aire se reconoce como una de las fuentes de error más críticas en la simulación energética. Según los hallazgos de Lozinsky et al. [196] y Gutiérrez González et al. [138], este fenómeno puede impactar hasta en un 45 % la demanda de calefacción. Ji et al. [161] aclaran que, si bien la práctica convencional suele simplificarla como una tasa constante, se trata de un proceso dinámico condicionado por las fluctuaciones ambientales. Para mitigar los sesgos advertidos por Tomrukcu et al. [287], autores como Bastos Porsani et al. [48] y Martínez-Mariño et al. [207] recalcan la necesidad de realizar validaciones *in-situ*, tales como el uso de gas trazador o el *Blower Door Test*. Por otro lado, Chong et al. [71] advierten sobre el riesgo de la **equifinalidad** al utilizar la infiltración como un simple parámetro de ajuste numérico; un modelo puede alcanzar una coincidencia estadística en la temperatura pero carecer de validez física interna, lo cual invalida su capacidad para evaluar medidas de ahorro de forma fiable [196].

Inercia térmica y propiedades termofísicas dinámicas. La masa térmica es citada por Giuliani et al. [130] como el factor determinante en la amortiguación de la temperatura interior. Mantesi et al. [202] demuestran que una representación inadecuada de la masa térmica puede derivar en divergencias predictivas de hasta el 26 %. Al respecto, Johra et al. [164] subrayan cómo esta propiedad dicta la capacidad de almacenamiento de energía y la dinámica térmica de los espacios. Para reducir esta brecha, Gutiérrez González et al. [138] proponen la capacitancia térmica como una variable de ajuste crucial, mientras que Bastos Porsani et al. [48] sugieren el empleo de modelos de múltiples capacitores para separar la masa del aire de la de los materiales. Finalmente, la calibración en régimen de **flotación libre** (FF) es defendida por Ruiz et al. [265] como una estrategia para aislar la física de la envolvente de las incertidumbres del $HVAC$. Este enfoque, validado por Cipriano et al. [75] y Baba et al. [39], facilita el ajuste de la conductividad (k) y el calor específico (C_p), garantizando una comprensión profunda del comportamiento real del edificio.

Resistencia térmica efectiva y puentes térmicos. La discrepancia entre la resistencia térmica (R) teórica y la efectiva es una problemática recurrente señalada por Ji et al. [161], derivada de la diferencia entre las librerías de los softwares y el rendimiento de los materiales reales. A esto se suma el deterioro cronológico de los componentes explicado por Tomrukcu et al. [287]. Para abordar técnicamente esta desviación, Guyot et al. [139] justifican el procedimiento de modificar la conductividad (k) del material aislante para obtener un valor de transmitancia ajustado que integre el impacto de los puentes térmicos. Esta estrategia de compensación es considerada fundamental por Ramos Ruiz et al. [265] cuando existen deficiencias en la colocación del aislamiento o puentes térmicos no declarados, obligando al ajuste de la conductividad (k) y la densidad (ρ) en el modelo computacional.

3.1.2. Incertidumbre en los sistemas activos de climatización (HVAC)

Complementariamente a la física de la envolvente, la literatura especializada identifica a los sistemas de acondicionamiento térmico como una fuente de incertidumbre sistémica de alta sensibilidad. La recurrente falta de datos empíricos sobre el rendimiento operativo real, frente a las especificaciones de diseño teóricas, obliga a tratar los parámetros de los sistemas mecánicos como variables estocásticas críticas dentro de los protocolos de modelado inverso.

Rendimiento operativo y degradación de componentes. En el ámbito de la simulación, se reconoce que el rendimiento de los sistemas $HVAC$ presenta desviaciones sistemáticas respecto a los valores nominales, traccionadas por factores como la operación a carga parcial, el mantenimiento deficiente o la implementación de estrategias de control subóptimas. Al respecto, Yin et al. [312] subrayan la imperatividad de derivar las curvas de rendimiento de componentes críticos —tales como ventiladores o enfriadoras— a partir de datos monitorizados en campo. Esta necesidad surge debido a que las especificaciones de catálogo rara vez logran capturar la respuesta real del sistema ante condiciones de operación dinámicas y variables.

Ajuste de curvas de eficiencia y capacidad nominal. La calibración de sistemas con alta complejidad técnica exige un ajuste pormenorizado a nivel de componente para reflejar la eficiencia operativa real. En este sentido, Pachano et al. [233–235] han validado metodologías de calibración secuencial o multi-etapa para sistemas de bomba de calor y flujo de refrigerante variable. Sus investigaciones demuestran que el ajuste de la capacidad nominal y de las curvas de desempeño dependientes de la temperatura resulta fundamental para reducir la brecha de rendimiento entre los modelos BES y la mediciones en campo. Este procedimiento asegura que el modelo computacional logre una replicación fiel de la respuesta térmica del sistema ante las fluctuaciones de la demanda climática regional.

Integridad del modelo para el diagnóstico de anomalías. En investigaciones orientadas a la gestión inteligente de edificios, la calibración detallada se postula como un requisito previo indispensable para una Detección y Diagnóstico de Fallas efectiva. Según demuestran Palaic et al. [236] y Li et al. [183], la integración de parámetros de ajuste que contemplen la degradación progresiva de la eficiencia en intercambiadores de calor y ventiladores permite que el modelo virtual actúe como una referencia robusta. Este enfoque de alta fidelidad facilita la identificación de errores operativos específicos, tales como sensores descalibrados, válvulas bloqueadas o desvíos en el consumo energético que los modelos simplificados son incapaces de detectar.

3.1.3. Incertidumbre en los patrones de ocupación y uso

El comportamiento de los ocupantes y los protocolos operativos representan, según el consenso de la literatura, la fuente de incertidumbre más significativa y de carácter estocástico en la simulación energética. Dada la alta variabilidad inherente al factor humano, los horarios de operación y la cuantificación de las cargas internas se posicionan como los parámetros de ajuste más recurrentes en las investigaciones sobre modelado inverso.

Horarios de ocupación y perfiles de carga. La utilización de perfiles de ocupación estandarizados, como los propuestos por $ASHRAE\ 55$ o la normativa $ISO\ 52000$, suele considerarse insuficiente para capturar la naturaleza aleatoria del comportamiento humano. Al respecto, Chong et al. [71] señalan que estos horarios normativos difieren sustancialmente de los perfiles de diversidad reales, lo que deriva en predicciones cuya validez física resulta cuestionable. En términos de precisión térmica, O'Donovan et al. [229] demostraron que el empleo de los horarios de $ASHRAE\ 55$ tiende a sobreestimar la temperatura interior, reportando discrepancias en el error que pueden superar los $2.0\,^{\circ}\mathrm{C}$. Asimismo, Paliouras et al. [237] observaron que las simulaciones basadas en perfiles teóricos subestiman sistemáticamente las temperaturas pico debido a la falta de resolución en los niveles de actividad real. Para mitigar estas desviaciones, la integración de datos capturados *in-situ* permite mejorar drásticamente la fiabilidad del modelo. Arbulu et al. [23] reportaron una mejora del $67\,\%$ en la precisión de la temperatura interior al implementar clústeres de comportamiento real, mientras que Peinturier et al. [241] advierten que la satisfacción de los umbrales de validación de la Guía 14 de $ASHRAE\ 14$ ($CV(RMSE) < 15\,\%$ y $NMBE < 5\,\%$) solo es alcanzable cuando se incorporan perfiles observados. En escenarios de alta complejidad, Kim et al. [172] lograron reducir errores horarios del $120\,\%$ a rangos aceptables mediante la derivación de horarios basados en datos de consumo eléctrico medidos.

Interacción con la ventilación natural. En edificaciones que dependen de la ventilación natural, el comportamiento de los usuarios se identifica como el factor determinante que limita la precisión de las predicciones térmicas. O'Donovan et al. [229] señalan que la regulación del confort mediante la apertura de ventanas ejerce una influencia dominante en la temperatura interna, especialmente en edificios de energía cero. Para capturar esta variabilidad, la literatura propone dos enfoques principales: el uso de registros empíricos detallados [130; 139] o el empleo de modelos probabilísticos basados en algoritmos adaptativos que emulan la interacción humana en función del confort percibido [71; 229]. La relevancia de estos ajustes radica en su capacidad para evitar sesgos críticos en el balance energético global.

Uso de equipos e iluminación. Finalmente, se reconoce que la densidad de potencia de equipos e iluminación presenta una variabilidad drástica respecto a las especificaciones originales de diseño. La investigación contemporánea subraya la necesidad de implementar estrategias de medición segregada (*sub-metering*); según demuestran Peinturier et al. [241], el uso de datos de alta resolución permite reducir el $CV(RMSE)$ a niveles del $6.4\,\%$. Ante la ausencia de medidores

específicos, trabajos como el de Chong et al. [71] validan el uso de indicadores indirectos, como los datos de conexión WiFi, como un método eficaz para estimar la carga de periféricos.

3.2. Metodología de calibración y validación estadística

Desde una perspectiva metodológica, el proceso de calibración se articula como una secuencia lógica de etapas orientadas a la reducción sistemática del error. La literatura científica propone un flujo de trabajo estructurado en cuatro fases fundamentales:

1. **Recolección y auditoría de datos:** Caracterización exhaustiva de la incertidumbre física, operativa y de los sistemas activos del edificio.
2. **Análisis de sensibilidad:** Identificación y selección de los parámetros de ajuste que ejercen un impacto dominante en los indicadores de desempeño.
3. **Ejecución del bucle de calibración:** Implementación de técnicas de modelado inverso que oscilan desde ajustes manuales iterativos hasta procesos de optimización automatizada (SBO) o inferencia bayesiana.
4. **Validación estadística:** Evaluación de la fiabilidad del modelo mediante el cumplimiento de los criterios de aceptación establecidos por estándares internacionales como la normativa $ASHRAE\ 14$ o el protocolo $IPMVP$.

La disciplina ha experimentado una evolución significativa, transitando desde enfoques manuales basados en el juicio del experto hacia métodos automatizados de carácter probabilístico. En este sentido, trabajos de revisión exhaustivos como los presentados por Coakley et al. [76] y Chong et al. [71] permiten clasificar las metodologías contemporáneas en tres categorías principales: técnicas manuales basadas en evidencia, procesos de optimización automatizada y enfoques híbridos basados en la ciencia de datos.
Como se ilustra en la Figura 3.1, la metodología que predomina en la investigación actual es la optimización algorítmica automatizada. El uso extensivo de metaheurísticas responde a la complejidad no lineal y multidimensional del balance térmico edilicio. No obstante, se observa una tendencia emergente hacia el aprendizaje automático (*Machine Learning*) y la calibración bayesiana, orientada al desarrollo de gemelos digitales capaces de cuantificar explícitamente la incertidumbre residual del modelo.

Optimización multiobjetivo mediante algoritmos genéticos. La implementación de GA se ha consolidado en la última década como una herramienta de alta robustez para abordar el problema

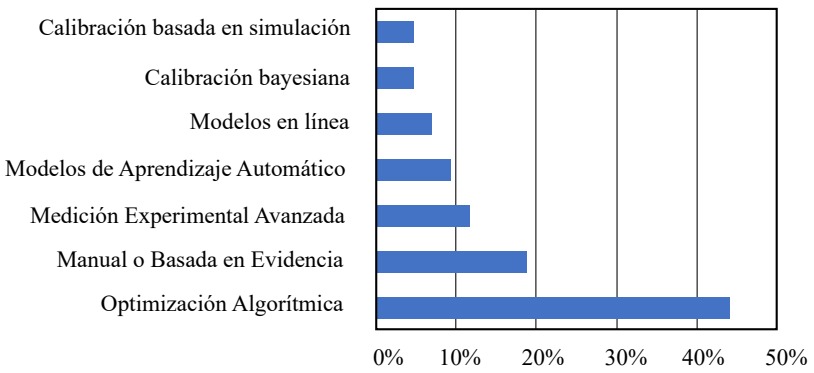


Figura 3.1: Clasificación de las metodologías de calibración desarrolladas en la literatura científica.

de la calibración. En este ámbito, autores pioneros como Wright et al. [299] y las contribuciones posteriores de Ascione et al. [27; 29] sentaron las bases metodológicas al emplear estos algoritmos para equilibrar objetivos contrapuestos, como el ahorro energético y el confort térmico. Por su parte, investigaciones desarrolladas por Ruiz et al. [265] han validado la precisión de estas técnicas para capturar la dinámica térmica compleja de la envolvente. Asimismo, trabajos como los de Baba et al. [39] demuestran la eficacia del GA en la gestión de la calibración simultánea de múltiples zonas térmicas, mientras que Palaic et al. [236] destacan su capacidad para optimizar el rendimiento operativo en entornos de gestión inteligente de edificios. Esta capacidad de procesar grandes espacios de búsqueda sin requerir la derivabilidad de la función objetivo posiciona a los Algoritmos Genéticos como el eje motor de la calibración automatizada en la actualidad.

3.3. Variables de calibración

A partir del análisis de las variables de calibración reportadas en la literatura (Figura 3.2), se observa una dicotomía metodológica clara. Mientras que un grupo de estudios se centra exclusivamente en el ajuste de los perfiles de consumo, la tendencia en la investigación busca una mayor robustez técnica combinando dichos datos con mediciones ambientales *in-situ*. En escenarios específicos de Régimen de Flotación Libre (*Free-floating*) (FF), la literatura coincide en prescindir del consumo energético para priorizar el ajuste de la temperatura y la humedad como indicadores de fidelidad física.

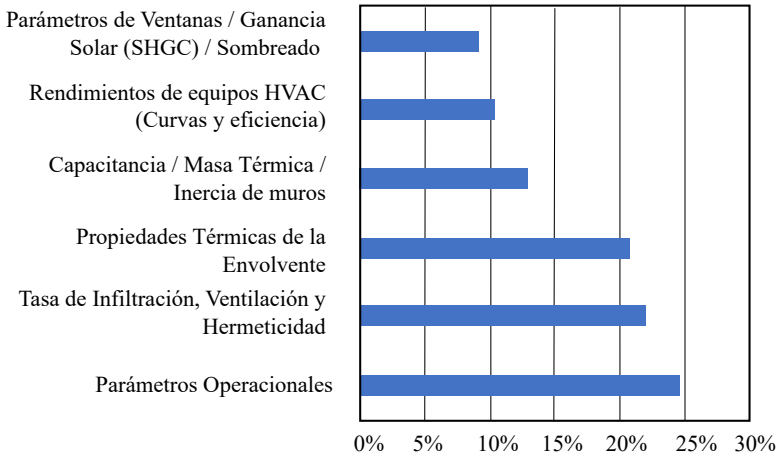


Figura 3.2: Clasificación de las variables de calibración empleadas en los estudios revisados según su naturaleza física y operativa.

Temperatura del aire interior. La temperatura del aire (T_{aire}) constituye el pilar fundamental para verificar la precisión física de un modelo, permitiendo capturar dinámicas complejas como la inercia térmica de los cerramientos y el impacto de las tasas de infiltración. En este contexto, autores como O'Donovan et al. [229] y Guyot et al. [139] subrayan que la calibración basada en datos de alta resolución temporal (horaria o sub-horaria) resulta imperativa. Esta relevancia se acentúa en edificaciones que operan de forma pasiva, donde la T_{aire} se identifica como la única variable capaz de validar si el modelo computacional refleja fielmente las fluctuaciones térmicas naturales del recinto [270].

Consumo de energía y demanda térmica. El análisis del consumo energético permanece como la métrica dominante para evaluar la viabilidad de las medidas de conservación de energía. En esta línea, Pachano et al. [234] sostienen que la calibración del consumo eléctrico a nivel horario

constituye la estrategia más robusta para cerrar la brecha de rendimiento en edificios con sistemas activos. Asimismo, la integración de técnicas de inteligencia artificial para la predicción de cargas térmicas, siguiendo los desarrollos de Fouladfar et al. [121] y Afzal et al. [3], en conjunto con el uso de infraestructura de medición inteligente, permite una optimización operativa avanzada a través de gemelos digitales, como lo demuestran Peinturier et al. [241].

Infiltración, calidad de aire y balance higrotérmico. Para asegurar la coherencia física de los flujos de masa, las investigaciones más recientes sugieren someter al modelo a una validación multifactorial. Bastos Porsani et al. [48] proponen una triple validación que integre simultáneamente energía, temperatura y concentraciones de CO_2, advirtiendo que un ajuste basado únicamente en la temperatura puede enmascarar tasas de infiltración físicamente irreales. Paralelamente, en climas húmedos o entornos con alta higroscopicidad, el monitoreo de la humedad relativa (HR) y el estudio del amortiguamiento higrotérmico de los materiales resultan factores críticos para garantizar la exactitud de la simulación [50; 207].

Desempeño de sistemas y equipos. Finalmente, la calibración detallada de los subsistemas mecánicos es vital para el despliegue de estrategias de control avanzado. Yin et al. [312] resaltan la importancia de ajustar las curvas de rendimiento específicas de enfriadores y bombas de calor para asegurar que el modelo responda con precisión ante eventos dinámicos. Esta rigurosidad técnica permite, tal como demuestran Palaic et al. [236] y Li et al. [183], utilizar los modelos calibrados para la detección de anomalías en unidades terminales mediante el análisis detallado de los residuos entre la simulación y las mediciones de campo.

3.4. Parámetros de ajuste

La selección estratégica de los parámetros de entrada se encuentra estrictamente subordinada a la naturaleza de la variable objetivo definida para el proceso de calibración (Figura 3.3). A partir de la revisión, se identifican dos enfoques metodológicos: 1) estrategias orientadas a la minimización de discrepancias en el consumo energético, donde se priorizan los cronogramas operativos y la eficiencia de los sistemas activos; y 2) estrategias destinadas a replicar la dinámica térmica intrínseca, donde el foco se desplaza hacia las propiedades termofísicas de la envolvente, las tasas de infiltración y la inercia de la masa térmica.

Parámetros operacionales y perfiles de uso. La conducta del usuario se reconoce como el elemento más disruptivo en la precisión del modelado energético. Las investigaciones desarrolladas

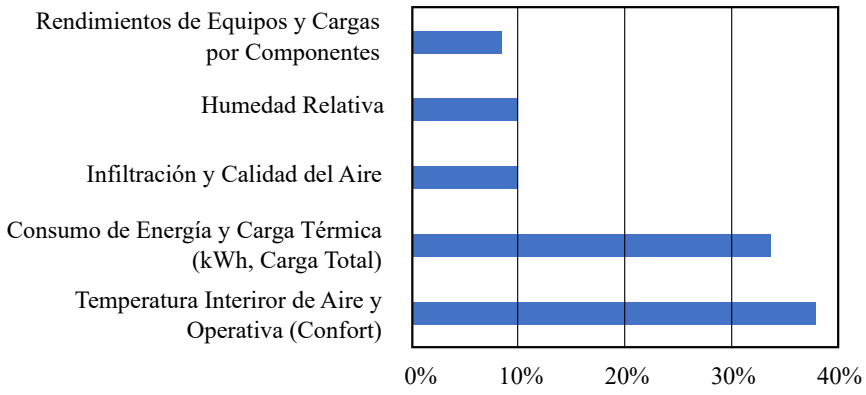


Figura 3.3: Jerarquía y frecuencia de uso de los parámetros de calibración identificados en la literatura técnica.

por Kim et al. [172] y Chong et al. [71] evidencian que la derivación de horarios de ocupación a partir de datos monitorizados permite reducir el indicador $CV(RMSE)$ de manera sustancial. Complementariamente, Allesina et al. [11] subrayan la necesidad de calibrar las temperaturas de consigna reales, dado que la imprevisibilidad del comportamiento humano invalida frecuentemente las asunciones de diseño iniciales.

Infiltración, ventilación y hermeticidad edilicia. Este componente constituye el parámetro de mayor sensibilidad y complejidad en la modelización térmica. Lozinsky et al. [196] señalan que la infiltración puede representar hasta el $45\,\%$ de la demanda de calefacción en climas templados y fríos. Asimismo, el consenso entre diversos autores [48; 161] sugiere que el empleo de tasas medidas empíricamente, en contraposición al uso de valores teóricos normativos, permite mejorar drásticamente la capacidad predictiva del modelo frente a las variaciones de presión y temperatura exterior.

Propiedades termofísicas de la envolvente y masa térmica. Se asume que los valores de transmitancia térmica teóricos suelen diferir de la realidad operativa debido a procesos de degradación material o errores en la fase de ejecución. Al respecto, Bayomi et al. [49] sostienen que las mediciones *in-situ* del valor U resultan vitales para capturar el estado patológico o de envejecimiento actual del edificio. Paralelamente, autores como Giuliani et al. [130], Gutiérrez González et al. [137] y Murphy et al. [224] enfatizan la necesidad de calibrar la masa térmica efectiva para evitar la sobreestimación del potencial de ahorro asociado a estrategias de climatización pasiva.

Sistemas HVAC, propiedades ópticas y ganancia solar. La caracterización de los sistemas de acondicionamiento térmico permite diagnósticos avanzados de eficiencia; Yin et al. [312] y Pachano et al. [235] destacan que el empleo de curvas de rendimiento reales es fundamental para modelos con resolución horaria. Por otro lado, los parámetros ópticos de las superficies vidriadas determinan la magnitud del balance térmico diario. Autores como Kunwar et al. [179] y Ruiz et al. [265] subrayan que tanto el $SHGC$ como la eficacia del sombreado dinámico resultan críticos para capturar las oscilaciones térmicas extremas provocadas por la radiación incidente.

3.4.1. Interdependencia entre variables de desempeño y parámetros de ajuste

Al realizar el cruce analítico entre las variables de calibración y los parámetros de ajuste (Figura 3.4), emerge un patrón metodológico que define la jerarquía del modelado inverso: la selección de parámetros responde estrictamente a la sensibilidad específica de la variable objetivo perseguida.

En lo que respecta a la caracterización de la envolvente, se observa que los esfuerzos de la literatura suelen concentrarse en el ajuste de parámetros constitutivos de la masa térmica, tales como la densidad (ρ), el calor específico (C_p) y la tasa de infiltración (C_{inf}), particularmente bajo condiciones de flotación libre (FF). No obstante, este enfoque a menudo omite variables superficiales que resultan determinantes en el balance radiativo y convectivo, como la absortividad térmica (α_T), la absortividad solar (α_S) y los coeficientes de transferencia superficial interior (h_{int}) y exterior (h_{ext}).

Esta limitación metodológica sugiere que validar la integridad de un modelo exclusivamente a través de la temperatura del aire (T_{aire}), omitiendo el comportamiento de las temperaturas superficiales (T_{sup}), representa una oportunidad de mejora crítica. La inclusión de estas variables superficiales en el bucle de optimización permitiría alcanzar una fidelidad física superior, garantizando que el modelo no solo replique la tendencia térmica del ambiente, sino que capture con precisión los flujos de calor que atraviesan la envolvente edilicia.

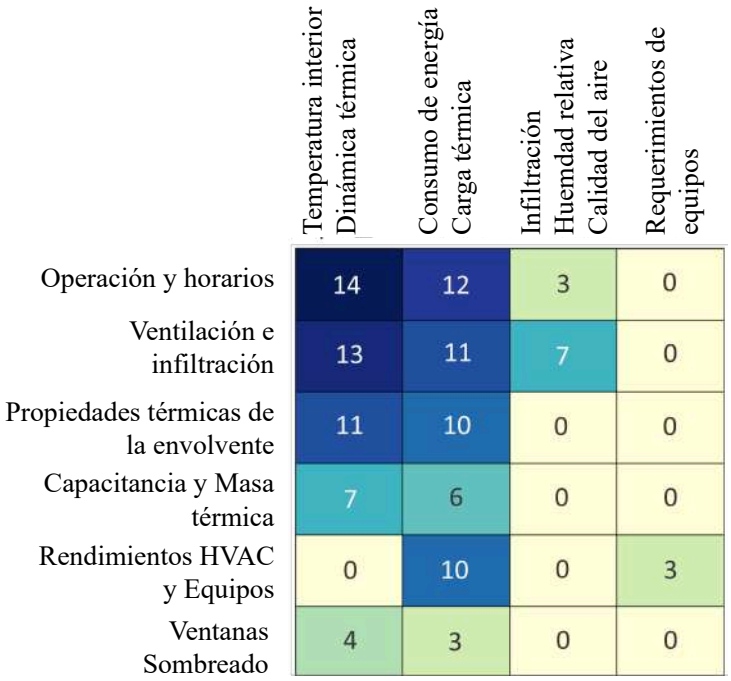


Figura 3.4: Matriz de relación entre los parámetros de ajuste y las variables de desempeño térmico en la literatura técnica.

3.5. Métricas de evaluación y criterios de validación estadística

La evaluación de la fiabilidad de un modelo energético constituye un procedimiento estandarizado cuya finalidad es determinar, bajo criterios estadísticos, si la simulación representa con suficiente fidelidad la realidad física y operativa del edificio. En la literatura técnica, las métricas de desempeño se categorizan según su capacidad para capturar el sesgo, la dispersión o la correlación de los resultados.

Dentro de los protocolos internacionales de medida y verificación, el $NMBE$ y el $CV(RMSE)$ se consolidan como los indicadores fundamentales. El $NMBE$ permite evaluar el sesgo global del modelo, donde valores negativos sugieren una sobreestimación y valores positivos una subestimación de la variable analizada. No obstante, diversas investigaciones advierten sobre el denominado efecto de cancelación, en el cual errores de signo opuesto se compensan mutuamente, arrojando un sesgo global bajo que puede ocultar deficiencias locales severas. Por consiguiente, se establece que el $NMBE$ nunca debe emplearse como métrica de validación única.

Complementariamente, el $CV(RMSE)$ cuantifica la precisión y la variabilidad de los residuos, reflejando la capacidad del modelo para seguir la morfología de la curva de carga o de temperatura. Al elevar los errores al cuadrado, esta métrica elimina el efecto de cancelación, proporcionando una medida de la incertidumbre global de la predicción.

A pesar de que estos indicadores fueron concebidos originalmente para el análisis del consumo energético, la literatura contemporánea sostiene que para la validación de temperaturas interiores, el MAE y el $RMSE$ resultan indicadores más robustos desde una perspectiva termofísica. El MAE proporciona la magnitud física del error promedio expresada en grados Celsius (°C); en este sentido, un modelo de alta fidelidad debe aspirar a un $MAE \leq 1\,°\text{C}$. Por su parte, el $RMSE$ penaliza con mayor rigor las desviaciones de gran magnitud, lo cual resulta crítico para la detección de picos de sobrecalentamiento y el estudio del confort térmico. Asimismo, se emplea el R^2

para cuantificar la proporción de la varianza explicada por el modelo, recomendándose valores superiores a 0.75 para considerar una correlación satisfactoria.
Las métricas y los umbrales de aceptación se encuentran detallados en la Tabla 3.1 a continuación.

Tabla 3.1: Métricas estadísticas y criterios de aceptación para la validación de modelos en resolución horaria.

Métrica	**Ecuación**	**Límite**
$NMBE$	$\text{NMBE} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)}{(n-p)\cdot\bar{y}} \times 100$	$\pm 10\,\%$
$CV(RMSE)$	$\text{CV(RMSE)} = \frac{1}{\bar{y}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}} \times 100$	$30\,\%$
R^2	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}$	> 0.75
$RMSE$	$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$	Minimización (°C)
MAE	$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\lvert y_i - \hat{y}_i\rvert}{n}$	Minimización (°C)

3.6. Conclusiones de la revisión del estado del arte: Hacia un cambio de paradigma en la calibración

La revisión exhaustiva de la literatura técnica permite concluir que la calibración de modelos BES ha experimentado una transición significativa, evolucionando desde un enfoque artesanal basado en el juicio del experto hacia una disciplina científica sustentada en la optimización automatizada. No obstante, este notable avance en la reducción de la incertidumbre estadística, particularmente en factores estocásticos como la ocupación, ha ocultado una vulnerabilidad crítica en la disciplina: el fenómeno de la **equifinalidad**.
A partir del análisis crítico de los trabajos revisados, se detecta que los modelos contemporáneos, aun cumpliendo con los umbrales de aceptación de la normativa $ASHRAE\ 14$ o el protocolo $IPMVP$, operan frecuentemente bajo una paradoja de validez matemática desprovista de integridad física. Al concentrar el esfuerzo de ajuste en parámetros constitutivos básicos (k, ρ, C_p) y validar los resultados exclusivamente contra la temperatura del aire (T_{aire}), se induce involuntariamente a un error de compensación térmica. Bajo este escenario, existe el riesgo latente de que el modelo compense una caracterización deficiente de los fenómenos superficiales o radiativos mediante la alteración artificial de la inercia térmica interna.
Esta omisión de las variables superficiales genera lo que podemos definir como una falsa precisión. Si un modelo subestima sistemáticamente el flujo por radiación solar o el intercambio convectivo, los algoritmos de optimización tenderán a forzar valores de transmitancia o de masa térmica físicamente irreales para lograr el ajuste de la curva de T_{aire}. En consecuencia, es imperativo un cambio de paradigma en el modelado inverso que contemple los siguientes ejes de desarrollo:

- **Desacoplamiento de fenómenos térmicos:** Es necesario separar el balance de energía superficial de los procesos de transferencia transitoria interna para evitar compensaciones entre variables.
- **Implementación de validación multifactorial de alta fidelidad:** Resulta indispensable integrar las temperaturas superficiales (T_{sup}) como variables objetivo obligatorias para la integridad termodinámica de la envolvente.

- **Reducción inteligente del espacio de búsqueda:** Se propone la subdivisión lógica del problema de optimización mediante enfoques multiobjetivo secuenciales, permitiendo que cada parámetro se ajuste en función del fenómeno físico que realmente domina.

Este marco de deficiencias y oportunidades constituye el punto de partida para la **Metodología de Calibración de Alta Fidelidad** que se desarrolla en los capítulos subsiguientes de esta investigación.

3.7. Objetivos y aportes del Módulo II

El presente módulo constituye el núcleo experimental de esta investigación, donde se materializa la transición desde la teoría del modelado inverso hacia una aplicación metodológica de alta fidelidad. Tras identificar las limitaciones de los enfoques convencionales, orientamos este bloque hacia la resolución de la problemática entre el ajuste numérico y la realidad física de la edificación.

3.7.1. Objetivo General

El propósito de este Módulo es desarrollar y validar un marco metodológico robusto para la creación de simulaciones térmicas de alta fidelidad física. Para ello, proponemos un esquema basado en la optimización utilizando GA y la calibración secuencial por etapas, con el fin de garantizar que el modelo resultante posea una integridad termodinámica superior al ajuste estadístico tradicional.

3.7.2. Objetivos Específicos

Para alcanzar la meta general propuesta, estructuramos el desarrollo en tres ejes de acción específicos:

1. **Ampliación del espacio de decisión mediante parámetros de frontera:** Nos proponemos integrar la absortividad solar (α_S) y térmica (α_T), y los coeficientes de transferencia superficial interior (h_{int}) y exterior (h_{ext}) como variables de calibración. El objetivo es incorporar estos parámetros, frecuentemente omitidos en la literatura, para evaluar su influencia en la precisión de los modelos y determinar la necesidad de su inclusión.

2. **Implementación de una validación multifactorial de alta resolución:** Buscamos validar la capacidad predictiva del modelo considerando de forma simultánea la temperatura del aire (T_{aire}) y las temperaturas superficiales (T_{sup}) de los nodos internos y externos, y analizar el nivel de precisión en la caracterización térmica de la envolvente.

3. **Diseño y validación de un protocolo de calibración secuencial (*Step-wise Calibration*):** Pretendemos estructurar un procedimiento que desacople lógicamente las variables de inercia térmica de aquellas vinculadas a la infiltración y a los sistemas activos. Mediante la subdivisión del proceso en sub-etapas bajo condiciones de flotación libre (FF), buscamos aislar la caracterización de la envolvente opaca, reduciendo drásticamente el riesgo de equifinalidad y compensaciones erróneas entre variables.

Para cumplir con los objetivos planteados, en este Módulo se estudian dos casos concretos.

Edificio MEVIR. En primer lugar, para responder a los **Objetivos 1 y 2**, se analiza una vivienda rural ubicada en Sauce, Uruguay, la cual fue monitoreada durante un periodo de 3 semanas mediante dos sensores de temperatura de aire (T_{aire}), sensores de superficie en piso (T^{int}_{piso}), pared interior (T^{int}_{muro}), y techo (T^{int}_{techo} y T^{ext}_{techo}), y el ensayo *Blower Door Test* para la permeabilidad de la envolvente (Q_{inf}). A partir de estos datos, se ajustan parámetros convencionales de calibración

(ρ, k, R_{aire}, C_{inf}, D_{vidrio} y ρ_{suelo}), y se incorporan los coeficientes convectivos interior (h_{int}) y exterior (h_{ext}), junto con la absortividad solar (α_S) y térmica (α_T) de las superficies.

Edificio Sofia. Posteriormente, para cumplir con el **Objetivo 3**, se analiza un edificio test, ubicado en Bulgaria. La particularidad de este caso radica en su exhaustivo sistema de monitoreo, el cual registra la temperatura del aire (T_{aire}) y de todas las superficies de la envolvente (T_{sup}^{int} y T_{sup}^{ext}), durante un año completo. Con este edificio se evalúa una metodología de calibración por pasos que desacopla la relación entre variables mediante la subdivisión del problema: (1) Paso 1: Caracterización de la envolvente opaca y, (2) Paso 2: Calibración integrada. En el Paso 1 se analiza cada elemento de la envolvente individualmente mediante una calibración MO. En esta etapa se calibran las resistencias térmicas (R_{aire}), densidades de los materiales (ρ), coeficientes convectivos exteriores (h_{ext}), absortividad solar (α_S) y térmica (α_T) de las superficies exteriores y la reflectividad del suelo (ρ_{suelo}). Con estos parámetros definidos, se pasa al Paso 2, en donde se ajustan variables como la superficie de infiltración de aire (A_{inf}), el coeficiente de suciedad del vidrio (D_{vidrio}), las propiedades de los materiales del piso (ρ_{LHA}) y los coeficientes convectivos interiores (h_{int}). Esta metodología se aplica a los meses de febrero, junio, agosto y noviembre, y se contrasta con otros tres enfoques: (1) Enfoque Clásico MOO, (2) Enfoque Detallado MOO y (3) Enfoque Global MOO. Los resultados se comparan de manera directa y cruzada, y se valida en periodos no usados en la calibración. El objetivo es analizar la robustez de la metodología propuesta en la caracterización de la envolvente y su replicabilidad anual, verificando si es posible obtener resultados precisos a partir de periodos cortos de monitoreo.

Capítulo 4

Caso de aplicación I: Edificio MEVIR

Este Capítulo aborda la comparación entre un esquema convencional de calibración mono-objetivo (MO) —centrado únicamente en el ajuste de la temperatura del aire (T_{aire})- y la implementación de una metodología de calibración con un enfoque multi-objetivo (MOO), que ajusta simultáneamente la temperatura del aire (T_{aire}) y las temperaturas superficiales (T_{sup}). En el primer enfoque, la calibración se realiza mediante parámetros clásicos de literatura como conductividad, densidad, resistencias térmicas, propiedades de los vidrios y caudales de infiltración. En el enfoque MOO se amplía el vector de parámetros de calibración para incluir coeficientes convectivos y propiedades ópticas de la envolvente. Para ello se utiliza como caso una vivienda rural (MEVIR) construida en Sauce, Uruguay. Los resultados demuestran que el enfoque MOO y la diversificación de los parámetros de calibración resultan imperativos para alcanzar una caracterización térmica fidedigna de la envolvente.

4.1. Caracterización del caso de estudio: Edificio MEVIR

4.1.1. Configuración arquitectónica y caracterización de la envolvente

La unidad experimental consiste en una vivienda unifamiliar aislada, representativa de las tipologías residenciales de contexto rural. El prototipo se encuentra emplazado en la localidad de Sauce, Uruguay (34°39′27.5″S 56°03′45.1″W), con su fachada principal orientada con un azimut de 27° hacia el Noroeste (Figura 4.1). Funcionalmente, la vivienda se estructura a partir de un área social integrada (estar-comedor-cocina), tres dormitorios y un núcleo sanitario central, conformando una volumetría compacta que favorece la eficiencia térmica (Figura 4.2).



Figura 4.1: Ubicación del Edificio MEVIR.

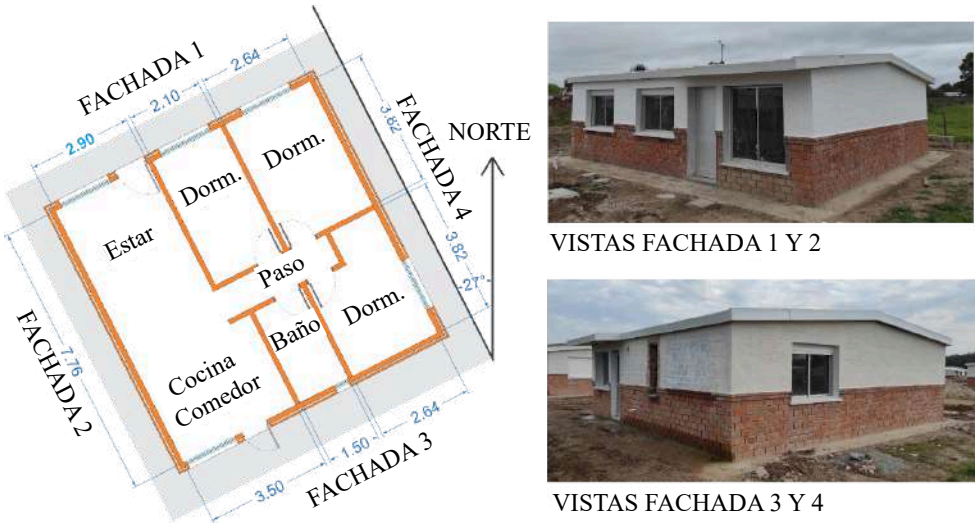


Figura 4.2: Arquitectura del Edificio MEVIR.

La caracterización de la envolvente opaca (Figura 4.3) se basa en sistemas constructivos tradicionales mediante la integración de aislamiento térmico intermedio. La composición de los elementos principales se detalla a continuación:

- **Muros Exteriores:** Cerramiento de mampostería doble con un espesor total de 0.22 m. La configuración, dispuesta desde la cara interior a la exterior, consiste en un muro de LCM (0.12 m), una barrera térmica de EPS (0.03 m), una cámara de aire (CA, 0.01 m) y mampostería exterior de LCM (0.055 m).
- **Cubierta:** Estructura a dos aguas resuelta mediante paneles tipo sándwich. Estos elementos

están conformados por una doble lámina de acero prepintado blanco que confina un núcleo aislante de EPS de alta densidad con un espesor de 0.15 m.

- **Piso:** Solera de hormigón de 0.12 m de espesor, con una terminación superficial de baldosas graníticas blancas, lo que define las condiciones de emisividad y absorción de la superficie interior.
- **Terminaciones y Acabados:** Las paredes exteriores e interiores presentan un acabado de pintura blanca. En el exterior posee un zócalo de LCM visto que se extiende hasta los 1.10 m de altura. En los espacios húmedos como cocina y baño la terminación es con cerámicos blancos.

Respecto a la envolvente transparente, esta se constituye por carpinterías de aluminio con VS de 3 mm. El control de la radiación solar en los dormitorios se gestiona mediante dispositivos de sombreado con persianas enrollables exteriores.

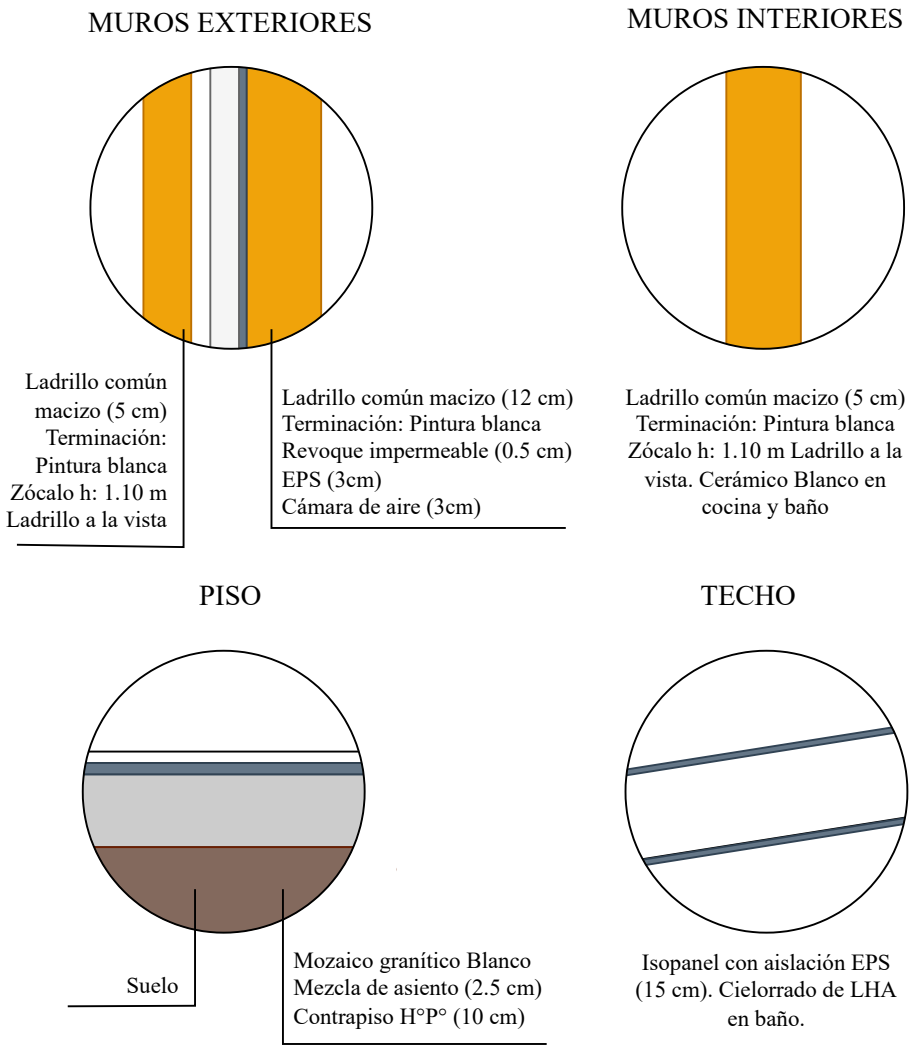


Figura 4.3: Materiales del Edificio MEVIR.

4.1.2. Protocolo de monitoreo y adquisición de datos

La campaña experimental se desarrolló durante un periodo de 17 días consecutivos, comprendido entre el 07/09/2023 y el 23/09/2023. El estudio se realizó en la etapa de post-obra inmediata y de forma previa a la ocupación, operando la vivienda bajo un régimen de oscilación libre (FF). Esta configuración, caracterizada por la ausencia de ocupantes y de sistemas $HVAC$, permite aislar la respuesta termofísica de la envolvente y suprimir las incertidumbres inherentes a las cargas internas.
De acuerdo con la instrumentación detallada en la Figura 4.4, el sistema de monitoreo registró de forma continua las siguientes variables físicas:

- **Temperatura de ambiente Interior:** Medición de la T_{aire} en el área de cocina-comedor a través de dos nodos sensores posicionados a una altura de 1.70 m.
- **Temperatura superficial:** Registro de las temperaturas de algunas de las superficies de la envolvente: T^{int}_{muro}, T^{int}_{piso}, T^{int}_{techo} y T^{ext}_{techo}.
- **Hermeticidad de la Envolvente:** Caracterización de la permeabilidad al aire mediante un ensayo de presurización (*Blower Door Test*). Se determinó un caudal de infiltración Q_{inf} de 756 m^{3}h^{-1} ($\pm 4.2\,\%$) a una presión de referencia de 50 Pa, lo que representa una tasa de renovación de $n_{50} = 5.21$ h^{-1}.

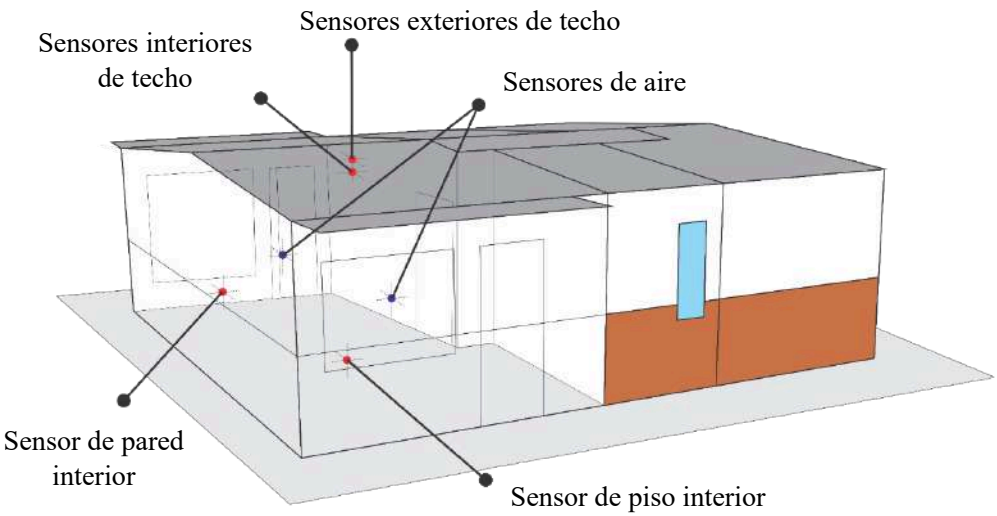


Figura 4.4: Sistema de monitoreo del Edificio MEVIR.

Para la generación del archivo climático (EPW) local, se dispuso de una estación meteorológica instalada *in situ*. Los registros faltantes o inconsistentes fueron completados utilizando como referencia las estaciones meteorológicas de San Jacinto y Carrasco. Con el objetivo de garantizar la integridad física de la simulación y mitigar la incertidumbre asociada a la inercia térmica inicial, el archivo EPW incorporó un periodo de pre-acondicionamiento utilizando los datos climáticos del mes de agosto. Este procedimiento asegura que, al iniciar la evaluación en septiembre, la distribución de temperaturas en la masa constructiva sea representativa del estado térmico real del prototipo.

4.1.3. Implementación del modelo computacional

El modelo computacional se implementó en $E+$, definiendo la geometría a partir de la documentación técnica y mediciones en obra (Figura 4.5). Para garantizar la representatividad física de la simulación, se aplicaron los siguientes criterios de modelado:

- **Estrategia de Zonificación:** El volumen de aire interior se discretizó en siete ZT interconectadas: Zona 1, estar cocina y comedor; Zona 2, 3 y 4, dormitorios; Zona 6, baño y Zona 7, cielorraso baño. Esta subdivisión permite capturar los gradientes térmicos entre locales con diferentes orientaciones y condiciones de exposición.
- **Modelado de Infiltraciones:** El intercambio de masa por aire no controlado se integró mediante el módulo AFN (`Air flow Network`). Este enfoque emplea la ley $\dot{m}_i = C_i \Delta P_i^n$, donde los coeficientes de flujo (C_i) y el exponente de presión (n_i) fueron ajustados para replicar el comportamiento detectado en el ensayo de presurización.
- **Características adicionales:** Se incorporaron resistencias térmicas (R_{aire}) en paredes para contabilizar el impacto de la cámara de aire (CA) y características térmicas inciertas. Asimismo, se consideró una penalización en la transmitancia de los acristalamientos mediante un factor de suciedad (D_{vidrio}), representando el estado real de la envolvente durante la campaña de obra.

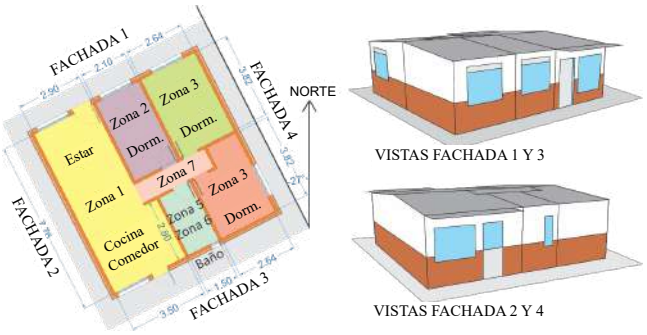


Figura 4.5: Modelo de Simulación Computacional en EnergyPlus del Edificio MEVIR.

4.2. Metodología de calibración y definición de casos de comparación

Con el propósito de evaluar el impacto de las técnicas de optimización en la precisión del modelo computacional, se estructuraron dos casos de calibración con niveles crecientes de complejidad. Esta progresión permite contrastar el desempeño de un modelo base determinista, fundamentado en parámetros nominales, frente a flujos de trabajo de Optimización Basada en Simulación (SBO) bajo enfoques mono-objetivo (MO) y multiobjetivo (MOO).
En los esquemas de optimización propuestos, el proceso de ajuste se centra en la minimización del $RMSE$ (Sección 3.5) como función objetivo principal. La validez de los modelos resultantes se corrobora mediante un análisis estadístico complementario que incorpora las métricas $CV(RMSE)$, MAE y $NMBE$ (Sección 3.5). A través de este análisis comparativo, se pretende demostrar que la transición hacia una validación multifactorial no solo mejora la precisión estadística, sino que constituye el recurso metodológico esencial para mitigar incertidumbre, garantizando que el modelo sea un reflejo fiel de la física interna del edificio.

4.2.1. Caso 1: Modelo Base (No Calibrado)

Este caso ($Caso\ 1$) constituye la línea base de la investigación y representa la práctica convencional de simulación energética, en la cual las variables se definen exclusivamente a partir de

especificaciones técnicas nominales y valores normativos. En esta configuración, se establecieron parámetros fijos para el modelo, adoptando una resistencia térmica adicional (R_{aire}) de 1 m^2K/W para representar de forma heurística las pérdidas por puentes térmicos. Asimismo, el factor de suciedad de los acristalamientos (D_{vidrio}) se fijó en un valor unitario (1.0), asumiendo condiciones de limpieza ideales. Para el cálculo de los coeficientes de transferencia superficial h_{int} y h_{ext}, se mantuvo el algoritmo ACA (`Adaptative Convection Algorithm`) predeterminado por el motor $E+$, sin ajustes por condiciones de contorno locales.

4.2.2. Caso 2: Calibración Mono-Objetivo (Enfoque Convencional)

En este caso ($Caso\ 2$) se implementa un proceso de optimización estocástica orientado a minimizar una FO de carácter mono-objetivo (MO), fundamentada exclusivamente en la desviación de la T_{aire} respecto a los datos monitorizados (Figura 4.6). El espacio de búsqueda se define a través de un conjunto de variables de decisión críticas, que incluyen las propiedades termofísicas del aislante (ρ_{EPS} y k_{EPS}), las resistencias térmicas adicionales (R_{F1} a R_{F4}), el factor de suciedad del acristalamiento (D_{vidrio}), el coeficiente de infiltración (C_{inf}) y las propiedades térmicas del suelo (F_{suelo}).

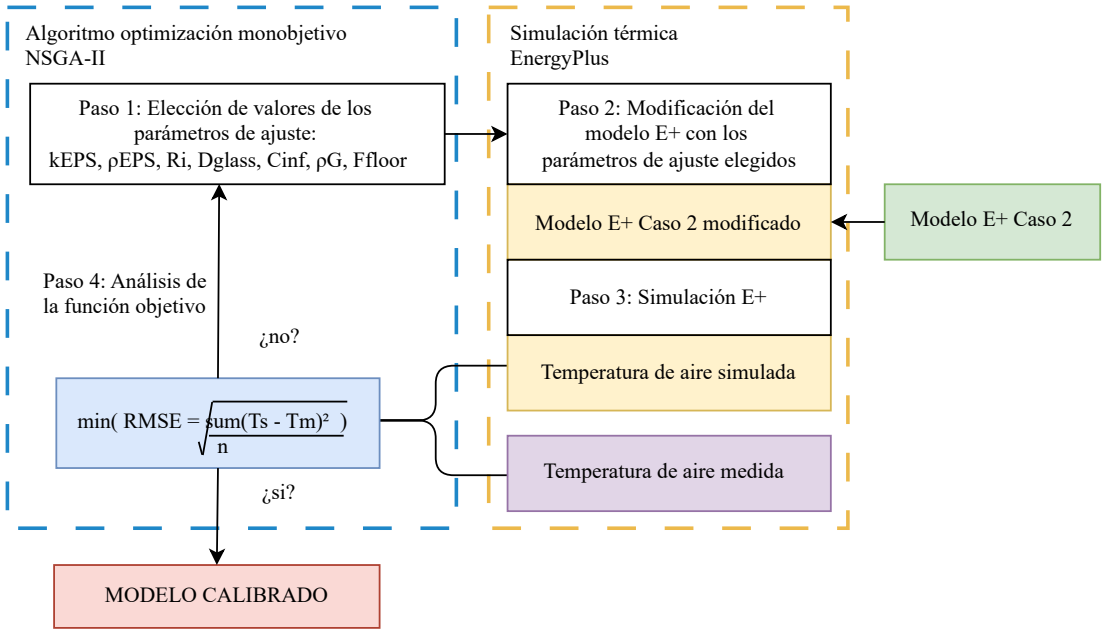


Figura 4.6: $Caso\ 2$: Pseudocódigo de Calibración Mono-Objetivo Edificio MEVIR.

Los rangos de búsqueda y las restricciones asignadas a cada una de las variables de calibración para este caso se detallan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Espacio de búsqueda para los parámetros de calibración del Caso 2.

Parámetro	Unidad	Min	Max
ρ_{LCP}	kg/m^3	800	2000
k_{EPS}	W/m · K	0.01	0.10
ρ_{EPS}	kg/m^3	5.00	15.00
R_{F1} a R_{F4}	m^2K/W	0.01	1.00
C_{inf}	-	0.00	2.00
D_{vidrio}	-	0.50	1.00
F_{suelo}	-	0.10	2.00

4.2.3. Caso 3: Calibración Multi-objetivo (Enfoque Detallado)

Este caso final ($Caso\ 3$) introduce una metodología de calibración avanzada basada en un enfoque multiobjetivo (MOO). La estrategia se fundamenta en la minimización simultánea de los errores asociados a la T_{aire} y a las temperaturas superficiales interiores y exteriores (T^{int}_{piso}, T^{int}_{muro}, T^{int}_{techo} y T^{ext}_{techo}), conforme se esquematiza en el flujo de trabajo de la Figura 4.7.

A diferencia de los enfoques convencionales, este modelo busca resolver el balance de energía mediante el ajuste sincronizado de los flujos convectivos y radiativos. Al integrar las temperaturas de las interfaces como funciones objetivo adicionales, se pretende forzar la convergencia del algoritmo hacia soluciones con alta fidelidad física, reduciendo la dependencia de ajustes puramente estadísticos y fortaleciendo la capacidad predictiva del modelo ante variaciones climáticas.

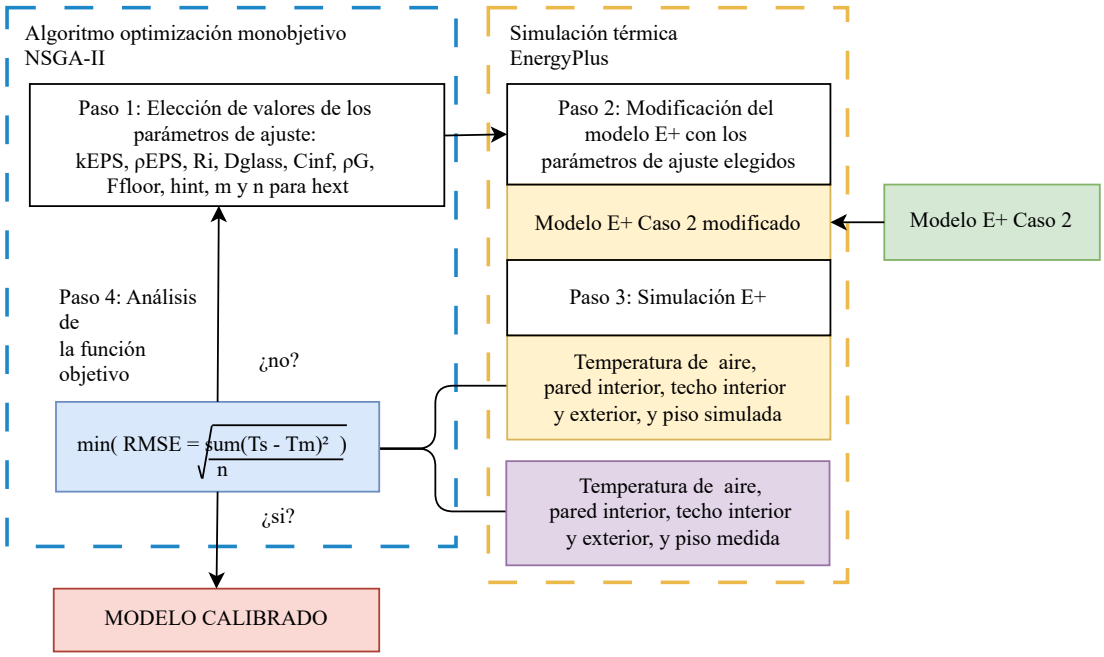


Figura 4.7: Caso 3: Pseudocódigo de Calibración Multi-objetivo Edificio MEVIR.

Expansión del vector de variables de decisión. Con el objetivo de capturar con mayor precisión los fenómenos de transferencia de calor en las interfaces del edificio, el $Caso\ 3$ extiende el espacio de búsqueda respecto a los casos anteriores. En esta etapa, se integran las propiedades ópticas de la envolvente (absortividad térmica α_T y absortividad solar α_S) junto con una caracterización dinámica de los coeficientes convectivos (h_{int} y h_{ext}).

Para el cálculo del coeficiente exterior (h_{ext}), se implementó el modelo de McAdams (Ecuación 4.1), el cual permite ajustar la sensibilidad de la transferencia superficial en función de la velocidad del viento y las condiciones de contorno locales:

$$h_{ext} = mV_{loc} + n \tag{4.1}$$

En esta formulación, la velocidad local del viento (V_{loc}) se determina considerando el ángulo de incidencia θ respecto a la superficie, permitiendo una discretización más fina de la interacción entre el clima y la morfología del prototipo:

$$V_{loc} = \begin{cases} 0.15V_{viento} & \text{si } V_{viento} \leq 1, \theta \in [0, 10^\circ] \\ 0.5 & \text{si } 1 < V_{viento} \leq 2, \theta \in [0, 10^\circ] \\ V_{viento} \sin(\theta) & \text{si } \theta \in (10^\circ, 90^\circ] \\ 0.25V_{viento} \sin(\theta) & \text{si } \theta \in (90^\circ, 180^\circ] \end{cases} \tag{4.2}$$

Esta ampliación metodológica busca reducir la incertidumbre en los nodos superficiales del modelo. El rango de variación y los límites asignados a cada parámetro de este espacio de búsqueda multidimensional se consolidan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Definición del espacio de búsqueda para los parámetros de calibración del Caso 3.

Parámetro	**Unidad**	**Min**	**Max**
ρ_{LCP}	kg/m^3	800	2000
k_{EPS}	W/m · K	0.01	0.10
ρ_{EPS}	kg/m^3	5.00	15.00
R_{F1} a R_{F4}	m^{2}K/W	0.01	1.00
C_{inf}	-	0.00	2.00
m, n	-	0.10	2.00
h_{int}	W/m^{2}K	0.10	20.00
α_S, α_T	-	0.01	0.90

4.3. Análisis y discusión de resultados

La evaluación del desempeño de los modelos calibrados se desarrolla de manera integral a través de tres niveles de análisis interconectados. En primer lugar, se realiza una caracterización estadística de los errores para cuantificar la precisión global de cada caso. En segundo término, se lleva a cabo una validación de la dinámica temporal de las temperaturas, analizando la capacidad de los modelos para replicar el comportamiento transitorio del edificio. Finalmente, se examina la consistencia física de los parámetros resultantes, verificando que los valores obtenidos mediante optimización mantengan una coherencia termodinámica con la realidad constructiva del prototipo. Esta estructura permite distinguir entre una coincidencia numérica y una representación fidedigna de los flujos de calor, facilitando la identificación del caso que mejor resuelve el compromiso entre precisión estadística y fidelidad física.

4.3.1. Evaluación del desempeño estadístico: RMSE, CVRMSE, NMBE y MAE

En esta subsección se analizan los indicadores de error obtenidos para los tres casos, contrastando las salidas del modelo con los datos experimentales. La evaluación se fundamenta en los índices de desempeño estandarizados por la normativa internacional: $RMSE$ (Tabla 4.3), $CV(RMSE)$ (Tabla 4.4), $NMBE$ (Tabla 4.5) y MAE (Tabla 4.6).

Tabla 4.3: RMSE (°C) de las variables térmicas para los tres casos.

	T_{aire}	T^{int}_{muro}	T^{int}_{techo}	T^{ext}_{techo}	T^{int}_{piso}
$Caso\ 1$	1.17	2.24	2.33	5.44	1.91
$Caso\ 2$	0.36	0.88	1.30	5.40	0.50
$Caso\ 3$	0.47	0.60	0.48	3.17	0.34

El análisis del $RMSE$ revela una reducción drástica de las desviaciones en los modelos optimizados respecto a la línea base ($Caso\ 1$). Si se considera únicamente la T_{aire}, el $Caso\ 2$ alcanza

el error mínimo (0.36 °C), superando levemente al $Caso\ 3$ (0.47 °C). Sin embargo, la precisión lograda en la T_{aire} por el $Caso\ 2$ no se extrapola al resto de las temperaturas, donde se observan desviaciones significativas. La superioridad metodológica del $Caso\ 3$ se manifiesta en la precisión de las temperaturas superficiales. Mientras que el $Caso\ 2$ presenta desviaciones significativas en los componentes de la envolvente, especialmente en el techo y el piso, el $Caso\ 3$ logra un equilibrio global superior. Este fenómeno sugiere que el enfoque MO incurre en un sobreajuste de la temperatura del aire a expensas de distorsionar la física interna, mientras que la optimización MOO garantiza una representación fidedigna de los flujos de calor en toda la envolvente.

Tabla 4.4: CVRMSE (%) de las variables térmicas para los tres casos.

	T_{aire}	T^{int}_{muro}	T^{int}_{techo}	T^{ext}_{techo}	T^{int}_{piso}
$Caso\ 1$	7.45 %	14.62 %	16.04 %	44.43 %	12.65 %
$Caso\ 2$	2.33 %	5.78 %	8.98 %	44.08 %	3.34 %
$Caso\ 3$	3.00 %	3.92 %	3.29 %	25.78 %	2.28 %

Respecto al $CV(RMSE)$, ambos casos optimizados se sitúan ampliamente por debajo del límite del 30 % exigido por la norma $ASHRAE\ 14$, validando su capacidad predictiva. Es notable la mejora en la temperatura exterior del techo (T^{ext}_{techo}): la metodología avanzada logra reducir el error crítico del 44.43 % ($Caso\ 1$) al 25.78 %, un avance esencial para modelos que pretendan evaluar estrategias de control solar o cubiertas frías.

Tabla 4.5: NMBE (%) de las variables térmicas para los tres casos.

	T_{aire}	T^{int}_{muro}	T^{int}_{techo}	T^{ext}_{techo}	T^{int}_{piso}
$Caso\ 1$	6.55 %	13.73 %	13.60 %	29.07 %	10.14 %
$Caso\ 2$	-0.04 %	4.73 %	4.22 %	29.92 %	2.42 %
$Caso\ 3$	-1.82 %	2.80 %	0.28 %	12.87 %	0.06 %

El análisis del error $NMBE$ permite evaluar la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar las temperaturas. Mientras que el $Caso\ 1$ presenta un error positivo significativo en todas las variables (llegando al 29.07 % en el techo exterior), el $Caso\ 3$ logra reducir esta métrica a valores cercanos a cero en las superficies interiores, como se observa en el piso (0.06 %) y el techo (0.28 %). Es relevante notar que, aunque el $Caso\ 2$ muestra un error casi nulo en la T_{aire} (-0.04 %), mantiene errores sistemáticos importantes en las superficies. La capacidad del $Caso\ 3$ para minimizar simultáneamente el error en el aire y en la envolvente demuestra una mayor integridad en el balance de masas y energías del sistema.

Tabla 4.6: MAE (°C) de las variables térmicas para los tres casos.

	T_{aire}	T^{int}_{muro}	T^{int}_{techo}	T^{ext}_{techo}	T^{int}_{piso}
$Caso\ 1$	1.04	2.10	1.97	3.94	1.52
$Caso\ 2$	0.31	0.74	0.89	3.92	0.41
$Caso\ 3$	0.38	0.49	0.38	2.23	0.30

En cuanto al MAE, los resultados refuerzan la tendencia observada con el $RMSE$. El $Caso\ 3$ logra los valores más bajos en la totalidad de las temperaturas superficiales, destacando una desviación de apenas 0.38 °C en el techo interior y 0.30 °C en el piso. Esta consistencia en el MAE a través de todos los nodos del modelo indica que la metodología MOO no solo reduce los errores puntuales, sino que mejora la aproximación media del modelo en todo el periodo de estudio. Por el contrario, el $Caso\ 2$ mantiene un MAE elevado en el techo exterior (3.92 °C), similar al modelo no calibrado, lo que confirma su limitación para capturar la dinámica térmica de la envolvente.

Análisis de la dinámica temporal de los errores

El análisis de la evolución temporal de los errores (Figuras 4.8 a 4.10) permite evaluar la estabilidad del modelo ante el periodo de estudio. Se observa que el $Caso\ 3$ logra una brecha de error significativamente más estrecha en comparación con los casos previos.
Para las variables interiores, las oscilaciones residuales del caso multiobjetivo se estabilizan en un rango de $\pm 1\,°C$. Este comportamiento contrasta con el modelo base ($Caso\ 1$), que presenta desviaciones sistemáticas que superan los $2\,°C$ durante los picos de radiación. En el caso de la interfaz exterior del techo (T^{ext}_{techo}), si bien la magnitud del error es naturalmente mayor debido a la exposición directa a la irradiancia y el viento, el $Caso\ 3$ logra contener las diferencias dentro de los $5\,°C$. Esta reducción del error residual en la envolvente confirma que el ajuste de los parámetros ópticos y los coeficientes convectivos dinámicos permite capturar con mayor fidelidad la respuesta transitoria del prototipo, mitigando los picos de error.

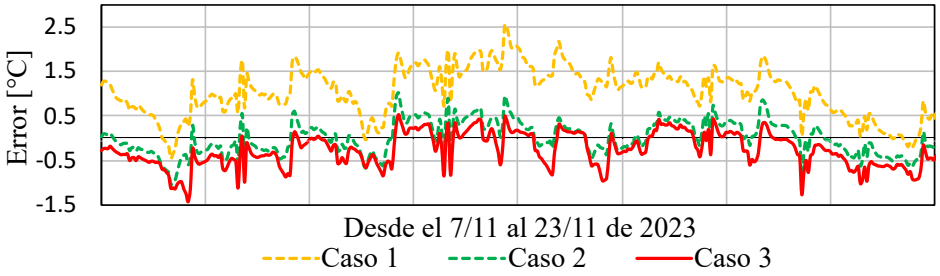


Figura 4.8: errores de Temperatura de Aire para los tres casos evaluados en el Edificio MEVIR.

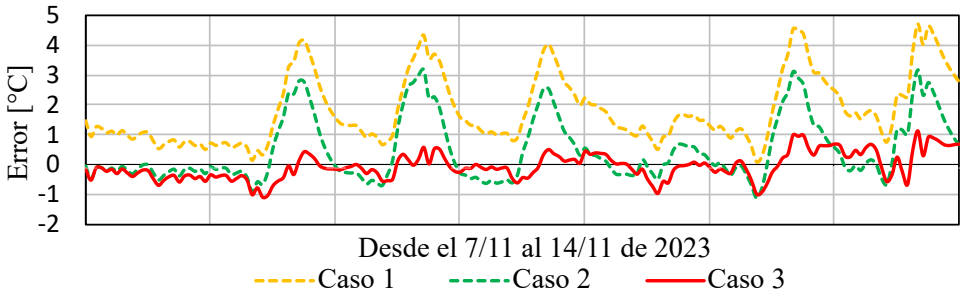


Figura 4.9: errores de Temperatura de Techo Interior para los tres casos evaluados en el Edificio MEVIR.

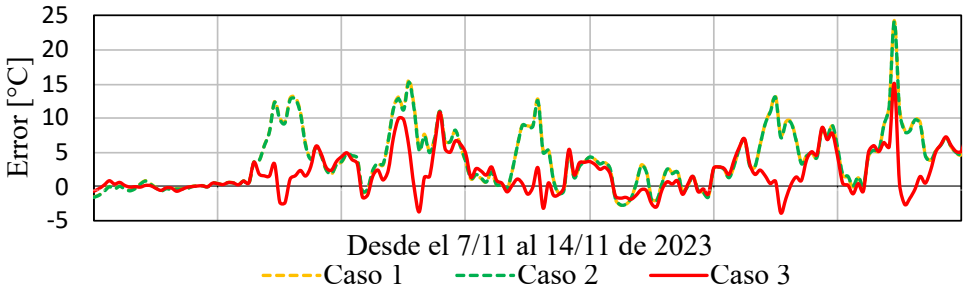


Figura 4.10: errores de Temperatura de Techo Exterior para los tres casos evaluados en el Edificio MEVIR.

4.3.2. Análisis de la precisión en la predicción de temperaturas

El análisis visual de la evolución temporal de las temperaturas permite corroborar las tendencias identificadas en el procesamiento estadístico, proporcionando una comprensión detallada de la fidelidad transitoria del modelo. Al contrastar los perfiles horarios de las simulaciones con los datos monitorizados, es posible evaluar la capacidad de los modelos para replicar fenómenos complejos como el amortiguamiento de la onda térmica y el desfase temporal producido por la inercia de los cerramientos. Esta evaluación cualitativa resulta fundamental para verificar que la reducción de los indicadores de error responda a una representación fidedigna de la física del edificio y no a una compensación numérica de errores.

Temperatura del aire de zona. Al examinar el perfil de la T_{aire} (Figura 4.11), se evidencia que la práctica estándar ($Caso\ 1$) no logra ajustarse a los niveles reales, situándose consistentemente por encima de los registros experimentales. Esta sobreestimación de la temperatura sugiere una definición imprecisa de las tasas de infiltración y de las resistencias térmicas en el modelo no calibrado. Por el contrario, los casos optimizados ($Caso\ 2$ y $Caso\ 3$) logran corregir este desplazamiento, alcanzando una elevada correspondencia tanto en la fase como en la amplitud de las oscilaciones diarias. Esta convergencia visual indica que el ajuste de los coeficientes de infiltración y las propiedades de la envolvente permite replicar con exactitud el balance de calor sensible de la zona térmica.

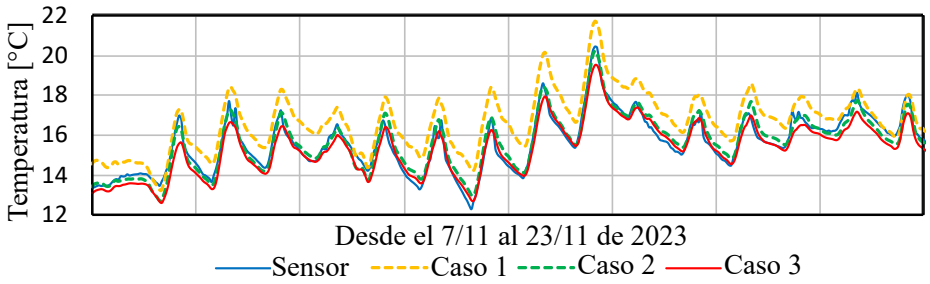


Figura 4.11: Comparativa de Temperatura de Aire medida y simulada para los tres casos evaluados en el Edificio MEVIR.

Temperaturas superficiales interiores de muro, piso y techo Respecto a la T^{int}_{muro} (Figura 4.12), la práctica estándar ($Caso\ 1$) excede los valores medidos con una desviación persistente de aproximadamente 2 °C. Los casos calibrados logran reducir drásticamente esta brecha; específicamente, el $Caso\ 3$ ofrece la mayor precisión, ajustándose a la dinámica de calentamiento y enfriamiento de la mampostería. Un comportamiento análogo se observa para la T^{int}_{piso} (Figura 4.13), donde la metodología avanzada logra replicar con exactitud la inercia térmica de la solera y su interacción con el suelo.
Las discrepancias más críticas se manifiestan en el techo. Para la T^{int}_{techo} (Figura 4.14), tanto la práctica estándar como el $Caso\ 2$ fallan al reproducir la respuesta térmica real, con errores que superan los 4 °C durante las horas de máxima irradiancia. Este resultado evidencia que el $Caso\ 2$, a pesar de su buen ajuste en el aire, no capturó las propiedades termofísicas reales de la cubierta, incurriendo en un error de caracterización de las respuesta térmica del techo. En contraste, la metodología de optimización MOO exhibe una precisión superior, capturando con mayor exactitud las amplitudes térmicas y el amortiguamiento del flujo de calor.

Temperaturas superficiales exteriores de techo. Al analizar la distribución de temperatura del $Caso\ 1$ y del $Caso\ 2$ se observa que ambos son prácticamente idénticos. Este fenómeno ratifica

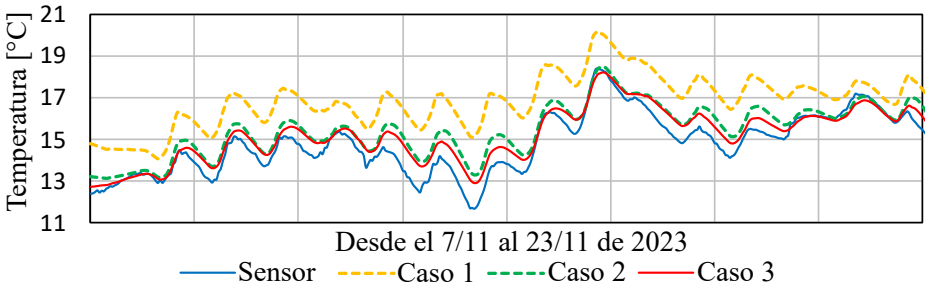


Figura 4.12: Comparativa de Temperatura de Muro Interior medida y simulada para los tres casos evaluados en el Edificio MEVIR.

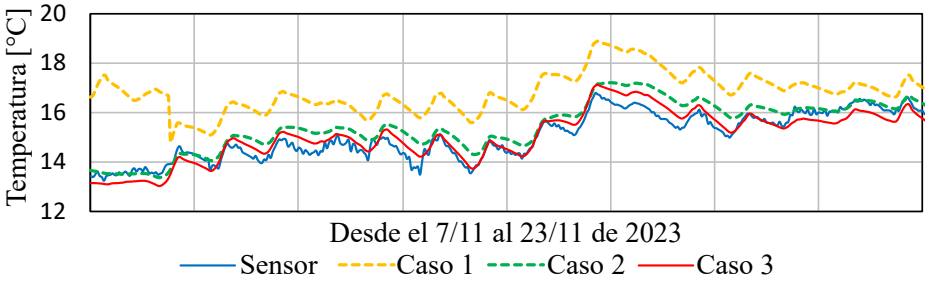


Figura 4.13: Comparativa de Temperatura de Piso Interior medida y simulada para los tres casos evaluados en el Edificio MEVIR.

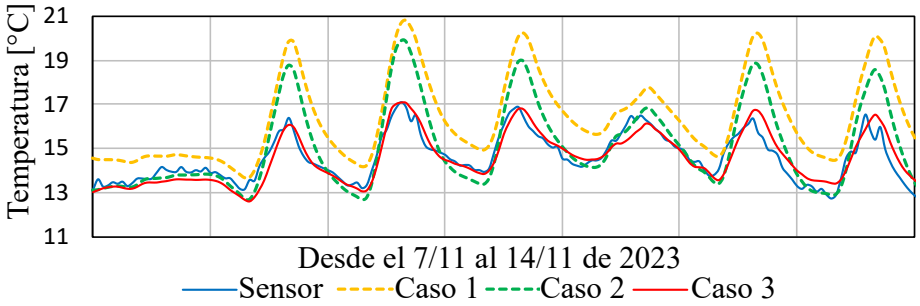


Figura 4.14: Comparativa de Temperatura de Techo Interior medida y simulada para los tres casos evaluados en el Edificio MEVIR.

que una calibración MO, al estar centrada exclusivamente en la temperatura del aire, es incapaz de ajustar parámetros críticos de la envolvente. Por el contrario, el $Caso\ 3$ logra una corrección sustancial de la curva térmica. Al integrar el modelo de McAdams para el cálculo dinámico del viento local y optimizar las propiedades ópticas, el caso MOO alcanza una aproximación superior a los datos reales. Esta mejora en la interfaz exterior es la que permite, en última instancia, resolver el acoplamiento conductivo-radiativo de la cubierta, garantizando la precisión observada en las temperaturas interiores de la vivienda.

4.3.3. Análisis de los parámetros de ajuste

La Tabla 4.7 presenta una comparativa de los valores obtenidos las variables de decisión en cada caso, contrastando los parámetros nominales del $Caso\ 1$ con los resultados derivados de los

procesos de optimización, $Caso\ 2$ y $Caso\ 3$.
Al examinar las propiedades resultantes, se observa que mientras el caso $Caso\ 3$ mantiene los parámetros dentro de rangos coherentes con la literatura técnica y la realidad constructiva, el $Caso\ 2$ tiende a adoptar valores en los límites del espacio de búsqueda para forzar el ajuste de la temperatura del aire. Esta divergencia entre casos constituye una evidencia empírica del fenómeno de la equifinalidad, subrayando la necesidad de una validación multifactorial para garantizar la capacidad predictiva del modelo ante condiciones climáticas no monitoreadas.

Tabla 4.7: Valores de los parámetros obtenidos tras la calibración para los tres casos.

Parámetros	$Caso\ 1$	$Caso\ 2$	$Caso\ 3$
$k_{EPS}\ (W/m \cdot K)$	0.0400	0.0694	0.0629
$\rho_{EPS}\ (kg/m^3)$	15.00	6.9895	13.6355
$\rho_{LCP}\ (kg/m^3)$	1300	1300	1335.6
$R_{F1}\ (m^2 \cdot K/W)$	1.0000	0.4917	1.0200
$R_{F2}\ (m^2 \cdot K/W)$	1.0000	0.2377	0.2593
$R_{F3}\ (m^2 \cdot K/W)$	1.0000	0.3334	1.0527
$R_{F4}\ (m^2 \cdot K/W)$	1.0000	0.2482	1.3571
C_{inf}	1.0000	1.2931	2.2578
D_{vidrio}	1.0000	0.6038	0.6578
F_{suelo}	0.5000	0.2491	0.4680
ρ_{suelo}	0.2600	0.0150	0.1717
m_{techo}	—	—	6.0500
n_{techo}	—	—	5.2900
m_{muro}	—	—	6.1900
n_{muro}	—	—	5.7200
$h_{int,muro}\ (W/m^2 \cdot K)$	—	—	7.3400
$h_{int,piso}\ (W/m^2 \cdot K)$	—	—	9.7100
$h_{int,techo}\ (W/m^2 \cdot K)$	—	—	7.3100
$h_{int,vidrio}\ (W/m^2 \cdot K)$	—	—	10.330

Al analizar las propiedades termofísicas vinculadas a la conducción (Tabla 4.7), se observa que la conductividad del aislante (k_{EPS}) obtenida en ambos casos optimizados es aproximadamente un $50\,\%$ superior al valor nominal. Sin embargo, las discrepancias más significativas surgen al examinar las resistencias térmicas adicionales. Mientras que el $Caso\ 2$ arroja valores inferiores a $0.50\,\mathrm{m^2K/W}$, el $Caso\ 3$ converge hacia valores cercanos a $1.20\,\mathrm{m^2K/W}$. De forma análoga, el F_{suelo} en el enfoque MO se reduce a la mitad respecto a la metodología avanzada. Estos resultados sugieren que la calibración del $Caso\ 2$ degrada la resistencia térmica global de forma artificial para compensar excedentes térmicos en el aire, mientras que el caso MOO preserva una mayor coherencia con la física del sistema.
Respecto al intercambio de masa con el exterior, el coeficiente de infiltración (C_{inf}) en la metodo-

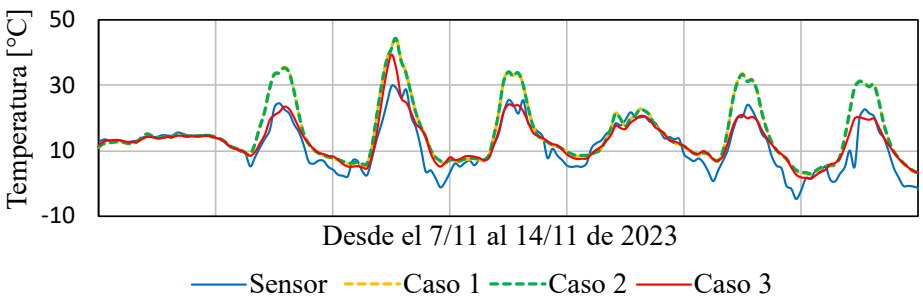


Figura 4.15: Comparativa de Temperatura de Techo Exterior medida y simulada para los tres casos evaluados en el Edificio MEVIR.

logía avanzada duplica los valores de los casos previos, favoreciendo un enfriamiento convectivo más acorde a la dinámica real del prototipo. En cuanto a las propiedades ópticas, el D_{vidrio} en ambas optimizaciones converge en valores cercanos a 0.6, confirmando que la radiación solar incidente se ve significativamente atenuada por el estado de la envolvente. Finalmente, la densidad del suelo ρ_{suelo} en el $Caso\ 2$ resulta drásticamente inferior a la del $Caso\ 3$. Esta subestimación de la influencia del terreno en el enfoque MO actúa como un mecanismo de compensación matemática para reducir la ganancia radiativa, evidenciando nuevamente el riesgo de alcanzar soluciones estadísticamente aceptables pero físicamente inconsistentes.
Por otro lado, las Tablas 4.8 y 4.9 presentan una comparativa entre los valores teóricos y los coeficientes de absortividad optimizados.

Tabla 4.8: Valores de absortividad térmica α_T obtenidos tras la calibración.

	$\alpha^{int}_{T,muro}$	$\alpha^{ext}_{T,muro}$	$\alpha^{ext}_{T,zoc}$	$\alpha^{int}_{T,piso}$	$\alpha^{int}_{T,techo}$	$\alpha^{ext}_{T,techo}$
$Caso\ 1$ y $Caso\ 2$	0.93	0.93	0.93	0.90	0.25	0.25
$Caso\ 3$	0.35	0.49	0.49	0.51	0.52	0.41

Tabla 4.9: Valores de absortividad solar α_S obtenidos tras la calibración.

	$\alpha^{int}_{S,muro}$	$\alpha^{ext}_{S,muro}$	$\alpha^{ext}_{S,zoc}$	$\alpha^{int}_{S,piso}$	$\alpha^{int}_{S,techo}$	$\alpha^{ext}_{S,techo}$
$Caso\ 1$ y $Caso\ 2$	0.55	0.55	0.55	0.45	0.40	0.40
$Caso\ 3$	0.40	0.54	0.37	0.32	0.51	0.31

Al contrastar los resultados del $Caso\ 3$, se evidencia que los coeficientes α_S tienden a valores inferiores respecto a los supuestos iniciales. Esta reducción en la captación de energía por radiación permite al modelo mitigar las ganancias térmicas de forma más realista, logrando una mayor fidelidad en la respuesta térmica superficial.
Este ajuste es particularmente crítico en las superficies exteriores, donde la optimización de α_S y α_T actúa en conjunto con los coeficientes convectivos h_{ext} para resolver el balance de energía en la interfaz. Mientras que en los modelos previos se asumen valores genéricos de catálogo, el $Caso\ 3$ adapta las propiedades ópticas a las condiciones reales de exposición y acabado del prototipo, eliminando errores térmicos que suelen compensarse artificialmente mediante la modificación de la conductividad o la infiltración..

Tabla 4.10: Comparación de los coeficientes de transferencia de calor por convección medios ($W/m^2 \cdot K$).

	$h_{int,muro}$	$h_{ext,muro}$	$h_{int,techo}$	$h_{ext,techo}$
$Caso\ 1$	1.02	6.16	0.56	11.63
$Caso\ 2$	0.96	6.08	0.67	11.62
$Caso\ 3$	7.34	11.62	7.31	32.97

La Tabla 4.10 revela un hallazgo crítico: los coeficientes convectivos medios del $Caso\ 3$ son sustancialmente mayores que en los modelos previos. Este incremento favorece una disipación de calor más dinámica, fundamental para corregir las temperaturas superficiales, particularmente en el techo. Estos resultados sugieren que los algoritmos estándar de $E+$ tienden a subestimar los coeficientes convectivos para esta tipología residencial.

4.3.4. Análisis de sensibilidad en el balance de cargas térmicas

Con el propósito de evaluar la robustez predictiva de los modelos calibrados, se llevó a cabo una simulación en régimen anual comparando el desempeño del $Caso\ 2$ frente a la metodología avanzada ($Caso\ 3$). Para este análisis, se integró un sistema de climatización idealizado mediante

el objeto `Ideal Loads Air System` de $E+$, estableciendo temperaturas de consigna (*set-points*) de 21 °C para calefacción y 24 °C para refrigeración. Con el fin de evaluar el desempeño térmico bajo condiciones meteorológicas típicas, se utilizó el archivo TMY de Montevideo.
Se cuantificaron los balances de cargas térmicas para los periodos estivales e invernales, representativos del clima del Hemisferio Sur. Este procedimiento permite realizar un desglose detallado de los flujos de calor a través de los componentes de la envolvente, facilitando la identificación de las variables que dominan la demanda energética en cada caso. Al contrastar estos balances, es posible evidenciar cómo las diferencias en la caracterización física de los modelos, derivadas de los procesos de calibración, se traducen en variaciones significativas en la predicción del consumo energético final.
Durante el periodo estival, la energía térmica requerida para mantener la T_{aire} en 24 °C resulta comparable entre ambos casos, siendo la demanda de la metodología avanzada apenas un 11 % superior a la del $Caso\ 2$. No obstante, a pesar de esta similitud en la carga neta, se observan diferencias estructurales significativas: las ganancias solares a través de las ventanas en la metodología avanzada son un 65 % mayores que en el $Caso\ 2$, mientras que las ganancias por la cubierta en el $Caso\ 2$ son casi diez veces superiores a las del $Caso\ 3$. Estas discrepancias provocan que las pérdidas de calor a través del suelo sean un 69 % mayores en la metodología avanzada (ver Figura 4.16).

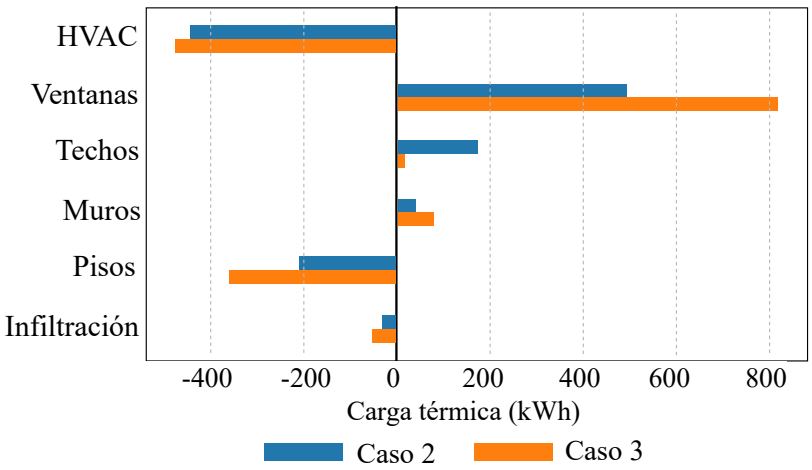


Figura 4.16: Cargas térmicas durante el periodo estival en el Edificio MEVIR.

Durante el periodo invernal, la demanda de acondicionamiento térmico necesaria para mantener

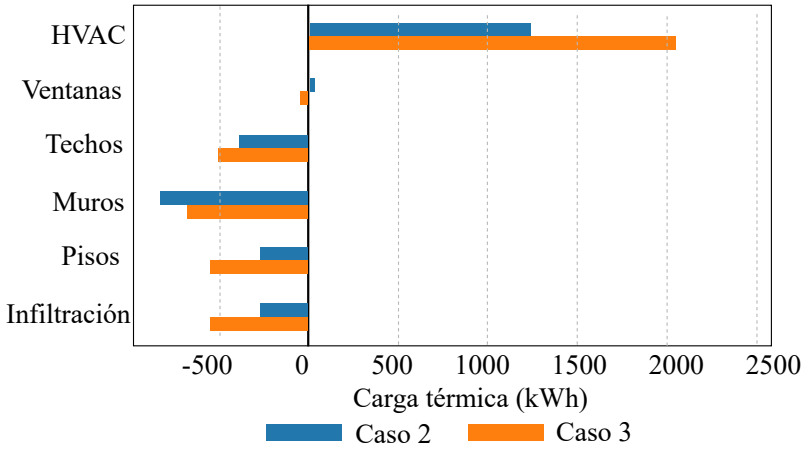


Figura 4.17: Cargas térmicas durante el periodo invernal en el Edificio MEVIR.

el *setpoint* de 21 °C resulta un 30 % superior en la metodología avanzada respecto al $Caso\ 2$. Este incremento en la carga de calefacción se fundamenta en una caracterización más rigurosa de los flujos de pérdida en el $Caso\ 3$. Específicamente, se observa que las pérdidas por infiltración son un 74 % mayores, mientras que la transferencia de calor hacia el suelo se duplica y las pérdidas a través de la cubierta aumentan un 29 % en comparación con el caso mono-objetivo.
Inversamente, el balance revela que las pérdidas por muros son un 20 % superiores en el $Caso\ 2$ respecto al $Caso\ 3$ (Figura 4.17). Esta discrepancia sugiere que el $Caso\ 2$ compensa artificialmente los parámetros para intentar ajustar la temperatura del aire. Estos resultados evidencian que una calibración defectuosa no solo afecta la precisión horaria, sino que induce a errores significativos en la predicción de la demanda energética estacional.
En términos de desempeño anual, el $Caso\ 3$ reporta unas necesidades de acondicionamiento térmico un 33 % superiores a las estimadas por el $Caso\ 2$. Los balances de carga térmicos contrastantes entre ambos casos ponen de manifiesto la elevada sensibilidad de los modelos de simulación frente al protocolo de validación seleccionado. Estas discrepancias subrayan que el enfoque de calibración no solo influye en la precisión estadística, sino que es un factor determinante en la representación física de los intercambios de calor con el entorno. En consecuencia, la adopción de una metodología avanzada como la propuesta en el $Caso\ 3$ resulta indispensable para evitar una subestimación de la demanda energética real, garantizando que el modelo calibrado sea una herramienta de predicción robusta para el diseño de estrategias de eficiencia energética.

4.4. Conclusiones y aportes del capítulo

El desarrollo de las metodologías de calibración aplicadas sobre el edificio MEVIR ha permitido contrastar dos paradigmas de optimización con niveles de complejidad diferenciados. Por un lado, una aproximación convencional ($Caso\ 2$) basada en optimización mono-objetivo (MO) enfocada exclusivamente en la T_{aire}. Este enfoque, ampliamente difundido en la literatura, se limita al ajuste de propiedades termofísicas básicas y tasas de infiltración. Por otro lado, se evaluó una metodología avanzada ($Caso\ 3$) basada en optimización multiobjetivo (MOO), diseñada para ajustar la T_{aire} con las (T_{sup}). Esta última integra una caracterización dinámica de los coeficientes de transferencia convectiva (h_{int} y h_{ext}) mediante modelos avanzados y el ajuste de las propiedades ópticas (α_T y α_S) de la envolvente. A partir de este análisis comparativo, se derivan las siguientes conclusiones y aportes significativos.

Eficacia de la calibración multiobjetivo en la precisión global. Los resultados demuestran que la integración de las T_{sup}, los coeficientes de transferencia convectiva h_{int} y h_{ext}, y las absortividades α_T y α_S como variables de decisión mejora drásticamente la integridad física del modelo. Si bien el $Caso\ 2$ logró reducir el $RMSE$ de la T_{aire} en un 69 %, su impacto en la envolvente (T^{ext}_{techo}) fue marginal, con una mejora de apenas el 1 %. En contraste, la metodología avanzada ($Caso\ 3$), aunque presenta una reducción porcentual ligeramente menor en la T_{aire} (60 %), alcanza un desempeño superior en la totalidad de las variables de superficie: 73 % en T^{int}_{muro}, 82 % en T^{int}_{piso} y, de manera destacada, un 79 % en la T^{int}_{techo} y un 42 % en la T^{ext}_{techo}. Esta distribución equilibrada del error confirma que el enfoque MOO no solo optimiza el volumen de aire, sino que garantiza una representación fidedigna de los flujos de calor a través de todos los componentes de la envolvente.

Variables críticas de ajuste y representación física. El estudio valida que la inclusión de variables de ajuste avanzadas, específicamente los coeficientes de convección (h_{int} y h_{ext}) y las absortividades solar (α_S) y térmica (α_T), resulta indispensable para garantizar la robustez y confiabilidad del modelo. La optimización de los parámetros del modelo de McAdams para el cálculo del coeficiente convectivo exterior (h_{ext}) permitió capturar con precisión la dinámica de la capa límite exterior y su interacción con el viento local, un fenómeno físico frecuentemente ignorado o

simplificado en los métodos de calibración convencionales. Asimismo, el ajuste de los coeficientes convectivos interiores (h_{int}) resultó determinante para corregir la tendencia de los algoritmos predeterminados de $E+$ a subestimar estos intercambios, logrando así una caracterización más exacta de la transferencia de calor hacia el aire de zona. Esta caracterización detallada de dichas propiedades es la que permite resolver el acoplamiento térmico entre el entorno y la envolvente, asegurando que la reducción de los errores estadísticos responda a una representación fidedigna de los mecanismos de transferencia de calor y no a ajustes empíricos carentes de sustento físico.

Impacto en la dinámica de cargas térmicas. El análisis comparativo de los balances de carga demuestra cómo la metodología de calibración condiciona el diagnóstico del desempeño energético del edificio. Se evidenció que las estrategias simplificadas, como el $Caso\ 2$, distorsionan la atribución de ganancias y pérdidas de calor al incurrir en una compensación de errores entre los distintos componentes de la envolvente. La captura precisa de los intercambios de energía lograda en el $Caso\ 3$ resulta vital para garantizar que la evaluación de futuras medidas de mejora energética se fundamente en una base física real. Un modelo que no represente correctamente la distribución de cargas en superficies críticas, como la cubierta o el suelo, podría inducir a errores en el dimensionamiento de sistemas de climatización o en la estimación del potencial de ahorro de estrategias pasivas.

4.4.1. Aportes al estado del arte

La selección del protocolo de calibración trasciende el carácter de un mero procedimiento técnico; constituye el cimiento que garantiza la fiabilidad de cualquier predicción energética. En la práctica convencional, la validez de un modelo suele reducirse a la minimización del error en la temperatura del aire. No obstante, esta investigación demuestra que un ajuste estadísticamente aceptable en el volumen de aire puede coexistir con desviaciones críticas en la caracterización térmica de las superficies. Esta discrepancia es fundamental al evaluar medidas de mejora energética, como el refuerzo de aislamiento en cubiertas o la sustitución de acristalamientos: si el modelo es incapaz de cuantificar con precisión la energía absorbida y transferida por cada elemento de la envolvente, las estimaciones sobre el potencial de ahorro y la efectividad de las estrategias de eficiencia carecerán de sustento real.

En este sentido, los enfoques centrados exclusivamente en la T_{aire} presentan una limitación estructural crítica al omitir el acoplamiento térmico entre la masa del edificio y el aire interior. Al visibilizar estas carencias, este trabajo propone que la simulación debe evolucionar de un simple ajuste de curvas estadísticas hacia una representación fidedigna de los balances de energía. Bajo esta premisa, la transición hacia una metodología MOO, incluyendo T_{sup}, permite que el modelo digital actúe como un gemelo térmico fidedigno, donde el ajuste sincronizado de las propiedades termofísicas (conducción, k, R_{aire}), ópticas (radiación, α_T y α_S) y convectivas (intercambios superficiales, h_{int} y h_{ext}) garantiza que los flujos de calor calculados se aproximen con rigor a la dinámica del edificio real.

Finalmente, al obligar al algoritmo a minimizar simultáneamente los errores de T_{aire} y T_{sup}, se restringe el espacio de soluciones posibles, mitigando de forma efectiva el fenómeno de la equifinalidad. Se concluye que un modelo de BES con verdadera capacidad predictiva requiere esta calibración integral de la envolvente. Este enfoque no solo asegura la integridad de los procesos de intercambio de energía representados, sino que dota al modelo de la robustez necesaria para proyectar con exactitud el comportamiento de la vivienda ante futuras rehabilitaciones energéticas o casos de cambio climático.

Capítulo 5

Caso de aplicación II: Edificio SOFIA

En éste Capítulo se aborda la implementación práctica de la metodología de calibración escalonada mediante en el edificio experimental SOFIA, ubicado en Bulgaria. El presente estudio propone un proceso secuencial que desacopla las propiedades de los elementos opacos de los parámetros globales del edificio. La originalidad de la propuesta reside en confrontar el enfoque convencional simultáneo frente a una estrategia jerárquica que incorpora las temperaturas superficiales (T_{sup}) a las temperaturas de aire (T_{aire}) para mitigar el fenómeno de la equifinalidad. A través de un análisis comparativo entre cuatro escenarios de calibración (Cal_1 a Cal_4) y una validación cruzada estacional, se demuestra que la concurrencia de este enfoque escalonado y una caracterización física detallada son condiciones indispensables para obtener modelos térmicamente coherentes y con capacidad predictiva anual.

5.1. Caracterización del caso de estudio: Edificio SOFIA

5.1.1. Descripción del edificio y su envolvente

La unidad experimental seleccionada constituye uno de los tres edificios de ensayo construidos en Sofía, Bulgaria (42°41′N 23°19′E), bajo el marco del proyecto europeo [NRG Storage] (Figura 5.1). El diseño arquitectónico y las especificaciones técnicas de estos prototipos se fundamentan en la geometría normalizada del estándar ASHRAE, BESTEST 900, garantizando una configuración de referencia para la evaluación de modelos térmicos. En particular, este estudio se focaliza en el denominado Edificio 1, cuya envolvente se caracteriza por el empleo de poliestireno expandido (EPS) convencional como componente principal de aislamiento térmico.



Figura 5.1: Ubicación e imágenes de los edificios de demostración construidos en Sofía, Bulgaria.

La construcción consiste en una zona térmica única de planta rectangular (8.00 m × 6.00 m exteriores) y una altura libre de 2.50 m. La envolvente transparente, en la fachada principal, está orientada hacia el Sur para maximizar la captación de radiación solar directa; dicha superficie integra dos acristalamientos fijos de dimensiones considerables (3.00 m × 1.80 m). El acceso se resuelve mediante una puerta opaca (0.98 m × 2.11 m) ubicada en la fachada Norte.
La caracterización de la envolvente (Figura 5.2) se basa en sistemas constructivos tradicionales. La composición de los elementos principales se detalla a continuación:

- **Muros:** Cerramiento de mampostería de LCP de 0.25 m de espesor con un sistema de aislamiento térmico exterior de EPS de 0.10 m. Las terminaciones consisten en un revoque cementicio blanco en la cara exterior y un enlucido de yeso blanco en la superficie interior.

- **Cubierta:** Estructura de madera con aislamiento de lana de vidrio (0.18 m) instalada sobre un cielorraso de placa de roca de yeso. La cara exterior presenta una terminación hidrófuga de color negro.

- **Piso:** Platea de hormigón armado de 0.20 m de espesor, la cual incorpora una capa continua de aislamiento de EPS (0.10 m) en la interfaz con el terreno.

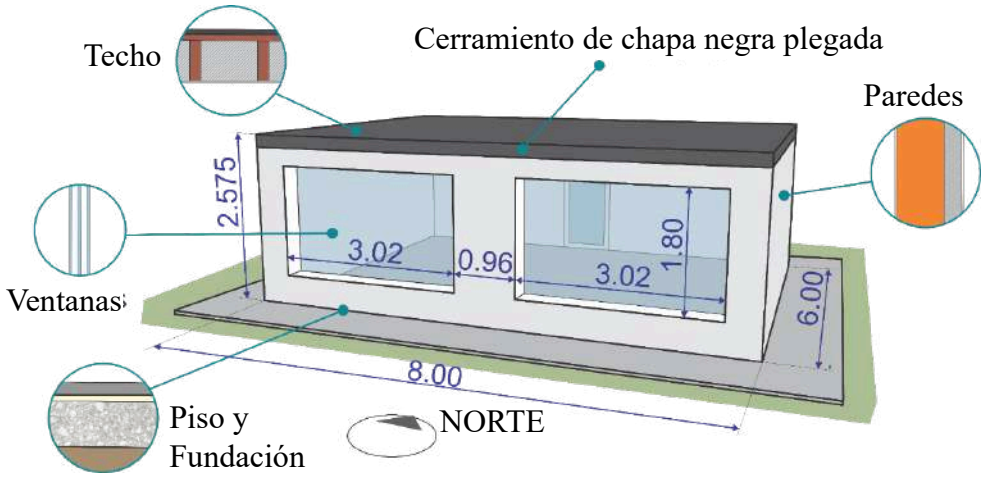


Figura 5.2: Geometría y materiales del Edificio SOFIA.

- **Acristalamientos:** Carpinterías de aluminio blanco con TVH. El sistema se complementa con dispositivos de sombreado exterior consistentes en cortinas móviles de lona blanca.

5.1.2. Protocolo de monitoreo y procesamiento de datos

La campaña experimental se desarrolló durante un ciclo anual completo, comprendido entre el 01/04/2023 y el 31/03/2024. El prototipo operó bajo un régimen de oscilación libre (FF), lo que permite evaluar la respuesta termofísica de la envolvente ante la ausencia de sistemas de climatización y ocupantes. De acuerdo con la instrumentación detallada en la Figura 5.3, el sistema de monitoreo registró de forma continua las siguientes variables físicas:

- **Temperatura de aire interior:** Medición de la T_{aire} en el centro de la zona térmica a través de sensores posicionados a una altura de 1.70 m.
- **Temperaturas superficiales:** Registro simultáneo de las temperaturas en las superficies de los distintos componentes: T^{int}_{piso}, T^{int}_{muro}, T^{ext}_{muro}, T^{int}_{techo} y T^{ext}_{techo}.
- **Variables meteorológicas:** Se dispuso de una estación meteorológica instalada *in situ* para capturar las condiciones de contorno locales, registrando temperatura de bulbo seco, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, y radiación solar global.

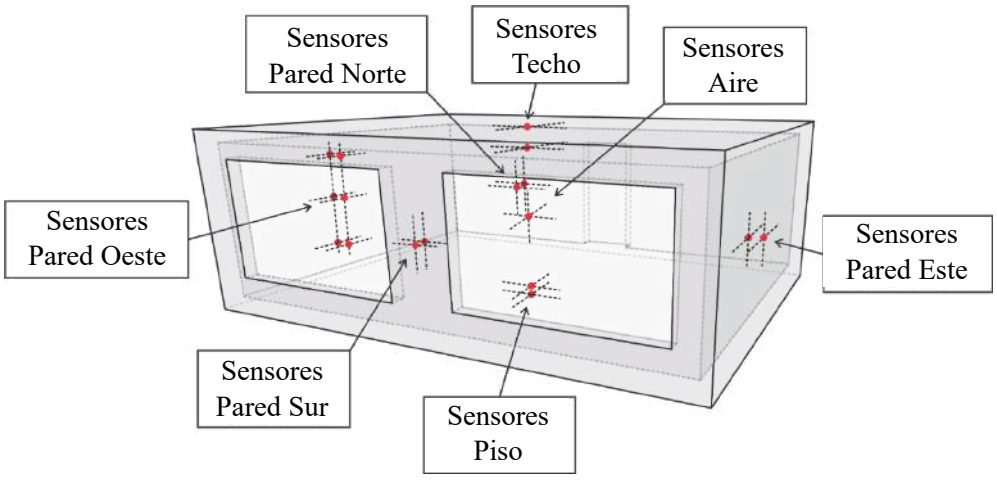


Figura 5.3: Sistema de monitoreo del Edificio SOFIA.

5.2. Implementación y configuración del modelo de simulación

El modelo computacional de referencia se implementó en el motor de simulación $E+$ adoptando los criterios estándar de modelado térmico, conforme a la geometría presentada en la Figura 5.2. En esta instancia inicial, se define una única zona térmica, y la geometría ajustada a la documentación técnica. Los procesos de intercambio de masa se integraron a través del objeto `Infiltration`, utilizando tasas de renovación constantes basadas en las especificaciones de diseño. Para la transferencia de calor superficial, se empleó el algoritmo adaptativo (`Adaptive Convection Algorithm`), de $E+$, el cual selecciona automáticamente las correlaciones de flujo según las condiciones térmicas de cada paso de tiempo. Finalmente, las propiedades termofísicas y ópticas de los materiales se establecieron a partir de valores nominales de catálogo, sin contemplar resistencias térmicas adicionales para cámaras de aire o factores de corrección por puentes térmicos y estado de los acristalamientos.

5.2.1. Evaluación de la sensibilidad paramétrica y fuentes de incertidumbre

Con el propósito de fundamentar la transición hacia una representación más compleja y reducir la dimensionalidad del problema de ajuste, se ejecutó un análisis de sensibilidad local mediante el método One-at-a-time (OAT). Este procedimiento permitió cuantificar el impacto de la perturbación individual de cada parámetro j sobre el $RMSE$ de la T_{aire}, facilitando una jerarquización de las variables según su influencia en la respuesta térmica global.
El análisis focalizó su alcance en cuatro categorías críticas de incertidumbre física que condicionan el balance de energía del prototipo: los fenómenos conductivos en los elementos opacos de la envolvente, las cargas térmicas por radiación, contemplando tanto la transmitancia en acristalamientos como la absortividad en superficies opacas, las áreas de infiltración y los mecanismos de transferencia de calor por convección. Los resultados de esta evaluación no solo permitieron identificar los parámetros dominantes para el proceso de calibración, sino que determinaron la necesidad de implementar una estrategia de modelado detallada capaz de capturar fenómenos locales que el modelo base, debido a sus simplificaciones intrínsecas, no lograba representar con fidelidad.

Conducción en elementos opacos. Con el fin de evaluar la influencia de los fenómenos conductivos, el estudio analizó la variabilidad del error ante fluctuaciones en las resistencias térmicas adicionales (R_{aire}) en techo y muros, y la conductividad de la losa estructural (k_{LHA}). Para ello, se definieron rangos operativos comprendidos entre 0 y 1 m^{2}K/W para las R_{aire}, y entre 0.5 y 2.5 W/m $\cdot$ K para el hormigón, permitiendo capturar la incertidumbre asociada a puentes térmicos y heterogeneidades del material. Como se observa en la Figura 5.4, el $RMSE$ presenta oscilaciones de hasta $1.2\,°$C, evidenciando una sensibilidad dispar según el componente evaluado. Este

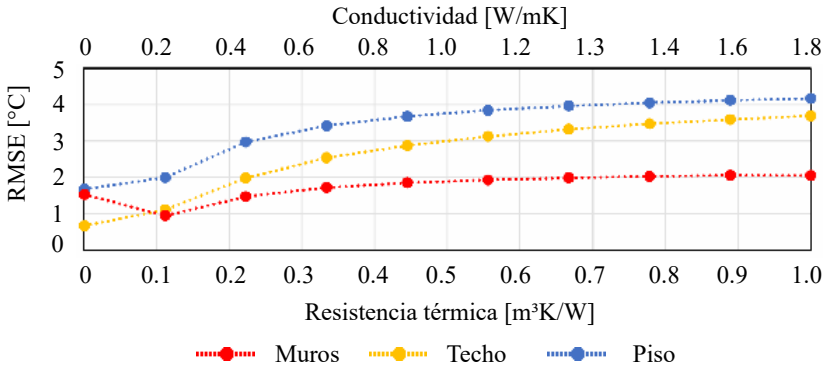


Figura 5.4: Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones de la R_{aire} en las superficies opacas del Edificio SOFIA.

comportamiento confirma que la caracterización precisa de la resistencia térmica de la envolvente es un factor determinante para reducir el sesgo en la predicción de la inercia térmica del prototipo.

Radiación en elementos opacos. La sensibilidad del modelo ante las variaciones en los coeficientes de absortividad térmica (α_T) y solar (α_S) se evaluó mediante la perturbación de sus valores en un rango exhaustivo de 0.01 a 0.99. Como se desprende de las Figuras 5.5 a 5.9, el impacto sobre el $RMSE$ se encuentra estrictamente condicionado por el rol de cada componente en el balance energético global y su grado de exposición a la irradiancia. En particular, las superficies exteriores con mayor incidencia de radiación directa presentan las mayores fluctuaciones en el error residual. Este comportamiento pone de manifiesto que el uso de valores genéricos de absortividad induce a una caracterización imprecisa de los flujos de calor radiativo, validando la necesidad de tratar estas propiedades como variables críticas de ajuste para garantizar la integridad térmica de la envolvente en el modelo detallado.

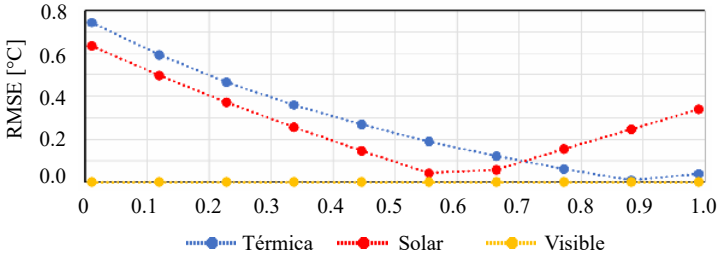


Figura 5.5: Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones de α_S y α_T en el techo del Edificio SOFIA.

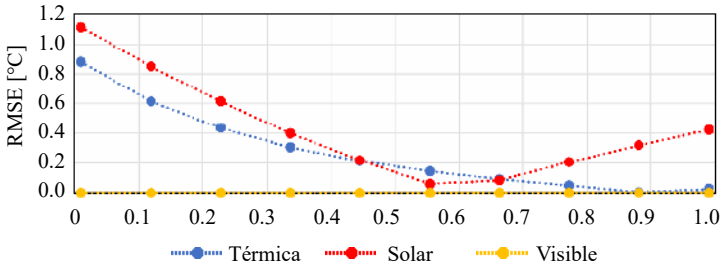


Figura 5.6: Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones de α_S y α_T en el cielorraso del Edificio SOFIA.

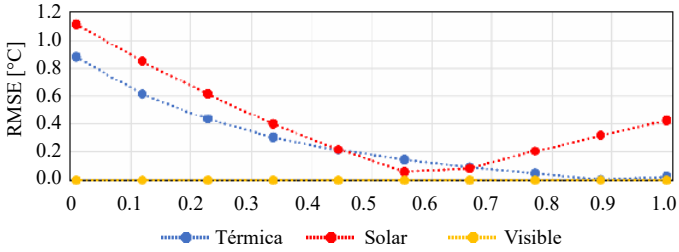


Figura 5.7: Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones de α_S y α_T en el piso del Edificio SOFIA.

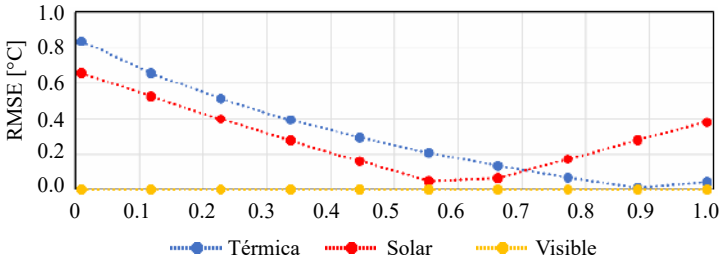


Figura 5.8: Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones de α_S y α_T en la superficie interior de muros del Edificio SOFIA.

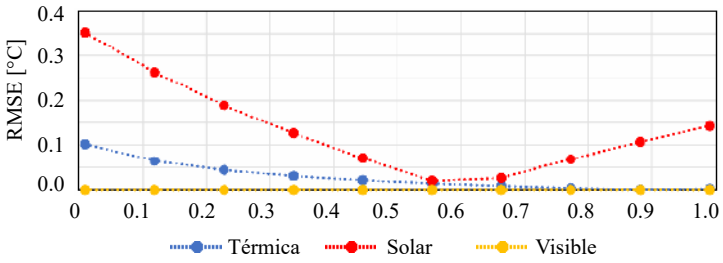


Figura 5.9: Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones de α_S y α_T en la superficie exterior de muros del Edificio SOFIA.

Algoritmos de convección interiores y exteriores. Se analizó el impacto de la variabilidad del error ante las diversas correlaciones disponibles en $E+$ para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por convección interiores (h_{int}) y exteriores (h_{ext}), evaluando exhaustivamente el espacio de soluciones generado por sus combinaciones. Como se observa en la Figura 5.10, el

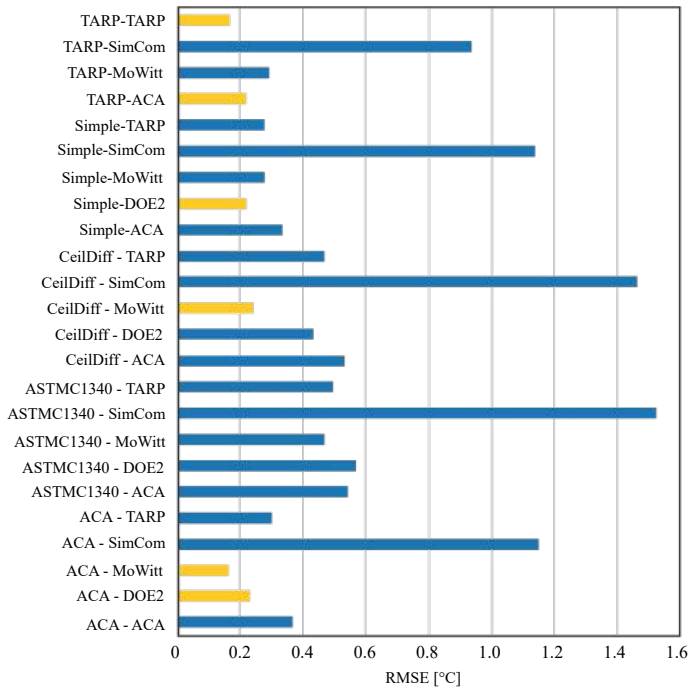


Figura 5.10: Análisis de sensibilidad del RMSE ante la variación de los modelos de coeficientes h_{int} y h_{ext} en el Edificio SOFIA.

modelo presenta una elevada sensibilidad ante la selección de estos algoritmos, con fluctuaciones en el $RMSE$ que oscilan entre 0.2 y 1.5 °C. Esta dispersión en los resultados evidencia que la elección de un modelo de convección inadecuado puede distorsionar significativamente el balance térmico superficial, introduciendo errores que comprometen la fidelidad de la respuesta térmica del aire. La magnitud de esta sensibilidad valida la necesidad de prescindir de los algoritmos adaptativos convencionales y fundamenta la implementación de un modelo de cálculo dinámico, como el de McAdams, para resolver con mayor rigor físico el acoplamiento convectivo en las superficies del edificio.

Propiedades de los elementos transparentes. Los resultados evidencian que el desempeño térmico de los acristalamientos constituye el factor de mayor peso en la precisión global del modelo. Como se observa en la Figura 5.11, el $RMSE$ presenta fluctuaciones drásticas que oscilan entre 0 y 14 °C ante variaciones en la transmitancia térmica (U), perturbada en un rango de 0 a 6 W/m^{2}K, y el factor de ganancia de calor solar ($SHGC$), explorado en su totalidad de 0 a 1. La magnitud de este impacto supera significativamente la sensibilidad registrada en el resto de los componentes de la envolvente, lo que confirma que las ganancias radiativas a través de la fachada Sur dominan el balance de energía del edificio. Esta sensibilidad no solo justifica el ajuste de las propiedades ópticas del vidrio, sino que fundamenta la necesidad de implementar una discretización espacial fina en las superficies opacas circundantes; de este modo, se evita la simplificación intrínseca de $E+$ de promediar las temperaturas superficiales.

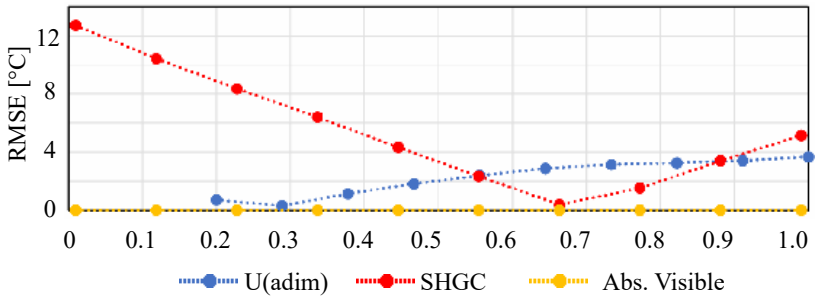


Figura 5.11: Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones de U, SHGC y absortividad visible en las superficies vidriadas.

Infiltración. Finalmente, se analizó la sensibilidad del modelo ante variaciones en el caudal de infiltración (Q_{inf}), perturbando los valores en un rango operativo expresado en m^3/s. Los resultados confirmaron que este parámetro constituye una variable determinante en el balance de calor sensible, induciendo fluctuaciones en el $RMSE$ que oscilan entre 0.6 °C y 5.5 °C (Figura 5.12). La magnitud de estas desviaciones pone de manifiesto que la permeabilidad al aire de la envolvente condiciona severamente la respuesta transitoria del aire interior, especialmente en periodos de

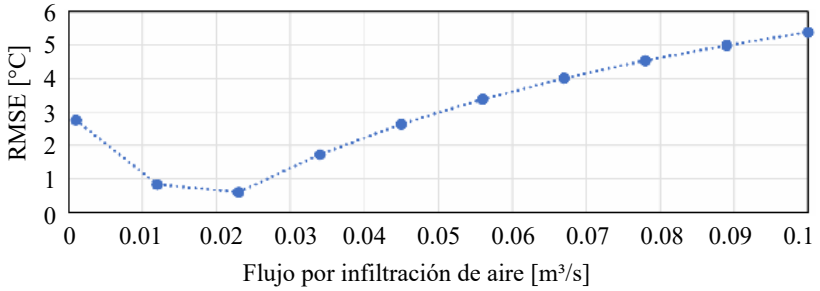


Figura 5.12: Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones del Q_{inf} en el Edificio SOFIA.

gran amplitud térmica exterior. Esta sensibilidad fundamenta la necesidad de transitar desde una tasa de renovación constante en el modelo base hacia una caracterización más robusta en el modelo detallado, mediante la implementación del objeto `Effective Leakage Area`, permitiendo una respuesta dinámica más acorde a los registros experimentales.

Análisis de la incertidumbre constructiva y estacional. La evolución de las condiciones superficiales en el sitio evidencia una marcada variabilidad estacional, tal como se documenta en la Figura 5.13.

Con el fin de capturar la variabilidad inherente a las condiciones reales de emplazamiento y ejecución, se definieron tres ejes críticos de incertidumbre física que condicionan la fidelidad del modelo. En primer término, se consideró el impacto ambiental y estacional, donde la presencia de nieve altera significativamente el albedo local y la acumulación de suciedad en la envolvente modifica la absortividad solar (α_S), modificando el balance radiativo exterior.

En segundo lugar, se abordó la incertidumbre asociada a la ejecución de obra, centrada en las desviaciones de densidad (ρ) y en las irregularidades de espesor de los revoques tradicionales; estos factores introducen variaciones en la capacidad calorífica de los cerramientos que impactan directamente en la inercia térmica del edificio. Finalmente, se integró la dinámica de las cámaras de aire, reconociendo que la resistencia térmica (R_{aire}) no es un valor estático, sino que fluctúa en función de los gradientes de temperatura y los flujos convectivos internos.



Figura 5.13: Análisis de sensibilidad del RMSE ante variaciones del Q_{inf} en el Edificio SOFIA.

5.2.2. Modelado computacional detallado

El modelo computacional se desarrolló en el motor de simulación $E+$ (Figura 5.14). Con el objetivo de minimizar la incertidumbre espacial y elevar la precisión de los resultados, se realizó una discretización de la envolvente opaca en subdivisiones de 1 m^2. Esta estrategia metodológica responde a la necesidad de mitigar las limitaciones de $E+$, que promedia la temperatura superficial de cada cara de la zona térmica. Debido a la presencia de grandes acristalamientos en la fachada Sur, la incidencia de la radiación solar directa genera gradientes térmicos significativos en las superficies adyacentes; por lo tanto, la subdivisión permite capturar estas variaciones locales y garantizar una correspondencia nodal exacta entre los puntos de cálculo y la ubicación física de los sensores de T_{sup} instalados en el prototipo.
Los criterios de modelado se fundamentan en los siguientes puntos:

- **Caracterización de infiltraciones:** El flujo de aire no controlado (Q_{inf}) se integró mediante el modelo de área de infiltración efectiva (`Effective Leakage Area`), permitiendo una representación simplificada pero robusta de la permeabilidad de la envolvente.
- **Ajustes y factores de corrección:** Se incorporaron resistencias térmicas adicionales (R_{aire}) para contabilizar el impacto de los puentes térmicos en los encuentros estructurales. Asimismo, se aplicó un factor de suciedad (D_{vidrio}) para cuantificar la degradación de la transmitancia visible y la ganancia solar debido al estado real de los acristalamientos.
- **Cálculo de coeficientes convectivos:** Se optó por la imposición de coeficientes de transferencia de calor por convección interiores (h_{int}) y coeficientes de transferencia de calor por convección exteriores (h_{ext}) mediante el modelo de McAdams detallado en la Sección 4.2.3 mediante la Ecuación 4.1. Esta configuración permite resolver con mayor fidelidad el acoplamiento entre las superficies y el aire de zona, evitando que el modelo subestime los intercambios energéticos en las superficies interiores y exteriores, especialmente ante la presencia de grandes superficies vidriadas.

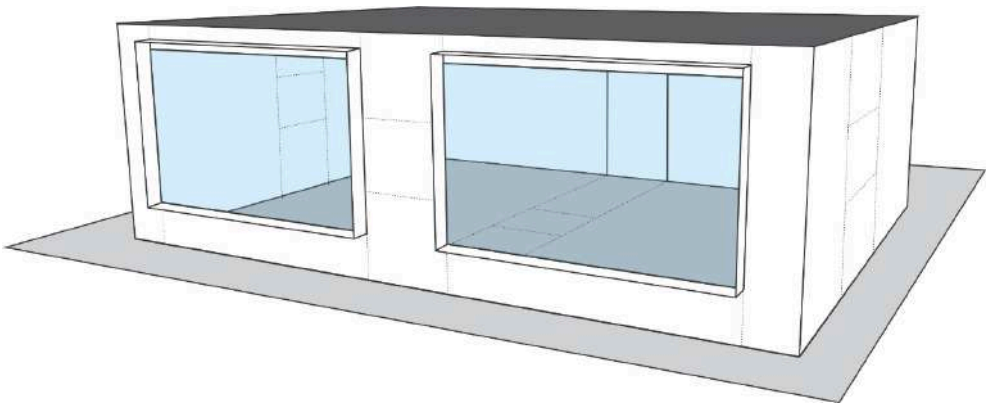


Figura 5.14: Modelo de simulación computacional en EnergyPlus del Edificio SOFIA.

5.2.3. Definición de parámetros de ajuste

El análisis de sensibilidad previo permitió jerarquizar los factores con impacto crítico en la fidelidad del modelo, distinguiendo aquellas variables que condicionan la respuesta térmica del prototipo. Con base en estos resultados, y reconociendo la dificultad de caracterizar fenómenos estocásticos de forma determinista, se definieron los parámetros definitivos para el proceso de optimización, orientados a resolver las incertidumbres constructivas, ambientales y de modelado identificadas.

En lo referente a la conducción en superficies opacas, se seleccionó el ajuste de las resistencias térmicas adicionales (R_{aire}) en muros y techos, integrando la variabilidad de la densidad en materiales estructurales y aislantes (ρ_{LCP}, ρ_M, ρ_{LHA}) junto con la conductividad del hormigón (k_{LHA}). Para capturar la respuesta radiativa del entorno documentada en la Sección 5.2.1, se incorporaron la reflectancia del suelo (ρ_{suelo}) y las absortividades térmica (α_T) y solar (α_S) de la envolvente exterior.

El comportamiento dinámico del aire y los intercambios superficiales se calibrarán mediante el ajuste del área de infiltración efectiva (A_{inf}), los coeficientes convectivos interiores (h_{int}) y los coeficientes convectivos exteriores (h_{ext}). Para este último punto, se optimizarán los parámetros m y n del modelo de McAdams, permitiendo una adaptación precisa a la climatología del sitio. Finalmente, se adoptó el factor de suciedad (D_{vidrio}) y la transmitancia de las protecciones solares (τ_{Sombra}) como variables de compensación ante la alteración de las propiedades ópticas nominales de los acristalamientos.

Tabla 5.1: Vector de parámetros de calibración y rangos del espacio de búsqueda (Ω) para el Edificio SOFIA.

Parámetro	**Valor Inicial**	**Rango** (Ω)
m_{muro}, n_{muro}	3.6 / 6.5	1.0 — 10.0
m_{techo}, n_{techo}	3.8 / 7.4	1.0 — 10.0
$R_{airemuro}$ $m^2 \cdot K/W$	1.00	0.01 — 1.00
$R_{airetecho}$ $m^2 \cdot K/W$	1.00	0.01 — 1.00
ρ_{LCP} kg/m^3	500	300 — 700
ρ_M kg/m^3	550	400 — 800
$\alpha^{ext}_{T,muro}$	0.85	0.01 — 0.99
$\alpha^{ext}_{T,techo}$	0.95	0.01 — 0.99
$\alpha^{ext}_{S,muro}$	0.60	0.01 — 0.99
$\alpha^{ext}_{S,techo}$	0.95	0.01 — 0.99
h_{int} $W/m^2 \cdot K$	Variable	1.0 — 20.0
ρ_{LHA} kg/m^3	2400	1000 — 12000
k_{LHA} $W/m \cdot K$	1.63	0.5 — 10.0
ρ_{suelo}	0.20	0.01 — 0.50
τ_{Sombra}	0.01	0.01 — 0.15
D_{vidrio}	1.00	0.60 — 1.00
A_{inf} cm^2	150	50 — 1500

5.3. Metodologías de calibración comparadas

Con el propósito de evaluar la eficacia del modelado inverso aplicado a la envolvente, se diseñó un experimento comparativo estructurado en cuatro estrategias de calibración. Todos los escenarios emplean un motor de SBO basado en el acoplamiento de GA con $E+$. En cada configuración, el algoritmo busca la minimización del $RMSE$ como métrica de error principal. No obstante, las estrategias se diferencian en la arquitectura de la FO y en la secuencia metodológica del procedimiento.

5.3.1. Calibración 1 (Cal. 1): Metodología Secuencial Detallada

Esta es la propuesta central del estudio. Desacopla el problema en dos etapas para reducir la dependencia e interrelación entre parámetros:

1. **Paso 1 (Envolvente Opaca):** Consiste en la calibración individual de cada componente de la envolvente opaca. En esta etapa, se impone la T_{sup} interior medida como condición de borde térmica, lo que permite desacoplar analíticamente el elemento de la influencia de la ZT y de las fluctuaciones por Q_{inf}. El objetivo es la minimización del $RMSE$ de la T_{sup} exterior simulada frente a la medida.

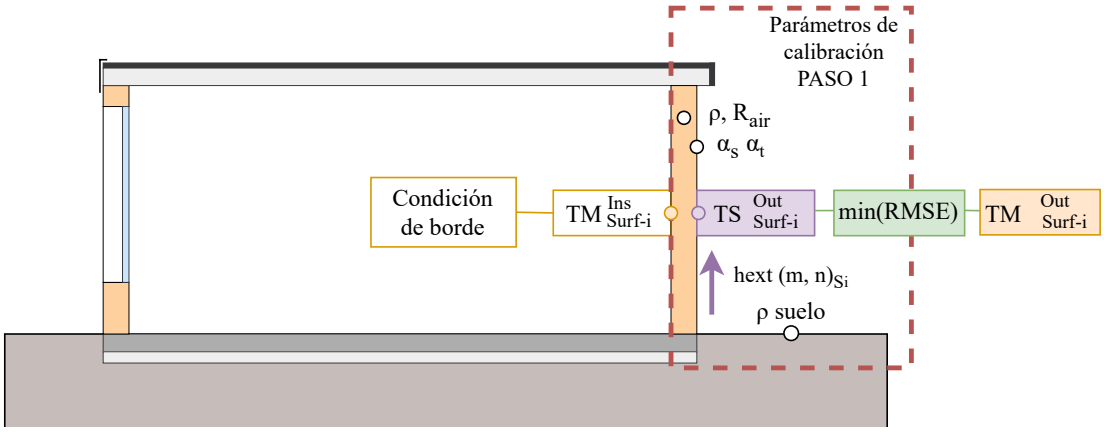


Figura 5.15: Paso 1 de la metodología escalonada propuesta: aislamiento de componentes opacos.

2. **Paso 2 (Modelo Global):** Una vez fijadas las propiedades de las superficies opacas, se procede a la calibración del modelo integral. Se minimiza una FO de tipo MOO que busca reducir simultáneamente el $RMSE$ de la T_{aire} y de las T_{sup}. Los parámetros se centran en el flujo de aire (A_{inf}), propiedades de vidrios (D_{vidrio}) y la inercia interna.

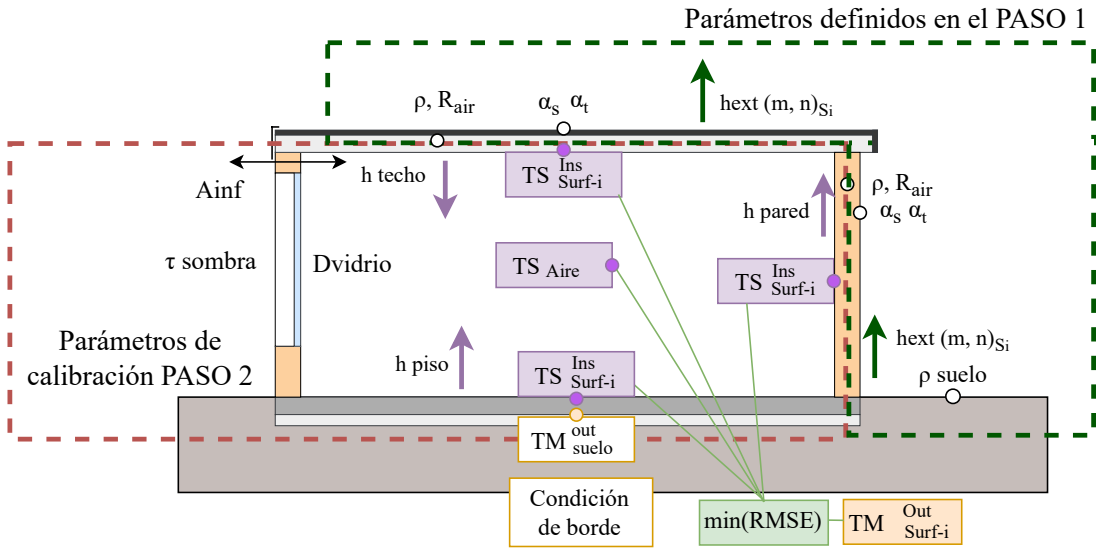


Figura 5.16: Paso 2 de la metodología escalonada propuesta: calibración del balance global.

Como se muestra en la Figura 5.17, la metodología se escalona en dos etapas secuenciales para desacoplar las incertidumbres del modelo.

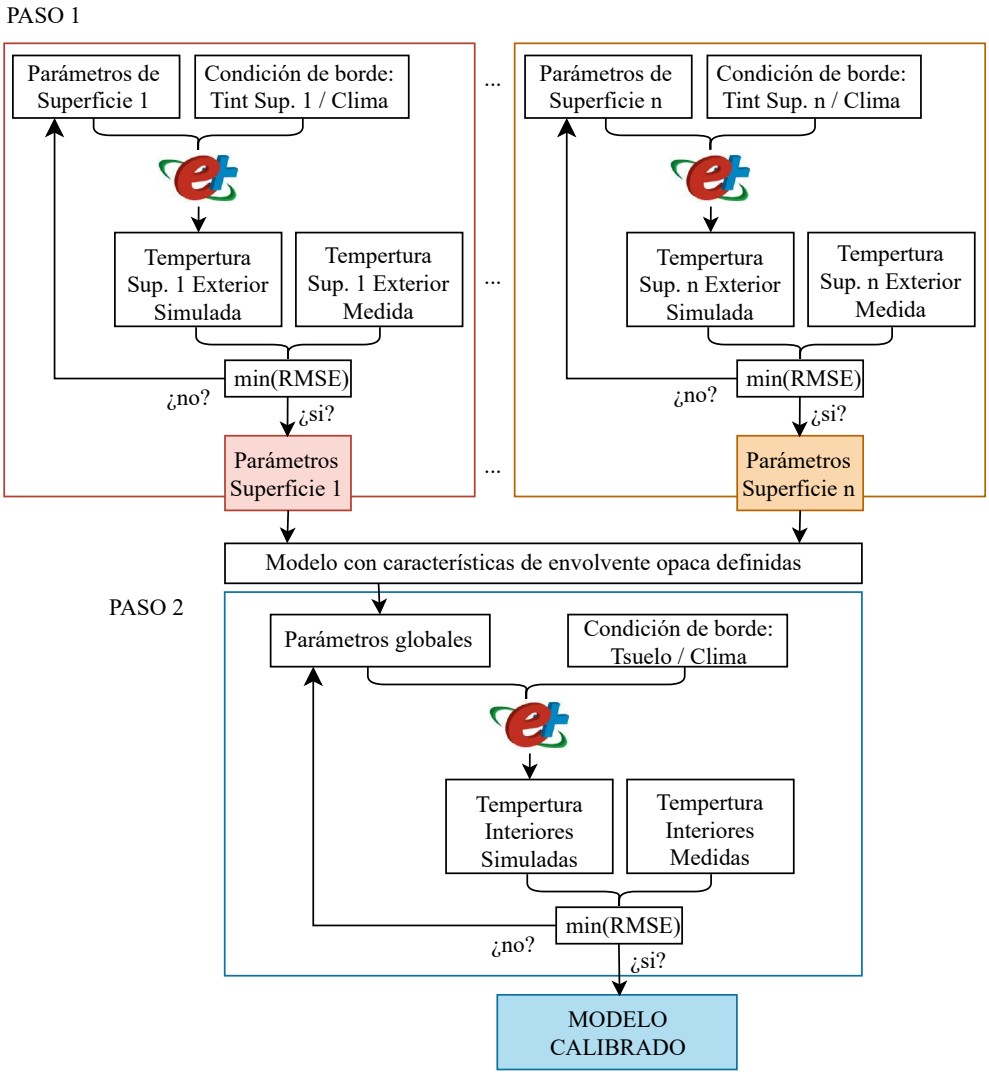


Figura 5.17: Metodología de calibración en dos pasos (*Step-wise*) para el Edificio SOFIA.

5.3.2. Calibración 2 (Cal. 2): Enfoque Clásico Mono-objetivo

El enfoque convencional emplea una optimización MOO centrada exclusivamente en el $RMSE$ de la T_{aire}. Bajo este esquema, el ajuste se restringe a parámetros globales como las propiedades de la envolvente opaca (R_{aire}, ρ y k), la infiltración mediante A_{inf}, manteniendo valores normativos para los coeficientes convectivos (h_{int} y h_{ext}) y las propiedades ópticas α_S y α_T.

5.3.3. Calibración 3 (Cal. 3): Enfoque Mono-objetivo Detallado

Se propone un escenario que mantiene como único objetivo la minimización del error en la T_{aire}, pero expande el vector de variables incorporando parámetros de transferencia superficial (h_{int}, h_{ext}, α_S y α_T). Esta configuración busca evaluar si el incremento en los grados de libertad del modelo permite mejorar la respuesta térmica global sin requerir la integración de objetivos adicionales, analizando así la capacidad de ajuste del sistema bajo una mayor flexibilidad paramétrica.

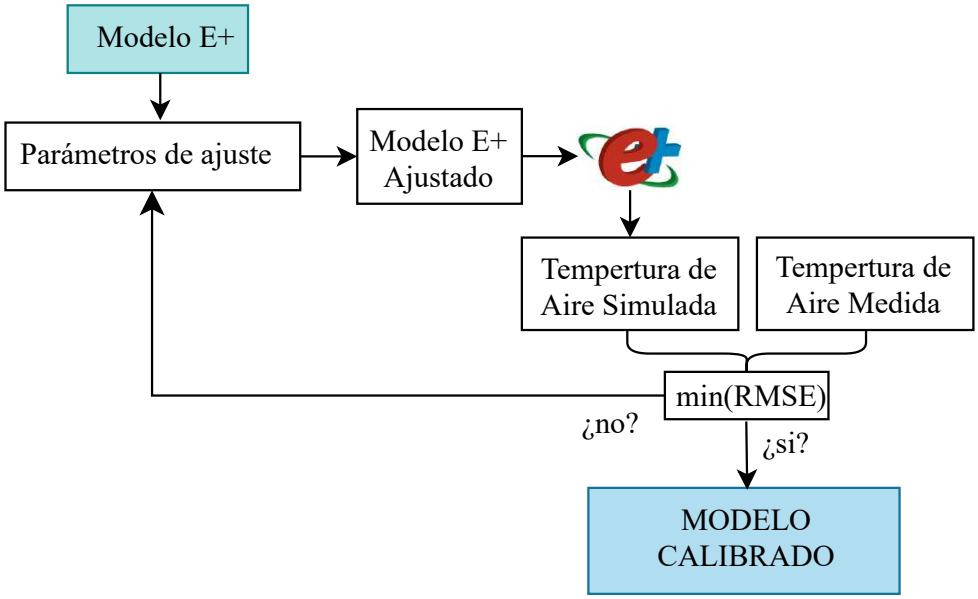


Figura 5.18: Metodología de calibración Mono-Objetivo.

5.3.4. Calibración 4 (Cal. 4): Enfoque Multi-objetivo Global

Se define una optimización multi-objetivo en una sola etapa que minimiza simultáneamente los errores en T_{aire}, T_{sup} interior y exterior, ajustando el vector completo de parámetros de forma concurrente. Esta configuración funciona como línea base para evaluar la eficacia del desacople secuencial propuesto en la metodología escalonada, permitiendo cuantificar si el tratamiento conjunto de las variables logra el mismo nivel de fidelidad física que el enfoque por etapas.

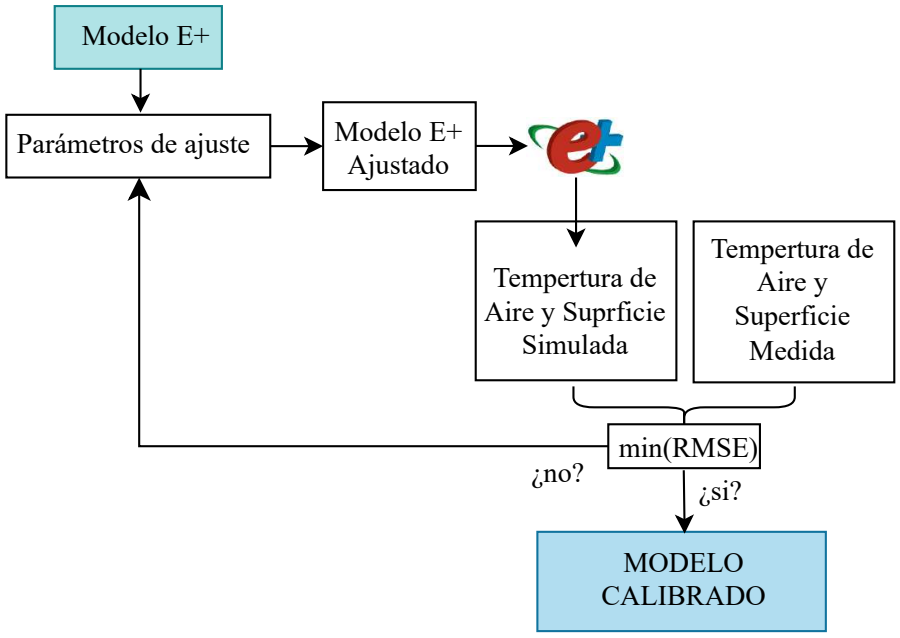


Figura 5.19: Metodología de calibración Multi-Objetivo con enfoque global.

5.4. Análisis y discusión de resultados: Edificio SOFIA

Para verificar la precisión y robustez de la metodología de calibración de dos pasos, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva mediante tres enfoques comparativos: un **análisis directo mensual**, un **análisis de variabilidad temporal cruzada** y la **validación en meses no contemplados** durante la calibración. Esta triple validación permite determinar si el modelo no solo ajusta matemáticamente los datos, sino que conserva su capacidad predictiva ante cambios en las condiciones de contorno y en periodos de tiempo independientes a los utilizados para la calibración.

5.4.1. Análisis directo

Este análisis se fundamenta en el comportamiento del $RMSE$ para tres variables críticas que definen el balance energético del prototipo: la temperatura del aire (T_{aire}), y las temperaturas superficiales interiores y exteriores (T_{sup}). La evaluación conjunta de estos indicadores permite verificar no solo la precisión global del modelo, sino también la coherencia térmica, asegurando que la reducción del error no sea producto de una compensación matemática.

Comparación Directa: Febrero

El análisis directo correspondiente al mes de febrero (invierno) se detalla en la Tabla 5.2 y se ilustra en la Figura 5.20.

Tabla 5.2: RMSE del mes de Febrero para los distintos escenarios de calibración.

RMSE	$Cal_{1,P1}$	$Cal_{1,P2}$	Cal_2	Cal_3	Cal_4
T_{aire}	-	**0.21**	**0.37**	**0.19**	**0.21**
$T^{int}_{muro}\ E$	-	**0.30**	0.34	0.34	**0.33**
$T^{int}_{muro}\ S$	-	**0.27**	0.37	0.27	**0.27**
$T^{int}_{muro}\ O$	-	**0.23**	0.29	0.27	**0.26**
$T^{int}_{muro}\ N$	-	**0.32**	0.33	0.35	**0.34**
T^{int}_{techo}	-	**0.22**	0.36	0.24	**0.24**
T^{int}_{piso}	-	**0.11**	0.13	0.11	**0.12**
$T^{ext}_{muro}\ E$	**1.72**	2.14	1.91	2.74	**2.06**
$T^{ext}_{muro}\ S$	**1.61**	2.92	1.31	3.08	**1.91**
$T^{ext}_{muro}\ O$	**1.57**	1.85	1.82	2.88	**1.99**
$T^{ext}_{muro}\ N$	**1.29**	2.40	1.31	1.70	**1.41**
T^{ext}_{techo}	**2.89**	4.83	3.57	4.40	**4.50**

Al analizar los indicadores estadísticos presentados en la Tabla 5.2, se observa que las estrategias Cal_1, Cal_3 y Cal_4 alcanzan una precisión elevada en la predicción de la T_{aire}, con valores de $RMSE$ que oscilan entre 0.19 y $0.21\,°C$. En contraste, el enfoque convencional representado por Cal_2 presenta un desempeño notablemente inferior con un error de $0.37\,°C$ en T_{aire}, lo que evidencia las limitaciones de los métodos MOO que omiten la complejidad de las transferencias superficiales. Esta tendencia se replica en las superficies interiores, donde el acoplamiento térmico con el aire de zona permite que un buen ajuste en T_{aire} se traduzca en errores bajos de T_{sup}, destacándose especialmente el desempeño de $Cal_{1,P2}$ en el cielorraso ($0.22\,°C$) y el piso ($0.11\,°C$).

La robustez de la metodología escalonada se manifiesta con con un nivel superior de precisión al evaluar el comportamiento de la envolvente exterior, donde las amplitudes térmicas alcanzan valores de entre 20 y $40\,°C$. En esta instancia, el primer paso de la calibración ($Cal_{1,P1}$) logra los errores sistemáticamente más bajos en todas las superfices, con valores de $RMSE$ entre 1.85 y $4.83\,°C$ para los muros y de $2.89\,°C$ para el techo.

Si comparamos los resultados de Cal_1 y Cal_4, la superioridad de Cal_1 sobre la optimización simultánea de Cal_4 radica en la capacidad de resolver las interdependencias paramétricas mediante

la subdivisión del problema. Mientras que Cal_4 debe ajustar concurrentemente un vector de 21 variables, lo que suele conducir a soluciones triviales o de compromiso donde unos errores compensan a otros, la estrategia secuencial asegura que las propiedades térmicas de cada superficie se consoliden antes de abordar el balance global. Bajo esta lógica, Cal_1 no solo minimiza el error, sino que garantiza una consistencia física superior en todos los nodos del modelo.

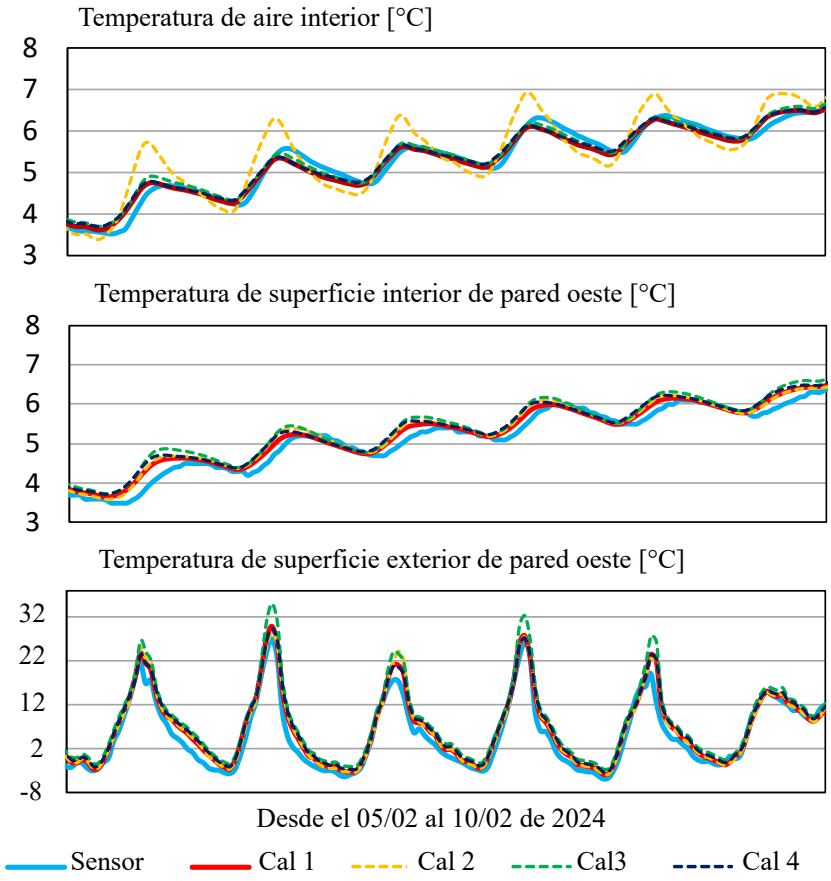


Figura 5.20: Temperaturas resultantes de las distintas calibraciones en el mes de febrero.

La Figura 5.20 permite validar visualmente los indicadores estadísticos, evidenciando que Cal_1 es la estrategia que mejor replica la trayectoria de los sensores en todos los nodos evaluados. Mientras que las calibraciones Cal_2 y Cal_3 presentan sobreestimaciones en los picos de temperatura o amplitudes térmicas, la metodología escalonada captura con precisión la dinámica superficial ante oscilaciones diarias de hasta 30 °C. Esta correspondencia temporal confirma que el desacople secuencial no solo reduce el error numérico, sino que asegura una respuesta dinámica coherente, consolidando a Cal_1 como la configuración más robusta para representar el comportamiento del edificio.

Comparación directa: Junio

Para el periodo estival (junio), los resultados se presentan en la Tabla 5.3 y la Figura 5.21.
Al analizar los indicadores de junio presentados en la Tabla 5.3, se observa que si bien Cal_3 alcanza el error mínimo en T_{aire} (0.17 °C) debido a su enfoque MO, esta precisión no se transfiere a las superficies. En las superficies interiores, Cal_1 logra una mayor exactitud con valores de $RMSE$ entre 0.30 y 0.33 °C para muros, mientras que en las exteriores Cal_2 presenta marcadas dificultades de ajuste, alcanzando errores críticos cercanos a los 20 °C en las superficies Este y Oeste. Estos desvíos se deben a la exclusión de variables clave como los coeficientes convectivos

Tabla 5.3: RMSE del mes de Junio para los distintos escenarios de calibración.

RMSE	$Cal_{1,P1}$	$Cal_{1,P2}$	Cal_2	Cal_3	Cal_4
T_{aire}	-	**0.48**	**0.56**	**0.17**	**0.41**
T^{int}_{muro} E	-	**0.31**	0.43	0.58	**0.57**
T^{int}_{muro} S	-	**0.33**	0.38	0.49	**0.56**
T^{int}_{muro} O	-	**0.30**	0.43	0.64	**0.60**
T^{int}_{muro} N	-	**0.31**	0.42	0.58	**0.59**
T^{int}_{techo}	-	**0.66**	0.70	0.54	**0.93**
T^{int}_{piso}	-	**0.23**	0.21	0.25	**0.22**
T^{ext}_{muro} E	**2.70**	2.91	3.63	19.25	**3.30**
T^{ext}_{muro} S	**2.16**	2.16	4.51	12.10	**2.72**
T^{ext}_{muro} O	**2.35**	2.48	2.98	19.46	**2.87**
T^{ext}_{muro} N	**1.28**	1.28	2.14	7.87	**1.28**
T^{ext}_{techo}	**8.57**	10.89	9.10	8.44	**8.93**

(h_{int}, m, n) y las absortividades (α_T, α_S). Por su parte, Cal_2 logra atenuar estas limitaciones respecto a Cal_3, aunque mantiene errores sistemáticamente superiores a Cal_1 y Cal_4 al centrarse exclusivamente en la temperatura del aire.
En términos dinámicos, Cal_3 lidera la aproximación en T_{aire}, mientras que Cal_2 tiende a la sobreestimación y los esquemas Cal_1 y Cal_4 presentan resultados intermedios y convergentes entre sí. No obstante, al evaluar T^{int}_{muro} O, las estrategias Cal_2, Cal_3 y Cal_4 exhiben amplitudes térmi-

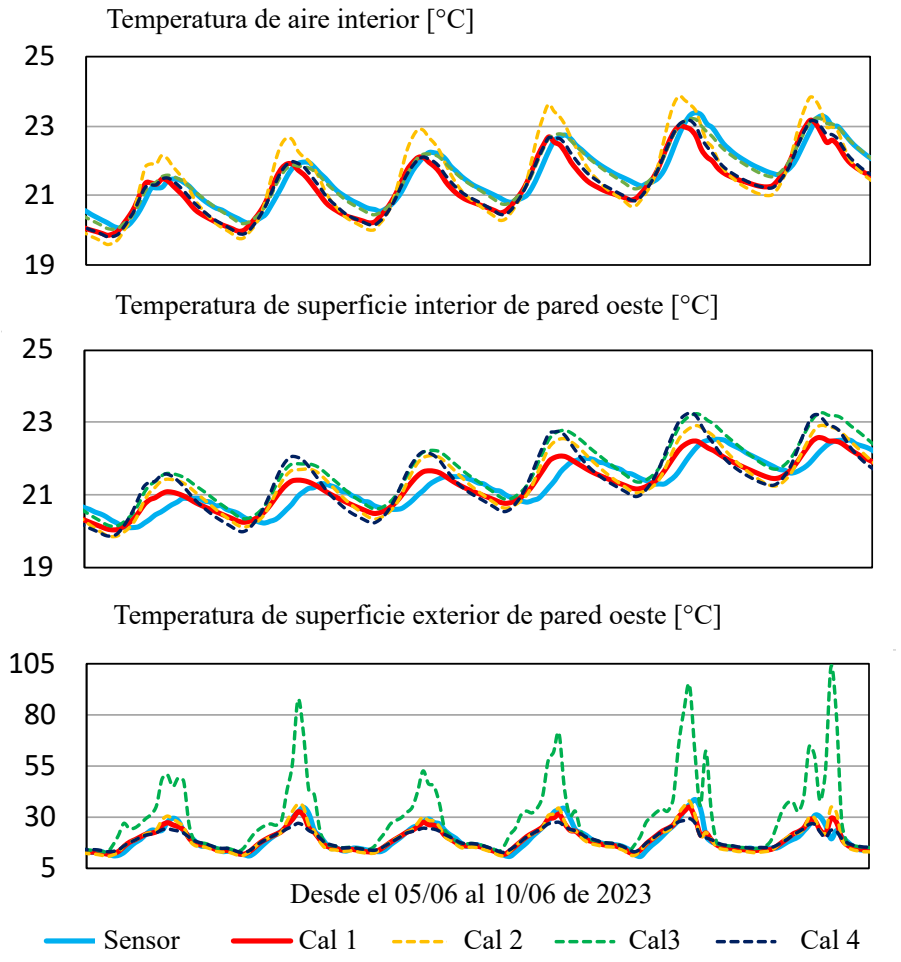


Figura 5.21: Temperaturas resultantes de las distintas calibraciones en el mes de junio.

cas excesivas frente a los registros experimentales. En contraste, Cal_1 es la única que reproduce fielmente las variaciones observadas gracias a su estrategia de ajuste secuencial por elemento, logrando un $RMSE$ de apenas $0.30\,°C$ frente al $0.64\,°C$ de Cal_3 o el $0.60\,°C$ de Cal_4. Esta superioridad de Cal_1 se extiende a las temperaturas exteriores, donde el primer paso de la calibración ($Cal_{1,P1}$) garantiza los desvíos más bajos, destacándose en la fachada Norte con solo $1.28\,°C$.
En síntesis, los resultados de junio confirman que los métodos focalizados únicamente en el aire (Cal_2 y Cal_3) sacrifican la representatividad del sistema en favor de un ajuste puntual. En cambio, Cal_1 y Cal_4 logran soluciones más equilibradas al integrar la totalidad del vector de variables. Entre ellas, Cal_1 se posiciona como la metodología más robusta y consistente, ya que su estrategia en pasos permite procesar la complejidad térmica del edificio evitando soluciones de compromiso que comprometan la precisión de las superficies. Esto puede verse en la distribución de temperatura de la Figura 5.21

Comparación directa: Agosto

El mes de agosto presenta el reto de la mayor amplitud térmica exterior ($25.2\,°C$). Los resultados se resumen en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: RMSE del mes de Agosto para los distintos escenarios de calibración.

RMSE	$Cal_{1,P1}$	$Cal_{1,P2}$	Cal_2	Cal_3	Cal_4
T_{aire}	-	**0.47**	**0.76**	**0.31**	**0.72**
$T^{int}_{muro}\ E$	-	**0.57**	0.51	0.74	**0.42**
$T^{int}_{muro}\ S$	-	**0.53**	0.43	0.61	**0.49**
$T^{int}_{muro}\ O$	-	**0.63**	0.55	0.80	**0.37**
$T^{int}_{muro}\ N$	-	**0.62**	0.52	0.72	**0.40**
T^{int}_{techo}	-	**0.66**	0.82	0.98	**0.75**
T^{int}_{piso}	-	**0.21**	0.27	0.19	**0.29**
$T^{ext}_{muro}\ E$	**2.99**	3.15	3.93	24.51	**5.68**
$T^{ext}_{muro}\ S$	**2.34**	2.38	5.82	18.84	**3.55**
$T^{ext}_{muro}\ O$	**2.27**	2.51	2.76	24.63	**5.40**
$T^{ext}_{muro}\ N$	**1.15**	1.14	1.57	7.01	**2.13**
T^{ext}_{techo}	**8.21**	9.54	9.04	10.90	**10.62**

Al analizar los indicadores estadísticos de agosto presentados en la Tabla 5.4, se observa que Cal_3 alcanza el $RMSE$ más bajo en T_{aire} ($0.31\,°C$), valor que representa aproximadamente la mitad del error registrado por los esquemas Cal_2 y Cal_4. No obstante, esta precisión en el aire no se traslada de forma homogénea a las superficies interiores; en estas, los errores más bajos corresponden a Cal_4, seguida por Cal_1 y Cal_2, mientras que Cal_3 exhibe los errores más elevados. El comportamiento de la envolvente exterior acentúa significativamente estas diferencias: Cal_2 presenta desvíos críticos que superan los $24\,°C$, confirmando que la omisión de las variables de transferencia superficial (h_{int}, m, n, α_T y α_S) impide una caracterización adecuada del modelo. En este contexto, Cal_1 se consolida como la estrategia de mayor precisión global al mantener un equilibrio de errores bajos en todos los puntos de control.
Las calibraciones Cal_1 y Cal_3 logran la correspondencia más estrecha con las mediciones de T_{aire}, mientras que Cal_2 y Cal_4 tienden a subestimar la amplitud térmica, reduciendo la calidad del ajuste temporal. Esta tendencia se profundiza al evaluar $T^{int}_{muro}\ O$, donde las temperaturas obtenidas con Cal_4 subestiman los registros experimentales frente a la mejor aproximación de Cal_2 y Cal_3; sin embargo, es la metodología Cal_1 la que reduce el error global del sistema y reproduce con mayor fidelidad la tendencia observada. En la interfaz exterior ($T^{ext}_{muro}\ O$), Cal_1 vuelve a destacar por su capacidad para capturar con detalle la evolución térmica diaria, superando el ajuste intermedio de Cal_3, la sobreestimación de Cal_4 y las severas desviaciones de Cal_2.
La efectividad puntual de Cal_2 y Cal_3 en el aire se explica por su enfoque metodológico restrictivo, orientado exclusivamente a la minimización de dicha variable. Por el contrario, la inclusión

del vector completo de parámetros y la observación simultánea de todas las temperaturas en Cal_1 y Cal_4 permiten refinar la estimación y alcanzar un desempeño superior. Entre estas últimas, Cal_1 resulta más consistente gracias a su estrategia secuencial por etapas, la cual evita las soluciones de compromiso propias de Cal_4.

La Figura 5.22 ratifica visualmente la solidez de Cal_1, que logra replicar con precisión la dinámica térmica en todas las superficies evaluadas, contrastando con las críticas sobre estimaciones de Cal_3 en la superficie exterior —donde los picos calculados duplican los registros reales— y la incapacidad de Cal_2 y Cal_4 para capturar la amplitud térmica total del aire interior.

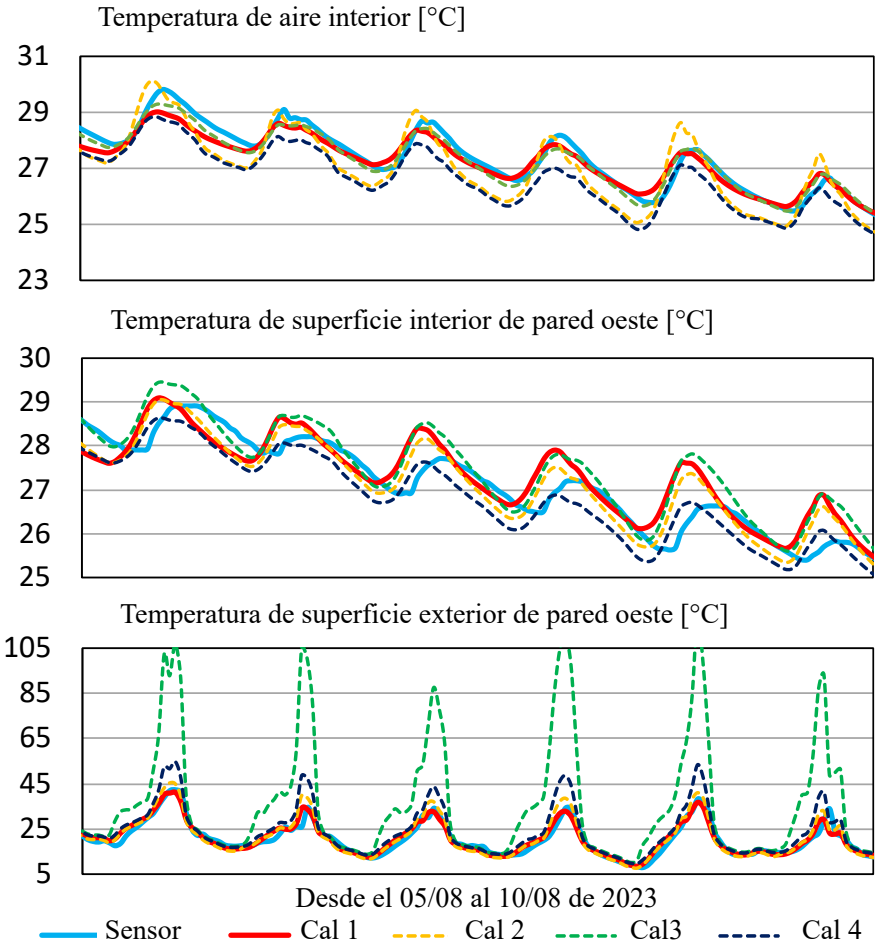


Figura 5.22: Residuos de temperatura en el mes de agosto para el Edificio SOFIA.

Comparación directa: Noviembre

En noviembre (Tabla 5.5), todas las metodologías convergen debido a la estabilidad climática, con errores medios en T_{aire} de $0.1\,°C$.

Al analizar los indicadores estadísticos de noviembre presentados en la Tabla 5.5, se observa que todas las configuraciones alcanzan un nivel de precisión elevado, con errores significativamente bajos en comparación con los meses de invierno. En lo que respecta a la T_{aire}, el escenario Cal_3 logra el $RMSE$ más reducido ($0.12\,°C$), seguido por $Cal_{1,P2}$ ($0.16\,°C$) y Cal_4 ($0.19\,°C$). Este desempeño generalizado indica que, bajo las condiciones de transición de noviembre, los distintos métodos convergen a resultados satisfactorios en el aire interior, aunque las estrategias mono-objetivo (Cal_2 y Cal_3) continúan priorizando esta variable sobre el resto de los nodos del sistema.

Tabla 5.5: RMSE del mes de Noviembre para los distintos escenarios de calibración.

RMSE	$Cal_{1,P1}$	$Cal_{1,P2}$	Cal_2	Cal_3	Cal_4
T_{aire}	-	**0.16**	**0.27**	**0.12**	**0.19**
T^{int}_{muro} E	-	**0.18**	0.17	0.22	**0.15**
T^{int}_{muro} S	-	**0.16**	0.25	0.18	**0.15**
T^{int}_{muro} O	-	**0.15**	0.16	0.18	**0.14**
T^{int}_{muro} N	-	**0.21**	0.16	0.23	**0.15**
T^{int}_{techo}	-	**0.21**	0.30	0.15	**0.20**
T^{int}_{piso}	-	**0.10**	0.21	0.08	**0.10**
T^{ext}_{muro} E	**1.66**	1.43	1.52	1.62	**1.54**
T^{ext}_{muro} S	**1.50**	1.67	7.54	2.30	**1.60**
T^{ext}_{muro} O	**1.29**	1.49	1.90	2.26	**1.72**
T^{ext}_{muro} N	**1.09**	1.69	1.49	1.12	**1.11**
T^{ext}_{techo}	**2.82**	2.90	4.40	4.07	**4.32**

La robustez de la metodología escalonada se hace evidente al evaluar las superficies del edificio. En las temperaturas superficiales interiores, Cal_1 y Cal_4 presentan un desempeño superior y equilibrado, destacándose $Cal_{1,P2}$ en el ajuste del piso (0.10 °C). No obstante, es en la envolvente exterior donde $Cal_{1,P1}$ consolida su ventaja técnica, obteniendo los errores más bajos en todas las

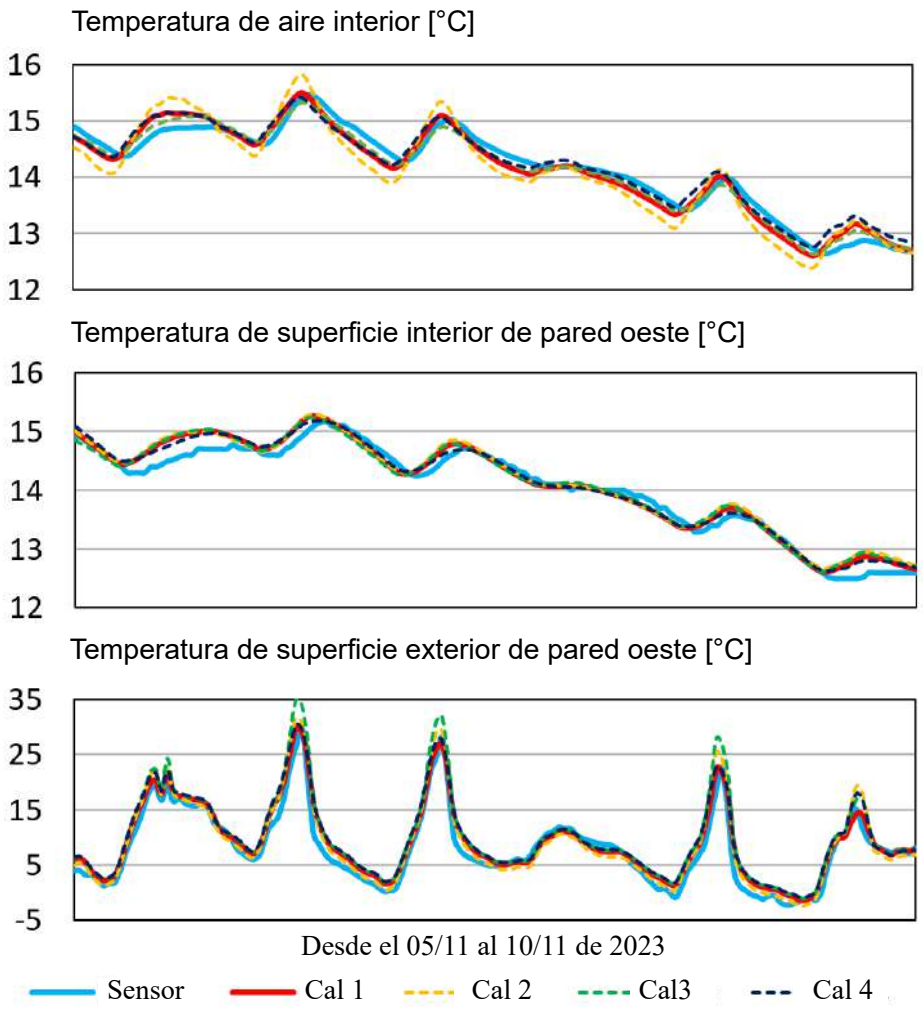


Figura 5.23: Evolución de temperaturas en el mes de noviembre.

superficies, con valores de $RMSE$ que oscilan entre 1.43 y 1.69 °C para muros y 2.90 °C para el techo. En contraste, se observan desvíos notorios en otros métodos, como los 7.54 °C registrados por Cal_2 en la fachada sur, lo que demuestra que incluso en meses de menor exigencia térmica, la omisión de variables de transferencia superficial compromete la integridad del modelo.
En síntesis, durante el mes de noviembre todas las metodologías presentan un desempeño aceptable; sin embargo, Cal_1 se posiciona como la opción más consistente y equilibrada. Al mantener la correspondencia más estrecha con las mediciones en la totalidad de los nodos analizados, la metodología escalonada demuestra su capacidad para ofrecer una representación fidedigna del comportamiento térmico del Edificio SOFIA, asegurando una transición fluida entre la caracterización de los materiales y la dinámica del aire interior.

5.4.2. Análisis cruzado

Para evaluar la robustez temporal de los parámetros obtenidos, se realizó una validación cruzada mediante la cual se utilizaron los parámetros calibrados en un mes específico para simular el comportamiento térmico en otro periodo distinto. Esta evaluación permite determinar si el ajuste alcanzado responde a las propiedades intrínsecas del edificio o si, por el contrario, existe un sobreajuste a las condiciones climáticas particulares de la fase de entrenamiento. Se analiza el comportamiento entre meses con regímenes térmicos similares, contrastando febrero con noviembre para el periodo invernal y junio con agosto para el estival. Luego, se evalúa el cruce entre estaciones para verificar la estabilidad y consistencia de los parámetros bajo condiciones climáticas opuestas. Este procedimiento es fundamental para consolidar la validez de la metodología Cal_1. Se busca confirmar que el desacople de variables propuesto en la estrategia escalonada garantiza una representación térmica fiable, independientemente de la estacionalidad del forzamiento exterior.

Comparación cruzada: Febrero y Noviembre

La primera fase de la validación cruzada analiza el intercambio de parámetros entre febrero y noviembre, dos periodos que, si bien presentan diferencias en la intensidad de la radiación, comparten un régimen de funcionamiento dominado por la calefacción. En la Tabla 5.6 se presentan los errores de simulación para el mes de febrero utilizando la configuración obtenida en noviembre. Los resultados muestran una elevada estabilidad en la temperatura del aire, con $RMSE$ competitivos (0.21 — 0.36 °C), donde Cal_3 registra el error más bajo.

Tabla 5.6: RMSE Febrero con parámetros calibrados en Noviembre.

RMSE	Cal_1	Cal_2	Cal_3	Cal_4
T_{aire}	0.25	0.36	0.21	0.26
$T^{int}_{muro}\ E$	0.34	0.34	0.32	0.34
$T^{int}_{muro}\ S$	0.30	0.36	0.27	0.31
$T^{int}_{muro}\ O$	0.28	0.29	0.26	0.29
$T^{int}_{muro}\ N$	0.36	0.33	0.33	0.34
T^{int}_{techo}	0.28	0.36	0.25	0.28
T^{int}_{piso}	0.14	0.14	0.11	0.14
$T^{ext}_{muro}\ E$	2.33	1.87	2.42	2.23
$T^{ext}_{muro}\ S$	2.24	7.41	2.44	2.07
$T^{ext}_{muro}\ O$	1.86	1.85	2.50	2.16
$T^{ext}_{muro}\ N$	2.49	1.31	1.70	1.67
T^{ext}_{techo}	3.85	3.58	6.21	5.38

Mientras que las superficies interiores mantienen variaciones mínimas entre metodologías, las superficies exteriores revelan disparidades significativas. La calibración Cal_2 exhibe una pérdida de precisión crítica en la fachada sur (7.41 °C), y Cal_3 muestra errores exteriores sistemáticamente

elevados. Por su parte, en Cal_4 los mayores desvíos se concentran en la pared oeste y el techo, mientras que la metodología escalonada (Cal_1) conserva una precisión equilibrada en todos los nodos, validando la robustez de sus parámetros de transferencia superficial ante un aumento en la demanda térmica.

Tabla 5.7: RMSE Noviembre con parámetros calibrados en Febrero.

RMSE	Cal_1	Cal_2	Cal_3	Cal_4
T_{aire}	0.16	0.27	0.18	0.23
T^{int}_{muro} E	0.27	0.17	0.31	0.35
T^{int}_{muro} S	0.20	0.26	0.23	0.24
T^{int}_{muro} O	0.20	0.16	0.25	0.29
T^{int}_{muro} N	0.30	0.18	2.79	0.36
T^{int}_{techo}	0.17	0.31	0.20	0.23
T^{int}_{piso}	0.17	0.22	0.12	0.13
T^{ext}_{muro} E	1.54	1.55	1.85	1.47
T^{ext}_{muro} S	2.90	1.52	3.13	1.72
T^{ext}_{muro} O	2.00	1.90	2.79	1.90
T^{ext}_{muro} N	1.73	1.52	1.16	1.17
T^{ext}_{techo}	3.52	4.40	3.29	3.36

Por otro lado, la Tabla 5.7 expone el comportamiento de noviembre bajo la configuración de febrero. En este escenario, Cal_1 alcanza el ajuste más preciso en T_{aire} (0.16 °C), superando a Cal_3 (0.18 °C) y distanciándose de los errores más notorios de Cal_2 y Cal_4. Aunque Cal_2 ofrece una aproximación ligeramente superior en algunas superficies interiores, los $RMSE$ de la envolvente exterior se mantienen en rangos aceptables para todas las calibraciones, dada la menor amplitud térmica del periodo.
La comparación integral de los errores y la inspección visual de la Figura 5.24 permiten concluir

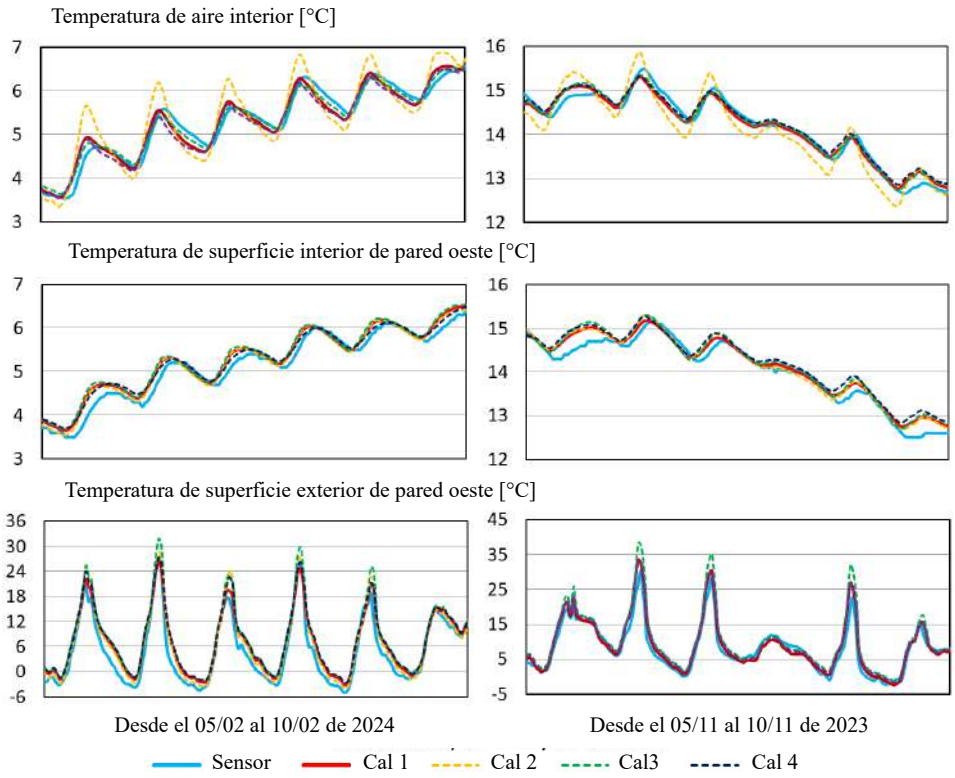


Figura 5.24: Temperaturas resultantes del cruce de parámetros entre Febrero y Noviembre.

que, ante similitudes climáticas estacionales, el intercambio de parámetros no deriva en variaciones significativas de la respuesta térmica. La paridad entre los $RMSE$ de las tablas de validación cruzada y los obtenidos en el análisis directo (Tablas 5.6 y 5.7) confirma que la caracterización de los materiales y los coeficientes de transferencia obtenidos mediante la técnica escalonada poseen la generalidad necesaria para describir el comportamiento del edificio en distintos momentos del periodo de calefacción.

Comparación cruzada: Junio y Agosto

La segunda fase de la validación analiza el intercambio de parámetros entre junio y agosto, representativos del periodo estival. A diferencia del cruce invernal, en este escenario las disparidades entre los métodos se tornan más evidentes, reflejando una mayor sensibilidad del modelo a la caracterización de las transferencias superficiales bajo condiciones de alta radiación solar. En la Tabla 5.8 se presentan los errores de junio utilizando la configuración de agosto. Se observa que para la temperatura del aire, Cal_1 (0.46 °C) y Cal_3 (0.24 °C) conservan el mejor ajuste, manteniendo una respuesta dinámica coherente.

Tabla 5.8: RMSE Junio con parámetros calibrados en Agosto.

RMSE	Cal_1	Cal_2	Cal_3	Cal_4
T_{aire}	0.46	0.61	0.24	0.73
$T^{int}_{muro}\ E$	0.42	0.36	0.52	0.41
$T^{int}_{muro}\ S$	0.43	0.34	0.42	0.50
$T^{int}_{muro}\ O$	0.42	0.32	0.56	0.31
$T^{int}_{muro}\ N$	0.42	0.35	0.49	0.38
T^{int}_{techo}	0.59	0.65	0.76	0.75
T^{int}_{piso}	0.22	0.33	0.13	0.33
$T^{ext}_{muro}\ E$	2.96	3.65	21.40	4.76
$T^{ext}_{muro}\ S$	2.24	4.42	14.73	2.76
$T^{ext}_{muro}\ O$	2.48	2.97	22.02	4.88
$T^{ext}_{muro}\ N$	1.59	2.14	5.13	2.13
T^{ext}_{techo}	8.86	9.29	10.17	11.75

No obstante, al evaluar las superficies exteriores, la metodología Cal_1 demuestra una robustez superior, obteniendo los $RMSE$ más bajos en todas las orientaciones. En contraste, Cal_3 presenta errores críticos que superan los 20 °C en las fachadas este y oeste, confirmando que un vector de parámetros optimizado solo para el aire en un mes de verano no posee la generalidad necesaria para representar los flujos superficiales en otro. Por su parte, Cal_2 y Cal_4 muestran desvíos intermedios, evidenciando dificultades para capturar la intensidad del forzamiento climático estival de

Tabla 5.9: RMSE Agosto con parámetros calibrados en Junio.

RMSE	Cal_1	Cal_2	Cal_2	Cal_4
T_{aire}	0.56	0.80	0.40	0.45
$T^{int}_{muro}\ E$	0.50	0.67	0.88	0.72
$T^{int}_{muro}\ S$	0.43	0.59	0.76	0.69
$T^{int}_{muro}\ O$	0.56	0.73	0.96	0.79
$T^{int}_{muro}\ N$	0.56	0.71	0.89	0.78
T^{int}_{techo}	0.80	0.96	0.80	1.12
T^{int}_{piso}	0.34	0.22	0.46	0.30
$T^{ext}_{muro}\ E$	3.20	3.91	22.31	3.60
$T^{ext}_{muro}\ S$	2.38	5.92	15.97	3.33
$T^{ext}_{muro}\ O$	2.54	2.78	21.81	3.38
$T^{ext}_{muro}\ N$	1.53	1.56	6.81	1.54
T^{ext}_{techo}	9.71	8.83	8.74	8.60

forma balanceada.
Este patrón de comportamiento se ratifica en la Tabla 5.9, donde se analizan los errores de agosto bajo la configuración de junio. Mientras que las calibraciones Cal_2, Cal_2 y Cal_4 incrementan sus residuos en la mayoría de las variables, Cal_1 mantiene una respuesta térmica equilibrada en todas superficies. La incapacidad de Cal_3 para representar las condiciones exteriores vuelve a quedar de manifiesto con desvíos sistemáticos, lo que invalida su uso para estudios de comportamiento superficial integral durante el verano.

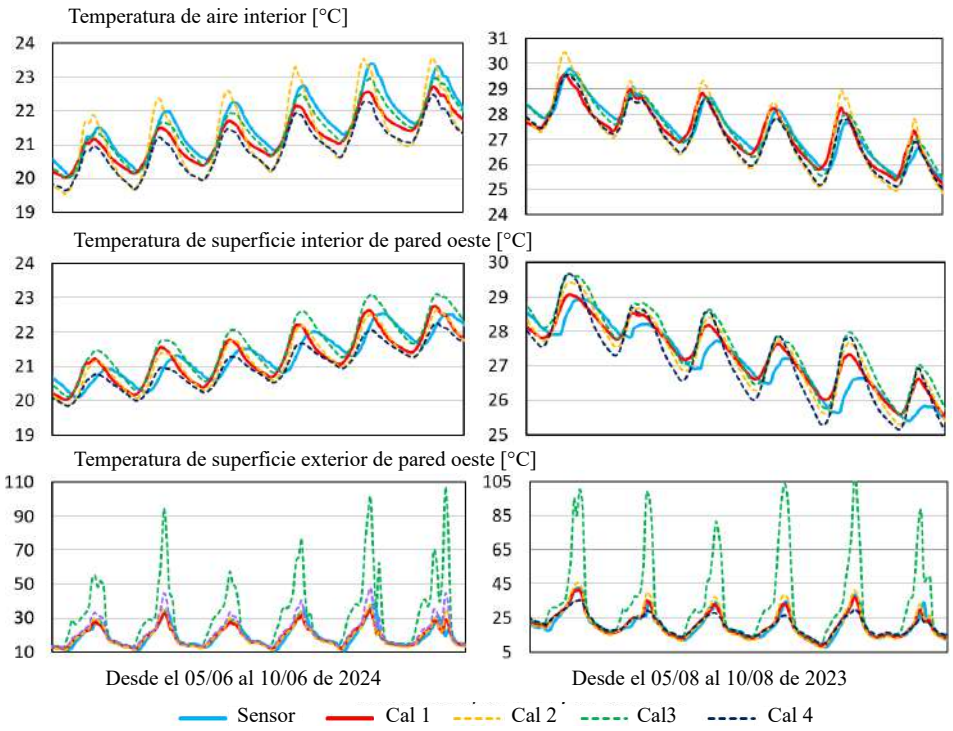


Figura 5.25: Temperaturas resultantes del cruce de parámetros entre Junio y Agosto.

A partir de la comparación de errores y la inspección de la Figura 5.25, se concluye que, debido a la similitud climática estacional, es factible utilizar los parámetros calibrados en junio para simular agosto y viceversa sin comprometer significativamente la precisión global. La paridad de los indicadores entre las fases de validación cruzada y los análisis directos previos consolida la transferibilidad de los parámetros obtenidos mediante la técnica escalonada, asegurando que el modelo conserva su integridad predictiva ante las variaciones típicas del periodo estival.

Cruce entre estaciones: Febrero-Junio y Agosto-Noviembre

Esta fase de la validación evalúa la capacidad de transferencia de los parámetros entre periodos con regímenes térmicos opuestos, sometiendo al modelo a condiciones climáticas significativamente distintas a las de su fase de entrenamiento. En la Tabla 5.10 se presentan los resultados de simular junio (verano) con la configuración de febrero (invierno), mientras que la Tabla 5.11 expone el desempeño de noviembre bajo los parámetros obtenidos en agosto.
En el primer cruce (Tabla 5.10), se observa un incremento generalizado de los errores en comparación con los análisis estacionales, lo cual es consistente con la naturaleza estocástica de variables como las infiltraciones y la dinámica convectiva ante forzamientos térmicos dispares. Para la temperatura del aire, Cal_1 mantiene el ajuste más robusto con un $RMSE$ de $0.47\,°C$, superando la precisión de Cal_3 ($0.55\,°C$) y Cal_4 ($0.52\,°C$). En la envolvente exterior, las amplitudes estivales impactan fuertemente en la cubierta, con errores entre 9.34 y $12.50\,°C$; no obstante, Cal_1 conserva una mayor exactitud en las fachadas, destacándose en la superficie norte con solo $1.48\,°C$.

Tabla 5.10: RMSE Junio con parámetros calibrados en Febrero.

RMSE	Cal_1	Cal_2	Cal_3	Cal_4
T_{aire}	0.47	0.64	0.55	0.52
$T^{int}_{muro}\ E$	0.46	0.43	0.42	0.45
$T^{int}_{muro}\ S$	0.46	0.35	0.47	0.49
$T^{int}_{muro}\ O$	0.46	0.44	0.35	0.41
$T^{int}_{muro}\ N$	0.46	0.43	0.38	0.43
T^{int}_{techo}	0.73	0.65	0.62	0.70
T^{int}_{piso}	0.23	0.29	0.25	0.27
$T^{ext}_{muro}\ E$	3.64	3.53	4.49	3.42
$T^{ext}_{muro}\ S$	2.80	2.14	2.60	2.31
$T^{ext}_{muro}\ O$	3.41	3.16	4.44	3.30
$T^{ext}_{muro}\ N$	1.48	2.14	1.99	1.80
T^{ext}_{techo}	12.10	9.34	11.94	12.50

Tabla 5.11: RMSE Noviembre con parámetros calibrados en Agosto.

RMSE	Cal_1	Cal_2	Cal_3	Cal_4
T_{aire}	0.40	0.31	0.39	0.29
$T^{int}_{muro}\ E$	0.52	0.23	0.59	0.29
$T^{int}_{muro}\ S$	0.39	0.30	0.53	0.24
$T^{int}_{muro}\ O$	0.46	0.21	0.54	0.24
$T^{int}_{muro}\ N$	0.54	0.22	0.57	0.29
T^{int}_{techo}	0.44	0.37	0.53	0.30
T^{int}_{piso}	0.20	0.24	0.19	0.13
$T^{ext}_{muro}\ E$	1.79	1.61	10.32	2.11
$T^{ext}_{muro}\ S$	1.70	7.18	20.40	3.81
$T^{ext}_{muro}\ O$	1.38	1.85	13.13	3.11
$T^{ext}_{muro}\ N$	1.22	1.51	3.42	1.33
T^{ext}_{techo}	5.14	5.25	6.41	3.35

Por otro lado, el cruce de noviembre con parámetros de agosto (Tabla 5.11) revela una tendencia similar en la jerarquía de las metodologías. Aunque Cal_2 y Cal_4 logran errores puntuales bajos en T_{aire} ($0.31\,°$C y $0.29\,°$C respectivamente), su desempeño en la envolvente exterior es dispar. Nuevamente, Cal_3 muestra una incapacidad crítica de adaptación, con desvíos que superan los $20\,°$C en la fachada sur y los $13\,°$C en la oeste. En contraste, Cal_1 demuestra una estabilidad superior en las superficies exteriores, manteniendo errores por debajo de los $1.80\,°$C en todos los muros, lo que ratifica la validez de su caracterización física.

En análisis de la Figura 5.26 permite confirmar que, a pesar de la variación lógica de la precisión al omitir la estacionalidad, los parámetros obtenidos mediante la metodología escalonada Cal_1 ofrecen la respuesta más equilibrada y consistente en todos los nodos. Esta estabilidad estacional confirma que el desacople de variables propuesto permite capturar propiedades intrínsecas del edificio que trascienden el periodo de calibración, consolidando un modelo robusto capaz de representar el comportamiento térmico global del Edificio SOFIA bajo condiciones climáticas contrastantes.

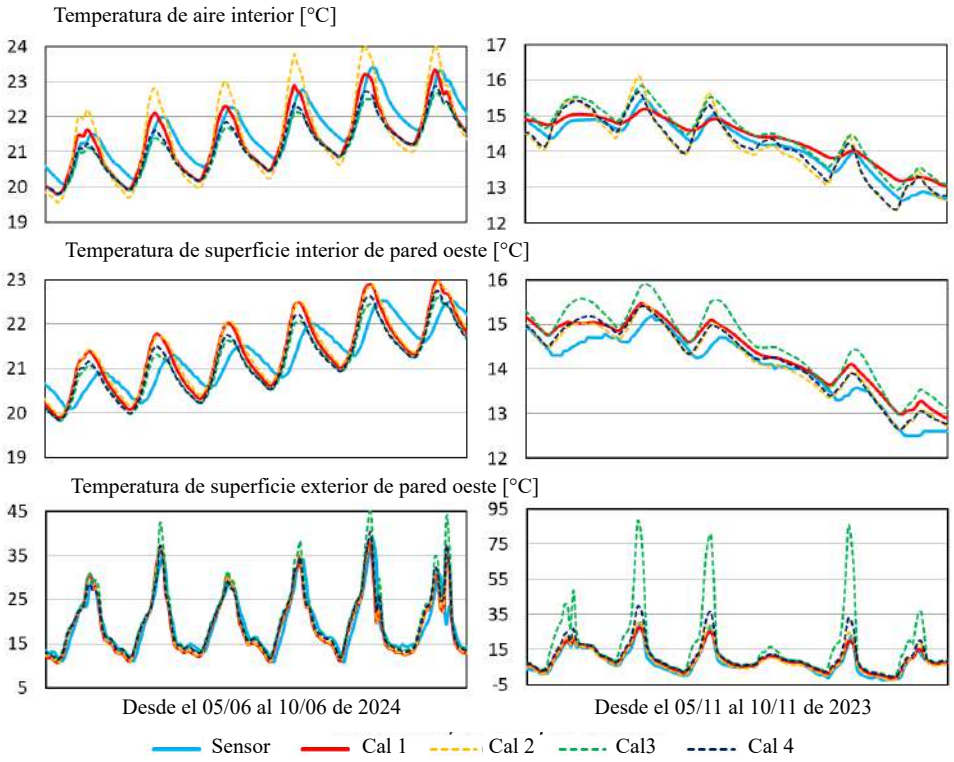


Figura 5.26: Resultados del cruce de parámetros estacional (Verano vs. Invierno).

5.4.3. Validación

Para confirmar la robustez y la capacidad de generalización del enfoque propuesto, se realizó una validación del modelo en periodos de datos no contemplados durante la fase de optimización. Se seleccionaron para este fin una semana de enero (invierno extremo) y otra de julio (verano pleno), permitiendo evaluar el desempeño del sistema bajo las condiciones de contorno más exigentes del año. La Tabla 5.12 sintetiza los valores de $RMSE$ obtenidos al aplicar los cuatro conjuntos de parámetros calibrados (Cal_1 de los meses de febrero, junio, agosto y noviembre) a estos nuevos periodos de validación.

Tabla 5.12: RMSE para los meses de Enero y Julio: T_{aire}, T^{int}_{muro} y T^{ext}_{muro} [$°C$].

T_{aire}				
Mes	Parámetros Feb.	Parámetros Jun.	Parámetros Ago.	Parámetros Nov.
Enero	0.47	0.62	0.48	0.64
Julio	0.47	0.49	0.47	0.62
T^{int}_{muro} (O)				
Enero	0.60	0.75	0.65	0.75
Julio	0.52	0.35	0.49	0.82
T^{ext}_{muro} (O)				
Enero	4.58	4.81	4.72	4.67
Julio	3.04	2.11	2.07	2.25

Los resultados demuestran una notable estabilidad en la predicción de la temperatura del aire (T_{aire}), con errores que se mantienen de forma consistente en torno a los $0.5\,°C$ para todas las combinaciones de parámetros y estaciones. Esta convergencia técnica es altamente significativa, ya que indica que el modelo ha capturado el comportamiento térmico del edificio con una precisión que trasciende la estacionalidad climática. En cuanto a las superficies de la pared oeste, el error en la superficie interior se sitúa en rangos muy bajos (0.35 — $0.82\,°C$), mientras que los errores en la superficie exterior reflejan la complejidad de los intercambios radiativos y convectivos, variando entre 2.07 y $3.04\,°C$ en julio, y alcanzando valores cercanos a los $4.7\,°C$ en enero.

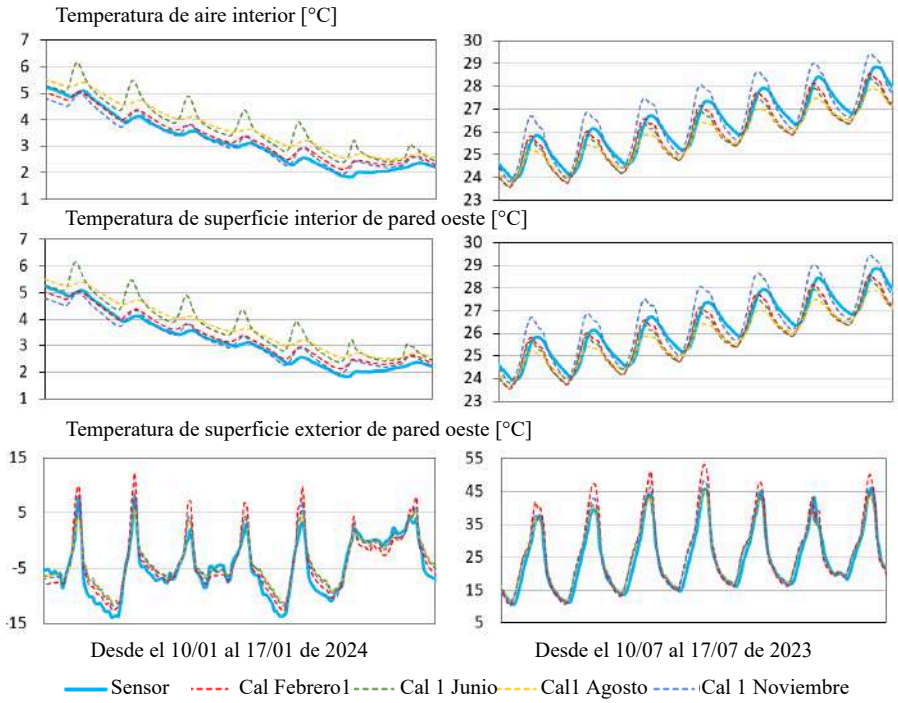


Figura 5.27: Temperaturas resultantes de la validación en los meses de Enero y Julio.

Este análisis de validación corrobora la eficacia de la metodología escalonada: mediante el uso de periodos de calibración de corto plazo, es factible derivar un modelo térmico con validez anual. La precisión alcanzada se manifiesta visualmente en la Figura 5.27, donde las curvas simuladas reproducen las mediciones experimentales con alta fidelidad, manteniendo desviaciones horarias mínimas en el aire interior. En síntesis, la consistencia de los indicadores estadísticos en periodos externos al entrenamiento consolida al modelo calibrado como una herramienta fiable para la evaluación del desempeño energético y térmico del Edificio SOFIA.

5.4.4. Análisis de parámetros

En esta sección se examinan los conjuntos de parámetros obtenidos para cada mes a través de las distintas metodologías de calibración. El análisis se centra en dos aspectos fundamentales: la consistencia de las soluciones y la capacidad de cada enfoque para reproducir valores con significado físico representativo. El estudio de los parámetros calibrados permite identificar en qué medida los algoritmos de optimización logran convergen hacia soluciones que, más allá de minimizar el error estadístico, reflejen las propiedades termofísicas reales del edificio.

Análisis de los parámetros de Febrero

En esta sección se examina el conjunto de parámetros obtenidos para el mes de febrero mediante las distintas metodologías de calibración. Los valores correspondientes a la envolvente opaca se detallan en la Tabla 5.13, mientras que el resto de las variables generales del edificio se presentan en la Tabla 5.14.

Tabla 5.13: Parámetros de elementos opacos de la envolvente - Febrero.

Param.	Cal_1					Cal_2	Cal_3	Cal_4
	E	S	O	N	T			
$R_{aire}\ E\ m^2 \cdot K/W$	0.70	-	-	-	-	0.29	0.47	0.89
$R_{aire}\ S\ m^2 \cdot K/W$	-	0.49	-	-	-	0.45	0.43	0.14
$R_{aire}\ O\ m^2 \cdot K/W$	-	-	0.48	-	-	0.50	0.36	0.67
$R_{aire}\ N\ m^2 \cdot K/W$	-	-	-	0.17	-	0.46	0.45	0.37
$R_{aire}\ T\ m^2 \cdot K/W$	-	-	-	-	0.11	0.62	0.56	0.41
$\rho_{LCP}\ kg/m^2$	592	601	592	410	-	547	375	440
$\rho_M\ kg/m^2$	-	-	-	-	770	559	615	556
$\alpha^{ext}_{T,muro}$	0.87	0.89	0.87	0.77	-	-	0.63	0.76
$\alpha^{ext}_{S,muro}$	0.15	0.19	0.15	0.27	-	-	0.35	0.24
$\alpha^{ext}_{T,techo}$	-	-	-	-	0.46	-	0.65	0.71
$\alpha^{ext}_{S,techo}$	-	-	-	-	0.25	-	0.40	0.42
m_{muro}	3.81	2.77	3.81	4.48	-	-	6.19	6.47
n_{muro}	2.31	2.42	2.31	2.07	-	-	4.86	3.81
m_{techo}	-	-	-	-	2.61	-	5.20	7.38
n_{techo}	-	-	-	-	3.43	-	4.78	3.92
ρ_{suelo}	0.36	0.25	0.36	0.26	-	0.12	0.10	0.22

Tabla 5.14: Parámetros generales del edificio - Febrero.

Param.	Cal_1	Cal_2	Cal_3	Cal_4
$\rho_{LHA}\ kg/m^3$	3164	7485	2831	1904
$k_{LHA}\ W/(m \cdot K)$	7.11	8.08	6.85	7.32
$h_{int,muro}\ W/(m^2 \cdot K)$	7.00	-	14.85	14.89
$h_{int,vidrio}\ W/(m^2 \cdot K)$	10.58	-	5.66	12.25
$h_{int,techo}\ W/(m^2 \cdot K)$	5.16	-	11.55	4.79
$h_{int,piso}\ W/(m^2 \cdot K)$	7.53	-	12.67	15.45
$A_{inf}\ cm^2$	107.22	88.02	341.17	256.05
D_{vidrio}	0.67	0.75	0.73	0.69
τ_{Sombra}	0.01	0.03	0.02	0.02

Al observar los parámetros de la envolvente, se hace evidente el impacto del desacoplamiento metodológico en la determinación de las propiedades físicas. En la estrategia Cal_1, los parámetros de resistencia de aire superficial (R_{aire}) y absortividad solar (α_S) muestran valores diferenciados por orientación, lo que refleja una respuesta específica a la exposición climática del Paso 1. Por el contrario, en Cal_3 y Cal_4, variables críticas como la absortividad del techo ($\alpha^{ext}_{S,techo}$) tienden a desplazarse hacia valores más elevados (0.40 — 0.42) en comparación con Cal_1 (0.25), lo que sugiere que estos modelos compensan la falta de precisión en los flujos superficiales forzando una mayor ganancia de calor por radiación.

En cuanto a los parámetros generales, Cal_3 y Cal_4, arrojan areas de infiltración significativamente superiores ($341.17\ cm^2$ y $256.05\ cm^2$ respectivamente) en comparación con Cal_1 ($107.22\ cm^2$). Este fenómeno es un indicador claro de equifinalidad, donde el algoritmo incrementa la renovación

de aire para reducir artificialmente la temperatura interior y así ajustar el balance térmico global. Los coeficientes de transferencia convectiva en Cal_1 se mantienen en rangos coherentes con la literatura técnica para espacios con baja actividad. Sin embargo, en Cal_3 y Cal_4, los valores de $h_{int,piso}$ y $h_{int,muro}$ se duplican, actuando nuevamente como factores de ajuste numérico para compensar las deficiencias en la caracterización de la envolvente. La densidad de la losa (ρ_{LHA}) presenta una dispersión alta en Cal_2 (7485 kg/m^3), un valor que carece de realismo físico para materiales de construcción convencionales. En cambio, Cal_1 converge en valores más razonables, lo que refuerza la idea de que la inclusión de temperaturas superficiales es vital para estabilizar la estimación de la inercia térmica.

Análisis de los parámetros de Junio

En esta sección se examinan los parámetros obtenidos para el mes de junio, representativos del régimen estival, utilizando las cuatro metodologías de calibración. En la Tabla 5.15 se detallan los valores correspondientes a los elementos opacos de la envolvente, mientras que la Tabla 5.16 presenta las variables generales del edificio.

Tabla 5.15: Parámetros de elementos opacos de la envolvente - Junio.

Param.	Cal_1					Cal_2	Cal_3	Cal_4
	E	S	O	N	T			
$R_{aire}\ E\ m^2 \cdot K/W$	0.76	-	-	-	-	0.18	0.47	0.97
$R_{aire}\ S\ m^2 \cdot K/W$	-	0.88	-	-	-	0.77	0.44	0.57
$R_{aire}\ O\ m^2 \cdot K/W$	-	-	0.76	-	-	0.46	0.52	0.96
$R_{aire}\ N\ m^2 \cdot K/W$	-	-	-	0.84	-	0.82	0.50	0.76
$R_{aire}\ T\ m^2 \cdot K/W$	-	-	-	-	0.52	0.23	0.56	0.86
$\rho_{LCP}\ kg/m^3$	538	559	401	613	-	346	467	440
$\rho_M\ kg/m^3$	-	-	-	-	774	664	657	780
$\alpha^{ext}_{T,muro}$	0.42	0.40	0.64	0.06	-	-	0.28	0.05
$\alpha^{ext}_{S,muro}$	0.15	0.18	0.18	0.04	-	-	0.75	0.05
$\alpha^{ext}_{T,techo}$	-	-	-	-	0.64	-	0.45	0.88
$\alpha^{ext}_{S,techo}$	-	-	-	-	0.30	-	0.69	0.87
m_{muro}	2.81	2.22	3.54	4.81	-	-	4.57	4.17
n_{muro}	7.38	7.95	7.83	7.87	-	-	3.26	5.41
m_{techo}	-	-	-	-	1.55	-	4.72	5.40
n_{techo}	-	-	-	-	2.89	-	4.09	8.24
ρ_{suelo}	0.46	0.16	0.08	0.15	-	0.05	0.09	0.38

Tabla 5.16: Parámetros generales del edificio - Junio.

Param.	Cal_1	Cal_2	Cal_3	Cal_4
$\rho_{LHA}\ kg/m^3$	3414	5183	2759	4214
$k_{LHA}\ W/(m \cdot K)$	4.28	4.05	2.69	5.32
$h_{int,muro}\ W/(m^2 \cdot K)$	0.63	-	14.85	14.94
$h_{int,vidrio}\ W/(m^2 \cdot K)$	11.70	-	5.66	1.95
$h_{int,techo}\ W/(m^2 \cdot K)$	12.22	-	11.55	5.46
$h_{int,piso}\ W/(m^2 \cdot K)$	17.34	-	12.67	16.80
$A_{inf}\ cm^2$	96.35	57.37	439.20	421.81
D_{vidrio}	0.67	0.74	0.73	0.69
τ_{Sombra}	-	-	-	-

Al contrastar estos resultados con los del periodo invernal, se observa que la metodología escalona-

da (Cal_1) mantiene una mayor consistencia en las propiedades físicas de los materiales, mientras que los modelos de alta dimensionalidad exhiben variaciones extremas.
En Cal_1, la absortividad solar del techo ($\alpha^{ext}_{S,techo}$) se sitúa en 0.30, un valor coherente con el análisis de febrero (0.25). En marcado contraste, Cal_4 asigna un valor de 0.87, lo que representaría una superficie casi negra, físicamente inconsistente con la cubierta real del Edificio SOFIA. Esta sobreestimación en Cal_4 actúa como un mecanismo de compensación numérica para elevar artificialmente la temperatura ante el balance global.
Se repite el fenómeno de equifinalidad observado en invierno. Mientras Cal_1 mantiene areas de infiltración estables (96.35 cm^2), los escenarios Cal_3 y Cal_4 disparan este valor por encima de 420 cm^2. Bajo condiciones de verano, este incremento excesivo de aire exterior busca enfriar el modelo para ajustar el error en T_{aire}, perdiendo representatividad de la estanqueidad real del edificio.
En Cal_1, el coeficiente convectivo de los muros ($h_{int,muro}$) desciende a 0.63 $W/(m^2 \cdot K)$, reflejando la menor actividad de mezcla térmica aire-superficie en este periodo. Sin embargo, Cal_3 y Cal_4 mantienen valores fijos o muy elevados (14.94 $W/(m^2 \cdot K)$), reforzando la hipótesis de que estas variables se utilizan en los modelos globales como "sumideros.º "fuentes"de calor para forzar el ajuste matemático.
La densidad de la losa (ρ_{LHA}) en Cal_1 (3414 kg/m^3) muestra una notable estabilidad respecto a febrero (3164 kg/m^3), validando que el método escalonado captura propiedades intrínsecas del material. Por el contrario, Cal_2 fluctúa de 7485 kg/m^3 en invierno a 5183 kg/m^3 en verano, demostrando que los enfoques centrados únicamente en el aire no logran estabilizar la caracterización de la inercia térmica.
En síntesis, los resultados de junio ratifican que el desacople secuencial de Cal_1 previene la deriva de los parámetros hacia valores físicamente inverosímiles. Mientras que las calibraciones concurrentes (Cal_3 y Cal_4) dependen de compensaciones extremas entre absortividades e infiltraciones, la técnica escalonada asegura una descripción del edificio robusta y transferible entre estaciones.

Análisis de parámetros de Agosto

En esta sección se examinan los parámetros obtenidos para el mes de agosto, periodo que representa la transición hacia el final del verano y el inicio de menores ganancias solares. Los valores correspondientes a los componentes opacos de la envolvente se detallan en la Tabla 5.17, mientras que las variables generales del edificio se presentan en la Tabla 5.18.

Tabla 5.17: Parámetros de elementos opacos de la envolvente - Agosto.

Param.	Cal_1					Cal_2	Cal_3	Cal_4
	E	S	O	N	T			
R_{aire} E $m^2 \cdot K/W$	0.31	-	-	-	-	0.61	0.44	0.34
R_{aire} S $m^2 \cdot K/W$	-	0.77	-	-	-	0.62	0.45	0.55
R_{aire} O $m^2 \cdot K/W$	-	-	0.62	-	-	0.67	0.50	0.43
R_{aire} N $m^2 \cdot K/W$	-	-	-	0.75	-	0.34	0.53	0.50
R_{aire} T $m^2 \cdot K/W$	-	-	-	-	0.64	0.62	0.51	0.49
ρ_{LCP} kg/m^3	423	413	432	471	-	470	473	582
ρ_M kg/m^3	-	-	-	-	784	580	580	549
$\alpha^{ext}_{T,muro}$	0.82	0.82	0.93	0.61	-	-	0.60	0.42
$\alpha^{ext}_{S,muro}$	0.15	0.21	0.20	0.05	-	-	0.29	0.35
$\alpha^{ext}_{T,techo}$	-	-	-	-	0.58	-	0.64	0.43
$\alpha^{ext}_{S,techo}$	-	-	-	-	0.64	-	0.23	0.29
m_{muro}	1.13	1.92	2.09	7.28	-	-	4.84	5.63
n_{muro}	8.08	9.17	6.59	9.35	-	-	5.49	6.28
m_{techo}	-	-	-	-	1.08	-	6.39	2.49
n_{techo}	-	-	-	-	4.20	-	4.94	5.34
ρ_{suelo}	0.48	0.37	0.09	0.23	-	0.04	0.13	0.06

Tabla 5.18: Parámetros generales del edificio - Agosto.

Param.	Cal_1	Cal_2	Cal_3	Cal_4
ρ_{LHA} kg/m^3	5816	8218	2800	5581
k_{LHA} $W/(m \cdot K)$	8.39	7.28	3.67	7.66
$h_{int,muro}$ $W/(m^2 \cdot K)$	18.91	-	13.69	3.22
$h_{int,vidrio}$ $W/(m^2 \cdot K)$	1.93	-	5.23	6.52
$h_{int,techo}$ $W/(m^2 \cdot K)$	15.12	-	12.57	11.49
$h_{int,piso}$ $W/(m^2 \cdot K)$	16.72	-	7.28	14.98
A_{inf} cm^2	102.84	85.49	141.17	987.96
D_{vidrio}	0.61	0.66	0.78	0.68
τ_{Sombra}	-	-	-	-

En la estrategia Cal_1, la absortividad solar del techo ($\alpha^{ext}_{S,techo}$) se sitúa en 0.64, un valor que refleja el mayor impacto de la radiación solar en este mes. En contraste, Cal_3 y Cal_4 asignan valores de 0.23 y 0.29 respectivamente, lo cual resulta inconsistente con la necesidad de representar las altas temperaturas superficiales observadas en los registros reales de agosto.
Se destaca un comportamiento crítico en Cal_4, donde la tasa de infiltración se dispara hasta los 987.96 cm^2. Este valor indica que el modelo está utilizando el aire exterior como un sumidero térmico masivo para compensar errores de sobreestimación en otros parámetros, un claro ejemplo de equifinalidad numérica. Por su parte, Cal_1 mantiene un valor estable y realista de 102.84 cm^2.
Los coeficientes convectivos en Cal_1 presentan valores elevados ($h_{Wall} = 18.91$ $W/(m^2 \cdot K)$; $h_{Floor} = 16.72$ $W/(m^2 \cdot K)$), lo que es consistente con la necesidad de modelar un intercambio térmico vigoroso durante los picos de radiación de agosto. En Cal_4, el valor de $h_{int,muro}$ desciende a 3.22 $W/(m^2 \cdot K)$, lo que sugiere que el modelo intenta aislar los muros para mitigar el efecto de las infiltraciones excesivas mencionadas anteriormente.
La densidad de la losa (ρ_{LHA}) en Cal_2 alcanza los 8218 kg/m^3, un valor que excede los límites físicos de los materiales cementicios estándar. En cambio, Cal_1 (5816 kg/m^3) y Cal_4 (5581 kg/m^3) convergen hacia valores que, aunque elevados, son más consistentes con la inercia térmica requerida para estabilizar el balance de energía en este mes.
En conclusión, el análisis de agosto ratifica que la metodología Cal_1, al aislar el ajuste de la envolvente en su primer paso, logra una caracterización mucho más robusta y verosímil del comportamiento térmico del edificio.

Análisis de parámetros de Noviembre

Finalmente, para noviembre, las Tablas 5.19 y 5.20 consolidan los valores finales.
En Cal_1, la absortividad solar del techo ($\alpha^{ext}_{S,techo}$) se sitúa en 0.49, un valor intermedio coherente con la radiación de noviembre. En contraste, Cal_2 asigna un valor de 0.75 y Cal_4 uno de 0.25, evidenciando nuevamente cómo los modelos concurrentes fuerzan estos parámetros para compensar el balance térmico.
El fenómeno de equifinalidad se manifiesta de forma aguda en Cal_3, donde la tasa de infiltración alcanza los 499.84 cm^2, mientras que Cal_1 mantiene un valor mucho más verosímil de 88.88 cm^2. Este incremento masivo de aire exterior en Cal_3 actúa como un factor de ajuste numérico para estabilizar la temperatura del aire, perdiendo la representatividad física de la estanqueidad del edificio.
Los coeficientes convectivos en Cal_1 se mantienen en rangos técnicos razonables ($h_{Wall} = 3.90$ $W/(m^2 \cdot K)$). Por el contrario, en Cal_4 el coeficiente de los muros desciende a un mínimo de 1.26 $W/(m^2 \cdot K)$, mientras que en Cal_3 el coeficiente de las ventanas cae a 0.77 $W/(m^2 \cdot K)$, lo que sugiere que estos algoritmos intentan desacoplar térmicamente ciertos componentes para mitigar el error global.
La densidad de la losa (ρ_{LHA}) en Cal_2 llega a los 8900 kg/m^3, un valor que carece de sentido para materiales de construcción estándar. En cambio, Cal_1 (3090 kg/m^3) ofrece un valor consis-

Tabla 5.19: Parámetros de elementos opacos de la envolvente - Noviembre.

Param.	Cal_1					Cal_2	Cal_3	Cal_4
	E	S	O	N	T			
R_{aire} E $m^2 \cdot K/W$	0.79	-	-	-	-	0.43	0.48	0.24
R_{aire} S $m^2 \cdot K/W$	-	0.54	-	-	-	0.56	0.60	0.51
R_{aire} O $m^2 \cdot K/W$	-	-	0.64	-	-	0.45	0.54	0.11
R_{aire} N $m^2 \cdot K/W$	-	-	-	0.11	-	0.34	0.51	0.30
R_{aire} T $m^2 \cdot K/W$	-	-	-	-	0.20	0.46	0.51	0.93
ρ_{LCP} kg/m^3	519	350	446	508	-	545	443	429
ρ_M kg/m^3	-	-	-	-	569	547	598	647
$\alpha^{ext}_{T,muro}$	0.82	0.77	0.70	0.62	-	-	0.23	0.69
$\alpha^{ext}_{S,muro}$	0.23	0.19	0.13	0.21	-	-	0.81	0.22
$\alpha^{ext}_{T,techo}$	-	-	-	-	0.57	-	0.36	0.67
$\alpha^{ext}_{S,techo}$	-	-	-	-	0.49	-	0.75	0.25
m_{muro}	3.70	2.98	6.01	7.34	-	-	3.95	1.54
n_{muro}	4.27	5.37	4.53	4.61	-	-	4.00	7.58
m_{techo}	-	-	-	-	3.14	-	3.74	1.58
n_{techo}	-	-	-	-	7.59	-	5.28	2.87
ρ_{suelo}	0.38	0.38	0.20	0.27	-	0.18	0.18	0.40

Tabla 5.20: Parámetros generales del edificio - Noviembre.

Param.	Cal_1	Cal_2	Cal_3	Cal_4
ρ_{LHA} kg/m^3	3090	8900	3645	5845
k_{LHA} $W/(m \cdot K)$	1.90	5.44	6.05	2.55
$h_{int,muro}$ $W/(m^2 \cdot K)$	3.90	-	15.95	1.26
$h_{int,vidrio}$ $W/(m^2 \cdot K)$	12.04	-	0.77	9.66
$h_{int,techo}$ $W/(m^2 \cdot K)$	8.06	-	5.22	9.96
$h_{int,piso}$ $W/(m^2 \cdot K)$	8.86	-	14.27	17.20
A_{inf} cm^2	88.88	86.39	499.84	291.11
D_{vidrio}	0.70	0.71	0.66	0.61
τ_{Sombra}	0.02	0.02	0.07	0.03

tente con los resultados obtenidos en febrero ($3164\ kg/m^3$) y junio ($3414\ kg/m^3$), demostrando que la metodología escalonada logra aislar y caracterizar propiedades intrínsecas del edificio independientemente de la estacionalidad.

En conclusión, el análisis de noviembre consolida la superioridad del enfoque escalonado. Mientras que las calibraciones simultáneas (Cal_4) dependen de soluciones de compromiso con parámetros que fluctúan hacia extremos irreales, Cal_1 garantiza una caracterización técnica robusta y coherente en todos los nodos del Edificio SOFIA.

Análisis de la dispersión paramétrica y equifinalidad

El análisis de los parámetros resultantes subraya la naturaleza estocástica y la alta interdependencia paramétrica inherente a la calibración de modelos complejos. Al comparar las distintas metodologías, se observan disparidades significativas en variables críticas como la resistencia térmica del aire superficial (R_{aire}), la densidad de los materiales (ρ_{LCP}, ρ_M, ρ_{LHA}) y la conductividad térmica (k_{LHA}), factores que inciden directamente en la caracterización de la transferencia de calor por conducción. En este sentido, mientras que la metodología escalonada (Cal_1) logra estabilizar los coeficientes de absortividad (α_T y α_S) en valores coherentes con la naturaleza de los materiales, los enfoque MOO globales (Cal_4) exhiben fluctuaciones extremas, utilizando estas variables como meros factores de ajuste numérico.

Esta tendencia se replica en los parámetros determinantes de la convección exterior (m y n) y en la reflectividad del suelo (ρ_{suelo}); esta última conserva una notable estabilidad en el Cal_1, pero

sufre degradaciones considerables en los escenarios mono-objetivo (Cal_2 y Cal_3). La variabilidad observada en el área de infiltración (A_{inf}) es, quizás, el indicador más claro de las diferencias metodológicas: mientras en los esquemas globales el algoritmo explora soluciones extremas para compensar desvíos en el balance térmico, el enfoque escalonado restringe la búsqueda a rangos físicamente admisibles, logrando un equilibrio superior entre precisión matemática y verosimilitud física.

Al analizar la estabilidad de los 25 mejores individuos de cada población, se constata que el Cal_1 alcanza una precisión superior con una dispersión drásticamente menor en comparación con la optimización simultánea. La eficacia de la estrategia en dos pasos queda demostrada al observar que, una vez definido un valor único para la envolvente opaca en el **Paso 1**, el **Paso 2** converge hacia soluciones con una variabilidad controlada: los coeficientes convectivos interiores presentan una variabilidad media del $39.5\,\%$, mientras que parámetros críticos como el área de infiltración ($3.50\,\%$), el coeficiente de suciedad del vidrio ($22.5\,\%$), y las propiedades del hormigón, densidad ($21.4\,\%$) y conductividad ($28.2\,\%$), se mantienen en rangos de búsqueda estrechos.

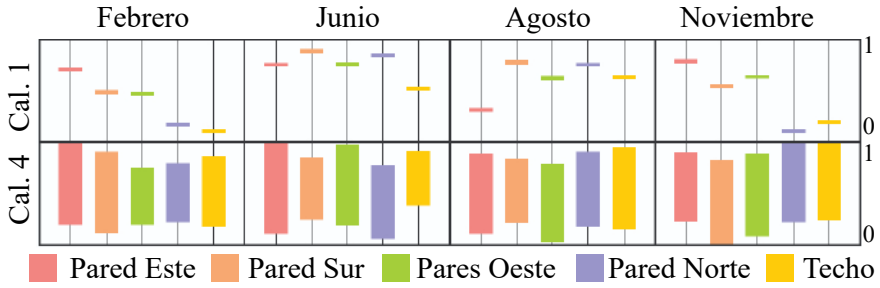


Figura 5.28: Dispersión de la resistencia térmica del aire R_{aire} (Rango: 0.00–1.00 m^2K/W).

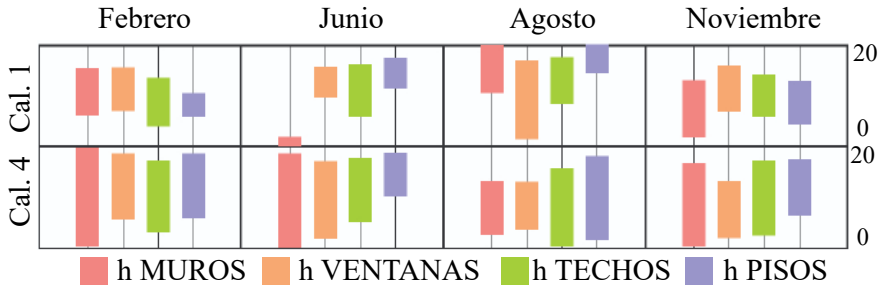


Figura 5.29: Dispersión del coeficiente convectivo interior (Rango: 0.00–20.00 W/m^2K).

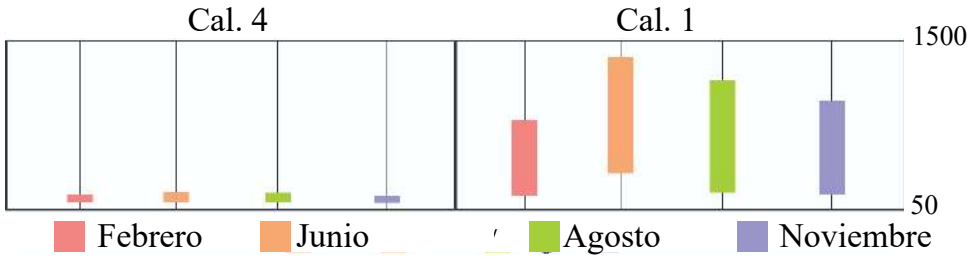


Figura 5.30: Dispersión del área de infiltración A_{inf} (Rango: 50–1500 cm^2).

Como se ilustra en las Figuras 5.28 a 5.30, la evidencia gráfica confirma que el Cal_1 produce un agrupamiento de soluciones mucho más denso y coherente, mientras que el Cal_4 genera individuos distribuidos erráticamente en casi todo el espacio de búsqueda. Estos resultados ponen de

manifiesto que, si bien la interdependencia paramétrica permite al optimizador encontrar múltiples combinaciones que minimizan el error residual, solo una estrategia de desacople como la propuesta en esta tesis asegura que dichas combinaciones no deriven en soluciones matemáticamente válidas pero físicamente irreales, consolidando así la fiabilidad del modelo térmico del Edificio SOFIA.

5.5. Conclusiones y aporte del capítulo

El desarrollo de la calibración sobre el edificio experimental en Sofía, Bulgaria, ha permitido validar una **Metodología de Calibración Escalonada en Dos Pasos**. Esta estrategia se estructuró secuencialmente en: (i) el ajuste de los parámetros de la envolvente opaca implementando condiciones de borde térmicas en las superficies; y (ii) el ajuste de los parámetros globales del edificio, incluyendo infiltraciones y sistemas vidriados. Esta descomposición del problema permitió reducir la interdependencia paramétrica y mitigar el fenómeno de la equifinalidad, garantizando una consistencia física superior a los métodos de optimización global simultánea.
La metodología propuesta, denominada Cal_1, se contrastó con tres enfoques: Cal_2 y Cal_3 (mono-objetivo centrados en el aire) y Cal_4 (multi-objetivo global simultáneo). La robustez se evaluó mediante análisis cruzados estacionales y se validó con datos independientes de enero y julio. Los resultados demuestran que el enfoque escalonado ofrece la mayor fidelidad local y global, con errores estables durante todo el ciclo anual.
A partir de la aplicación experimental y del análisis comparativo exhaustivo, se derivan los siguientes aportes científicos:

Validación de la metodología escalonada Se ha demostrado empíricamente que la **Metodología de Calibración Escalonada en Dos Pasos** supera las limitaciones estructurales de los métodos de optimización global. Al desacoplar el problema, fijando primero las propiedades de la envolvente opaca mediante temperaturas superficiales (T_{sup}), se logra reducir drásticamente la incertidumbre del espacio de búsqueda (Ω). Esto permite identificar parámetros físicos con una precisión que los métodos simultáneos no pueden alcanzar debido a la compensación matemática de errores entre variables.

Superioridad frente a enfoques convencionales. El análisis comparativo evidenció las falencias de las estrategias clásicas. Los métodos mono-objetivo centrados en el aire (Cal_2 y Cal_3) lograron ajustes aceptables en T_{aire}, pero fallaron sistemáticamente en representar el comportamiento térmico de la envolvente exterior, con errores que superaron los $20\,°$C en periodos de alta radiación. Por su parte, la optimización global simultánea (Cal_4), aunque redujo el error matemático, generó una dispersión paramétrica excesiva, resultando en modelos físicamente inconsistentes. En contraste, el Cal_1 mantuvo un equilibrio óptimo en todas las variables.

Precisión al límite de la instrumentación. La metodología propuesta alcanzó niveles de exactitud notables. Las desviaciones en las temperaturas superficiales se situaron en el orden de $0.15\,°$C, coincidiendo con el límite de precisión de los sensores utilizados. Asimismo, el error en la temperatura del aire se mantuvo sistemáticamente por debajo de $0.8\,°$C (representando entre un $2\,\%$ y $5\,\%$ de los valores medidos), lo que valida la capacidad del modelo para replicar fenómenos físicos complejos en régimen de oscilación libre.

Robustez temporal y transferibilidad de parámetros. Los análisis cruzados y la validación externa confirmaron la estabilidad del modelo. Se demostró que los parámetros calibrados en un periodo pueden utilizarse para predecir el comportamiento en estaciones opuestas sin una degradación significativa del ajuste. Esto sugiere que el Cal_1 logra capturar las propiedades intrínsecas del edificio, independizándolas de las condiciones de contorno momentáneas.

Reducción de la interdependencia paramétrica. El análisis de la dispersión de los parámetros (conductividad, absortividad, coeficientes convectivos) reveló que el Cal_1 produce soluciones con baja variabilidad y alto sentido físico. Al aislar variables críticas en el Paso 1 (como R_{aire} o α_S), se mitiga el efecto de compensación de errores. Esto establece que la **jerarquización de las variables de calibración** es tan determinante para la precisión como el algoritmo de optimización empleado.

Aporte metodológico para envolventes avanzadas Este capítulo establece un protocolo robusto para la caracterización térmica de edificios *in-situ*. La combinación de monitoreo detallado con una calibración secuencial constituye un precedente metodológico esencial para futuras investigaciones que requieran evaluar tecnologías de envolvente innovadoras o sistemas pasivos.

5.5.1. Aportes al estado del arte

El aporte fundamental de este módulo reside en la validación de un cambio de paradigma en la calibración de modelos BES: la transición de enfoques globales hacia una estrategia estructurada de desacople físico. Al demostrar que la subdivisión del problema de calibración en etapas secuenciales reduce drásticamente la equifinalidad, este trabajo ofrece una solución robusta al problema histórico de la interdependencia paramétrica.
Asimismo, el módulo contribuye al estado del arte estableciendo un protocolo de caracterización *in-situ* de alta fidelidad. La capacidad demostrada para transferir parámetros calibrados entre estaciones opuestas confirma que la metodología logra capturar las propiedades termofísicas intrínsecas del edificio. Este hallazgo es crucial para reducir los costos y tiempos de las campañas de monitoreo experimental sin sacrificar la confiabilidad de las predicciones energéticas.
Finalmente, este trabajo sienta las bases para una evaluación rigurosa de tecnologías de envolvente avanzadas. Al lograr reducir el error de simulación en las temperaturas superficiales al límite de la precisión instrumental ($\sim 0.15\,^{\circ}\mathrm{C}$), la metodología habilita el uso de la simulación termoenergética no solo para estimar consumos, sino para estudiar fenómenos de transferencia de calor complejos a nivel de componente.

Capítulo 6

Conclusiones y Aportes del Módulo II

La revisión crítica de la literatura realizada en este módulo permitió identificar que, si bien la calibración de modelos BES ha evolucionado hacia procesos automatizados mediante SBO, persiste un riesgo latente de equifinalidad al analizar la envolvente edilicia. Los enfoques convencionales, al validarse únicamente mediante la temperatura del aire (T_{aire}), tienden a compensar errores en la modelización a través de la alteración forzada de la masa térmica o la resistencia. Este fenómeno produce modelos que, aunque ajustados en resultados numéricos, resultan inexactos en su física fundamental.
Los resultados obtenidos demuestran que la integración de las temperaturas superficiales (T_{sup}) incrementa la precisión de la calibración y permite un ajuste más riguroso de los parámetros físico-constructivos. No obstante, se observó que ajustar exclusivamente la densidad (ρ), la conductividad (k), las infiltraciones (Q_{inf}) y las propiedades del vidriado es insuficiente; resulta imperativo incluir parámetros vinculados a los coeficientes de convección (h_{int} y h_{ext}) y a la ganancia de calor por radiación (α_S y α_T). Asimismo, el incremento en la densidad y diversidad de los datos permite desacoplar las variables del problema, mejorando significativamente la caracterización térmica de la envolvente.
Este análisis sintetiza el trabajo desarrollado en el presente módulo, donde se validaron estrategias de calibración mediante modelos inversos aplicadas a dos casos de estudio: la vivienda rural MEVIR (Uruguay) y el edificio experimental SOFIA (Bulgaria). A continuación, se presentan las conclusiones transversales derivadas de la integración de ambos casos y los aportes principales de este módulo al estado del arte.

6.1. Síntesis de hallazgos obtenidos

El análisis comparativo de las metodologías aplicadas en los Casos I y II permite establecer tres pilares fundamentales para la calibración de alta precisión en edificaciones.

6.1.1. La insuficiencia de la calibración mono-objetivo

Los resultados obtenidos en ambos casos de estudio confirman que la calibración centrada exclusivamente en la T_{aire}, aunque es el estándar de la literatura, resulta insuficiente para caracterizar la envolvente térmica.

- En el **Caso MEVIR**, el enfoque MO redujo el $RMSE$ del aire en un 69 %, pero mantuvo errores críticos en la T^{ext}_{techo} (reducción de apenas el 1 %), demostrando una incapacidad para capturar la dinámica de intercambio con el entorno.

- En el **Caso SOFIA**, las calibraciones MO (Cal_2 y Cal_3) fallaron sistemáticamente en representar el comportamiento térmico de las superficies exteriores, con errores que superaron

los 20 °C en periodos de alta irradiancia, evidenciando que un buen ajuste del aire no garantiza la validez física de los cerramientos.

6.1.2. La validación de la optimización multi-objetivo y el ajuste de parámetros avanzados

Se demostró que la incorporación de las T_{sup} (muros, techos y pisos) en la FO, junto con el ajuste explícito de parámetros avanzados (h_{int}, h_{ext}, α_S y α_T), es indispensable para la integridad física del modelo.

- La inclusión de estas variables en el **Caso MEVIR** permitió reducir el $RMSE$ en componentes opacos entre un 42 % y un 82 %, logrando un equilibrio físico entre el aire y las superficies que evita el *overfitting*.
- Se verificó que los coeficientes convectivos (h_{int} y h_{ext}) y las propiedades ópticas (α_S y α_T) no deben asumirse como valores estáticos de normativa, sino tratarse como variables estocásticas para corregir la incertidumbre asociada a la construcción real.

6.1.3. Superación de la equifinalidad mediante el desacople físico

Si bien la optimización MOO global mejora la representación física, el **Caso SOFIA** reveló que, ante un alto número de variables, persiste la interdependencia paramétrica. La solución propuesta, la **Calibración Escalonada en Dos Pasos**, constituye el hallazgo metodológico más relevante del módulo:

- Al desacoplar el problema —ajustando primero la envolvente opaca mediante T_{sup} y luego el sistema global— se mitiga la equifinalidad.
- Esta estrategia logró errores en T_{sup} (0.15 °C) cercanos al límite de precisión de los sensores y mantuvo la estabilidad predictiva al transferir parámetros entre estaciones climáticas opuestas.
- A diferencia de la optimización global simultánea (Cal_4), el enfoque escalonado produjo parámetros con baja variabilidad y alto sentido físico.

6.2. Aportes al Estado del Arte

A partir de la integración de los resultados, este módulo realiza las siguientes contribuciones:

Cambio de paradigma hacia el desacople físico

Este trabajo valida la transición de enfoques globales hacia estrategias de desacople físico. Se establece que para modelos de alta fidelidad, la envolvente debe tratarse como un subsistema independiente antes de abordar el comportamiento global de la zona térmica.

Protocolo de caracterización *in-situ* de alta fidelidad

Se define y valida un protocolo experimental que combina monitoreo desagregado con calibración secuencial. Este protocolo permite obtener modelos virtuales con validez anual utilizando periodos de datos cortos, optimizando los recursos de monitoreo.

Validación de la simulación para componentes avanzados

Al lograr reducir el error de simulación en las T_{sup} a niveles despreciables ($\sim 0.15\,°\text{C}$), se habilita el uso de la simulación energética para estudiar fenómenos complejos a nivel de componente. Esto posiciona a la calibración escalonada como herramienta habilitante para investigar materiales innovadores y tecnologías de mejoras pasivas.

Evidencia sobre la sensibilidad de los balances térmicos

Se demostró que dos modelos con errores de T_{aire} similares pueden presentar balances de carga térmica estructuralmente distintos. Esto subraya que la validación física de los flujos de calor es tan crítica como el ajuste de las temperaturas operativas para la toma de decisiones de diseño.

Parte IV

DISEÑO DE ENVOLVENTES BIOCLIMÁTICAS EN ARGENTINA

Capítulo 7

Introducción al diseño eficiente de envolventes

El presente Módulo constituye el cimiento teórico de la investigación, donde el diseño de la envolvente edilicia deja de ser una decisión estática para transformarse en un problema complejo de Optimización Multiobjetivo (MOO). En este Capítulo, se describe el marco conceptual que sustenta la Optimización Basada en Simulación (SBO), integrando de forma sistémica las variables termofísicas, geométricas y de orientación que definen el comportamiento energético del edificio. A continuación, se exploran los pilares del confort higrotérmico y la eficiencia energética, estableciendo la necesidad de minimizar las demandas térmicas —tanto en sus componentes sensibles como latentes— mediante el fortalecimiento de estrategias de diseño pasivo. Bajo esta perspectiva, el edificio se concibe como un filtro dinámico capaz de mediar entre las condiciones climáticas exteriores y los requisitos de habitabilidad interna. Seguidamente, el Capítulo ofrece una revisión crítica del estado del arte en los ámbitos nacional e internacional. Este análisis permite identificar el nicho científico que fundamenta la tesis: la imperatividad de equilibrar el desempeño de la masa térmica, el aislamiento, la superficie acristalada y los aleros de sombreado. El objetivo central que se desarrolla es la búsqueda de un compromiso óptimo que maximice el confort interior y minimice la energía para climatización, sin comprometer la viabilidad económica del proyecto. Finalmente, se presenta la lógica de aplicación del algoritmo $NSGA-II$ como motor de búsqueda de los diseños óptimos. Este enfoque garantiza que las soluciones sean técnicamente rigurosas, humanamente habitables y financieramente factibles.

7.1. El diseño de envolventes edilicias como un problema de optimización

El diseño óptimo de la envolvente edilicia se describe en la literatura como un proceso sistemático orientado a determinar la configuración geométrica y las propiedades termofísicas de los cerramientos. Siguiendo los planteamientos de Rabani et al. [251] y Xu et al. [306], este procedimiento busca maximizar el desempeño energético y el confort interior, equilibrando simultáneamente los costos asociados o los potenciales impactos ambientales derivados del ciclo de vida.

A diferencia de los métodos tradicionales, caracterizados habitualmente por iteraciones secuenciales de prueba y error basadas en la intuición, autores como Alexakis et al. [8] y Costa Carrapico et al. [80] proponen abordar la envolvente como un sistema complejo de transferencia de calor y masa. Bajo este paradigma, el diseño basado en optimización permite identificar las soluciones más eficientes dentro de un espacio de búsqueda multidimensional definido (Ω), garantizando que el cumplimiento de los objetivos de eficiencia no comprometa las restricciones de naturaleza geométrica, económica o constructiva.

Desde la perspectiva de la mecánica computacional y la simulación energética, esta problemática se formaliza matemáticamente como un problema de MOO, generalmente de carácter no lineal y discreto [8; 80]. El objetivo radica en hallar un vector de variables de diseño $\mathbf{x}$ que minimice una función objetivo vectorial $\mathbf{F}(\mathbf{x})$, expresada como:

$$\min_{\mathbf{x}\in\Omega} \mathbf{F}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \ldots, f_k(\mathbf{x})]^T \tag{7.1}$$

sujeta a las restricciones de desigualdad y de igualdad que definen el dominio de viabilidad:

$$g_j(\mathbf{x}) \leq 0, \quad j = 1, \ldots, m \tag{7.2}$$

$$h_l(\mathbf{x}) = 0, \quad l = 1, \ldots, p \tag{7.3}$$

En el contexto específico de las envolventes energéticamente eficientes, el vector $\mathbf{x}$ integra variables de decisión críticas como los espesores de aislamiento, conductividades térmicas, la relación ventana-pared, los coeficientes de ganancia solar y la orientación geográfica. Por otro lado, las funciones objetivo $f_i(\mathbf{x})$ representan indicadores de desempeño tales como la demanda anual de energía térmica, el costo de inversión inicial o métricas de confort térmico adaptativo.

El desafío intrínseco de este enfoque radica en la fuerte interdependencia de las variables y la naturaleza conflictiva de los objetivos; por ejemplo, la reducción del costo inicial suele contraponerse a la maximización de la eficiencia energética. Esta complejidad justifica la necesidad de algoritmos de búsqueda robustos capaces de identificar el compromiso óptimo entre criterios divergentes.

7.2. El confort higrotérmico como métrica de desempeño

El confort higrotérmico es definido por el estándar Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy ($ASHRAE\ 55$) [35] como aquella condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico circundante. En el marco de la optimización del diseño edilicio, este concepto trasciende su naturaleza cualitativa para consolidarse como una métrica cuantitativa. Según la revisión sistemática de Alexakis et al. [8], el confort térmico se evalúa numéricamente en el 43 % de los estudios de optimización, utilizando índices como el PMV y el PPD como funciones objetivo matemáticas. En este sentido, Tian et al. [286] subrayan que el PPD ha evolucionado hasta convertirse en una herramienta indispensable en marcos multiobjetivo para equilibrar el bienestar de los ocupantes con el ahorro energético.

El equilibrio termodinámico que sustenta el bienestar del ocupante resulta de la interacción dinámica entre factores personales y ambientales. Como explican Abdou et al. [1], el confort se fundamenta en el balance térmico del cuerpo humano, el cual es influenciado por la tasa metabó-

lica, el aislamiento de la vestimenta y las cuatro variables ambientales clásicas: temperatura del aire, temperatura media radiante de las superficies, velocidad del aire y humedad relativa. Esta interdependencia es validada explícitamente por Liu et al. [193] y detallada por Zhen et al. [324], quienes desglosan la ecuación de equilibrio térmico resaltando el papel del metabolismo frente a las condiciones de contorno impuestas por la envolvente.
Para la cuantificación de la sensación térmica, la disciplina reconoce dos enfoques metodológicos contrapuestos:

- **Modelo del Voto Medio Predicho (PMV/PPD):** Constituye el estándar analítico para espacios controlados mecánicamente. Abdou et al. [1] confirman que, siguiendo la norma EN ISO 7730, el límite $|PMV| \leq 0.5$ se establece como el nivel normal para la optimización. Por su parte, Liu et al. [193] demuestran que el porcentaje de insatisfechos (PPD) cae por debajo del 10 % (confort aceptable) específicamente cuando el modelo se mantiene dentro de dicho rango de neutralidad.

- **Modelo de Confort Adaptativo:** Es idóneo para edificaciones con ventilación natural, dado que reconoce que las preferencias térmicas de los ocupantes dependen de factores psicológicos y de su capacidad para interactuar con el entorno [221]. Desde una perspectiva de eficiencia, Arballo et al. [20] legitima este modelo como una estrategia clave que puede conducir a ahorros energéticos de entre el 30 % y el 60 %, al considerar la evolución del clima exterior y la adaptabilidad intrínseca del usuario.

7.2.1. Evaluación del confort y la transición a sistemas activos

En el marco de la MOO, el confort se evalúa inicialmente bajo un régimen de oscilación libre, donde el objetivo es maximizar la autonomía térmica. Hagentoft et al. [140] definen la temperatura de funcionamiento libre como aquella que alcanza el interior sin intervención de climatización, base crítica para el cálculo de la demanda pasiva. Para gestionar esta condición en el modelo de SBO, autores como Chegari et al. [68] introducen la métrica de Grados-Hora de Disconfort como función objetivo a minimizar, mientras que Rabani et al. [251] justifican el uso de funciones de penalización para descartar soluciones que no cumplan con un umbral mínimo de horas de confort pasivo.
Cuando las estrategias pasivas resultan insuficientes para mantener la aceptabilidad adaptativa, se activa la intervención de sistemas $HVAC$. Arballo et al. [20] describen esta lógica de control dinámico donde el sistema transita de la ventilación natural al aire acondicionado solo cuando se superan los límites térmicos. En este escenario, la envolvente asume el rol de minimizar la carga térmica suplementaria. Al respecto, Muñoz Salcedo et al. [223] enfatizan la importancia de gestionar no solo la carga sensible sino también la latente (Q_{lat}) en climas húmedos, donde la deshumidificación impacta drásticamente el consumo y la salud.
Finalmente, se establece que la envolvente actúa como un filtro primario responsable de regular entre el 56 % y el 78 % de las pérdidas de calor totales [148]. Esta optimización física reduce directamente la tasa de inversión en equipos mecánicos y, como demuestran Al-Kabaha et al. [4], disminuye la intensidad de la carga térmica demandada a los sistemas activos, optimizando así el Costo de Ciclo de Vida (LCC) y las emisiones del edificio (CO_2).

7.3. Arquitectura metodológica para el diseño de alto desempeño

La arquitectura de la Optimización Basada en Simulación (SBO) articula de manera dinámica los motores de BES con algoritmos metaheurísticos para transformar el diseño edilicio en un proceso paramétrico y automatizado [171]. En este ecosistema, los motores de simulación garantizan la fidelidad termofísica necesaria para evaluar cada iteración, mientras que algoritmos como

el $NSGA-II$ o la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), permiten explorar con eficacia espacios de búsqueda (Ω) vastos y no lineales. Al respecto, Alexakiset et al. [8] confirma que el $NSGA-II$ se mantiene como el algoritmo genético más adoptado debido a su eficiencia computacional, mientras que estudios comparativos realizados por Li et al. [184] validan el uso conjunto de estas metaheurísticas para resolver problemas de rendimiento de edificios con múltiples objetivos en conflicto.
A fin de mitigar la elevada carga computacional inherente a las ejecuciones iterativas de modelos numéricos complejos, la literatura reciente propone la integración de metamodelos sustentados en Aprendizaje Automático (ML) [247]. Estos modelos subrogados, que incluyen redes neuronales artificiales (ANN) o técnicas de *Machine Learning*, actúan como sustitutos capaces de aproximar los resultados del motor de cálculo en milisegundos [14]. Como sostienen Xu et al. [306], la sustitución del modelo físico por estos metamodelos permite una optimización multiobjetivo mucho más rápida y práctica, superando las limitaciones de tiempo habituales en la fase de diseño.

7.3.1. Vector de variables de diseño

El éxito de la optimización se fundamenta en la definición de un vector de variables de decisión $\mathbf{x}$ que integra de manera holística tres dimensiones críticas de la física de la edificación:

- **Envolvente opaca:** Comprende la caracterización termofísica de los cerramientos. Investigaciones de He at al. [148] validan la selección del material y el espesor del aislamiento como variables críticas. Asimismo, este vector integra la interacción entre la transmitancia y la inercia térmica, masa y capacitancia, [259; 309], junto con las propiedades radiativas de las superficies exteriores, como la absortividad solar y los materiales de recubrimiento [178].

- **Sistemas transparentes:** Definidos por parámetros de alta sensibilidad térmica. Siguiendo a Feehan et al. [108] y Yao et al. [311], se examinan configuraciones de acristalamiento caracterizadas por su transmitancia (valor U), factor de ganancia solar directa ($SHGC$) y la relación ventana-pared (WWR), evaluada de forma uniforme o específica según la orientación.

- **Parámetros morfológicos y estrategias pasivas:** Consideran la geometría del edificio y su inserción climática. Autores como Ciardiello et al. [74] y Beninca et al. [54] destacan la optimización del factor de forma y la orientación (0–355°) como fases prioritarias del diseño. Este eje se completa con la optimización de dispositivos de sombreado, ajustando variables como la profundidad y el ángulo de rotación para maximizar la protección solar [14].

Este enfoque sistémico trasciende la optimización de componentes aislados para centrarse en la interdependencia dinámica de los parámetros. Bajo este paradigma, se reconoce que la eficiencia global no es la suma de partes óptimas, sino el resultado de una sinergia técnica donde la envolvente actúa como un filtro selectivo capaz de equilibrar las demandas contrapuestas de confort higrotérmico y racionalización energética.

7.3.2. Definición de las funciones objetivo y criterios de optimización

La definición de las funciones objetivo constituye el núcleo del problema de optimización, ya que estas determinan las metas de desempeño y orientan la búsqueda heurística hacia soluciones técnicamente válidas. Como advierten Yang et al. [309], una formulación deficiente de estas funciones puede conducir a resultados erróneos, comprometiendo la utilidad del modelo. En el diseño edilicio, este proceso es particularmente desafiante debido a que los intereses y objetivos suelen ser

conflictivos y deben ser gestionados de forma simultánea [74]. Según He et al. [148], es imperativo explorar esquemas que equilibren la eficiencia y la inversión, reconociendo que estas variables tienden a evolucionar en direcciones opuestas. En esta investigación, las funciones objetivo se estructuran en cuatro dimensiones:

- **Desempeño energético de alta fidelidad:** Se orienta a la minimización de la demanda energética total, incluyendo tanto calefacción como refrigeración [74]. Para ello, se emplean métricas como el uso de energía neta [182] o el consumo de energía operativa acumulado durante la fase de mantenimiento [82], permitiendo evaluar la eficiencia bajo diversos escenarios climáticos.
- **Confort y habitabilidad humana:** Esta dimensión trasciende el ahorro energético para asegurar la calidad de vida. Autores como Cui et al. [82] y Rabani et al. [251] utilizan el porcentaje de horas de disconfort térmico o las horas ponderadas de disconfort como funciones críticas de filtrado. Asimismo, Yao et al. [311] integran la maximización de la iluminación natural útil junto con la minimización del PPD, ponderando la importancia de cada espacio según su frecuencia de uso.
- **Viabilidad económica y ciclo de vida (LCC):** El análisis del Costo de Ciclo de Vida se consolida como la métrica de decisión que equilibra la inversión inicial con el valor presente del costo operativo proyectado a largo plazo [4; 182]. Como sugieren Almeida te al. [12], el LCC actúa como un criterio de optimización fundamental para determinar, por ejemplo, el espesor de aislamiento ideal considerando el impacto financiero global.
- **Mitigación del impacto ambiental:** Se persigue una visión de sostenibilidad integral que equilibre el carbono operativo con el carbono embebido de los materiales. Kamazani et al. [167] argumentan que optimizar únicamente la energía operativa es insuficiente, dado que existe una interacción compleja donde reducir el consumo puede incrementar la huella de los materiales si no se gestionan conjuntamente. En este sentido, Schwartz et al. [274] y Rojas-Herrera et al. [260] enfatizan que las decisiones tempranas sobre materialidad y orientación impactan la huella de carbono de ciclo de vida desde la extracción hasta la operación.

El éxito de la SBO reside en la resolución de estos conflictos intrínsecos. Para ello, se emplean algoritmos multiobjetivo que permiten identificar el Frente de Pareto: un conjunto de soluciones óptimas donde es imposible mejorar un objetivo sin degradar otro [12; 171]. Dado que la minimización absoluta de todos los objetivos es físicamente poco realista, el propósito final es hallar un compromiso que proporcione al proyectista una base científica sólida para la toma de decisiones informada [74].

7.4. Análisis del estado del arte: Contexto internacional

Esta sección sintetiza los hallazgos derivados de una revisión crítica y sistemática de la literatura científica, estructurada con el propósito de deconstruir el problema del diseño óptimo en sus ejes fundamentales. El análisis identifica las tendencias consolidadas y los vacíos de conocimiento que definen el estado del arte actual, organizándose desde la metodología hasta la síntesis de resultados.

7.4.1. Metodología de diseño

Desde una perspectiva estrictamente metodológica, el diseño de la envolvente edilicia se ha consolidado como un dominio regido por la SBO. Este paradigma ha desplazado los métodos tradicionales de prueba y error hacia marcos de trabajo donde el edificio se formaliza mediante un vector de diseño $\mathbf{x}$, el cual integra parámetros geométricos, termofísicos y operativos. Bajo esta arquitectura, la resolución de problemas habitualmente no lineales y multiobjetivo se sustenta en

la interacción dinámica entre variables de decisión y funciones de desempeño, evaluadas mediante motores de BES de alta fidelidad.

Para gestionar la complejidad inherente a este espacio de búsqueda (Ω), diversos autores han propuesto estrategias de segmentación. Ciardiello et al. [74], por ejemplo, introducen una metodología en dos fases que prioriza la morfología macroscópica (forma y orientación) antes de abordar la configuración técnica de los cerramientos. En una línea más específica sobre la composición de los cerramientos, Yang et al. [309] implementan técnicas de optimización inversa basadas en algoritmos de PSO para derivar la distribución ideal de resistencia (R) y capacitancia (C) en muros. Complementariamente, Lu et al. [197] proponen un método analítico que permite optimizar la secuencia y el número de capas de aislamiento de forma significativamente más veloz que los métodos iterativos convencionales.

El núcleo de esta investigación metodológica reside en la selección del motor de búsqueda, donde se observa una clara predilección por los algoritmos metaheurísticos. Las revisiones sistemáticas de Alexakis et al. [8] y Costa-Carrapiço et al. [80] confirman que el algoritmo $NSGA-II$ es la herramienta más robusta y extendida para identificar el Frente de Pareto, especialmente en el balance entre confort higrotérmico y demanda energética. No obstante, el espectro es amplio: desde la programación entera bi-objetivo para edificios públicos He et al. [148] hasta algoritmos de inteligencia de enjambre para dispositivos de sombreado con geometrías complejas como proponen Alsharif et al. [14].

Esta sofisticación algorítmica ha permitido que las funciones objetivo evolucionen hacia marcos integrales de bienestar y economía. Investigaciones como las de He et al. [148] y Lin et al. [188] establecen la minimización del costo de inversión inicial como una restricción crítica. En un nivel de síntesis superior, Bayat Pour et al. [247] introduce el Análisis de Decisión de Inutilidad (IDA), vinculando la física de la edificación con las consecuencias médicas derivadas de la humedad y el moho, optimizando la envolvente para prevenir riesgos de salud.

Hacia el futuro, el marco metodológico se proyecta hacia la resiliencia climática y la integración tecnológica. Le et al. [182] incorporan escenarios de cambio climático para el año 2050, asegurando que las estrategias pasivas mantengan su validez ante el aumento de las temperaturas globales. En paralelo, el desarrollo de envolventes con generación activa, como los sistemas fotovoltaicos integrados en edificios estudiados por Samarasinghalage et al. [269], demuestra que la SBO es capaz de unificar el análisis de ciclo de vida con la generación distribuida.

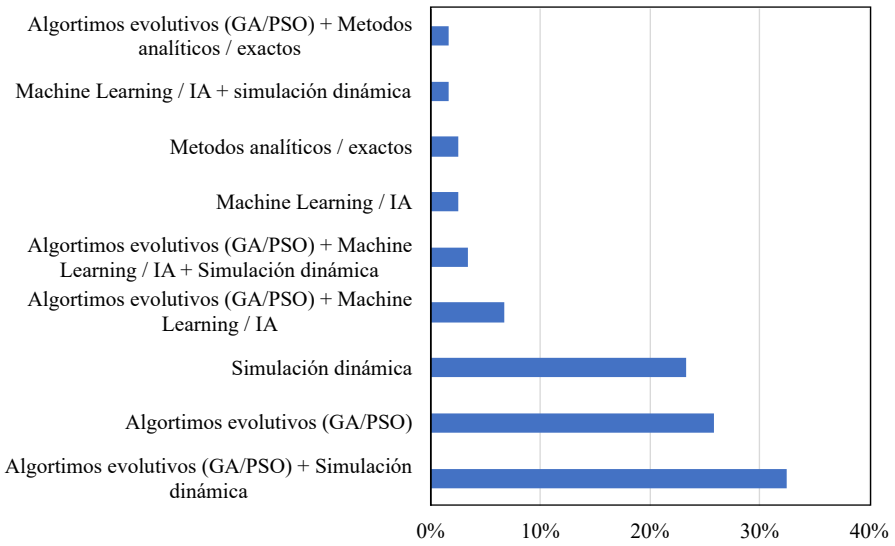


Figura 7.1: Frecuencia de metodologías de optimización en la literatura revisada.

Como síntesis de esta evolución, ilustrada en la Figura 7.1, la tendencia dominante es la integración de algoritmos evolutivos, específicamente el $NSGA-II$, con motores de simulación validados como $E+$ o TRNSYS. Sin embargo, ante el alto costo computacional, ha emergido el uso de metamodelos o modelos subrogados basados en ML (como Redes Neuronales) para predecir el comportamiento del edificio en milisegundos, permitiendo una toma de decisiones informada en tiempo real.

7.4.2. Estrategias de diseño

La literatura científica reciente propone un cambio de paradigma en el diseño de edificios, donde la envolvente deja de ser una barrera estática para convertirse en un sistema adaptativo. El análisis de las investigaciones revela que la eficiencia no surge de la suma de componentes, sino de la orquestación técnica de variables que responden al clima local y a la salud de los ocupantes.
Como se puede ver en la Figura 7.2 el comportamiento térmico de un edificio depende de la interacción sistémica entre sus componentes. El análisis combinatorio distingue entre enfoques holísticos donde la geometría, la fenestración y la envolvente se optimizan como un sistema acoplado para reducir la brecha de rendimiento energético.

Envolvente opaca. La revisión exhaustiva identifica la optimización del aislamiento térmico como la estrategia más recurrente. Investigaciones contemporáneas demuestran un desplazamiento desde enfoques empíricos hacia modelos matemáticos avanzados. Por ejemplo, He et al. [148]

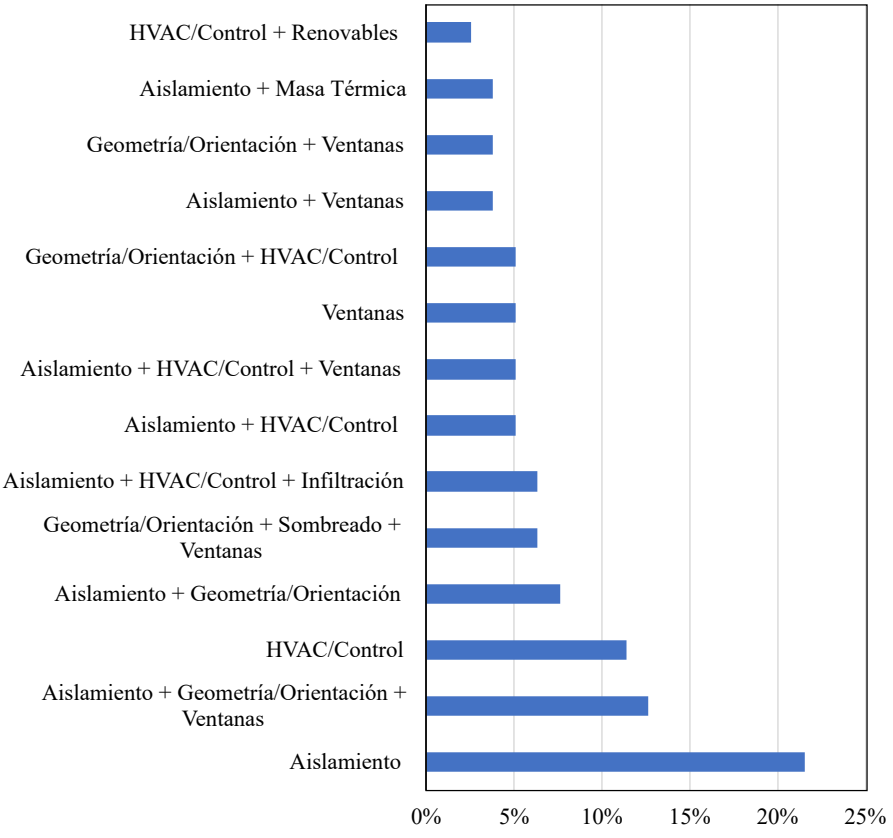


Figura 7.2: Frecuencia de las combinaciones de variables de diseño identificadas a partir de la revisión sistemática.

proponen un modelo de optimización entera bi-objetivo donde el material y el espesor del aislante actúan como variables determinantes. En una línea similar, Almeida et al. [12] emplean ANN integradas con análisis de LCC para definir espesores óptimos bajo escenarios de inversión limitada. Desde una perspectiva material, Zhen et al. [324] posicionan a la lana de roca como la solución con mejor balance en edificios Edificios de Energía Casi Nula, mientras que Liu et al. [193] subrayan que la elección entre materiales como Poliuretano Expandido EPS o Poliestireno Extruido (XPS) varía drásticamente según la prioridad económica. No obstante, la eficiencia no depende exclusivamente del espesor, sino de la configuración de las capas. Yan et al. [308] demuestran, mediante algoritmos de PSO que la asignación precisa de resistencia (R) y capacitancia (C) puede reducir el flujo de calor hasta en un 44.3 %. Complementariamente, Lu et al. [197] demuestran que la fragmentación del aislamiento en tres capas estratégicas maximiza el desfase térmico y el amortiguamiento de la carga exterior.

Sistemas híbridos, materiales bio-basados e innovación. La bibliografía evidencia una tendencia hacia la descarbonización mediante materiales de baja huella de carbono. Khoso et al. [169] validan configuraciones de piedra caliza, OSB y arcilla que reducen el consumo en casi un 50 % frente al concreto convencional. Asimismo, Rojas-Herrera et al. [260] identifican a la paja de trigo como un material de vanguardia renovable. A esta tendencia se suma la integración de materiales de cambio de fase (PCM); Wu et al. [300] demuestran que su colocación estratégica cerca de la cara interior mejora la estabilidad térmica y reduce la carga de refrigeración estival en un 8.2 %. Más allá de la composición, la gestión de las propiedades radiativas resulta fundamental. Chegari et al. [68] utilizan algoritmos metaheurísticos para optimizar la transmitancia y la absorción solar (α_S), mientras que Mounir et al. [220] validaron transmitancias de 0.15 W/m^{2}K mediante composiciones bio-basadas optimizadas.

Envolvente transparente. En cuanto a las aberturas, la investigación aborda el sistema de ventana como una unidad integral. He et al. [148] destacan el material del marco como variable crítica, mientras que Chegari et al. [68] vinculan el valor U, el $SHGC$ y la transmitancia visible con el confort lumínico y térmico. Otros trabajos evalúan tecnologías de doble y triple vidriado con capas de baja emisividad (*Low-E*). En entornos rurales, Yao et al. [311] proponen configuraciones que combinan vidriado *Low-E* con cámaras de aire para maximizar el confort y la eficiencia.

Morfología y contexto urbano. La morfología edilicia juega un rol determinante. Mosca et al. [219] señalan que la compacidad y el factor de forma pueden inducir variaciones térmicas de hasta 11.9°C. Esta geometría debe responder al entorno; Beninca et al. [54] demuestran que las sombras urbanas desplazan los ángulos óptimos de orientación, mientras que Samarasinghalage et al. [269] integran el azimut con sistemas sistemas fotovoltaicos integrados en edificios. Finalmente, la orientación se articula con el control dinámico del sombreado. Liu et al. [193] proponen la optimización del ángulo de lamas para reducir el consumo entre un 4 % y un 30 %. En climas tropicales, Muños Salcedo et al. [223] identifican los toldos como la solución más efectiva.

7.4.3. Funciones objetivo

El cambio de paradigma en la definición de las metas del diseño edilicio permite que estas dejen de concebirse como indicadores aislados de ahorro energético para convertirse en modelos de evaluación multiobjetivo de alta complejidad. El análisis de las investigaciones revela que la sostenibilidad del diseño no reside en la optimización de un único parámetro, sino en objetivos frecuentemente contrapuestos, buscando un equilibrio dinámico entre el desempeño térmico, la viabilidad económica y la preservación de la habitabilidad humana.
La definición de los objetivos refleja una sofisticación creciente. Aunque el análisis cuantitativo (Figura 7.3) revela que la minimización de la demanda energética persiste como el vector director,

se observa una transición consolidada hacia esquemas de optimización para resolver conflictos entre parámetros tradicionalmente aislados.

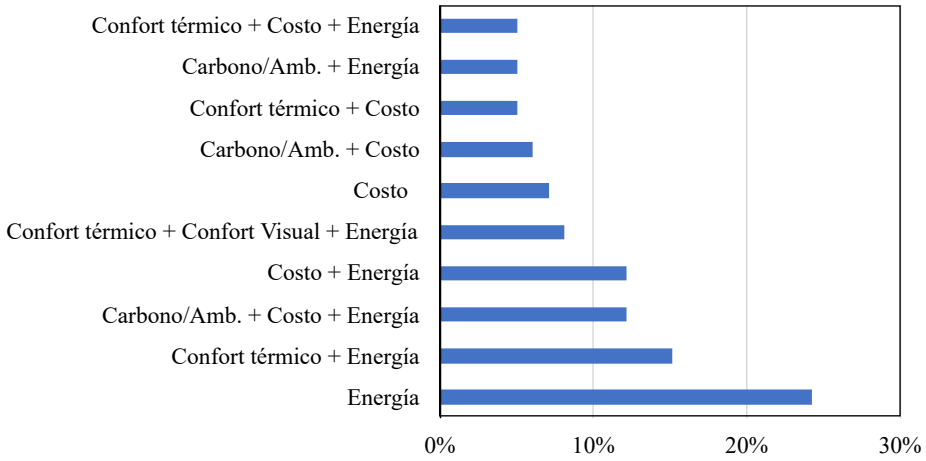


Figura 7.3: Frecuencia de funciones objetivo identificadas a partir de la revisión sistemática.

Investigaciones con enfoque integral: Energía, costo, confort y carbono. La literatura científica actual refleja una transición hacia el análisis sistémico de la edificación, superando la visión unidimensional del ahorro energético operativo. En este contexto, destaca el estudio de Li et al. [184], quienes proponen un marco de optimización integral que equilibra simultáneamente el LCC, las emisiones de CO_2 equivalente y el tiempo de disconfort térmico en entornos residenciales. Bajo esta misma premisa, Luo et al. [198] introducen un modelo exhaustivo que vincula la intensidad de uso de energía con los costos de inversión inicial y la calidad ambiental global. Esta perspectiva de MOO es reforzada por autores como Liu et al. [193] y Al Kabaha et al. [4], quienes priorizan la maximización del beneficio económico incremental a largo plazo frente a la minimización de las emisiones. Asimismo, en el ámbito de la prefabricación, Rojas-Herrera et al. [260] demuestran que la optimización algorítmica permite armonizar la reducción de la demanda energética y la huella de carbono con parámetros de productividad industrial.

Salud, habitabilidad y durabilidad. Un avance crítico identificado es la incorporación de la salud como métrica de desempeño. Bayat Pour et al. [245; 247] introducen el método de Análisis de Decisión de Inutilidad (IDA), un marco innovador que establece una correlación directa entre la física de la envolvente y las consecuencias médicas derivadas de patologías por moho, integrando estos riesgos en el análisis de LCC. Complementariamente, trabajos como el de Almeida et al. [12] subrayan que la optimización debe garantizar la reducción de la demanda de calefacción sin comprometer la habitabilidad estival, empleando una gestión de la envolvente que mitigue de forma pasiva los riesgos de sobrecalentamiento.

Modelado avanzado de carbono y compromisos económicos. La investigación contemporánea profundiza en la viabilidad financiera mediante simulación avanzada. Feehan et al. [108] emplean un marco integrado BES-LCA para cuantificar el impacto total de los recursos, diferenciando entre el carbono operativo y el embebido en los materiales. En este sentido, Kilis et al. [170] comparan diversos modelos de programación matemática para optimizar la envolvente bajo restricciones ambientales. Finalmente, en el contexto de los edificios de energía casi nula, el trabajo de Abdou et al. [1] reafirma que el éxito reside en hallar el punto de compromiso exacto entre el costo global y el ahorro energético.

7.4.4. Interacción sistémica entre variables y funciones objetivo

Para identificar las brechas estructurales en el estado del arte actual, se analizó la relación causal entre las variables de diseño (*inputs*) y los objetivos de desempeño perseguidos (*outputs*), cuya dinámica se visualiza en el diagrama de flujo de la Figura 7.4.

Como se observa en el diagrama, existe una conexión predominante entre el aislamiento térmico y los objetivos puros de energía y costo. Esto confirma que dicha variable sigue siendo el pilar fundamental para la optimización de la demanda operativa en la literatura actual. Sin embargo, el análisis evidencia una transición hacia el aislamiento, la geometría y las ventanas como el conjunto de variables más versátil, capaz de alimentar simultáneamente objetivos de triple impacto que integran la descarbonización, el costo y la energía, así como el confort térmico y visual.

Por otro lado, la vinculación entre la masa térmica y el aislamiento muestra una trayectoria específica hacia la mejora del confort higrotérmico, aunque con una presencia notablemente menor en comparación con los enfoques centrados únicamente en la resistencia térmica. Esta dinámica de flujos subraya una polarización metodológica:

- Las variables aisladas, como los sistemas $HVAC$, se vinculan directamente a la minimización de costos operativos.
- Las configuraciones integrales de la envolvente, que incluyen la orientación y el sombreado, son las que garantizan la habitabilidad mediante la maximización del confort y la autonomía energética.

En este escenario, la conexión entre la inercia térmica y el costo global permanece como una ruta menos transitada en los esquemas de MOO actuales, lo que representa una oportunidad de profundización para el presente estudio.

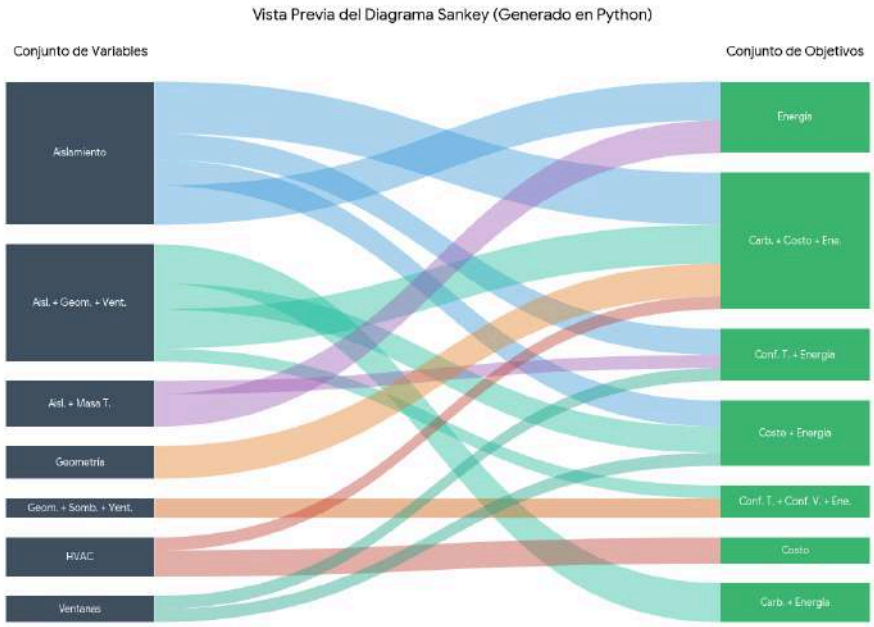


Figura 7.4: Diagrama de flujo que relaciona los conjuntos de variables de entrada con los objetivos de optimización multiobjetivo identificados.

7.5. Análisis del estado del arte: Contexto nacional

7.5.1. Metodologías de optimización y simulación dinámica

La investigación en Argentina ha consolidado el uso de la Optimización Basada en Simulación (SBO) como el estándar científico para abordar la complejidad inherente al diseño de envolventes edilicias. En este ámbito, se destaca la integración de algoritmos genéticos GA acoplado a motores de simulación dinámica validados internacionalmente como EnergyPlus ($E+$).
Este enfoque metodológico permite el procesamiento en paralelo y la exploración de espacios de búsqueda (Ω) masivos. Como evidencia de esta capacidad de cómputo, se registran estudios locales que emplean hasta 270,000 simulaciones paramétricas con el fin de construir modelos predictivos simplificados o metamodelos de alta precisión. Estas metodologías resultan esenciales para garantizar el cumplimiento de los requerimientos de la normativa nacional, específicamente la norma $IRAM$ 11605, la cual establece las directrices de diseño para las diversas regiones del país.
Asimismo, la literatura nacional reporta la implementación de algoritmos avanzados de Inteligencia de Enjambre, tales como la Optimización por Colonia de Hormigas (ACO) desarrollados en entornos de programación. Estas herramientas se han aplicado con éxito para resolver el conflicto técnico entre la maximización del ahorro energético y la preservación del confort térmico en tipologías de edificios de oficinas. La tendencia actual en el país se orienta firmemente hacia la búsqueda de soluciones de compromiso que equilibren el desempeño térmico bajo las condiciones de diseño específicas de cada zona bioclimática, integrando el análisis de sensibilidad como etapa previa fundamental para reducir la dimensionalidad de los problemas de optimización multiobjetivo.

7.5.2. Parámetros de decisión

Inercia térmica y materialidad. El equilibrio entre la masa térmica y el aislamiento constituye uno de los ejes centrales de la discusión científica en el país, especialmente en contextos áridos con gran irradiancia como la provincia de San Juan, donde las investigaciones demuestran que la inversión en aislamiento térmico —tanto vertical como horizontal— resulta prioritaria frente al incremento indiscriminado de la masa térmica para optimizar los costos globales y garantizar la confiabilidad del confort térmico. Paralelamente, el estudio de materiales de baja energía embebida ha cobrado relevancia, destacándose las investigaciones sobre sistemas bio-basados como los muros de quincha liviana de tierra y paja, que han validado transmitancias térmicas globales de $0.79\,\mathrm{W/m^2K}$ cumpliendo con estándares regionales de eficiencia, así como los sistemas de suelo-cemento en Córdoba, evaluados como una alternativa sustentable que mejora la inercia térmica frente a los cerramientos livianos e industrializados tradicionales. En el campo de la innovación, el estado del arte nacional explora soluciones avanzadas que incluyen procedimientos numéricos para optimizar muros multicapa con materiales de cambio de fase (PCM) situados estratégicamente hacia la cara interna para minimizar flujos de calor, junto con la activación térmica de estructuras en Salta, donde se investiga el impacto de sistemas de tubos embebidos en el núcleo de hormigón para mejorar significativamente la temperatura operativa durante el periodo estival.

Acristalamientos y protecciones solares. El diseño de la envolvente transparente en el contexto nacional se aborda mediante la optimización geométrica y el control solar selectivo. En la región del Litoral, el dimensionamiento de voladizos y aleros se presenta como una variable crítica para mitigar la carga por radiación solar directa, permitiendo una reducción sustancial de los grados-hora de refrigeración. Para configuraciones de mayor complejidad, se emplean análisis paramétricos exhaustivos que permiten evaluar la sensibilidad de la fachada; por ejemplo, en la región de Cuyo, se han analizado hasta 5,670 combinaciones de geometría de lamas para determinar el impacto de su profundidad y ángulo en relación con la WWR. Estos estudios nacionales

permiten identificar el balance óptimo entre la maximización de la iluminación natural y la minimización de las cargas térmicas en zonas de alta irradiancia, proporcionando soluciones robustas que responden a la realidad climática regional.

Color y propiedades superficiales. La gestión de las propiedades opto-térmicas de las superficies exteriores se consolida como una estrategia de diseño de alto impacto y baja inversión económica, cuya validación técnica mediante el incremento de la reflectancia solar —a través del uso de colores claros— en muros y techos resulta fundamental para disminuir el IPE, mejorar la clasificación de eficiencia edilicia según las directrices de la normativa nacional de $IRAM$ 11900 y regular de forma pasiva el flujo térmico en envolventes ventiladas en función de la emisividad de la placa exterior.

7.5.3. Análisis de los avances científicos según la zona bioclimática

En la Tabla 7.1 se sistematizan los hallazgos más relevantes, categorizando las investigaciones según su zona bioambiental de aplicación, las variables de diseño de la envolvente intervenidas y los principales objetivos de desempeño perseguidos.

Tabla 7.1: Comparativa de investigaciones sobre estrategias de envolvente por Zona Bioambiental en Argentina.

Zona	Región	Estrategias de Envolvente	Hallazgo o Meta Principal	Autores
I	NEA / Santiago del Estero / Chaco	Protección solar en techos y carpinterías; ventilación natural; aislantes de residuo textil.	Mitigación de irradiancias $> 1000\,\mathrm{W/m^2}$; reducción drástica de grados-hora de refrigeración.	Garzon y Alias [9; 131; 211]
II	Tucumán / Salta / Paraná / Santa Fe	Aislantes multicapa; fachadas verdes; inercia mediante sistemas TABS (APES).	La ventilación natural reduce $> 65\,\%$ de grados-hora de refrigeración; confort adaptativo.	Garzon, Flores Larsen, Bre, Fachinotti y Gimenez [61; 62; 112; 119; 128].
III	San Juan / Córdoba / La Pampa / AMBA	Priorización de aislación sobre masa; bloques cerámicos aislados; ganancia solar al norte.	Optimización del IPE y reducción de disconfort mediante modelos adaptativos.	Arballo, Kuchen, Chuk, Filippin, Sulaiman y Flores Larsen [20; 208; 271; 280].
IV	Mendoza / La Plata / Rosario / Mar Chiquita	Envolventes ventiladas; muros de agua en sistemas livianos; optimización paramétrica de lamas.	Control de radiación extrema y ahorro en refrigeración por estrato forestal urbano	Czajkowski y otros [44; 56; 92; 126].
V/VI	Bariloche / Malargüe / Potrerillos	Masa térmica de tierra (quincha) > 25 cm; retrofit con hermeticidad (*Blower Door*).	Estabilidad térmica frente a $-10\,^{\circ}\mathrm{C}$; ahorro por captación solar y aislación extrema	[17; 101; 129]

Los trabajos realizados en Argentina han evidenciado una evolución significativa en sus metas, transitando de objetivos puramente energéticos hacia métricas de sostenibilidad integral que abarcan el bienestar humano y el impacto ambiental global.

Cuantificación del confort higrotérmico. En la literatura nacional, el confort deja de ser un concepto cualitativo para integrarse como una función objetivo crítica en los procesos de optimización. Para su cuantificación, se emplean mayoritariamente los modelos del estándar $ASHRAE$ 55 [35], utilizando los índices de Voto Medio Predicho (PMV) y Porcentaje de Personas Insatisfechas (PPD). Esta metodología se aplica tanto en monitoreos *in situ* con sensores de precisión

como en simulaciones dinámicas, permitiendo evaluar el nivel de bienestar en diversas tipologías que van desde viviendas sociales hasta edificios de valor patrimonial. El objetivo recurrente es minimizar las horas de disconfort anuales o los grados-hora de refrigeración y calefacción, validando la eficacia de la envolvente como filtro ambiental.

Análisis de ciclo de vida y descarbonización. Investigaciones recientes desarrolladas en centros urbanos como Buenos Aires, Tucumán y Santiago del Estero han incorporado el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) para evaluar el impacto ambiental total de las decisiones de diseño. Estos estudios trascienden el ahorro operativo al cuantificar el carbono embebido en los materiales aislantes y el Potencial de Calentamiento Global (PCG), proyectando el desempeño del edificio en periodos de hasta 50 años. Bajo esta perspectiva, se busca alcanzar estándares de Edificios de Impacto Neto Nulo, donde la elección de la materialidad de la envolvente es determinante para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la climatización.

Etiquetado energético e Índice de Prestaciones Energéticas. La implementación del Etiquetado Energético de Viviendas [PRONEV], fundamentado en la norma $IRAM$ 11900, ha permitido estandarizar la evaluación del desempeño edilicio en el país a través del Índice de Prestaciones Energéticas (IPE). Diversos trabajos analizan cómo la integración de estrategias pasivas de diseño, como la optimización de la transmitancia térmica, el uso de protecciones solares y la inercia térmica, impacta positivamente en la clase de eficiencia alcanzada por el edificio. Este enfoque no solo permite determinar la demanda de energía primaria y secundaria para calefacción, refrigeración, iluminación y agua caliente, sino que también sirve como herramienta de validación para propuestas de rehabilitación energética en el parque construido.

7.5.4. Análisis de los avances científicos según metodologías implementadas y objetivos de desempeño

La integración de herramientas digitales ha permitido a los investigadores locales abordar la envolvente desde múltiples dimensiones simultáneas. Mientras que algunos trabajos se enfocan en la validación experimental y normativa, otros avanzan hacia la optimización multiobjetivo y la predicción estocástica. La Tabla 7.3 resume este panorama metodológico.

Tabla 7.3: Sistematización de metodologías de simulación e indicadores de desempeño en la literatura nacional.

Autor(es)	Método / Software de Simulación	Indicadores y Objetivos de Desempeño
Bre et al. [61]	SBO acoplando $E+$ con algoritmos genéticos en Python.	Optimización multiobjetivo de la envolvente: balance entre consumo y confort térmico.
Flores Larsen et al. [119]	Enfoque holístico con $E+$ y herramientas de optimización ($NSGA-II$).	Reducción de la demanda energética anual y mejora del confort en diversas zonas climáticas.
Fachinotti et al. [106]	Modelado numérico de muros multicapa incluyendo PCM.	Minimización de flujos de calor a través de la envolvente mediante almacenamiento térmico.
Fernandez et al. [114]	Simulación de estrategias pasivas vinculadas al etiquetado energético.	Evaluación del impacto de la envolvente en la clase de eficiencia y el IPE.
Betman et al. [56]	Análisis paramétrico de protecciones solares en climas de alta radiación.	Optimización de la geometría de aleros para reducir la carga de refrigeración en Mendoza.

Continúa en la siguiente página...

Tabla 7.3 – Continúa de la página anterior

Autor(es)	Método / Software de Simulación	Indicadores y Objetivos de Desempeño
Mercado et al. [211]	Construcción de modelos matemáticos simplificados para requerimiento energético.	Predicción rápida del desempeño térmico sin necesidad de simulaciones dinámicas extensas.
Sulaiman et al. [280]	Simulación estocástica e higrotérmica considerando incertidumbre.	Evaluación de la confiabilidad del confort térmico ante variabilidad climática y de uso.
Giuliano et al. [131]	Simulación de edificios con estándares de energía y carbono casi nulo (Edificios de Impacto Neto Nulo).	Cuantificación de emisiones de CO_2 y balance de energía neta en edificios universitarios.

7.6. Conclusiones de la revisión del estado del arte en diseño de envolventes

La revisión exhaustiva del estado del arte y el marco teórico desarrollados en este capítulo permiten consolidar los pilares científicos que fundamentan la presente investigación. Los hallazgos aquí expuestos delimitan un cambio de paradigma en la ciencia de la edificación y justifican el enfoque metodológico adoptado en este módulo.

En primer lugar, se confirma que el diseño de la envolvente ha evolucionado de un proceso basado en la intuición hacia un problema de MOO de alta complejidad. La interdependencia no lineal entre las propiedades termofísicas, la geometría y las fluctuaciones climáticas exige el abandono de los métodos de prueba y error en favor de flujos de trabajo de SBO. Bajo este enfoque, la búsqueda de la mejor solución se desplaza hacia la identificación de un Frente de Pareto, permitiendo al diseñador comprender los compromisos necesarios entre objetivos contrapuestos:

- Maximización del confort higrotérmico.
- Minimización del consumo de energía (considerando carga sensible y latente).
- Reducción de los costos de inversión inicial.

A nivel metodológico, se identifica al algoritmo GA acoplado de forma directa a motores de simulación dinámica (BES) como la herramienta más robusta para la resolución de estos conflictos. Si bien la literatura actual muestra una tendencia hacia el uso de metamodelos, la presente investigación prioriza la fidelidad física del acoplamiento directo. De este modo, se garantiza que cada solución evaluada responda estrictamente a los fenómenos de transferencia de calor y masa, fundamentales para el cálculo preciso de las cargas latentes y el comportamiento de la masa térmica, asegurando la máxima fiabilidad técnica.

Un aporte fundamental de este análisis es la identificación de un vacío crítico: la falta de investigaciones que integren de forma sistémica la envolvente opaca y transparente con el costo constructivo bajo un enfoque de diseño pasivo. En este módulo se propone potenciar la autonomía térmica mediante el equilibrio entre:

1. **Materialidad del muro:** Espesor y posición del aislante respecto a la masa.
2. **Configuración de aberturas:** Tipo de vidriado.
3. **Control solar:** Profundidad de aleros y protecciones.
4. **Orientación estratégica.**

En el contexto argentino, esta brecha es particularmente relevante. La diversidad bioambiental de la norma $IRAM$ 11603 exige soluciones situadas donde la rotación del volumen y el dimensionamiento de los aleros condicionan la efectividad de la masa térmica interna y la gestión de la humedad. Al contraponer estos parámetros técnicos con el costo de ejecución, esta investigación busca determinar la configuración más financieramente factible para la realidad constructiva nacional, sentando las bases para el modelo de optimización que se desarrolla en los capítulos siguientes.

7.7. Objetivos y aportes del Módulo III

El presente Módulo constituye la fase de transferencia y aplicación sistémica de esta investigación, donde el marco metodológico desarrollado converge en una herramienta de diseño de alto desempeño. Tras consolidar los principios de fidelidad física y calibración, orientamos este bloque hacia la resolución del problema de diseño óptimo, transformando la envolvente edilicia en un filtro dinámico capaz de maximizar la habitabilidad bajo criterios de eficiencia y viabilidad económica.

7.7.1. Objetivo General

El propósito central de este Módulo es desarrollar y validar un marco metodológico para el diseño óptimo de la envolvente edilicia bajo un enfoque de Optimización Multiobjetivo (MOO), evaluando el prototipo teórico VERA a través de la diversidad de las zonas bioambientales de la República Argentina según la norma $IRAM$ 11603. Mediante el uso de herramientas de SBO de acoplamiento directo, se busca identificar las configuraciones arquitectónicas pasivas que logren el máximo equilibrio entre la minimización del consumo energético, sensible y latente, el bienestar térmico de los ocupantes y el costo constructivo inicial.

7.7.2. Objetivos Específicos

Para alcanzar la meta general propuesta, estructuramos el desarrollo en tres ejes de acción específicos:

- **Formalización del problema de optimización y el vector de diseño:** Nos proponemos estructurar el diseño de la envolvente como un problema matemático riguroso, definiendo un vector de variables de decisión ($\mathbf{x}$) que integre la interdependencia sistémica de sus componentes. Esto implica parametrizar variables críticas como el espesor y la posición estratégica del aislamiento, la inercia térmica de los materiales, las propiedades de los acristalamientos, la profundidad de aleros y la orientación del volumen.
- **Implementación de un flujo de trabajo SBO de alta fidelidad:** Buscamos establecer un procedimiento que acople dinámicamente el algoritmo $NSGA-II$ con el motor de simulación térmica $E+$. Se priorizará el acoplamiento directo sobre el uso de metamodelos para garantizar la integridad en el cálculo de transferencias de calor y masa, permitiendo obtener frentes de Pareto confiables que revelen los compromisos reales entre la reducción de cargas, la autonomía térmica y el costo económico de ejecución.
- **Evaluación de la sensibilidad bioclimática y regional:** Pretendemos analizar el desempeño del prototipo optimizado bajo las condiciones específicas de las distintas regiones de Argentina. Se busca determinar la sensibilidad de las funciones objetivo ante cambios en la envolvente según la zonas bioambientales, identificando estrategias determinantes, como la masa térmica en climas de gran amplitud o el control solar en zonas de alta irradiancia, para alcanzar la eficiencia y la factibilidad financiera en cada contexto particular de la norma $IRAM$ 11603.

Capítulo 8

Diseño óptimo de envolventes: Prototipo VERA

En este Capítulo se presenta el desarrollo e implementación del la simulación BES acopalda a $NSGA-II$ para el diseño óptimo de la envolvente edilicia. A través del prototipo VERA, se articula un marco metodológico de SBO que integra la complejidad climática de la República Argentina bajo los lineamientos de la norma $IRAM$ 11603. El análisis no solo persigue la eficiencia energética en términos de reducción de Q_{sens} y Q_{lat}, sino que busca alcanzar un equilibrio que garantice la habitabilidad higrotérmica de los ocupantes y la viabilidad económica dentro del contexto constructivo nacional. Los resultados obtenidos de la optimización se comparan con el rendimiento energético y económico de VERA 1 ($V1$), prototipo de construcción tradicional sin aislar, y VERA 2 ($V2$), prototipo cuya construcción cumple con el Nivel A de la $IRAM$ 11605.

8.1. Descripción del caso de estudio: Prototipo VERA

Para el diseño óptimo de envolvente mediante SBO de este Capítulo su utiliza el prototipo VERA. Este modelo ha sido diseñado para estudiar de manera sistemática la influencia de diversas estrategias de diseño pasivas de la envolvente. Entre ellas se destacan la disposición y el espesor de materiales aislantes en cerramientos (piso, techo y muros), la tecnología de acristalamiento, la configuración geométrica de protecciones solares (aleros y galerías) y la orientación del edificio. La integración de estas variables dentro del flujo SBO busca dar respuesta a un triple compromiso técnico-económico:

1. **Eficiencia energética:** Reducir la demanda de energía sensible (Q_{sens}) y latente (Q_{lat}) requerida para el acondicionamiento térmico, tanto en regímenes de calefacción como de refrigeración.

2. **Desempeño pasivo:** Maximizar el confort higrotérmico interior mediante el aprovechamiento de estrategias bioclimáticas, priorizando el control de la radiación solar, la gestión de la ventilación natural y la sinergia entre la masa térmica y la capacidad aislante de los componentes constructivos.

3. **Viabilidad económica:** Minimizar el costo de inversión (CI) asociado a la construcción, garantizando soluciones que resulten factibles desde una perspectiva financiera.

El comportamiento de este prototipo se proyecta y evalúa de forma comparativa en las diversas zonas bioambientales de la República Argentina, bajo los lineamientos de la norma $IRAM$ 11603.

8.1.1. Configuración arquitectónica y funcional del prototipo

La organización espacial del prototipo se fundamenta en una zonificación que jerarquiza los usos y garantiza la privacidad de los ocupantes. Esta distribución resulta en tres áreas funcionales claramente diferenciadas, las cuales presentan demandas térmicas y perfiles de uso específicos (Figura 8.1):

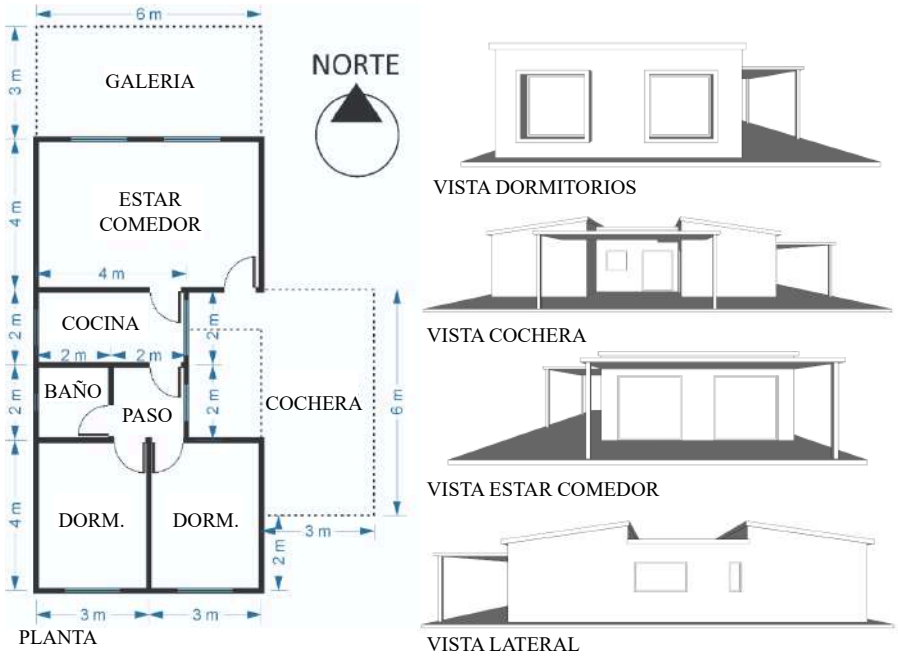


Figura 8.1: Zonificación funcional y esquema arquitectónico del prototipo VERA.

- **Sector Social:** Integrado por el estar-comedor, este espacio se localiza en uno de los extremos de la planta, tiene una conexión directa con la galería principal y el exterior, y predominan la actividades diurnas.
- **Sector de Transición y Servicios:** Esta zona nuclea la cocina, el baño y las áreas de circulación. Este núcleo separa físicamente el área pública de la privada.
- **Sector Privado:** Los dormitorios se posicionan en el extremo opuesto de la vivienda, garantizando la intimidad y la separación respecto a las zonas de mayor actividad.

Es importante destacar que esta configuración funcional, si bien responde a criterios de habitabilidad, somete a cada sector a condiciones de asolamiento y pérdidas por transmisión sensible marcadamente opuestas. Esta asimetría térmica convierte al prototipo en una base de análisis crítica, permitiendo que las simulaciones de optimización evalúen cómo la envolvente debe responder a demandas diferenciadas dentro de una misma unidad arquitectónica.

8.1.2. Condiciones de operación y perfiles de uso

Para la simulación energética, se han estandarizado las condiciones de borde operativas, definiendo cargas internas y cronogramas que representan un uso residencial intensivo.

Ocupación y cronogramas de uso. Se considera un núcleo familiar tipo compuesto por cuatro integrantes (dos adultos y dos menores). Los perfiles de uso se han asignado en función de la zonificación del prototipo. Esto implica una ocupación diurna activa en la zona social (estar-comedor-cocina) entre las 08:00 y las 22:00 hs, y una ocupación nocturna plena en el sector privado de los dormitorios durante el intervalo restante (22:00 a 08:00 hs).

Equipamiento y cargas internas. La ganancias de calor por equipamiento se modelan en función del uso de la zona. En el bloque de cocina se asigna una carga constante de 150 W para representar el funcionamiento de horno, cocina y heladera, mientras que en las áreas de servicio se contemplan 100 W asociados al uso de lavarropas y termotanque eléctrico. Por su parte, la sala de estar se considera una ganancia de 75 W correspondiente a dispositivos multimedia. Respecto a la iluminación, se ha optado por tecnología LED de alta eficiencia, estableciendo una potencia de 6 W/m² en zonas comunes y 4 W/m² en dormitorios, valores que se alinean con los estándares de iluminancia recomendados para el hábitat residencial.

Estrategia de climatización y ventilación. La estrategia de climatización y ventilación se fundamenta en un esquema jerárquico que prioriza el aprovechamiento de recursos pasivos. Bajo este enfoque, la ventilación natural actúa como el mecanismo principal de refrigeración, activándose, cuando las temperaturas interiores no están dentro del rango de confort definido, mediante una lógica condicional que evalúa simultáneamente el estado del aire interior ($20\,^{\circ}\text{C} < T_{int} < 27\,^{\circ}\text{C}$; $30\,\% < HR < 70\,\%$) y las condiciones del entorno exterior ($15\,^{\circ}\text{C} < T_{ext} < 20\,^{\circ}\text{C}$). El acondicionamiento mecánico activo ($HVAC$) en locales habitables se utiliza únicamente en momentos donde la ventilación natural es insuficiente para cumplir con los estándares de confort de la norma $ASHRAE\ 55$. Este procedimiento permite que el modelo cuantifique el consumo de energía sensible (Q_{sens}) y latente (Q_{lat}) necesario para cubrir la demanda térmica que el diseño pasivo de la envolvente no logra resolver.

8.2. Configuración del modelo computacional en EnergyPlus

La evaluación del desempeño térmico se llevó a cabo utilizando el motor de cálculo dinámico $E+$. A continuación, se detalla las características físicas y operativas del prototipo a los objetos y algoritmos de simulación.

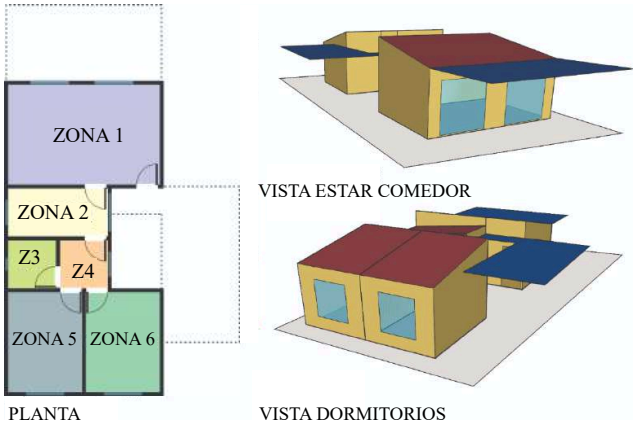


Figura 8.2: Zonificación térmica y modelo computacional del prototipo VERA en $E+$.

Definición de zonas térmicas. El prototipo se discretiza en zonas térmica independientes que permite una modelización detallada del comportamiento termofísico del edificio, facilitando un control preciso sobre las cargas internas y los regímenes de consigna de los termostatos (Figura 8.2). Bajo este esquema, el Estar-Comedor (**Zona 1**) se definió bajo perfiles de ocupación diurna con una carga de equipamiento de 75 W, mientras que los sectores de Cocina, Baño y Servicios (**Zonas 2, 3 y 4**) concentra las mayores ganancias de calor, promediando 150 W debido a la actividad de los electrodomésticos. Finalmente, los dormitorios (**Zonas 5 y 6**) se caracterizaron por un uso nocturno con cargas reducidas de entre 4 y 6 W asociados a la iluminación, completando así una configuración zonal que refleja fielmente la heterogeneidad del uso residencial y permite cuantificar los flujos de calor específicos de cada área funcional.

Estrategias de climatización y modelado de cargas ideales. La implementación de las estrategias de acondicionamiento térmico se diseñó bajo una lógica de desacoplamiento, orientada a aislar la demanda energética del edificio de la eficiencia propia de los equipos mecánicos. Por lo que la energía para acondicionamiento se simula mediante el objeto `Ideal Loads Air System` de $E+$. Este algoritmo determina la energía térmica neta requerida para mantener los espacios habitables dentro de los rangos de consigna estipulados (20 °C a 27 °C), asumiendo una capacidad de suministro ideal. La adopción de este enfoque permite evaluar el desempeño de la envolvente de manera pura y objetiva, garantizando que los resultados de la optimización respondan exclusivamente a la calidad del diseño arquitectónico y no a las variables tecnológicas de un sistema de climatización específico.

Ventilación natural e infiltración: Módulo AFN. Paralelamente, la ventilación natural y las infiltraciones de aire se integraron mediante el módulo de red de flujo de aire AFN (`Air Flow Network`). A diferencia de los métodos simplificados, este motor calcula los intercambios de masa basándose en los diferenciales de presión inducidos por la acción del viento y el efecto chimenea, considerando tanto la geometría de las aberturas como los coeficientes de presión superficial y descarga.

Control de apertura de ventanas. Para representar fielmente la interacción del usuario con el edificio, el control de las ventanas se modeló mediante un algoritmo de apertura proporcional, con niveles discretos fijados en el 25 %, 50 % y 75 % de la sección efectiva del vano. Esta lógica operativa se activa únicamente bajo condiciones de disconfort interior, siempre que el entorno exterior presente parámetros favorables de temperatura, humedad y velocidad de viento. Este esquema jerárquico asegura que el modelo priorice la refrigeración pasiva, recurriendo al sistema mecánico solo cuando la ventilación es insuficiente para restablecer el confort higrotérmico.

8.3. Implementación del flujo de optimización multiobjetivo

La búsqueda de la configuración óptima para la envolvente se articula mediante el acoplamiento dinámico entre el modelo BES en $E+$ y el algoritmo $NSGA-II$. Los fundamentos teóricos y la mecánica operativa de este algoritmo se detallan exhaustivamente en el Capítulo 2 (Sección 2.4.2).

El flujo de trabajo (Figura 8.3) opera como un ciclo iterativo automatizado de cuatro etapas. En cada generación, el algoritmo selecciona un vector de variables de diseño $\mathbf{x}$ que representa una combinación específica de materiales y geometrías. Posteriormente, el sistema modifica el archivo de entrada de $E+$ (*.idf*), ejecuta la simulación dinámica anual y recupera los indicadores de desempeño térmico y económico. Este proceso se repite sistemáticamente hasta alcanzar los criterios de convergencia, permitiendo explorar el amplio espacio de búsqueda que sería imposible mediante métodos de diseño convencionales. El desafío reside en encontrar el diseño que equilibre el CI minimizando el consumo energético para climatización.

Para ello, el problema se define a través de una función de aptitud estructurada en tres dimensiones complementarias: la **eficiencia energética**, orientada a minimizar la demanda anual de energía sensible (Q_{sens}) y latente (Q_{lat}); el **confort pasivo**, destinado a maximizar la autonomía térmica según el estándar $ASHRAE\ 55$; y el Costo de Inversión CI, enfocado en reducir el gasto constructivo inicial de la envolvente.

Como resultado de este proceso, no se obtiene una solución única, sino un un conjunto de soluciones óptimas que equilibran el compromiso entre consumo de energía y CI, donde resulta imposible mejorar un indicador sin degradar otro de forma simultánea. De este modo, el un conjunto de soluciones óptimas se constituye como una herramienta de soporte a la decisión, permitiendo seleccionar la opción que mejor represente el dicho compromiso.

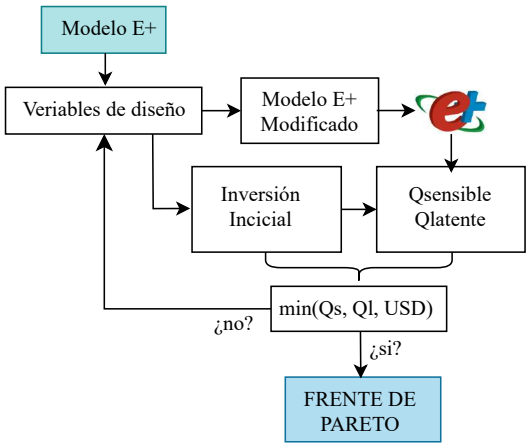


Figura 8.3: Acople entre $E+$ y $NSGA-II$ para el diseño óptimo de envolvente del prototipo VERA.

Variables de decisión

El espacio de búsqueda queda definido por el conjunto variables continuas y categóricas que se han clasificado en tres categorías principales: variables relacionadas con la materialidad de la envolvente opaca, variables asociadas a las superficies vidriadas y variable geométricas relacionadas a la geometría de los aleros y la orientación del edificio.

Aislación e incercia térmica en muros. Para los muros se consideran diversas técnicas constructivas basadas en mampuestos de ladrillo común (LCM), cerámico hueco (LCT), portante (LCP) y hormigón celular (LHC), integrando poliestireno expandido (EPS) como material aislante. Para la terminación exterior se consideró revoque grueso terminado con color blanco, beige y gris claro, cuya emisividad térmica (α_T) se mantiene constante frente a una variabilidad de absortividad solar (α_S), parámetros que determinan las ganancias térmicas por radiación en la superficie. La terminación interior es revoque grueso terminación blanca. Los materiales se configuran en cinco capas que permite evaluar cinco configuraciones fundamentales (Figura 8.4): aislamiento exterior, núcleo confinado, aislamiento interior o mampostería simple sin material aislante adicional, y material aislante únicamente. Las propiedades termo físicas se detallan en las Tablas B.13, B.14 y B.11 del Anexo B.

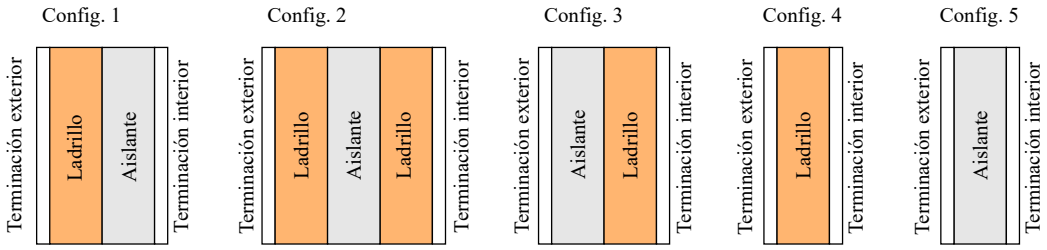


Figura 8.4: Configuraciones de capas y posición del aislante en muros del prototipo VERA.

Aislación e incercia térmica en techos. Para la cubierta se considera una losa de hormigón armado como elemento estructural de gran inercia térmica, integrada con EPS como barrera aislante. La carga térmica por radiación queda condicionado por el acabado exterior, evaluándose variantes de chapa acanalada n°25 con terminaciones galvanizado, cincalum y acabados prepintados en gris silver, gris pizarra y negro, junto con el empleo de tejas francesas en tonalidades roja y negra. La flexibilidad del paquete constructivo permite configurar tres esquemas de montaje (Figura 8.5) que definen la posición del aislante respecto a la losa: disposición externa, interna o la ausencia total de la capa aislante. Esta disposición permite estudiar el impacto de la masa térmica según se encuentre expuesta o protegida. Las propiedades de los materiales se detallan en las Tablas B.15, B.9 y B.11 del Anexo B.

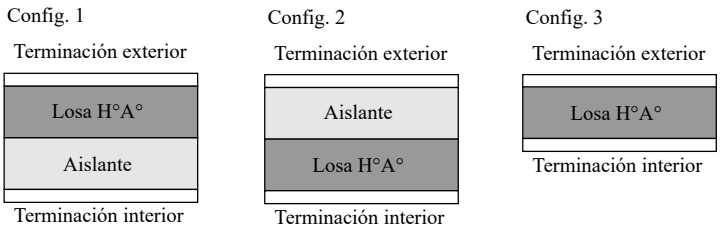


Figura 8.5: Configuraciones de montaje y posición del aislante en cubiertas.

Aislación e incercia térmica en pisos. Finalmente, para los pisos, se propuso una estructura de losa de hormigón armado LHA con EPS y terminación de piso cerámico beige. El sistema se organiza en tres capas: acabado superficial, losa estructural y aislante térmico sobre el terreno. Se estudian dos configuraciones (Figura 8.6): base con aislante térmico y base constituida únicamente por la losa estructural sin capas aislantes. Los datos técnicos se presentan en la Tablas B.9 y B.11 del Anexo B.

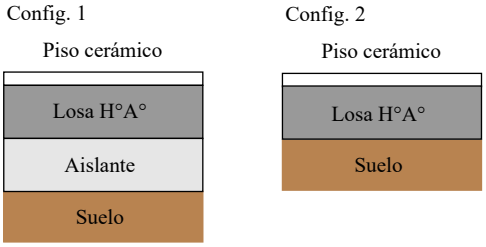


Figura 8.6: Configuraciones de aislación en pisos en contacto con el suelo.

Acristalamientos. El control de la radiación solar y las pérdidas térmicas a través de los Acristalamientos se gestiona mediante una selección estratégica de acristalamientos: VS, DVH o TVH. Esta variabilidad modifica parámetros críticos como la transmitancia térmica (U), responsable de regular el flujo de calor por conducción, y el coeficiente de ganancia de calor solar ($SHGC$), que determina la fracción de radiación admitida hacia el interior. En este sentido, se han evaluado diversas tipologías cuyas propiedades termofísicas se detallan en la Tabla B.16 del Anexo B.

Asignación de materiales por grupo de zonas. La configuración del modelo de optimización se fundamenta en una asignación estratégica de los componentes de la envolvente, tanto opacos como transparentes, mediante una clasificación por grupos de zonas térmicas. Esta organización permite al algoritmo $NSGA-II$ proponer soluciones diferenciadas que responden a los requerimientos operativos y cargas térmicas específicas de cada sector. Bajo este esquema, la **Zona 1** (G_1) se optimiza priorizando el equilibrio entre ganancias solares y confort dada su mayor superficie vidriada; las **Zonas 2, 3 y 4** (G_2) se aborda como un área de transición con altas cargas latentes y de equipamiento; y las **Zonas 5 y 6** (G_3) se enfoca en el desempeño nocturno y la mitigación de pérdidas por transmisión en los dormitorios.

Orientación y rotación del prototipo. La incorporación de la orientación como variable de decisión dentro del vector $\mathbf{x}$ permite la rotación completa del prototipo en un rango de $0°$ a $359°$ respecto al Norte geográfico, otorgando al proceso de SBO la capacidad de ajustar dinámicamente la exposición de la envolvente a la radiación solar directa. Esta flexibilidad no solo regula las ganancias por asoleamiento según la latitud y estacionalidad, sino que modifica el ángulo de ataque de los vientos predominantes, alterando los coeficientes de presión (C_p) calculados por el módulo AFN y los procesos de convección exterior. De este modo, el algoritmo $NSGA-II$ puede identificar configuraciones que optimicen la captación térmica invernal, controlen las infiltraciones de aire no deseado y favorezcan el enfriamiento superficial.

Dimensiones de los aleros y protecciones solares. Complementariamente al control de la radiación en las superficies vidriadas, el modelo integra el dimensionamiento específico de aleros

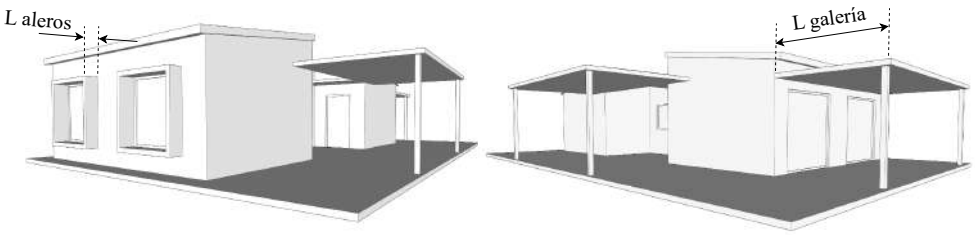


Figura 8.7: Dimensiones de aleros y galerías.

para los dormitorios y de una galería semicubierta vinculada al Estar-Comedor. Estos elementos operan como dispositivos de protección solar pasiva cuya profundidad, permite un control de la radiación solar. Se han establecido rangos de variación que oscilan entre 0.00 m y 3.00 m para la galería ($L_{galeria}$) y entre 0.00 m y 1.00 m para los aleros de los dormitorios (L_{alero}), con el fin de maximizar el ingreso de radiación invernal y mitigar el sobrecalentamiento estival.

Funciones objetivo

El problema de optimización se define como la búsqueda del compromiso entre el desempeño termo energético y el CI de material requerido. Para ello, se establecen tres funciones objetivo contrapuestas que el algoritmo $NSGA-II$ busca minimizar de forma simultánea, generando un un conjunto de soluciones óptimas que equilibran dicho compromiso.

Minimización de la demanda energética (f_1 y f_2). Las primeras FO del problema cuantifican el requerimiento térmico anual del edificio, integrando tanto la demanda de calor sensible (Q_{sens}) como la demanda de calor latente (Q_{lat}). El propósito es reducir la energía neta ideal de calefacción (f_1) y refrigeración (f_2) ($kWh/$año) requerida para sostener los estándares de confort.

Minimización de la inversión inicial (f_3). En contraposición, la tercer FO actúa como un mecanismo de regulación económica diseñado para penalizar el sobredimensionamiento de los componentes de la envolvente. Este indicador evalúa el costo directo de los materiales sujetos a optimización, calculando el costo total a partir de las superficies, volúmenes y precios unitarios de mercado (Tabla B.17, Anexo B).

8.4. Selección de escenarios climáticos

Con el propósito de evaluar la robustez de la metodología propuesta y comprender la sensibilidad del prototipo **VERA** ante diversas solicitaciones climáticas, se definieron escenarios representativos de la amplia variabilidad climática del territorio argentino. Esta selección no solo busca cubrir la totalidad de las **Zonas Bioambientales** establecidas por la norma $IRAM$ 11603, sino también someter al modelo a un gradiente latitudinal extremo que se extiende desde la frontera norte (latitud 22°S) hasta el extremo austral (latitud 55°S).
La elección de las localidades se basa en el contraste térmico y radiativo, permitiendo analizar el desempeño de la envolvente en situaciones donde las estrategias de diseño pasivo deben variar radicalmente. Este enfoque abarca desde climas subtropicales, donde la refrigeración y el control solar son prioritarios, hasta escenarios subantárticos donde la conservación del calor y la resistencia térmica constituyen los condicionantes principales. Asimismo, se han incluido ciudades con regímenes de humedad y altitudes diferentes para evaluar el impacto de la amplitud térmica diaria sobre la eficiencia del prototipo.

Localidades seleccionadas y perfiles climáticos

Se han seleccionado 11 localidades representativas de las diversas subzonas de la norma $IRAM$ 11603. Estas se presentan en la Tabla 8.1 ordenadas según su clasificación bioambiental y su condicionante de diseño predominante.
Para las simulaciones dinámicas se utilizan archivos en formato *EnergyPlus Weather* (**EPW**), correspondientes a **Años Meteorológicos Típicos (TMY)**. Estos registros contienen datos horarios de temperatura de bulbo seco, humedad relativa, radiación solar y vectores de viento, permitiendo una modelización precisa del balance energético anual bajo condiciones dinámicas.

Tabla 8.1: Localidades de evaluación y clasificación bioambiental según norma $IRAM$ 11603.

Localidad	Provincia	Zona	Clasificación	Condicionante Principal
Rivadavia	Salta	Ia	Muy Cálido / Seco	Radiación y calor extremo
Cat. del Iguazú	Misiones	Ib	Muy Cálido / Húmedo	Carga latente y humedad
Chilecito	La Rioja	IIa	Cálido / Seco	Gran amplitud térmica
Sauce Viejo	Santa Fe	IIb	Cálido / Húmedo	Rigor estival y humedad
Córdoba Capital	Córdoba	IIIa	Templado Cálido	Continentalidad
Ezeiza	Buenos Aires	IIIb	Templado Cálido	Influencia marítima
Mendoza	Mendoza	IVa	Templado Frío	Aridez y frío de montaña
Bahía Blanca	Buenos Aires	IVc	Templado Frío	Transición y vientos
C. Rivadavia	Chubut	V	Frío	Exposición eólica constante
S. C. de Bariloche	Río Negro	VI	Muy Frío	Conservación de calor
Ushuaia	Tierra del Fuego	VI	Muy Frío	Rigor invernal extremo

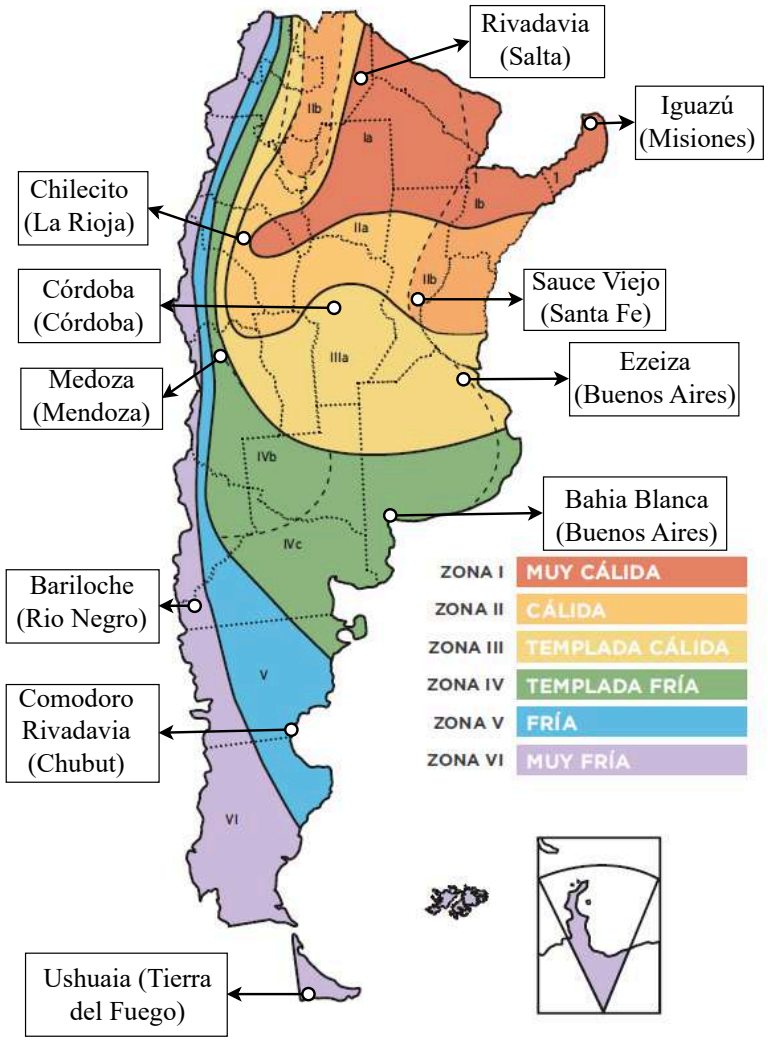


Figura 8.8: Mapa bioclimático según Norma $IRAM$ 11603 y ubicación de las localidades seleccionadas.

Rivadavia, Salta (Zona Ia)

Rivadavia es el lugar más caluroso de todo el grupo estudiado. Según las normas técnicas, tiene un clima muy cálido y seco. En verano, el calor es extremo, con temperaturas que llegan a los 42,1 °C

y un sol muy fuerte. Por el contrario, el invierno es bastante suave, con una temperatura promedio de 17,69 °C. Las características se detallan en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2: Parámetros climáticos de diseño y condicionantes para Rivadavia, Salta (Zona Ia).

Variable de Análisis	**Valor / Característica**
Clasificación Bioambiental ($IRAM$ 11603)	Zona Ia (Muy Cálido / Seco)
Temperatura de Diseño (Invierno)	$-1,0\,°C$
Temperatura de Diseño (Verano)	$42,1\,°C$
Humedad Relativa Media (Verano)	$66,7\,\%$
Amplitud Térmica Diaria (ΔT)	$> 14\,°C$
Condicionante Principal de Diseño	Radiación y Calor Extremo

Iguazú, Misiones (Zona Ib)

Iguazú pertenece a una zona muy cálida y húmeda. Al igual que en el extremo norte del país, el calor en verano es intenso, con temperaturas que alcanzan los 37,0 °C. Su ubicación cerca de grandes ríos hace que la humedad sea alta, siendo este el principal motivo de incomodidad. En este entorno subtropical, la temperatura no varía demasiado entre el día y la noche (menos de 14 °C de diferencia). Por su parte, el invierno es muy suave, con una temperatura media de 17,48 °C. Las características climáticas se presentan en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3: Parámetros climáticos de diseño para Iguazú, Misiones (Zona Ib).

Variable de Análisis	**Valor / Característica**
Clasificación Bioambiental ($IRAM$ 11603)	Zona Ib (Muy Cálido / Húmedo)
Temperatura de Diseño (Invierno)	$0,0\,°C$
Temperatura de Diseño (Verano)	$37,0\,°C$
Humedad Relativa Media (Verano)	$78,3\,\%$
Amplitud Térmica Diaria (ΔT)	$< 14\,°C$
Condicionante Principal de Diseño	Carga Latente y Humedad

Chilecito, La Rioja (Zona IIa)

Chilecito se ubica en una zona de clima cálido y seco. El aire es muy árido y existe una gran diferencia de temperatura entre el día y la noche, que supera los 14 °C. A diferencia de otras zonas cálidas, aquí las estaciones están muy marcadas: el verano es extremo, con temperaturas de hasta 40,5 °C, pero el invierno es mucho más riguroso, llegando a los -5,3 °C con un ambiente muy seco. Los datos meteorológicos de este entorno de montaña se resumen en la Tabla 8.4.

Tabla 8.4: Parámetros climáticos de diseño para Chilecito, La Rioja (Zona IIa).

Variable de Análisis	**Valor / Característica**
Clasificación Bioambiental ($IRAM$ 11603)	Zona IIa (Cálido / Seco)
Temperatura de Diseño (Invierno)	$-5,3\,°C$
Temperatura de Diseño (Verano)	$40,5\,°C$
Humedad Relativa Media (Verano)	$61,6\,\%$
Amplitud Térmica Diaria (ΔT)	$> 14\,°C$
Condicionante Principal de Diseño	Gran Amplitud Térmica y Aridez

Sauce Viejo, Santa Fe (Zona IIb)

Sauce Viejo tiene un clima cálido y húmedo. En verano, el calor es intenso, con temperaturas que llegan a los 39,0 °C y una humedad promedio alta, del 74,0 %. Debido a que se encuentra en una

zona de llanura cerca de ríos, la temperatura no cambia mente entre el día y la noche (menos de 14 °C de diferencia), lo que aumenta la sensación de incomodidad. A diferencia de las zonas más al norte, aquí el invierno es más frío, con temperaturas que bajan hasta los -2,6 °C. Los datos climáticos se encuentran organizados en la Tabla 8.5.

Tabla 8.5: Parámetros climáticos de diseño para Sauce Viejo, Santa Fe (Zona IIb).

Variable de Análisis	**Valor / Característica**
Clasificación Bioambiental ($IRAM$ 11603)	Zona IIb (Cálido / Húmedo)
Temperatura de Diseño (Invierno)	$-2,6\,°C$
Temperatura de Diseño (Verano)	$39,0\,°C$
Humedad Relativa Media (Verano)	$74,0\,\%$
Amplitud Térmica Diaria (ΔT)	$< 14\,°C$
Condicionante Principal de Diseño	Rigor Estival y Humedad

Córdoba Capital, Córdoba (Zona IIIa)

La ciudad de Córdoba se encuentra en una zona de clima templado cálido y seco. Es un clima de transición con características continentales. Los veranos son calurosos, con temperaturas de hasta 36,6 °C, mientras que los inviernos son moderadamente fríos, llegando a los -4,3 °C. Una característica importante de este lugar es su gran amplitud térmica: la temperatura varía mucho entre el día y la noche, con diferencias que superan los 14 °C. Los datos meteorológicos se detallan en la Tabla 8.6.

Tabla 8.6: Parámetros climáticos de diseño para Córdoba Capital (Zona IIIa).

Variable de Análisis	**Valor / Característica**
Clasificación Bioambiental ($IRAM$ 11603)	Zona IIIa (Templado Cálido / Seco)
Temperatura de Diseño (Invierno)	$-4,3\,°C$
Temperatura de Diseño (Verano)	$36,6\,°C$
Humedad Relativa Media (Verano)	$71,3\,\%$
Amplitud Térmica Diaria (ΔT)	$> 14\,°C$
Condicionante Principal de Diseño	Continentalidad y Amplitud Térmica

Ezeiza, Buenos Aires (Zona IIIb)

La localidad de Ezeiza pertenece a una zona de clima templado cálido y húmedo. A diferencia de los climas de interior, su cercanía a la costa y a los ríos hace que la humedad sea constante. En este lugar, la temperatura no cambia bruscamente entre el día y la noche, manteniendo variaciones menores a los 14 °C. En cuanto a las estaciones, los veranos alcanzan los 36,9 °C, mientras que los inviernos son moderadamente fríos, con temperaturas de hasta -3,5 °C. Las características principales se detallan en la Tabla 8.7.

Tabla 8.7: Parámetros climáticos de diseño para Ezeiza, Buenos Aires (Zona IIIb).

Variable de Análisis	**Valor / Característica**
Clasificación Bioambiental ($IRAM$ 11603)	Zona IIIb (Templado Cálido / Húmedo)
Temperatura de Diseño (Invierno)	$-3,5\,°C$
Temperatura de Diseño (Verano)	$36,9\,°C$
Humedad Relativa Media (Verano)	$69,8\,\%$
Amplitud Térmica Diaria (ΔT)	$< 14\,°C$
Condicionante Principal de Diseño	Influencia Marítima y Control Solar

Mendoza, Mendoza (Zona IVa)

La ciudad de Mendoza se ubica en una zona de clima templado frío y seco. Por su cercanía a la montaña, el ambiente es muy árido y existe una gran diferencia de temperatura entre el día y la noche, superando habitualmente los 14 °C de variación. Este clima presenta desafíos opuestos según la estación: el invierno es riguroso, con temperaturas de hasta -3,3 °C, mientras que el verano es caluroso, con picos de 36,1 °C. Debido a las escasas lluvias y a la baja humedad, el clima se mantiene seco durante todo el año. Los datos se resumen en la Tabla 8.8.

Tabla 8.8: Parámetros climáticos de diseño para Mendoza Capital (Zona IVa).

Variable de Análisis	**Valor / Característica**
Clasificación Bioambiental ($IRAM$ 11603)	Zona IVa (Templado Frío / Seco)
Temperatura de Diseño (Invierno)	$-3,3\,°C$
Temperatura de Diseño (Verano)	$36,1\,°C$
Humedad Relativa Media (Verano)	$57,0\,\%$
Amplitud Térmica Diaria (ΔT)	$> 14\,°C$
Condicionante Principal de Diseño	Aridez y Frío de Montaña

Bahía Blanca, Buenos Aires (Zona IVc)

Bahía Blanca se clasifica como una zona de clima templado frío. Su ubicación la convierte en un lugar de contrastes extremos: los inviernos son muy crudos, con temperaturas que bajan hasta los -5,6 °C, mientras que los veranos son intensos, alcanzando picos de 39,0 °C. Sin embargo, la característica más importante de esta ciudad es el viento, con velocidades promedio de 24,4 km/h que aumentan la sensación de frío o calor. Los valores meteorológicos que definen este clima se detallan en la Tabla 8.9.

Tabla 8.9: Parámetros climáticos de diseño para Bahía Blanca, Buenos Aires (Zona IVc).

Variable de Análisis	**Valor / Característica**
Clasificación Bioambiental ($IRAM$ 11603)	Zona IVc (Templado Frío / Transición)
Temperatura de Diseño (Invierno)	$-5,6\,°C$
Temperatura de Diseño (Verano)	$39,0\,°C$
Humedad Relativa Media (Verano)	$58,2\,\%$
Velocidad Media del Viento	$24,4$ km/h
Condicionante Principal de Diseño	Transición y Vientos Predominantes

Comodoro Rivadavia, Chubut (Zona V)

Comodoro Rivadavia pertenece a una zona de clima frío. En este lugar, el clima es extremo durante casi todo el año y la necesidad de calefacción es constante. Aunque está en la costa, los inviernos son muy crudos, con temperaturas que bajan hasta los -5,1 °C. Esta sensación de frío se vuelve mucho más intensa debido a los fuertes vientos que soplan permanentemente desde el oeste y

Tabla 8.10: Parámetros climáticos de diseño para Comodoro Rivadavia, Chubut (Zona V).

Variable de Análisis	**Valor / Característica**
Clasificación Bioambiental ($IRAM$ 11603)	Zona V (Frío)
Temperatura de Diseño (Invierno)	$-5,1\,°C$
Temperatura de Diseño (Verano)	$30,8\,°C$
Humedad Relativa Media (Verano)	$42,6\,\%$
Condicionante Principal de Diseño	Exposición Eólica y Conservación de Calor

el sudoeste. En este contexto, el calor del verano no representa un problema significativo. Las características de este clima de frío intenso se resumen en la Tabla 8.10.

San Carlos de Bariloche, Río Negro (Zona VI)

San Carlos de Bariloche se encuentra en una zona de clima muy frío. Su invierno es extremo, con temperaturas que bajan hasta los -11,4 °C, lo que genera una necesidad de calefacción constante. Aunque los veranos son frescos, pueden tener picos de calor de 32,0 °C, con una diferencia de temperatura muy grande entre el día y la noche (más de 15 °C). Los datos detallados de este entorno de montaña se resumen en la Tabla 8.11.

Tabla 8.11: Parámetros climáticos de diseño para San Carlos de Bariloche, Río Negro (Zona VI).

Variable de Análisis	Valor / Característica
Clasificación Bioambiental ($IRAM$ 11603)	Zona VI (Muy Frío)
Temperatura de Diseño (Invierno)	$-11,4\,°C$
Temperatura de Diseño (Verano)	$32,0\,°C$
Humedad Relativa Media (Verano)	$56,7\,\%$
Amplitud Térmica Diaria (ΔT)	$15,5\,°C$
Condicionante Principal de Diseño	Rigor Invernal y Conservación de Calor

Ushuaia, Tierra del Fuego (Zona VI)

Ushuaia presenta el clima más duro de la zona muy fría. A diferencia de otros lugares, aquí los inviernos son los más largos de Argentina, con temperaturas que bajan hasta los -10,3 °C. Los veranos también son fríos, con máximas que apenas llegan a los 18,9 °C, por lo que nunca hace falta enfriar las casas. Al estar junto al mar, la temperatura no varía bruscamente entre el día y la noche, pero la ciudad está expuesta a vientos muy fuertes y constantes desde el sudoeste. Las características de este clima subantártico se detallan en la Tabla 8.12.

Tabla 8.12: Parámetros climáticos de diseño para Ushuaia, Tierra del Fuego (Zona VI).

Variable de Análisis	Valor / Característica
Clasificación Bioambiental ($IRAM$ 11603)	Zona VI (Muy Frío / Austral)
Temperatura de Diseño (Invierno)	$-10,3\,°C$
Temperatura de Diseño (Verano)	$18,9\,°C$
Humedad Relativa Media (Verano)	$73,0\,\%$
Amplitud Térmica Diaria (ΔT)	$< 10\,°C$
Condicionante Principal de Diseño	Rigor Invernal Extremo y Vientos Persistentes

8.5. Descripción de las viviendas de referencia: VERA 1 y VERA 2

Para completar el marco metodológico de la evaluación, se definen a continuación las dos configuraciones de referencia utilizadas para contrastar los resultados de la optimización. Ambas parten de la morfología del prototipo VERA, pero difieren en su materialidad.
El modelo VERA 1 ($V1$) representa el estándar constructivo tradicional y se utiliza como línea de base para evaluar el potencial de ahorro. Su envolvente está compuesta por muros de mampostería de LCM de 30 cm, sin aislamiento térmico adicional. Tanto la cubierta como el entrepiso consisten en LHA de 10 cm de espesor. Los acristalamientos son de VS de 6 mm. Este modelo queda fuera de los rangos recomendados por la $IRAM$ 11605 de eficiencia (K_{muro} = $1.90 W/m^2K$) y $K_{techo} = 9.35 W/m^2K$).

Por otro lado, el modelo VERA 2 ($V2$) se ha diseñado como una referencia de alta prestación técnica. Los muros consisten mampostería doble de LCP de 12 cm con un núcleo de 10 cm de EPS, alcanzando un valor de $K_{muro} = 0,31$ W/m^{2}K. Para la cubierta, se utiliza una losa de hormigón de 10 cm con la adición de 20 cm de EPS sobre la misma, logrando un $K_{techo} = 0,17$ W/m^{2}K. El piso mantiene la configuración de losa de hormigón de 10 cm. Los acristalamientos son DVH 6/13/6 mm.
La configuración geométrica de aleros y galerías, y la orientación de ambos modelos se ajustan según la zona bioambiental para reflejar las prácticas de diseño habituales y los desafíos climáticos de cada región. Para las localidades de Rivadavia, Iguazú, Chilecito, Sauce Viejo, Córdoba y Ezeiza, la galería es de 3 m de profundidad y aleros de 1 m. En estos casos, la vivienda se orienta en el eje Norte-Sur para optimizar la captación y el sombreado estacional. En Mendoza, Bahía Blanca, Comodoro Rivadavia, San Carlos de Bariloche y Ushuaia, las viviendas de referencia se configuran sin elementos de protección solar (aleros o galerías) y con una orientación Este-Oeste, lo que permite evaluar el comportamiento térmico bajo condiciones de mayor exposición radiante en climas secos o fríos.

Tabla 8.13: Comparativa de transmitancia térmica (K): Modelo $V1$ frente a exigencias Nivel A de $IRAM$ 11605 (Invierno).

Localidad	T. diseño	K muro IRAM	K muro V1	Cat.	K techo IRAM	K techo V1	Cat.
Iguazú	0 °C	0,38	1,80	C	0,32	9,35	>C
Rivadavia	-1 °C	0,36	1,80	>C	0,31	9,35	>C
Sauce Viejo	-2,6 °C	0,33	1,80	>C	0,29	9,35	>C
Mendoza	-3,3 °C	0,33	1,80	>C	0,29	9,35	>C
Bahía Blanca	-3,3 °C	0,33	1,80	>C	0,29	9,35	>C
Ezeiza	-3,5 °C	0,32	1,80	>C	0,28	9,35	>C
Córdoba	-4,3 °C	0,32	1,80	>C	0,28	9,35	>C
Comodoro Riv.	-5,1 °C	0,31	1,80	>C	0,27	9,35	>C
Chilecito	-5,3 °C	0,31	1,80	>C	0,27	9,35	>C
Ushuaia	-10,3 °C	0,26	1,80	>C	0,23	9,35	>C
Bariloche	-11,4 °C	0,25	1,80	>C	0,22	9,35	>C

Tabla 8.14: Comparativa de transmitancia térmica (K): Modelo $V2$ frente a exigencias Nivel A de $IRAM$ 11605 (Invierno).

Localidad	T. diseño	K muro IRAM	K muro V2	Cat.	K techo IRAM	K techo V2	Cat.
Iguazú	0 °C	0,38	0,31	A	0,32	0,17	A
Rivadavia	-1 °C	0,36	0,31	A	0,31	0,17	A
Sauce Viejo	-2,6 °C	0,33	0,31	A	0,29	0,17	A
Mendoza	-3,3 °C	0,33	0,31	A	0,29	0,17	A
Bahía Blanca	-3,3 °C	0,33	0,31	A	0,29	0,17	A
Ezeiza	-3,5 °C	0,32	0,31	A	0,28	0,17	A
Córdoba	-4,3 °C	0,32	0,31	A	0,28	0,17	A
Comodoro Riv.	-5,1 °C	0,31	0,31	A	0,27	0,17	A
Chilecito	-5,3 °C	0,31	0,31	A	0,27	0,17	A
Ushuaia	-10,3 °C	0,26	0,31	B	0,23	0,17	A
Bariloche	-11,4 °C	0,25	0,31	B	0,22	0,17	A

Bajo el marco normativo $IRAM$ 11605, el modelo $V2$ se define técnicamente como una solución de alta prestación que integra espesores de aislamiento optimizados para alcanzar el **Nivel A** (excelencia) en la mayoría de los escenarios nacionales, como se observa en las Tablas comparativas 8.13, 8.14 y 8.15. Esta diferenciación material permite que $V2$ garantice la estabilidad térmica incluso en las condiciones de diseño más extremas, mientras que $V1$ opera fuera de los márgenes de eficiencia y confort aceptables.

Tabla 8.15: Definición de transmitancia térmica (K) en modelos de referencia para condición de verano.

Modelo	Zonas	K muro IRAM (A)	K muro Viv.	Cat.	K techo IRAM (A)	K techo Viv.	Cat.
$V1$	I y II	0,45	1,80	C	0,18	9,35	>C
	III y IV	0,50	1,80	C	0,19	9,35	>C
$V2$	I y II	0,45	0,31	A	0,18	0,17	A
	III y IV	0,50	0,31	A	0,19	0,17	A

8.6. Análisis y discusión de resultados

8.6.1. Evaluación del compromiso técnico-económico entre demanda energética y costo de inversión en el prototipo VERA

En esta sección se desarrolla un análisis sistemático de los resultados obtenidos tras la optimización del prototipo VERA en las diversas zonas bioambientales de Argentina. El estudio se centra en examinar la interacción entre el Consumo de Energía Total (E_{total}) y el Costo de Inversión Inicial (CI). Se identifica cómo la variación de los parámetros constructivos define un frente de compromiso técnico-económico, donde la selección precisa de materiales y el diseño bioclimático se combinan para alcanzar altos estándares de desempeño.
Asimismo, se profundiza en el comportamiento de la demanda energética para calefacción (E_{cal}) y refrigeración (E_{ref}). Este balance es fundamental para comprender cómo las estrategias de alta aislación y hermeticidad impactan en el comportamiento de la vivienda, considerando el riesgo de sobrecalentamiento frente a las ganancias solares internas. También, se evalúa el rol de la orientación y el dimensionamiento de elementos pasivos, como aleros y galerías, entendidos como mecanismos clave de ajuste térmico.
Finalmente, el estudio incluye la comparación de los resultados con normativa, contrastando los valores de transmitancia térmica obtenidos (K_{muro} y K_{techo}) con los estándares de la norma $IRAM$ 11605. Este contraste permite analizar el desempeño de los resultados de la metodología SBO frente al desempeño de prototipos normativos.

8.6.2. Zona I: Muy cálido

Rivadavia, Salta.

El análisis comparativo entre el costo de inversión (CI) y el consumo energético total (E_{total}), mostrado en la Figura 8.9, pone de manifiesto la obsolescencia del modelo de referencia $V1$. Con un consumo de 7 524 kWh/año y una inversión de \$14 914, $V1$ resulta ineficiente frente a los individuos óptimos (1 al 7), los cuales logran reducciones en la demanda mediante inversiones sensiblemente menores, que oscilan entre \$6 764 y \$9 469, para alcanzar consumos de entre

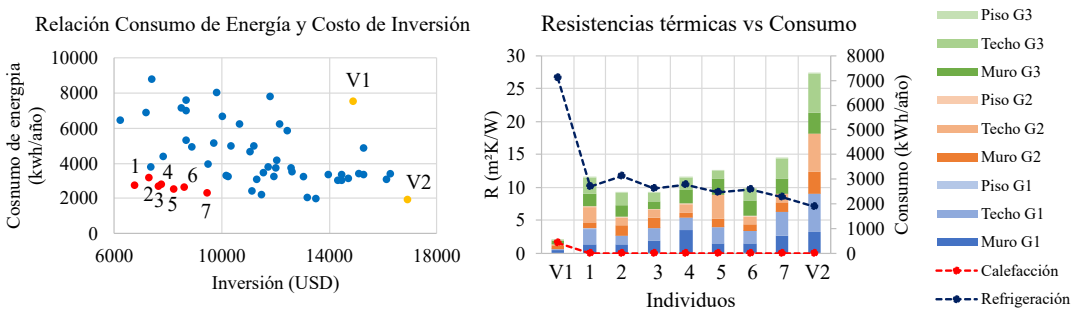


Figura 8.9: Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Rivadavia (Zona Ia)

2 291 y 2 725 kWh/año. Resulta particularmente relevante la comparación con el modelo $V2$ —representativo del Nivel A de la norma—, cuyo CI asciende a \$16 928 para un E_{total} de 1 911 kWh/año. Esta relación implica que las soluciones optimizadas, si bien presentan un consumo entre un 20 % y un 60 % superior al estándar de máxima eficiencia, requieren inversiones que se sitúan, en su mayoría, cerca de la mitad del capital necesario para alcanzar dicho nivel normativo, posicionándose como alternativas de gran viabilidad económica.
Al contrastar las resistencias térmicas de los componentes de la envolvente (Figura 8.9), se observa que el modelo $V1$ presenta una baja resistencia térmica global sujeta a una elevada masa térmica, producto de sus muros de ladrillo común (LCM) de 30 cm y losas de hormigón armado (LHA) en cubiertas y pisos, sin aislante. Por su parte, $V2$ exhibe resistencias térmicas significativamente superiores y constantes por grupo de zona; no obstante, en un clima con las características de Rivadavia, este nivel de aislamiento —si bien mitiga la carga por radiación en techos— puede dificultar la disipación de las ganancias térmicas provenientes de las superficies vidriadas.

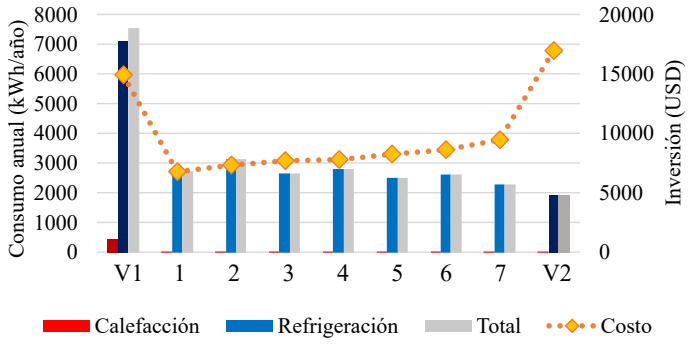


Figura 8.10: Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Rivadavia (Zona Ia)

Al desglosar la demanda energética entre calefacción (E_{cal}) y refrigeración (E_{ref}), los resultados de la Figura 8.10 confirman la predominancia de la carga de enfriamiento, la cual representa casi totalidad del E_{total}, mientras que la demanda de calefacción resulta prácticamente nula. Esta asimetría evidencia que las estrategias de diseño pasivo están orientadas a garantizar el confort estival mediante el aislamiento térmico y el control de la temperatura interior a través de masa térmica desacoplada. No obstante, esta misma configuración demuestra ser altamente efectiva para mantener la estabilidad térmica durante el período invernal sin requerir aportes mecánicos significativos.
El análisis detallado de los resultados presentados en las Tablas 8.16 y 8.17 permite identificar aquellas configuraciones que satisfacen con éxito el compromiso entre costo e inversión.

- **Orientación:** las soluciones óptimas se agrupan predominantemente en un rango de 163° a 200° (Sur/Sudoeste). Esta rotación tiene como objetivo principal proteger el Sector Social (G_1) de la radiación directa proveniente de la orientación Norte.

- **Muros:** Predomina la mampostería de LCT y LCM con capas de aislantes. El muro se caracteriza por la variación del espesor de EPS desde los 2 hasta los 12 cm y su ubicación respecto a la masa térmica (exterior, interior o núcleo). En cuanto a las terminaciones exteriores, se observa una convergencia hacia el uso de muros con acabados en tonos blancos o beige.

- **Cubiertas:** La solución constructiva consiste en placas de EPS (4 a 12 cm) entre la chapa acanalada (galvanizada o cincalum) y la LHA.

- **Acristalamientos:** Se observa una el uso de VS y DVH de 3/6/3 mm, según el grupo de

Tabla 8.16: Individuos óptimos para Rivadavia (Terminaciones y Orientación)

Individuos	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Orientación	166.03	135.29	172.90	170.34	179.47	163.01	200.34
Term. techo	Ch. Galv.	Ch. Cinc.	Ch. Galv.	Ch. Cinc.	Ch. Gris Sil	Ch. Cinc.	Ch. Cinc.
Term. muros	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca	Beige	Beige

Tabla 8.17: Individuos óptimos para Rivadavia (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías)

Individuos		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Muros (G1)	Ext.	LCM 5	LCT 8	LCT 8	S/L	LCT 12	LCT 12	LCT 12
	Aisl.	EPS 4	EPS 4	EPS 6	EPS 12	EPS 4	EPS 4	EPS 8
	Int.	S/L	LCT 8	LCT 12	S/L	LCM 5	LCM 5	LCM 5
	R	1.31	1.42	1.99	3.53	1.54	1.54	2.69
	K	0.76	0.70	0.50	0.28	0.65	0.65	0.37
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	A	B	B	B
Techo (G1)	Aisl.	EPS 8	EPS 4	EPS 6	EPS 6	EPS 8	EPS 6	EPS 12
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	2.39	1.25	1.82	1.82	2.39	1.82	3.54
	K	0.42	0.80	0.55	0.55	0.42	0.55	0.28
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Piso (G1)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G1)	Tipo	VS 6	VS 6	VS 3	VS 6	VS 6	DVH 3/6	DVH 3/6
	U	5.89	5.89	5.78	5.89	5.89	2.72	2.72
	SHGC	0.91	0.91	0.81	0.91	0.91	0.76	0.76
Gal.	m	0.62	0.86	0.60	0.66	1.03	1.04	1.30
Muros (G2)	Ext.	LCT 8	LCT 8	LCT 8	LCM 5	S/L	LCT 8	LCM 12
	Aisl.	EPS 2	EPS 4	EPS 4	EPS 2	EPS 4	EPS 2	EPS 4
	Int.	LCT 12	LCT 12	LCT 12	LCT 8	LCT 8	LCT 12	LCT 12
	R	0.91	1.48	1.48	0.80	1.30	0.91	1.46
	K	1.10	0.68	0.68	1.25	0.77	1.10	0.68
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	C	B	B	B
Techo (G2)	Aisl.	EPS 8	EPS 4	EPS 4	EPS 4	EPS 12	EPS 4	EPS 4
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	2.39	1.25	1.25	1.25	3.54	1.25	1.25
	K	0.42	0.80	0.80	0.80	0.28	0.80	0.80
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Piso (G2)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G2)	Tipo	VS 3	VS 6	DVH 3/6	VS 3	DVH 3/6	VS 6	VS 6
	U	5.78	5.89	2.72	5.78	2.72	5.89	5.89
	SHGC	0.82	0.91	0.76	0.82	0.76	0.91	0.91
Acrist. (G2)	Tipo	VS 6	DVH 3/6	VS 6	VS 3	VS 6	DVH 3/6	DVH 3/6
	U	5.89	2.72	5.89	5.78	5.89	2.72	2.72
	SHGC	0.91	0.76	0.91	0.82	0.91	0.76	0.76
Muros (G3)	Ext.	LCT 8	S/L	S/L	LCT 12	LCM 5	S/L	S/L
	Aisl.	EPS 6	EPS 6	EPS 4	EPS 6	EPS 8	EPS 8	EPS 8
	Int.	S/L	LCT 8	LCT 8	LCT 8	S/L	LCT 12	LCT 8
	R	1.97	1.79	1.22	2.0	2.43	2.36	2.36
	K	0.51	0.56	0.82	0.48	0.41	0.42	0.42
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Techo (G3)	Aisl.	EPS 8	EPS 6	EPS 4	EPS 6	EPS 4	EPS 6	EPS 10
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	2.39	1.82	1.25	1.82	1.25	1.82	2.96
	K	0.42	0.55	0.80	0.55	0.80	0.55	0.34
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Piso (G3)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G3)	Tipo	VS 6	VS 3	VS 6	DVH 3/6	VS 6	VS 3	DVH 3/6
	U	5.89	5.78	5.89	2.72	5.89	5.78	2.72
	SHGC	0.91	0.82	0.91	0.76	0.91	0.82	0.76
Aleros	m	0.28	0.18	0.38	0.19	0.58	0.27	0.37

zona y su orientación. Esto controla el flujo de calor durante los periodos de temperaturas extremas.

- **Protecciones solares:** La profundidad de la galería (G_1) se incrementa de 0.62 m a 1.29 m. Complementariamente, los aleros (G_3) adoptan dimensiones que van desde los 0.18 m hasta los 0.57 m.

El comportamiento de los individuos óptimos comparado a las exigencias de la norma $IRAM$ 11605 muestra la lógica de compromiso del algoritmo. Los valores de K_{muro} y K_{techo} presentan variaciones considerables entre los diferentes elementos y grupos de zonas, alcanzando distintos niveles de aislamiento según lo estipulado por la normativa. No obstante, todas las soluciones optimizadas superan ampliamente la relación entre E_{total} y CI del modelo $V1$. Esto indica que el equilibrio térmico de estrategias bioclimáticas optimizadas y el compromiso contrapuesto de eficiencia e inversión resulta más efectivo que el simple aislamiento masivo.

Iguazú, Misiones.

Al igual que en Rivadavia, el análisis comparativo en Iguazú (Figura 8.11), resalta la baja competitividad técnica del prototipo $V1$ y la mejora respecto a $V2$ de las soluciones resultantes de la metodología SBO. El consumo de $V1$ es 3 323 kWh/año mientras que el de $V2$ baja a 838 kWh/año, a costa de un alto CI. Los individuos óptimos (1 al 7), logran disminuciones en la demanda mediante inversiones sensiblemente menores, que oscilan entre \$7 157 y \$11 457, para alcanzar consumos de entre 1 200 y 1 860 kWh/año. Esta relación implica que las soluciones optimizadas, si bien presentan un consumo entre un 43 % y un 122 % superior al estándar de máxima eficiencia, requieren inversiones que se sitúan, en su mayoría, entre el 42 % y el 68 % del capital necesario para alcanzar dicho nivel normativo, consolidándose como alternativas de gran viabilidad económica.

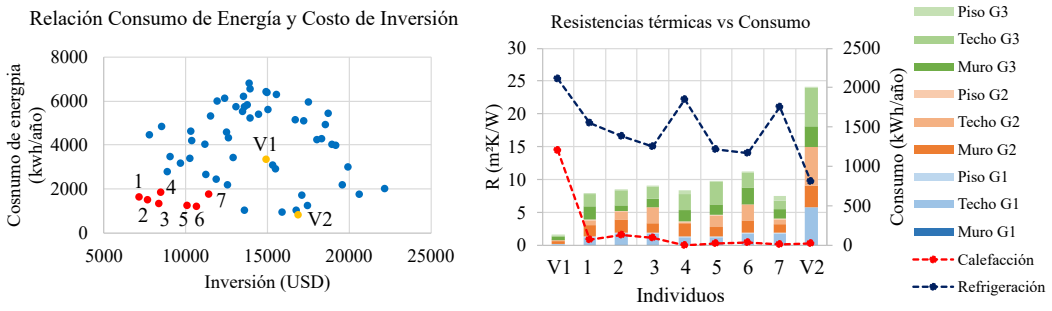


Figura 8.11: Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Iguazu (Zona Ib)

En lo que respecta a las configuraciones de la envolvente, en la Figura 8.11 se observa que la resistencia térmica global de $V1$ resulta insuficiente, mientras que en $V2$ se mantiene en niveles elevados y uniformes en la totalidad de sus componentes. Por el contrario, en los individuos óptimos la resistencia térmica que varía estratégicamente según el elemento y la zona térmica de la vivienda. Esta disposición busca un equilibrio dinámico entre las pérdidas y ganancias de calor, optimizando la respuesta del edificio de forma más eficiente que los modelos estáticos.
Según la Figura 8.12, el marcado predominio de la demanda de refrigeración en Iguazú ratifica la necesidad de una envolvente que optimice el confort estival y garantice la estabilidad térmica invernal de forma pasiva.
El análisis de los individuos óptimos, Tablas 8.18 y 8.19, muestra que la disposición de los componentes de la envolvente responde a una lógica de optimización de equilibrar el balance térmico. Los ejes principales se describen a continuación:

- **Orientación:** hay una transición en la orientación desde el Este (88°) hacia orientaciones Sur/Sudeste (170° a 200°).

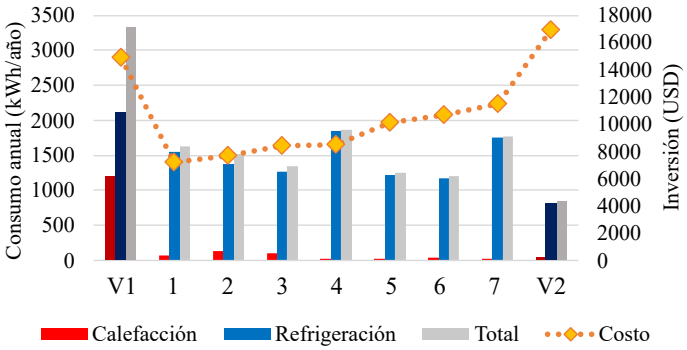


Figura 8.12: Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Iguazú (Zona Ib)

- **Muros:** La materialidad de los muros se basa en mamposterías simples o dobles con EPS de 2 a 12 cm en distintas posiciones respecto a los bloques de LCT o LCM. Esta flexibilidad en la configuración del aislamiento, junto a terminaciones claras en muros (blanco y beige), optimiza el desempeño del prototipo frente a los objetivos de ahorro energético y costos iniciales.
- **Cubiertas:** La solución de cubierta replica el esquema de Rivadavia al emplear EPS (4 a 12 cm) entre la chapa acanalada y la losa de hormigón. Dicha configuración garantiza una protección eficaz contra la carga térmica predominante en el sitio, complementada con techos (chapa galvanizada o cincalum).
- **Acristalamientos:** La configuración alterna entre soluciones de VS y DVH (3/6/3 mm) en función de las solicitaciones térmicas de cada zona y su orientación específica.
- **Protecciones solares:** el diseño de protecciones solares con galerías que llegan a los 1.75 m y aleros a los 0.72 m. Estos componentes actúan como el dispositivo crítico de regulación térmica, bloqueando de manera efectiva la incidencia solar directa sobre la envolvente transparente.

La evaluación frente a la norma $IRAM$ 11605 valida la racionalidad de los resultados obtenidos mediante el proceso de optimización. Todos los individuos óptimos presentan una mejora radical respecto al modelo de referencia $V2$, logrando niveles de alta prestación sin incurrir en los elevados costos asociados al cumplimiento estricto del Nivel A en la totalidad de sus componentes. Es notable que la mayoría de las soluciones óptimas se sitúen en niveles de transmitancias intermedias, lo que muestra que, bajo la lógica de la SBO, alcanzar el umbral estricto del Nivel A resulta económicamente ineficiente.

Tabla 8.18: Individuos óptimos para Iguazu (Terminaciones y Orientación)

Individuos	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Orientación	88.47	86.90	204.02	121.92	187.13	169.51	176.80
Term. techo	Ch. Cinc.	Ch. Cinc.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Gris Sil	Ch. Galv.	Ch. Cinc.
Term. muros	Blanca	Blanca	Blanca	Beige	Beige	Blanca	Beige

Tabla 8.19: Individuos óptimos para Iguazu (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías)

Individuos		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Muros (G1)	Ext.	S/L	LCT 8	LCT 12	S/L	LCM 5	LCT 12	LCT 8
	Aisl.	EPS 2	EPS 2	S/A	EPS 8	EPS 4	EPS 4	EPS 2
	Int.	LCT 12	LCT 12	LCP 12	LCT 8	LCT 12	LCM 5	LCT 12
	R	0.69	0.87	0.42	2.41	1.33	1.56	0.87
	K	1.45	1.15	2.38	0.42	0.75	0.64	1.15
	Nivel IRAM 11605	B	B	>C	B	B	B	B
Techo (G1)	Aisl.	EPS 4	EPS 6	EPS 6	EPS 4	EPS 4	EPS 6	EPS 6
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.25	1.82	1.82	1.25	1.25	1.82	1.82
	K	0.80	0.55	0.55	0.80	0.80	0.55	0.55
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Piso (G1)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G1)	Tipo	VS 3	VS 3	VS 3	DVH 3/6	DVH 3/6	VS 6	DVH 3/13
	U	5.78	5.78	5.78	2.72	2.72	5.89	2.67
	SHGC	0.82	0.82	0.82	0.76	0.76	0.91	0.70
Gal.	m	1.29	1.67	1.28	1.13	0.80	1.75	1.45
Muros (G2)	Ext.	S/L	LCT 8	LCP 12	LCT 12	LCT 8	LCM 5	LCM 12
	Aisl.	EPS 6	EPS 6	EPS 4	EPS 6	EPS 4	EPS 6	EPS 4
	Int.	LCM 5	LCM 12	S/L	LCT 12	LCT 8	LCM 12	LCT 8
	R	1.83	2.01	1.50	2.13	1.44	1.90	1.42
	K	0.55	0.50	0.67	0.47	0.69	0.53	0.70
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Techo (G2)	Aisl.	EPS 2	EPS 4	EPS 8	S/A	EPS 6	EPS 8	EPS 2
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	0.68	1.25	2.39	0.11	1.82	2.39	0.68
	K	1.47	0.80	0.42	9.35	0.55	0.42	1.47
	Nivel IRAM 11605	>C	C	B	>C	B	B	>C
Piso (G2)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G2)	Tipo	VS 3	VS 3	DVH 3/6	VS 6	VS 3	VS 3	VS 6
	U	5.78	5.78	2.72	5.89	5.78	5.78	5.89
	SHGC	0.82	0.82	0.76	0.91	0.82	0.82	0.91
Acrist. (G2)	Tipo	VS 6	VS 6	DVH 3/6	VS 3	VS 6	DVH 6/6	DVH 3/6
	U	5.89	5.89	2.72	5.78	5.89	2.56	2.72
	SHGC	0.91	0.91	0.76	0.82	0.91	0.76	0.76
Muros (G3)	Ext.	LCT 12	LCT 8	LCM 5	S/L	LCT 12	LCM 12	LCT 12
	Aisl.	EPS 6	EPS 2	EPS 4	EPS 6	EPS 4	EPS 8	EPS 4
	Int.	S/L	S/L	S/L	LCT 12	LCT 8	S/L	LCM 12
	R	2.12	0.85	1.32	1.82	1.55	2.55	1.55
	K	0.47	1.17	0.76	0.55	0.65	0.39	0.65
	Nivel IRAM 11605	B	C	B	B	B	B	B
Techo (G3)	Aisl.	EPS 6	EPS 8	EPS 6	EPS 8	EPS 12	EPS 8	EPS 4
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.82	2.39	1.82	2.39	3.54	2.39	1.25
	K	0.55	0.42	0.55	0.42	0.28	0.42	0.80
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Piso (G3)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	EPS 2	S/A	S/A	EPS 2
	R	0.06	0.06	0.06	0.63	0.06	0.06	0.63
Acrist. (G3)	Tipo	VS 3	VS 6	VS 6	VS 3	DVH 6/6	DVH 6/6	VS 6
	U	5.78	5.89	5.89	5.78	2.56	2.56	5.89
	SHGC	0.82	0.91	0.91	0.82	0.76	0.76	0.91
Aleros	m	0.27	0.11	0.60	0.68	0.72	0.51	0.35

8.6.3. Zona II: Cálido

Chilecito, La Rioja

La localidad de Chilecito presenta un desafío dual: un periodo estival caracterizado por alta radiación y aridez, y un periodo invernal con temperaturas por debajo de 0°C. Los resultados de la optimización (Figura 8.13) muestran una transición hacia estrategias que deben gestionar oscilaciones diarias superiores a los 14°C. A diferencia de los climas húmedos, donde el flujo térmico es más constante, la aridez de Chilecito exige que la envolvente actúe como un acumulador de calor durante el día en el periodo invernal, mientras que en verano, la misma masa térmica debe ser protegida mediante una aislación eficiente y un sombreado intensivo para evitar el sobrecalentamiento interior.
Las soluciones óptimas demuestran una eficacia superior al modelo $V1$, cuya configuración constructiva se ve superada tanto en costo como en desempeño. Mientras que $V1$ consume 7 227 kWh/año con una inversión de \$14 914, las alternativas optimizadas alcanzan niveles de ahorro energético entre 483 y 1 000 kWh/año con CI entre \$7 753 y \$10 266. Al comparar los resultados el modelo $V2$, se observa que los óptimos logran rendimientos competitivos, que van desde un ahorro adicional del 11 % hasta un aumento del 83 % en el consumo, pero exigiendo apenas entre el 46 % y el 61 % de la inversión necesaria para alcanzar el estándar normativo, consolidándose como opciones económicamente sólidas.

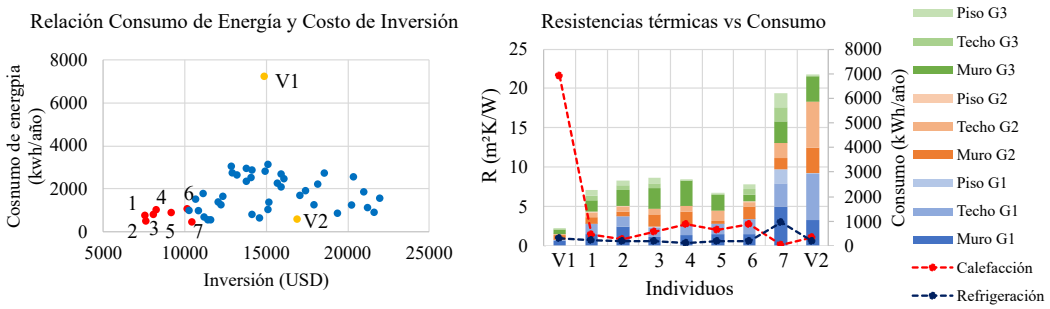


Figura 8.13: Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Chilecito (Zona IIa)

La Figura 8.13 muestra como, mediante el proceso de optimización, se prioriza el aumento equilibrado de la resistencia térmica en todos los elementos opacos para combatir el déficit térmico invernal. Mientras que $V1$ carece de la protección necesaria para evitar fugas de calor y $V2$ mantiene un alto valor de R, los individuos óptimos distribuyen estratégicamente el aislamiento, logrando estabilizar tanto la demanda de refrigeración como la de calefacción. Esta estrategia de resulta clave: al elevar los valores de R en muros y techos, se neutraliza el impacto de la radiación

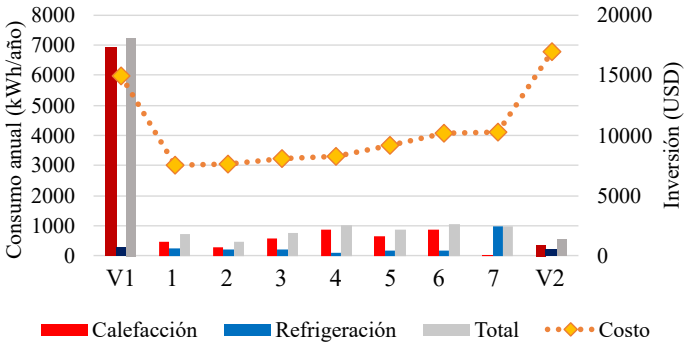


Figura 8.14: Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Chilecito (Zona IIa)

solar estival y se retiene el calor durante el invierno, optimizando el balance energético anual.
La relación entre el incremento de las resistencias térmicas y el comportamiento de la demanda energética E_{cal} y E_{ref} es determinante para entender la eficiencia del diseño. Según se ve en la Figura 8.14, en el modelo de referencia $V1$, la demanda de calefacción es el factor crítico, superando los 6 900 kWh/año debido a una envolvente con resistencias térmicas mínimas en todos sus componentes. Sin embargo, al observar los individuos óptimos, se aprecia una correlación inversa inmediata: un incremento moderado en los espesores de aislante provoca una disminución de la curva de E_{cal}, reduciéndola a valores cercanos a los 300 kWh/año. A diferencia, la demanda de E_{ref} se mantiene en niveles bajos y relativamente constantes a lo largo de los individuos óptimos. Esto sugiere que, una vez que se alcanza un umbral básico de resistencia térmica y se cuenta con protecciones solares adecuadas, el consumo de verano no es el principal impulsor de la inversión, permitiendo que el algoritmo se enfoque en neutralizar las condiciones invernales.
A partir de los resultados mostrados en las Tablas 8.20 y 8.21, se identifican soluciones constructivas que resuelven eficazmente la relación entre inversión y ahorro energético.

- **Orientación:** la mayoría de los individuos sitúan el Estar-Comedor con orientaciones cercanas al Este, ya que esta disposición busca priorizar la captación solar matutina y la minimiza la exposición a la radiación de la tarde de la zona, concentrado este calor en Domirtoiros.
- **Muros:** Se identifica una clara tendencia hacia el empleo de muros dobles con núcleo de EPS (2 a 16 cm). Complementariamente, la adopción generalizada de acabados blancos resulta estratégica en este clima, ya que maximiza el factor de reflexión solar y reduce la carga térmica por radiación sobre la envolvente opaca.
- **Cubiertas:** La solución de techo integra espesores variables de EPS (4 a 10 cm) entre la chapa (galvaniza) y la LHA.
- **Pisos:** Un rasgo distintivo en el diseño para Chilecito es la incorporación de aislamiento térmico en pisos mediante capas de 2 a 6 cm de EPS. Esta estrategia logra el desacople térmico respecto del suelo, evitando las pérdidas conductivas hacia el terreno durante el invierno.
- **Acristalamientos:** En función de la zona térmica y la orientación, los acristalamientos pueden ser VS o DVH.
- **Protecciones solares:** Las galerías tiene una profundidad de hasta 2.14 m y aleros de hasta 0.59 m.

Frente a la norma $IRAM$ 11605, la optimización logra resultados se sitúan a muros y techos en el Nivel A y B de eficiencia. La lógica del algoritmo minimiza el consumo neto mediante un equilibrio termofísico: en lugar de un aislamiento masivo uniforme, prioriza el refuerzo en las zonas con mayor asimetría térmica (G_1 y G_3). Esto demuestra que el flujo de SBO es capaz de encontrar compromisos económicos y energéticos altamente competitivos; incluso con valores de K que no alcanzan estrictamente el Nivel A normativo.

Tabla 8.20: Individuos óptimos para Chilecito (Terminaciones y Orientación)

Individuos	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Orientación	147.98	185.79	85.65	63.05	71.28	94.07	173.79
Term. techo	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Negra
Term. muros	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca

Tabla 8.21: Individuos óptimos para Chilecito (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías)

Individuos		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Muros (G1)	Ext.	LCT 8	S/L	LCT 12	LCM 5	LCT 8	LCT 8	LCT 8
	Aisl.	EPS 4	EPS 8	EPS 2	EPS 4	EPS 4	EPS 4	EPS 16
	Int.	LCT 12	LCT 8	LCM 5	LCM 5	LCT 12	LCM 12	LCM 5
	R	1.53	2.50	1.08	1.42	1.53	1.53	4.96
	K	0.65	0.40	0.92	0.70	0.65	0.65	0.20
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	A
Techo (G1)	Aisl.	EPS 4	EPS 4	EPS 4	EPS 4	EPS 4	EPS 6	EPS 10
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.82	2.96
	K	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.55	0.34
	Nivel IRAM 11605	C	C	C	C	C	B	B
Piso (G1)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	EPS 6
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	1.78
Acrist. (G1)	Tipo	VS 3	VS 6	VS 3	VS 3	VS 6	DVH 3/6	DVH 3/6
	U	5.78	5.89	5.78	5.78	5.89	2.72	2.72
	SHGC	0.82	0.91	0.82	0.82	0.91	0.76	0.76
Gal.	m	1.57	0.70	1.54	2.14	1.15	1.93	1.60
Muros (G2)	Ext.	S/L	LCT 12	LCT 12	LCT 12	LCT 8	LCT 8	LCT 8
	Aisl.	EPS 2	S/A	EPS 4	EPS 4	S/A	EPS 4	EPS 4
	Int.	LCM 5	LCT 8	LCT 8	LCT 12	LCT 8	LCT 12	LCM 12
	R	0.76	0.49	1.63	1.63	0.37	1.51	1.51
	K	1.31	2.04	0.61	0.61	2.72	0.66	0.66
	Nivel IRAM 11605	C	>C	B	B	>C	B	B
Techo (G2)	Aisl.	EPS 2	EPS 2	EPS 2	EPS 2	EPS 4	EPS 2	EPS 6
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	0.68	0.68	0.68	0.68	1.25	0.68	1.82
	K	1.47	1.47	1.47	1.47	0.80	1.47	0.55
	Nivel IRAM 11605	>C	>C	>C	>C	C	>C	B
Piso (G2)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G2)	Tipo	VS 6	VS 6	VS 6	VS 6	DVH 3/6	VS 6	DVH 3/6
	U	5.89	5.89	5.89	5.89	2.72	5.89	2.72
	SHGC	0.91	0.91	0.91	0.91	0.76	0.91	0.76
Acrist. (G2)	Tipo	DVH 3/6	VS 6	VS 6	VS 6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6
	U	2.72	5.89	5.89	5.89	2.72	2.72	2.72
	SHGC	0.76	0.91	0.91	0.91	0.76	0.76	0.76
Muros (G3)	Ext.	LCT 8	LCT 8	LCT 8	LCT 8	LCT 8	LCT 8	LCT 12
	Aisl.	EPS 4	EPS 6	EPS 8	EPS 10	EPS 6	EPS 2	EPS 8
	Int.	S/L	LCM 5	S/L	S/L	LCT 8	LCT 8	S/L
	R	1.43	2.00	2.58	3.15	2.00	0.86	2.70
	K	0.70	0.50	0.39	0.32	0.50	1.16	0.37
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	C	B
Techo (G3)	Aisl.	EPS 4	EPS 6	EPS 4	EPS 2	EPS 6	EPS 2	EPS 4
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.25	1.82	1.25	0.68	1.82	0.68	1.25
	K	0.80	0.55	0.80	1.47	0.55	1.47	0.80
	Nivel IRAM 11605	C	B	C	>C	B	>C	C
Piso (G3)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	EPS 2	EPS 2	EPS 2	S/A	S/A	EPS 2	EPS 6
	R	0.63	0.63	0.63	0.06	0.06	0.63	1.78
Acrist. (G3)	Tipo	VS 6	VS 3	VS 3	VS 3	VS 6	VS 3	VS 3
	U	5.89	5.78	5.78	5.78	5.89	5.78	5.78
	SHGC	0.91	0.82	0.82	0.82	0.91	0.82	0.82
Aleros	m	0.22	0.37	0.56	0.59	0.53	0.58	0.45

Sauce Viejo, Santa Fe.

El desempeño de los individuos óptimos en Sauce Viejo, Figura 8.15, demuestra una mejora en la eficiencia respecto a los modelos de referencia. La vivienda $V1$ presenta un consumo de E_{total} de

5 585 kWh/año, mientras que el modelo de cumplimiento normativo $V2$ alcanza el valor mínimo de 836 kWh/año. En contraste, los individuos óptimos (1 al 7) logran disminuir la demanda a un rango de entre 1 312 y 1 882 kWh/año, una reducción de entre el 66 % y 77 % en el consumo total, por lo que niveles de eficiencia competitivos. A diferencia de climas más áridos, la demanda de refrigeración E_{ref} es considerable (1 031 a 1 417 kWh/año), superando incluso a la carga de calefacción en las soluciones de mayor inversión. En función del CI ($5 915 a $9 804), se puede decir que es posible triplicar la eficiencia energética de la vivienda invirtiendo apenas entre un 30 % y un 70 % del capital necesario para el modelo normativo $V2$.
La distribución de la resistencia térmica (Figura 8.15) explica la caída de las variaciones de las curvas de consumo. El salto inicial del modelo $V1$ al Individuo 1 del incremento la resistencia en muros y techos causa la disminución inmediata de la demanda de E_{cal}, que cae de 3 619 kWh/año a menos de 465 kWh/año. A medida que se avanza hacia el Individuo 7, se observa un crecimiento progresivo de la resistencia térmica. Esto implica la baja progresiva en la curva de refrigeración logrando mitigar las ganancias térmicas por conducción en verano. A diferencia de $V2$, que aplica una resistencia y uniforme en todos los elementos, los individuos óptimos proponen una jerarquización que optimiza la relación costo-beneficio.

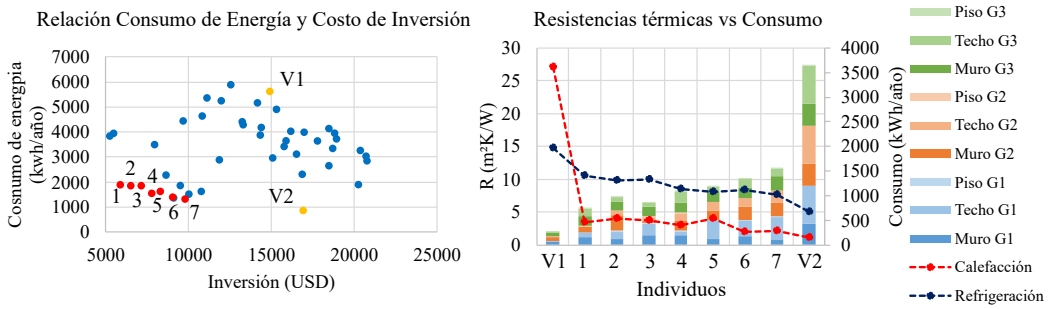


Figura 8.15: Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Sauce Viejo (Zona IIb)

Al analizar la Figura 8.16, se puede ver que la E_{cal} es el consumo predominante en $V1$. En las soluciones obtenidas del proceso de SBO, esta disminuye considerablemente, mientras aumenta la E_{ref}. Esto indica que en este clima, cálido y húmedo, una vez resuelto el confort en invierno, el mayor desafío técnico pasa a ser el control del calor en verano. Esto justifica por qué el algoritmo prioriza materiales y protecciones solares que eviten el sobrecalentamiento.

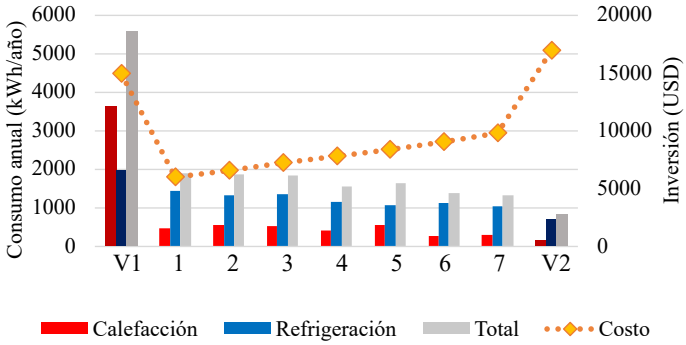


Figura 8.16: Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Sauce Viejo (Zona IIb)

De acuerdo con los resultados procesados (Tablas 8.22 y 8.23), se observa en las soluciones óptimas la clara tendencia del compromiso entre E_{total} y CI mediante la elección inteligente de las estrategias pasivas.

Tabla 8.22: Individuos óptimos para Sauce Viejo (Terminaciones y Orientación)

Individuos	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Orientación	80.40	57.11	58.45	41.03	39.04	125.17	91.67
Term. techo	Ch. Galv.	Ch. Cinc.	Ch. Cinc.	Ch. Cinc.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.
Term. muros	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca

Tabla 8.23: Individuos óptimos para Santa Fe (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías)

Individuos		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Muros (G1)	Ext.	S/L	LCT 8	LCT 8	LCT 8	LCT 8	LCM 5	LCM 5
	Aisl.	EPS 4	EPS 2	EPS 4	EPS 4	EPS 2	EPS 4	EPS 2
	Int.	LCT 8	LCT 8	S/L	LCM 5	LCT 8	LCM 5	LCT 12
	R	1.26	0.87	1.44	1.44	0.87	1.33	0.76
	K	0.79	1.15	0.69	0.69	1.15	0.75	1.32
	Nivel IRAM 11605	B	C	B	B	C	B	C
Techo (G1)	Aisl.	EPS 2	EPS 4	EPS 6	EPS 2	EPS 10	EPS 8	EPS 12
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	0.68	1.25	1.82	0.68	2.96	2.39	3.54
	K	1.47	0.80	0.55	1.47	0.34	0.42	0.28
	Nivel IRAM 11605	>C	C	B	>C	B	B	B
Piso (G1)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G1)	Tipo	VS 6	VS 6	VS 3	VS 3	VS 3	VS 6	VS 6
	U	5.89	5.89	5.78	5.78	5.78	5.89	5.89
	SHGC	0.91	0.91	0.82	0.82	0.82	0.91	0.91
Gal.	m	0.27	0.71	0.86	1.23	0.75	0.75	1.14
Muros (G2)	Ext.	LCM 5	S/L	LCT 8	LCT 8	LCT 8	LCT 12	LCT 12
	Aisl.	EPS 2	EPS 8	S/A	EPS 4	EPS 4	EPS 6	EPS 6
	Int.	LCT 8	LCT 8	LCT 8	S/L	LCM 5	LCT 8	LCM 5
	R	0.76	2.40	0.30	1.44	1.44	2.13	2.13
	K	1.32	0.42	3.38	0.69	0.69	0.47	0.47
	Nivel IRAM 11605	C	B	>C	B	B	B	B
Techo (G2)	Aisl.	S/A	EPS 2	EPS 2	EPS 4	EPS 4	EPS 4	EPS 6
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	0.11	0.68	0.68	1.25	1.25	1.25	1.82
	K	9.35	1.47	1.47	0.80	0.80	0.80	0.55
	Nivel IRAM 11605	>C	>C	>C	C	C	C	B
Piso (G2)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G2)	Tipo	VS 3	VS 3	VS 6	VS 6	DVH 3/6	VS 3	DVH 3/6
	U	5.78	5.78	5.89	5.89	2.72	5.78	2.72
	SHGC	0.82	0.82	0.91	0.91	0.76	0.82	0.76
Acrist. (G2)	Tipo	VS 6	VS 3	VS 6	VS 6	DVH 6/6	VS 3	DVH 3/13
	U	5.89	5.78	5.89	5.89	2.56	5.78	2.67
	SHGC	0.91	0.82	0.91	0.91	0.76	0.82	0.70
Muros (G3)	Ext.	LCT 8	S/L	LCT 8	LCT 8	LCT 12	LCT 12	LCP 12
	Aisl.	EPS 4	EPS 4	EPS 4	EPS 4	EPS 4	EPS 4	EPS 6
	Int.	S/L	LCT 8	LCT 8	LCT 8	LCT 8	LCP 12	LCT 8
	R	1.45	1.27	1.45	1.45	1.57	1.57	2.08
	K	0.69	0.79	0.69	0.69	0.64	0.64	0.48
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Techo (G3)	Aisl.	EPS 4	EPS 2	EPS 2	EPS 6	EPS 2	EPS 4	EPS 4
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.25	0.68	0.68	1.82	0.68	1.25	1.25
	K	0.80	1.47	1.47	0.55	1.47	0.80	0.80
	Nivel IRAM 11605	C	>C	>C	B	>C	C	C
Piso (G3)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G3)	Tipo	VS 3	VS 3	VS 3	VS 6	VS 3	VS 6	VS 6
	U	5.78	5.78	5.78	5.89	5.78	5.89	5.89
	SHGC	0.82	0.82	0.82	0.91	0.82	0.91	0.91
Aleros	m	0.33	0.21	0.32	0.22	0.18	0.38	0.37

- **Orientación**: el conjunto presenta una tendencia de orientar el Estar Comedor hacia el cuadrante Este/Noreste (39° a 91°).

- **Muros:** La solución constructiva que prevalece en los individuos óptimos es el muro doble con núcleo aislante. El espesor de EPS varía estratégicamente según los requerimientos de cada zona para optimizar el balance entre costo y eficiencia entre 2 y 8 cm. Esta disposición, potenciada por el uso de de color blanco, permite neutralizar gran parte de la ganancia por radiación solar antes de que afecte el interior.

- **Cubierta:** El espesor de EPS en cubiertas presenta una variabilidad significativa, permitiendo al algoritmo de optimización ajustar la protección térmica según el uso de cada local. Los valores oscilan entre un mínimo de 2 cm y un máximo de 12 cm. El uso de chapa galvanizada o cincalum refuerza el control de la carga térmica por techo.

- **Acristalamientos:** La envolvente transparente se resuelve principalmente mediante dos tecnologías, cuya selección varía según la zona térmica de la vivienda. El VS es la opción dominante en las áreas G_1 y G_3, utilizando espesores de 3 mm y 6 mm. En cambio, en las áreas G_2, se tiende al uso de DVH (3/6/3 mm, 6/6/6 mm y 3/13/3 mm).

- **Protecciones solares:** Se emplean aleros de entre 0.18 y 0.38 m, complementados con galerías que alcanzan profundidades de hasta 1.23 m para bloquear el sol de verano sin obstruir la captación invernal.

En el contraste con los valores de la norma $IRAM$ 11605 se observa que los resultados de la optimización multiobjetivo poseen una mayor racionalidad técnica y económica que el cumplimiento estricto de los estándares estáticos. La superioridad de estos individuos radica en su capacidad para explotar la sinergia entre variables: mientras que el Nivel A ($V2$) exige una inversión elevada para alcanzar aislamientos máximos y uniformes en toda la envolvente, la técnica de SBO identifica que es posible obtener un desempeño energético equivalente —o incluso superior— compensando transmitancias térmicas intermedias con una gestión precisa de la orientación y el sombreado. En última instancia, esta aproximación permite alcanzar niveles de alta prestación con una inversión de capital que representa apenas el $50\,\%$ del costo requerido por el estándar normativo máximo, consolidando el diseño bioclimático optimizado como la alternativa más eficiente.

8.6.4. Zona III: Templado cálido

Córdoba, Córdoba

El análisis de la localidad de Córdoba es clave para comprender cómo un clima templado de transición redefine las prioridades del diseño bioambiental. En este contexto, la marcada amplitud térmica y las características de un invierno seco exigen que el algoritmo actúe sobre un balance equitativo entre las demandas estacionales. Los resultados obtenidos (Figura 8.17) demuestran que la eficiencia no surge de una estrategia unidireccional, sino de una envolvente versátil capaz de neutralizar las pérdidas invernales sin comprometer la capacidad de enfriamiento pasivo durante el periodo estival.
El estudio del compromiso entre el consumo E_{total} anual y el CI demuestra una clara superación de los estándares tradicionales mediante la implementación de la SBO. El modelo $V1$ registra una demanda de $5\,195$ kWh/año, con una E_{cal} por encima de los $4\,200$ kWh/año. En contraste, el Individuo 1 evidencia un quiebre térmico y económico: con una inversión de apenas $\$6\,308$ (un $58\,\%$ menos que $V1$), logra reducir la demanda de calefacción en un $85\,\%$ gracias a un incremento estratégico de la resistencia térmica en muros y techos. Por otro lado, la transición hacia el extremo opuesto, Individuo 7, demuestra la capacidad del algoritmo para equilibrar las cargas; este diseño logra un consumo de apenas 800 kWh/año, igualando el desempeño del estándar de alta prestación $V2$ (669 kWh/año) pero con una inversión de $\$9\,123$, lo que representa un ahorro de capital cercano al $46\,\%$ respecto al modelo normativo. Estos resultados validan que, en el clima de Córdoba, la resistencia estratégicamente diseñada (en conjunto a la orientación protección solar y

acristalamientos) es el mecanismo más eficiente para equilibrar el balance energético frente a la amplitud térmica regional.

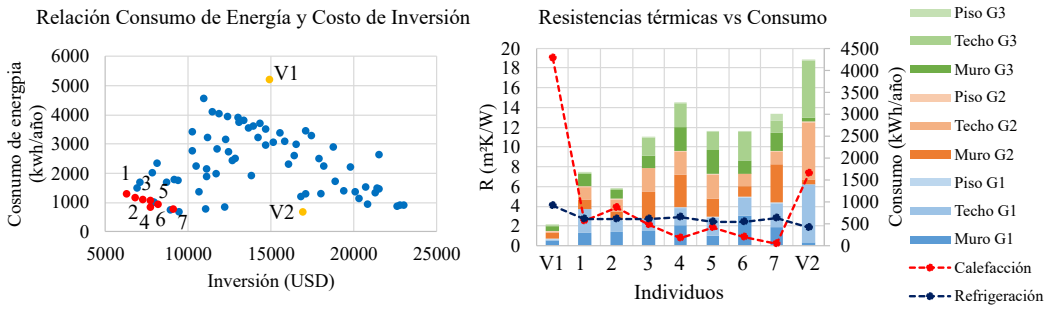


Figura 8.17: Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Córdoba (Zona IIIa)

El análisis comparativo de los consumos energéticos (Figura 8.18) muestra la variación en el perfil de demanda entre $V1$ y $V2$ a las soluciones optimizadas. En el modelo de referencia $V1$, la demanda total de E_{total} alcanza los 5 195 kWh/año con E_{cal} de 4 284 kWh/año y E_{ref}. Esto evidencia que una envolvente sin aislación es incapaz de retener el calor durante el invierno. A partir del Individuo 1, se observa una reducción del E_{total} que cae a 1 291 kWh/año. La carga de calefacción disminuye por debajo de los 600 kWh/año en los óptimos, llegando a valores casi nulos en algunos de ellos. La E_{ref} pasa a ser el factor dominante o equitativo, manteniéndose entre los 500 y 1 000 kWh/año. Al comparar estas soluciones con el estándar normativo máximo ($V2$), los resultados muestran que el Individuo 7 logra un consumo total de aproximadamente 800 kWh/año, una cifra sumamente cercana al mínimo técnico de $V2$ (669 kWh/año), con la mitad de la inversión. Mientras que ambos modelos ofrecen un confort térmico similar, los individuos óptimos lo consiguen sin la necesidad de las resistencias térmicas extremas de $V2$, optimizando la inversión para obtener el máximo ahorro de CI.

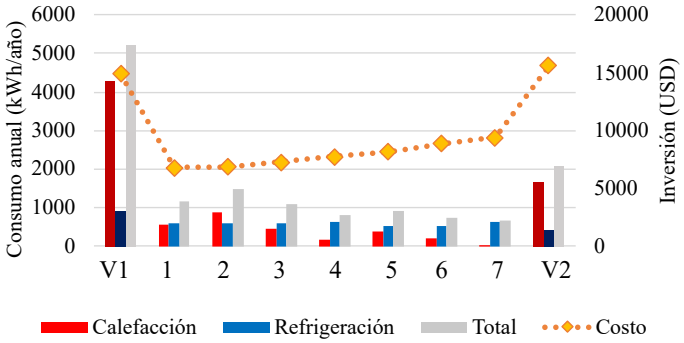


Figura 8.18: Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Córdoba (Zona IIIa)

El análisis de individuos (Tablas 8.24 y 8.25) muestra que las soluciones óptimas priorizan el desacoplamiento térmico y la captación solar selectiva como estrategias de control pasivo.

- **Orientación:** La gran mayoría de los individuos orientan el Sector Social (G_1) hacia el sector Noreste (28° a 84°). Esta rotación es fundamental ya que permite maximizar la ganancia térmica por radiación durante el invierno logrando disminuir la demanda de calefacción.

- **Muros:** Se observa un uso muros dobles con núcleo aislante de LCT y LCM y capas de entre 2 y 12 cm EPS con terminación blanca.

Tabla 8.24: Individuos óptimos para Córdoba (Terminaciones y Orientación)

Individuos	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Orientación	32.07	39.61	58.11	84.12	188.11	28.97	33.35
Term. techo	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.
Term. muros	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca

Tabla 8.25: Individuos óptimos para Córdoba (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías)

Individuos		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Muros (G1)	Ext.	S/L	S/L	LCT 8	LCT 8	LCM 5	LCT 12	LCM 12
	Aisl.	EPS 4	EPS 4	EPS 4	EPS 6	EPS 8	EPS 2	EPS 4
	Int.	LCT 8	LCT 8	S/L	S/L	S/L	LCT 8	LCM 5
	R	1.28	1.28	1.46	2.03	2.49	1.01	1.44
	K	0.78	0.78	0.69	0.49	0.40	0.99	0.69
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Techo (G1)	Aisl.	EPS 6	EPS 8	EPS 4	EPS 6	EPS 10	EPS 6	EPS 6
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.82	2.39	1.25	1.82	2.96	1.82	1.82
	K	0.55	0.42	0.80	0.55	0.34	0.55	0.55
	Nivel IRAM 11605	B	B	C	B	B	B	B
Piso (G1)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	EPS 2	S/A	S/A
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.63	0.06	0.06
Acrist. (G1)	Tipo	VS 3	VS 6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	VS 6	DVH 3/6
	U	5.78	5.89	2.72	2.72	2.72	5.89	2.72
	SHGC	0.82	0.91	0.76	0.76	0.76	0.91	0.76
Gal.	m	0.71	0.80	1.09	1.18	0.91	1.02	1.07
Muros (G2)	Ext.	LCT 12	LCT 8	LCT 8	LCT 8	LCP 12	S/L	S/L
	Aisl.	EPS 4	EPS 2	EPS 8	EPS 10	EPS 10	EPS 6	EPS 6
	Int.	LCT 8	LCT 8	LCT 8	LCM 5	LCM 5	LCM 5	LCM 12
	R	1.64	0.94	2.66	3.23	3.29	1.91	1.91
	K	0.61	1.06	0.38	0.31	0.30	0.52	0.52
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Techo (G2)	Aisl.	S/A	EPS 4	EPS 8	EPS 8	EPS 6	EPS 8	EPS 8
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	0.11	1.25	2.39	2.39	1.82	2.39	2.39
	K	9.35	0.80	0.42	0.42	0.55	0.42	0.42
	Nivel IRAM 11605	>C	C	B	B	B	B	B
Piso (G2)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G2)	Tipo	VS 3	VS 6	VS 6	VS 6	VS 6	VS 6	DVH 3/6
	U	5.78	5.89	5.89	5.89	5.89	5.89	2.72
	SHGC	0.82	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.76
Acrist. (G2)	Tipo	VS 6	VS 6	DVH 3/6	DVH 3/6	VS 6	VS 6	VS 6
	U	5.89	5.89	2.72	2.72	5.89	5.89	5.89
	SHGC	0.91	0.91	0.76	0.76	0.91	0.91	0.91
Muros (G3)	Ext.	S/L	LCT 8	S/L	S/L	S/L	S/L	S/L
	Aisl.	EPS 4	EPS 2	EPS 4	EPS 8	EPS 8	EPS 4	EPS 6
	Int.	LCT 12	LCM 5	LCT 8	LCT 8	LCT 12	LCT 12	LCT 12
	R	1.28	0.89	1.28	2.42	2.42	1.28	1.85
	K	0.78	1.12	0.78	0.41	0.41	0.78	0.54
	Nivel IRAM 11605	B	C	B	B	B	B	B
Techo (G3)	Aisl.	S/A	S/A	EPS 6	EPS 8	EPS 6	EPS 10	EPS 4
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	0.11	0.11	1.82	2.39	1.82	2.96	1.25
	K	9.09	9.09	0.55	0.42	0.55	0.34	0.80
	Nivel IRAM 11605	>C	>C	B	B	B	B	C
Piso (G3)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	EPS 2
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.63
Acrist. (G3)	Tipo	VS 6	VS 6	VS 3	VS 3	VS 3	DVH 3/6	VS 6
	U	5.89	5.89	5.78	5.78	5.78	2.72	5.89
	SHGC	0.91	0.91	0.82	0.82	0.82	0.76	0.91
Aleros	m	0.15	0.15	0.37	0.27	0.29	0.37	0.40

- **Techos:** En techos, el aislamiento se mantiene consistente entre los 4 y 10 cm y terminación chapa galvanizada.

- **Acristalamientos:** A diferencia de las zonas más cálidas, el DVH se consolida como una característica dominante desde los niveles iniciales de inversión. Esto demuestra que evitar las pérdidas por transmisión en invierno es tan prioritario como controlar las ganancias estivales.
- **Protecciones solares:** Las galerías mantienen profundidades promedio de 1 m, permitiendo el sombreado en verano sin bloquear el ingreso solar invernal debido a la orientación noreste adoptada. Los aleros en dormitorios son de 0.15 a 0.5 m.

En relación con los estándares de la $IRAM$ 11605, los resultados obtenidos para Córdoba validan la viabilidad de alcanzar compromisos reales entre costo y prestación térmica. Las soluciones optimizadas alcanzan el Nivel B en cerramientos verticales y el Nivel A en cubiertas. Este hallazgo demuestra no se requieren espesores de aislamiento excesivos ni uniformes para disminuir el consumo de E_{total}, por el contrario, una distribución estratégica donde las resistencias térmicas en muros (R entre 0.76 y 3.06 m^2K/W) y techos se ajustan según la zona térmica es más eficiente energética y económicamente.

Ezeiza, Buenos Aires.

El análisis del compromiso entre el desempeño energético E_{total} y el CI en Ezeiza es función directa de la variabilidad térmica y la humedad de la región pampeana. Según la Figura 8.19 se puede la ineficiencia del modelo $V1$, el cual demanda 6 682 kWh/año con una inversión de $14 913. Este elevado consumo se origina en una envolvente precaria que dispara la carga de calefacción por encima de los 5 500 kWh/año. En contraste, el Individuo 1 logra reducir la demanda total a menos de un tercio (1 783 kWh/año) con una inversión mínima de apenas $7 808. Por su parte, el Individuo 7 alcanza un desempeño cercano al estándar de alta prestación $V2$ (760 kWh/año) con un capital de $11 163, lo que representa un ahorro de inversión del 34 % respecto a la normativa máxima.

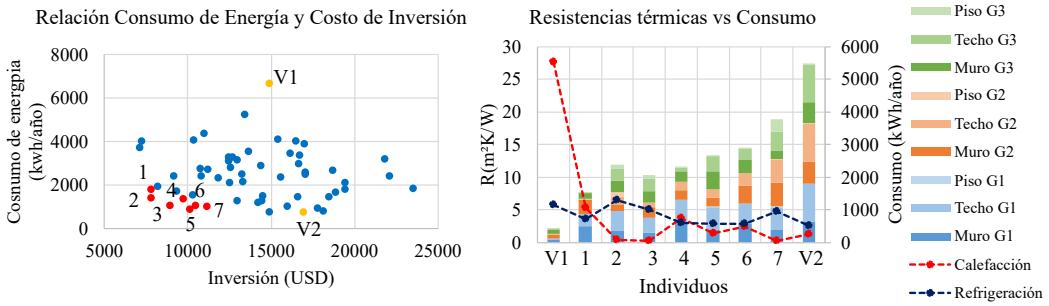


Figura 8.19: Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Ezeiza (Zona IIIb)

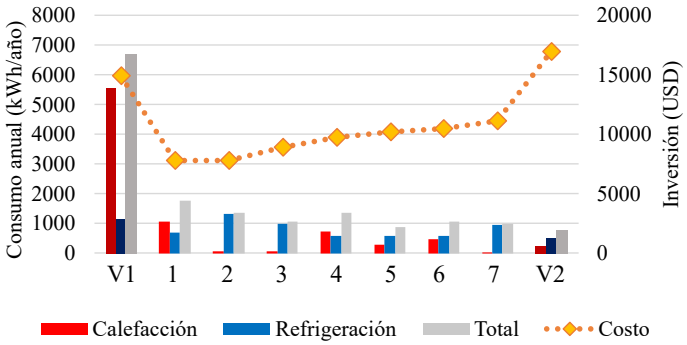


Figura 8.20: Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Ezeiza (Zona IIIb)

Tabla 8.26: Individuos óptimos para Ezeiza (Terminaciones y Orientación)

Individuos	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Orientación	50.37	201.36	132.21	56.77	41.85	57.93	166.43
Term. techo	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Gris Sil	Ch. Galv.	Ch. Galv.
Term. muros	Blanca	Blanca	Beige	Blanca	Beige	Blanca	Beige

Tabla 8.27: Individuos óptimos para Ezeiza (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías)

Individuos		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Muros (G1)	Ext.	LCT 8	S/L	LCT 8	LCM 5	LCM 5	S/L	LCM 5
	Aisl.	EPS 8	EPS 6	EPS 4	EPS 10	EPS 6	EPS 10	EPS 6
	Int.	LCM 5	LCT 8	LCM 5	LCM 5	LCP 12	LCM 12	LCM 12
	R	2.58	1.84	1.44	3.04	1.90	2.98	1.90
	K	0.39	0.54	0.69	0.33	0.53	0.34	0.53
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Techo (G1)	Aisl.	EPS 6	EPS 10	EPS 8	EPS 12	EPS 12	EPS 10	EPS 12
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.82	2.96	2.39	3.54	3.54	2.96	3.54
	K	0.55	0.34	0.42	0.28	0.28	0.34	0.28
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Piso (G1)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G1)	Tipo	VS 3	VS 6	DVH 6/6	VS 6	DVH 3/6	VS 6	VS 6
	U	5.78	5.89	2.56	5.89	2.72	5.89	5.89
	SHGC	0.82	0.91	0.76	0.91	0.76	0.91	0.91
Gal.	m	1.33	1.63	1.21	1.74	1.19	1.68	0.86
Muros (G2)	Ext.	LCT 8	LCT 8	LCT 8	LCM 5	LCM 5	LCT 12	LCM 5
	Aisl.	EPS 6	EPS 2	EPS 4	EPS 4	EPS 4	EPS 8	EPS 12
	Int.	LCT 12	LCP 12	LCM 12	LCM 5	LCM 5	LCT 12	LCT 12
	R	2.07	0.93	1.50	1.39	1.39	2.77	3.67
	K	0.48	1.08	0.67	0.72	0.72	0.36	0.27
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	A
Techo (G2)	Aisl.	S/A	EPS 4	EPS 2	EPS 4	EPS 4	EPS 6	EPS 12
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	0.11	1.25	0.68	1.25	1.25	1.82	3.54
	K	9.35	0.80	1.47	0.80	0.80	0.55	0.28
	Nivel IRAM 11605	>C	C	>C	C	C	B	B
Piso (G2)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	EPS 2	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.06	0.63	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G2)	Tipo	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 6/6	DVH 3/13
	U	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.56	2.67
	SHGC	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.70
Acrist. (G2)	Tipo	VS 3	VS 6	DVH 3/6	DVH 6/6	DVH 3/6	VS 3	DVH 3/13
	U	5.78	5.89	2.72	2.56	2.72	5.78	2.67
	SHGC	0.82	0.91	0.76	0.76	0.76	0.82	0.70
Muros (G3)	Ext.	LCT 8	S/L	S/L	LCT 12	LCT 12	LCM 12	LCM 5
	Aisl.	EPS 2	EPS 6	EPS 6	EPS 4	EPS 8	EPS 6	EPS 4
	Int.	LCM 5	LCT 8	LCT 8	LCT 8	LCM 5	S/L	LCP 12
	R	0.85	1.81	1.81	1.54	2.69	1.97	1.31
	K	1.18	0.55	0.55	0.65	0.37	0.51	0.76
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Techo (G3)	Aisl.	S/A	EPS 6	EPS 6	EPS 2	EPS 8	EPS 6	EPS 10
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	0.11	1.82	1.82	0.68	2.39	1.82	2.96
	K	9.35	0.55	0.55	1.47	0.42	0.55	0.34
	Nivel IRAM 11605	>C	B	B	>C	B	B	B
Piso (G3)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	EPS 2	EPS 2	S/A	S/A	S/A	EPS 6
	R	0.06	0.63	0.63	0.06	0.06	0.06	1.78
Acrist. (G3)	Tipo	VS 3	VS 6	DVH 3/6	DVH 3/13	DVH 3/6	VS 6	DVH 6/6
	U	5.78	5.89	2.72	2.67	2.72	5.89	2.56
	SHGC	0.82	0.91	0.76	0.70	0.76	0.91	0.76
Aleros	m	0.20	0.24	0.31	0.20	0.22	0.26	0.33

El desglose de la demanda (Figura 8.20) refleja la necesidad de un diseño capaz de mitigar, con igual eficacia, la demanda E_{cal} como la E_{ref}. A diferencia de climas más extremos, en Ezeiza se observa una paridad notable entre los requerimientos de calefacción y refrigeración a medida que

la envolvente se robustece. Mientras que en las soluciones de menor inversión predomina la E_{cal}, el incremento estratégico de las resistencias térmicas en techos y muros permite equilibrar ambos indicadores.
De acuerdo con los datos procesados (Tablas 8.26 y 8.27), se observa una dispersión estratégica que busca el equilibrio térmico estacional.

- **Orientación:** En los Individuos 1 y 4 el Sector Social (G_1) se orienta hacia el Noreste (50° a 56°) para maximizar la captación invernal, otros casos como el Individuo 2 rotan hacia el Sur (201°), priorizando la protección total de dicha área.
- **Muros:** Se emplea una combinación de mampostería (LCT y LCP) con espesores de EPS de entre 4 y 12 cm en muros y terminaciones blanca y beige.
- **Techos:** El aislamiento se identifica como un componente crítico, alcanzando los 12 cm en las soluciones más eficientes. La terminación predominante es la chapa galvanizada.
- **Pisos:** Un rasgo distintivo en Ezeiza es la incorporación selectiva de aislación en pisos (específicamente en los Individuos 2 y 3 con 2 cm de EPS). Esta estrategia se orienta a mitigar el puente térmico con el terreno frío durante el periodo invernal.
- **Acristalamientos:** Se opta por vidrios VS, pero el DVH se consolida como el estándar para los dormitorios y áreas de servicio (G_2 y G_3).
- **Protecciones solares:** Complementariamente, se proyectan galerías de hasta 1.74 m, asegurando el sombreado efectivo de los acristalamientos durante el verano, y aleros de 0.40 m.

Los individuos óptimos en Ezeiza validan la búsqueda de un compromiso técnico-económico real. Las soluciones derivadas de la SBO logran que las cubiertas alcancen el **Nivel A** de excelencia ($0.28\ W/m^2K$). En muros, la optimización alcanza el **Nivel B** para equilibrar el CI, demostrando que una configuración balanceada de materiales y diseño pasivo es físicamente más efectiva y económicamente viable que el simple aislamiento masivo tradicional.

8.6.5. Zona IV: Templada Fría

Mendoza, Mendoza.

Para la localidad de Mendoza, el análisis de los resultados (Figura 8.21) revela un comportamiento térmico condicionado por el clima árido y la marcada amplitud térmica de la región, donde la optimización logra un equilibrio prestacional superior con inversiones muy inferiores a las de referencia.

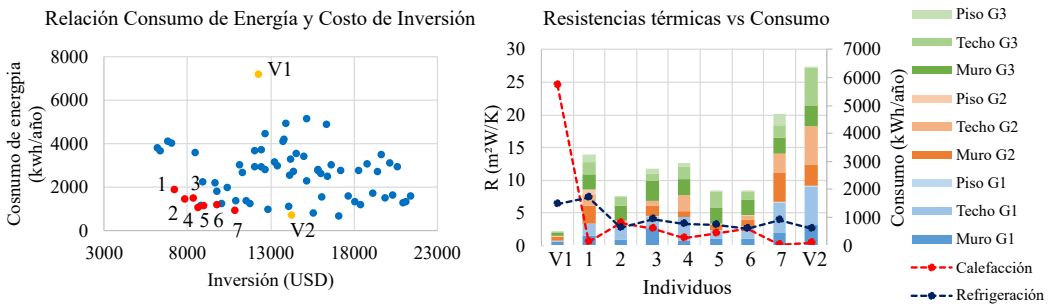


Figura 8.21: Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Mendoza (Zona IVa)

El análisis del compromiso entre el consumo E_{total} y el CI muestra, una vez más, la ineficiencia del modelo de referencia $V1$, el cual demanda aproximadamente 7 205 kWh/año. Los individuos

óptimos logran reducir la demanda E_{total} a un rango de entre 930 y 1 858 kWh/año; destacándose el Individuo 1, que alcanza un ahorro energético del 72 % con una inversión de apenas \$7 220 (50 % del CI de $V1$). Finalmente, al contrastar estos resultados con el modelo de alta prestación $V2$, ($\approx$ 700 kWh/año), se observa que las soluciones optimizadas consiguen niveles de eficiencia altamente competitivos con ahorros de capital de hasta el 35 % respecto al estándar del Nivel A.
La configuración de la envolvente en los individuos óptimos explica la caída del consumo energético. En comparación con la resistencia casi nula del modelo $V1$, se observa un incremento notable y equilibrado en las resistencias térmicas a lo largo de todo el conjunto de soluciones. El algoritmo prioriza el refuerzo térmico en las zonas de mayor permanencia, específicamente en la Zona 1 (G_1) y Zonas 5 y 6 (G_3), con el fin de maximizar el confort pasivo y la temperatura interior frente. Una observación interesante es que las soluciones de mayor inversión, como los individuos 6 y 7, incorporan estratégicamente aislamiento en pisos, lo que actúa como un ajuste final de precisión para minimizar las transferencias conductivas hacia el terreno y consolidar el perfil de alta eficiencia energética.

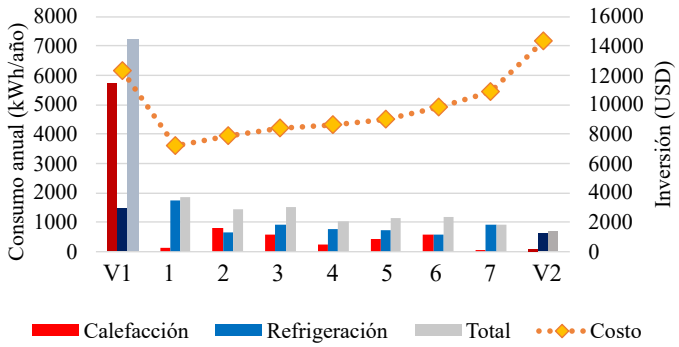


Figura 8.22: Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Mendoza (Zona IVa)

El desglose de la demanda E_{total} (Figura 8.22) muestra las prioridades de diseño bioclimático al pasar de los modelos de referencia a las soluciones optimizadas. En el modelo $V1$, la E_{cal} representa el componente crítico del balance, superando los 5 700 kWh/año. Sin embargo, a partir del Individuo 1, se observa una disminución de esta carga hacia valores cercanos a cero, lo que demuestra que incluso un nivel de aislamiento moderado es suficiente para anular el déficit térmico invernal en este clima. Como consecuencia, la E_{ref} se convierte en la carga predominante. Este cambio de perfil indica que, una vez resuelto el aislamiento básico, el algoritmo de la SBO desplaza su enfoque hacia la gestión de la carga térmica en verano.
De acuerdo con las Tablas 8.28 y 8.29, las soluciones óptimas se basan en una estrategia de aislamiento masivo y un control solar selectivo diseñado para gestionar la elevada amplitud térmica.

- **Orientación:** Hay dos opciones en cuanto a orientación. Una volcada al cuadrante **Norte-Noreste** (25° **a** 33°), orientada a maximizar la captación solar invernal en la Zona 1, y otra hacia el **Sur-Sudeste** (146° **a** 169°), que prioriza la protección integral del área de mayor permanencia durante el día frente a la radiación directa.

- **Muros:** La configuración de muros se caracteriza por el uso de mampostería diversa (LCT, LCM y LCP) con espesores de EPS que oscilan entre 2 y 14 cm, garantizando una protección crítica en los dormitorios con espesores constantes de 8 a 10 cm para anular la demanda de calefacción. Las terminaciones elegidas son blanca y beige.

- **Techos:** La solución adoptada de forma unánime el las protección de la LHA por capas de EPS. La configuración predominante emplea losas de hormigón con espesores de EPS que alcanzan un máximo de 16 cm, para garantizar la anulación de la demanda de calefacción observada en los individuos óptimos. La chapa galvanizada se elige como terminación.

Tabla 8.28: Individuos óptimos para Mendoza (Terminaciones y Orientación)

Individuos	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Orientación	146.20	26.33	32.56	160.09	25.49	25.68	168.48
Term. techo	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.
Term. muros	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca	Beige	Blanca	Beige

Tabla 8.29: Individuos óptimos para Mendoza (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías)

Individuos		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Muros (G1)	Ext.	LCT 8	LCT 8	LCT 8	LCM 5	LCT 12	LCT 12	LCM 5
	Aisl.	EPS 4	EPS 2	EPS 8	EPS 2	EPS 2	EPS 2	EPS 6
	Int.	S/L	LCT 12	S/L	LCM 5	LCM 5	LCM 12	LCM 12
	R	1.46	0.89	2.60	0.77	1.01	1.01	1.92
	K	0.69	1.13	0.38	1.29	0.99	0.99	0.52
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	C	B	B	B
Techo (G1)	Aisl.	EPS 6	EPS 6	EPS 6	EPS 12	EPS 4	EPS 6	EPS 16
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.82	1.82	1.82	3.54	1.25	1.82	4.68
	K	0.55	0.55	0.55	0.28	0.80	0.55	0.21
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	C	B	B
Piso (G1)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G1)	Tipo	DVH 3/6	VS 6	VS 6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 6/6
	U	2.72	5.89	5.89	2.72	2.72	2.72	2.56
	SHGC	0.76	0.91	0.91	0.76	0.76	0.76	0.76
Gal.	m	0.26	0.79	1.17	0.89	0.51	0.92	1.05
Muros (G2)	Ext.	LCP 12	LCM 5	LCT 12	LCM 12	LCM 5	LCP 12	LCM 20
	Aisl.	EPS 8	S/A	EPS 4	EPS 2	EPS 2	EPS 2	EPS 14
	Int.	LCT 8	LCT 12	LCT 12	LCT 8	LCT 8	LCM 5	LCM 5
	R	2.70	0.24	1.62	0.91	0.81	0.99	4.44
	K	0.37	4.14	0.62	1.10	1.23	1.01	0.23
	Nivel IRAM 11605	B	>c	B	B	C	B	A
Techo (G2)	Aisl.	EPS 6	EPS 2	EPS 2	EPS 8	S/A	EPS 2	EPS 10
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.82	0.68	0.68	2.39	0.11	0.68	2.96
	K	0.55	1.47	1.47	0.42	9.35	1.47	0.34
	Nivel IRAM 11605	B	>C	>C	B	>C	>C	B
Piso (G2)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	EPS 2	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.63	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G2)	Tipo	VS 6	VS 6	VS 6	DVH 3/6	DVH 3/6	VS 6	DVH 3/6
	U	5.89	5.89	5.89	2.72	2.72	5.89	2.72
	SHGC	0.91	0.91	0.91	0.76	0.76	0.91	0.76
Acrist. (G2)	Tipo	DVH 3/6	VS 6	DVH 3/13	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6
	U	2.72	5.89	2.67	2.72	2.72	2.72	2.72
	SHGC	0.76	0.91	0.70	0.76	0.76	0.76	0.76
Muros (G3)	Ext.	S/L	S/L	S/L	LCM 5	LCT 8	S/L	LCM 5
	Aisl.	EPS 8	EPS 8	EPS 10	EPS 8	EPS 8	EPS 8	EPS 8
	Int.	LCT 8	LCT 8	LCT 12	S/L	LCT 8	LCT 12	S/L
	R	2.40	2.40	2.97	2.47	2.58	2.40	2.47
	K	0.42	0.42	0.34	0.41	0.39	0.42	0.41
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Techo (G3)	Aisl.	EPS 6	EPS 4	EPS 4	EPS 6	EPS 8	EPS 4	EPS 6
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.82	1.25	1.25	1.82	2.39	1.25	1.82
	K	0.55	0.80	0.80	0.55	0.42	0.80	0.55
	Nivel IRAM 11605	B	C	C	B	B	C	B
Piso (G3)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	EPS 4	S/A	EPS 2	EPS 2	S/A	S/A	EPS 6
	R	1.21	0.06	0.63	0.63	0.06	0.06	1.78
Acrist. (G3)	Tipo	VS 3	VS 3	VS 6	DVH 3/6	VS 6	VS 6	DVH 3/6
	U	5.78	5.78	5.89	2.72	5.89	5.89	2.72
	SHGC	0.82	0.82	0.91	0.76	0.91	0.91	0.76
Aleros	m	0.23	0.53	0.45	0.56	0.50	0.53	0.55

- **Pisos:** Un factor diferencial es el tratamiento del suelo para mitigar el puente térmico mediante EPS con espesores de hasta 6 cm.

- **Acristalamientos:** El uso de DVH predomina en el área social (G_1). No obstante, se detectan decisiones estratégicas que mantienen el vidrio simple (VS). En los dormitorios (G_3), se alterna según la relación costo-beneficio de la captación diurna y retención térmica nocturna de cada caso.
- **Protecciones Solares:** Los dispositivos pasivos resultan determinantes para regular la carga de refrigeración. La profundidad de los aleros (G_3) oscila entre 0.23 m y 0.56 m, mientras que las galerías (G_1) fluctúan entre 0.26 m y 1.17 m. Estas dimensiones garantizan la autonomía térmica necesaria para evitar el sobrecalentamiento estival característico de la región.

En comparación con los estándares de la norma $IRAM$ 11605 para la zona, los individuos del conjunto logran situarse mayoritariamente dentro de los niveles de confort más exigentes. Incluso en las soluciones de menor inversión, la configuración técnica asegura el cumplimiento del Nivel B en locales de permanencia, garantizando un blindaje térmico que resulta determinante para anular casi por completo la demanda de calefacción invernal observada en los resultados. A pesar de que los niveles de la norma aseguran condiciones de habitabilidad, la optimización multiobjetivo demuestra ser una herramienta superior. Los resultados evidencian que el diseño mediante SBO es capaz de igualar la eficiencia de un estándar normativo máximo ($V2$) pero con un ahorro de capital superior al $35\,\%$, validando que la relación entre las variables de diseño pasivo es más efectiva que el simple incremento lineal de espesores de aislamiento.

Bahia Blanca, Buenos Aires.

La localidad de Bahía Blanca, presenta un desafío climático marcado por inviernos fríos y una constante exposición al viento. Los resultados de la optimización multiobjetivo (Figura 8.23) muestran que el compromiso entre el CI y el E_{total} evidencia que los estándares tradicionales resultan extremadamente ineficientes para climas templados-fríos. El modelo de referencia $V1$ tiene un consumo operativo superior a los $9\ 300$ kWh/año, mientras que el desemepeño del estándar normativo $V2$ es diez veces inferior (900 kWh/año). En contraste, la implementación de la SBO permite identificar soluciones de alta rentabilidad como el Individuo 1, que reduce la demanda a apenas $1\ 395$ kWh/año con una inversión mínima de $\$6\ 922$, logrando un ahorro del $82\,\%$ con menos de la mitad del capital de $V1$. Esta superioridad técnica se consolida en el Individuo 7, el cual supera el rendimiento de alta prestación del nivel normativo máximo al alcanzar consumos de ≈ 800 kWh/año con un ahorro de capital aproximado del $31\,\%$ respecto a $V2$.
A diferencia de otras latitudes, el desglose de la demanda E_{total} en Bahía Blanca muestra un balance totalmente volcado hacia la protección invernal. En el modelo $V1$, la E_{cal} alcanza niveles superiores a los $8\ 200$ kWh/año. La aplicación de estrategias pasivas optimizadas disminuye esta carga, situándola por debajo de los $1\ 400$ kWh/año desde la primera solución del conjunto. Por otro lado, la demanda de E_{ref} se mantiene constante y en niveles inferiores a la E_{cal}, generalmente

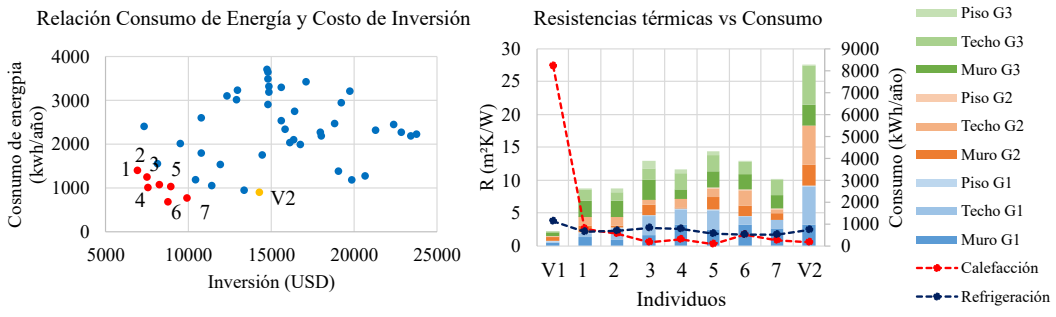


Figura 8.23: Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Bahia Blanca (Zona IVb)

por debajo de los 800 kWh/año, lo que confirma que el clima de la zona permite una gestión estival pasiva sumamente efectiva una vez que la envolvente ha sido correctamente aislada para el invierno.
La respuesta del algoritmo frente al clima regional se traduce en un incremento progresivo y estratégico de la capacidad de aislamiento de los componentes opacos. El análisis de las resistencias térmicas muestra que el crecimiento en los valores de R de techos y muros es el principal factor de eficiencia en todos los individuos óptimos. Asimismo, se destaca el rol fundamental del aislamiento de los pisos, en dormitorios específicamente, donde resulta indispensable para mitigar las pérdidas por conducción hacia el suelo.
El análisis de la relación entre el costo de inversión y la demanda energética discriminada en E_{cal} y E_{ref} (Figura 8.24) valida lo mencionado anteriormente. A lo largo del conjunto, se observa que mientras la E_{ref} llega a valores mínimos, el incremento estratégico del capital permite anular casi por completo el déficit invernal en los individuos de mayor inversión. Finalmente, la comparación con el estándar $V2$ es contundente: no solo se alcanza un consumo total similar o inferior, sino que se logra con un ahorro de inversión cercano al 30 %, validando que la optimización de la envolvente es la vía más efectiva para neutralizar las características climáticas con mínima inversión.

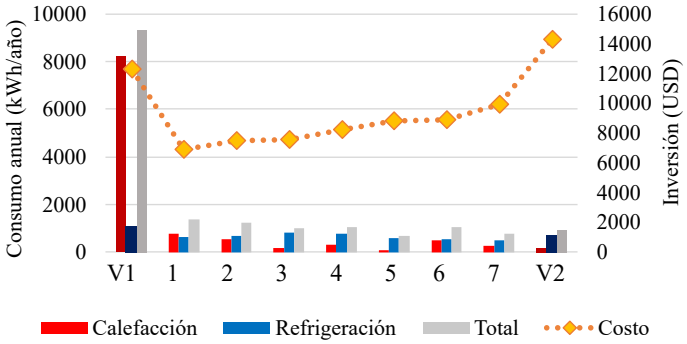


Figura 8.24: Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Bahia Blanca (Zona IVb)

De acuerdo con las Tablas 8.30 y 8.31, los resultados de la optimización se fundamenta en el la capacidad de los cerramientos para mitigar las pérdidas por conducción y el impacto del viento.

- **Orientación:** Los valores obtenidos se sitúan en un rango que va desde los $105.41°$ hasta los $165.04°$. Esto significa que el Sector Social (G_1) de la vivienda se orienta predominantemente hacia el Este-Sudeste (ESE) y el Sur-Sudeste (SSE).
- **Muros:** Existe una tendencia marcada hacia el uso de mampostería de LCT y LCP con espesores de EPS que alcanzan los 10 cm.
- **Techos:** El espesor de aislante llega a 10 cm. Esta configuración permiten desacoplar eficazmente la masa térmica interior de las bajas temperaturas exteriores, garantizando la estabilidad térmica del prototipo.
- **Pisos:** El desacople del piso de la vivienda respecto al suelo de logra al incorporan aislación de EPS de 2 a 4 cm, una estrategia esencial para evitar el puente térmico con el terreno y mejorar la autonomía térmica durante el invierno.
- **Acristalamientos:** El DVH se establece como el estándar técnico desde los niveles medios de inversión para reducir las pérdidas a través de las superficies vidriadas.
- **Protecciones solares:** Las galerías en el Sector Social (G_1) presentan profundidades de hasta 1.57 m, actuando como barreras físicas contra los vientos predominantes y regulando la incidencia solar. Los aleros en dormitorio alcanzan longitudes de 0.48 m.

Tabla 8.30: Individuos óptimos para Bahia Blanca (Terminaciones y Orientación)

Individuos	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Orientación	105.41	156.81	146.17	133.36	165.04	152.79	164.98
Term. techo	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Gris Sil	Ch. Cinc.	Ch. Gris Sil	Ch. Galv.	Ch. Galv.
Term. muros	Blanca	Beige	Beige	Blanca	Blanca	Blanca	Beige

Tabla 8.31: Individuos óptimos para Bahia Blanca (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías)

Individuos		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Muros (G1)	Ext.	S/L	LCT 8	LCT 12	LCT 8	LCM 5	LCT 8	LCP 12
	Aisl.	EPS 4	EPS 2	EPS 4	EPS 10	EPS 8	EPS 10	EPS 8
	Int.	LCT 8	LCT 8	LCM 5	LCT 8	LCM 5	LCT 12	LCT 12
	R	1.31	0.92	1.61	3.20	2.52	3.20	2.70
	K	0.76	1.09	0.62	0.31	0.40	0.31	0.37
Techo (G1)	Aisl.	EPS 2	EPS 6	EPS 10	EPS 8	EPS 10	EPS 4	EPS 4
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	0.68	1.82	2.96	2.39	2.96	1.25	1.25
	K	1.47	0.55	0.34	0.42	0.34	0.80	0.80
Piso (G1)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G1)	Tipo	VS 3	VS 6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	VS 6	DVH 3/6
	U	5.78	5.89	2.72	2.72	2.72	5.89	2.72
	SHGC	0.82	0.91	0.76	0.76	0.76	0.91	0.76
Gal.	m	1.16	0.74	0.61	1.03	1.06	1.57	1.38
Muros (G2)	Ext.	LCT 12	LCT 8	LCT 12	LCM 5	LCM 5	LCP 12	LCT 8
	Aisl.	EPS 2	S/A	EPS 4	S/A	EPS 6	EPS 4	EPS 2
	Int.	LCT 8	LCT 12	LCT 8	LCT 8	LCM 12	LCT 8	LCM 5
	R	1.06	0.37	1.63	0.25	1.97	1.57	0.94
	K	0.94	2.74	0.61	3.93	0.51	0.64	1.07
	Nivel IRAM 11605	C	>C	B	>C	B	B	B
Techo (G2)	Aisl.	EPS 4	EPS 4	EPS 2	EPS 4	EPS 4	EPS 8	EPS 2
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.25	1.25	0.68	1.25	1.25	2.39	0.68
	K	0.80	0.80	1.47	0.80	0.80	0.42	1.47
	Nivel IRAM 11605	C	C	>C	C	C	B	>C
Piso (G2)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G2)	Tipo	VS 6	VS 6	VS 6	VS 6	DVH 3/6	VS 6	DVH 6/6
	U	5.89	5.89	5.89	5.89	2.72	5.89	2.56
	SHGC	0.91	0.91	0.91	0.91	0.76	0.91	0.76
Acrist. (G2)	Tipo	VS 3	VS 6	VS 6	VS 6	DVH 3/6	VS 3	VS 3
	U	5.78	5.89	5.89	5.89	2.72	5.78	5.78
	SHGC	0.82	0.91	0.91	0.91	0.76	0.82	0.82
Muros (G3)	Ext.	S/L	S/L	S/L	LCT 8	LCT 8	S/L	LCT 8
	Aisl.	EPS 8	EPS 8	EPS 10	EPS 4	EPS 8	EPS 8	EPS 6
	Int.	LCT 8	LCT 8	S/L	S/L	S/L	LCT 8	LCM 5
	R	2.41	2.41	2.99	1.45	2.59	2.41	2.02
	K	0.41	0.41	0.33	0.69	0.39	0.41	0.49
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Techo (G3)	Aisl.	EPS 6	EPS 4	EPS 6	EPS 8	EPS 8	EPS 6	EPS 8
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.82	1.25	1.82	2.39	2.39	1.82	2.39
	K	0.55	0.80	0.55	0.42	0.42	0.55	0.42
	Nivel IRAM 11605	B	C	B	B	B	B	B
Piso (G3)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	EPS 2	EPS 4	EPS 2	EPS 2	S/A	S/A
	R	0.06	0.63	1.21	0.63	0.63	0.06	0.06
Acrist. (G3)	Tipo	VS 6	VS 3	VS 3	VS 6	VS 3	VS 6	VS 3
	U	5.89	5.78	5.78	5.89	5.78	5.89	5.78
	SHGC	0.91	0.82	0.82	0.91	0.82	0.91	0.82
Aleros	m	0.29	0.39	0.45	0.37	0.48	0.46	0.37

Según el análsis de resultados, la metodología SBO en Bahía Blanca logra un desempeño superior al gestionar la vivienda como un sistema térmico integrado, donde la orientación y la resistencia de la envolvente trabajan en absoluta sinergia. En lugar de buscar la captación solar directa, el algoritmo prioriza una estrategia orientando las fachadas principales hacia el sector Este-Sudeste y Sur-Sudeste. Esta decisión anula prácticamente la demanda de refrigeración y permite concentrar

todos los recursos del diseño en retener el calor en invierno. Al compensar la falta de sol con un aislamiento estratégico, la SBO logra que la carga de calefacción disminuya considerablemente en las soluciones óptimas, garantizando una estabilidad térmica interior con el menor consumo posible. En cuanto a los valores de transmitancia térmica K alcanzados por el conjunto, se demuestra que la optimización es la vía más eficiente al superar las exigencias de la $IRAM$ 11605. Esto confirma que la metodología no solo satisface los umbrales legales, sino que identifica las configuraciones exactas donde el aislamiento rinde su máximo beneficio económico y energético, superando incluso las prestaciones del modelo de alta prestación $V2$ con una inversión significativamente menor.

8.6.6. Zona V: Fría

Comodoro Rivadavia, Chubut.

La localidad de Comodoro Rivadavia es uno de los escenarios más exigentes para el diseño de la envolvente en el territorio argentino. La temperaturas bajas y la influencia de vientos constantes impone un régimen donde la conservación del calor es la prioridad. Los resultados de la SBO (Figura 8.25) muestran un salto cualitativo respecto a $V1$ y $V2$. El $V1$, con una demanda anual que alcanza los 13 811 kWh/año, es crítico, ya que resulta incapaz de mitigar las pérdidas térmicas, derivando en un consumo energético que triplica el promedio de otras zonas templadas. El modelo $V2$ logra el mínimo de consumo (630 kWh/año), aunque a costa de una inversión de \$14 288.
Las soluciones óptimas demuestran una eficiencia económica sobresaliente frente a estos extremos. El Individuo 1, requiere un CI de \$6 786 para reducir el consumo de E_{total} a 1 305 kWh/año. Esto representa un ahorro energético del 90 % respecto a $V1$ con una inversión un 44 % menor. Por otra parte, el Individuo 7, alcanza niveles de alta prestación (912 kWh/año) con una inversión de \$9 972. Este resultado logra un ahorro de capital del 30 % respecto a la referencia $V2$ para un desempeño térmico virtualmente equivalente, validando la capacidad del algoritmo para optimizar recursos donde el estándar tradicional simplemente añade material.

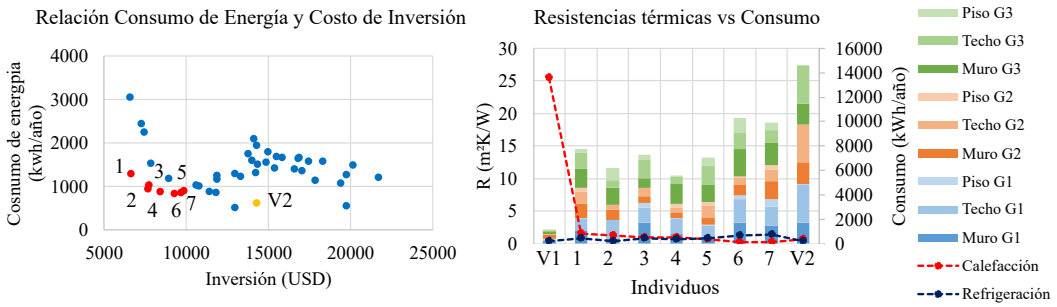


Figura 8.25: Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Comodoro Rivadavia (Zona V)

El balance térmico, Figura 8.26, está regido por la demanda de E_{cal}. En el modelo de referencia $V1$, la carga invernal representa el 98 % del consumo total, alcanzando valores de aproximadamente 13 580 kWh/año. La metodología SBO logra una disminución considerable de esta demanda. A diferencia de las zonas templadas analizadas previamente, aquí la carga de refrigeración es prácticamente inexistente en todos los individuos óptimos (< 100 kWh/año). Este fenómeno confirma que, en climas fríos con influencia del viento, cada \$ invertido en la resistencia térmica de la envolvente se traduce en una reducción directa del requerimiento de calefacción, eliminando casi por completo la necesidad de enfriamiento mecánico.
Según los resultados obtenidos de la Tablas 8.32 y 8.33, la optimización se fundamenta en el confinamiento térmico del prototipo.

- **Orientación:** Las soluciones tienden a orientarse en el cuadrante Este-Sudeste (116° a

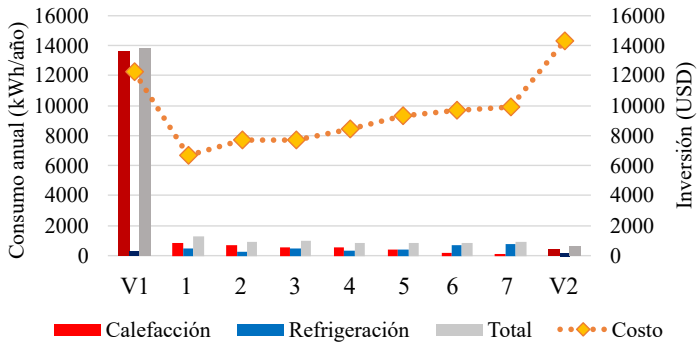


Figura 8.26: Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Comodoro Rivadavia (Zona V)

172°).

- **Muros y Techos:** Los espesores de aislante se acercan a los valores máximos definidos para la investigación. En muros, se emplean hasta 14 cm de EPS. En cubiertas, incorpora 20 cm de EPS.
- **Pisos:** Todos los individuos tiene aislación de EPS en pisos por debajo de a LHA, con espesores entre 2 y 8 cm.
- **Acristalamientos:** El uso de DVH es la estrategia para mitigar las pérdidas por acristalamientos, asegurando que las superficies vidriadas no comprometan el balance energético global.
- **Protección solar:** La protección sola es muy baja, con galerías que no superan el largo de 1 m y aleros de 0.50 como máximo.

Al contrastar los resultados con la norma $IRAM$ 11605, los individuos óptimos alcanzan varios niveles de la $IRAM$ 11605 tanto en techos como en muros. Esto demuestra que la SBO converge de manera natural hacia las soluciones de alta eficiencia exigidas por normativa: la penalización económica de un diseño ineficiente es tan alta que el algoritmo prioriza la inversión en la envolvente para minimizar el costo operativo a largo plazo.

Tabla 8.32: Individuos óptimos para Comodoro Rivadavia (Terminaciones y Orientación)

Individuos	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Orientación	116.46	138.76	152.94	172.78	159.30	139.12	270.00
Term. techo	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Cinc.	Ch. Galv.	Ch. Gris Sil	Ch. Galv.	Ch. Galv.
Term. muros	Beige	Blanca	Beige	Beige	Beige	Blanca	Blanca

Tabla 8.33: Individuos óptimos para Comodoro Rivadavia (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías)

Individuos		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Muros (G1)	Ext.	LCT 8	S/L	LCT 8	LCT 8	LCT 12	LCT 12	LCP 12
	Aisl.	EPS 6	EPS 2	EPS 10	EPS 4	EPS 2	EPS 10	EPS 10
	Int.	S/L	LCT 12	S/L	LCT 8	LCT 12	LCM 5	LCP 12
	R	2.04	0.72	3.19	1.47	1.02	3.31	3.25
	K	0.48	1.37	0.31	0.67	0.97	0.30	0.30
	Nivel IRAM 11605	B	B	A	B	B	A	A
Techo (G1)	Aisl.	EPS 6	EPS 10	EPS 8	EPS 8	EPS 6	EPS 12	EPS 20
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.82	2.96	2.39	2.39	1.82	3.53	5.82
	K	0.54	0.33	0.41	0.41	0.54	0.28	0.17
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	A	A
Piso (G1)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	S/A	EPS 2	S/A	S/A	EPS 2	S/A
	R	0.06	0.06	0.63	0.06	0.06	0.63	0.06
Acrist. (G1)	Tipo	VS 6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 6/13
	U	5.89	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.511
	SHGC	0.91	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.70
Gal.	m	0.59	0.99	0.80	0.55	0.75	1.33	0.2
Muros (G2)	Ext.	LCT 12	LCT 8	LCT 12	LCT 8	LCT 12	LCT 8	LCP 12
	Aisl.	EPS 6	EPS 4	EPS 2	EPS 2	EPS 2	EPS 4	EPS 10
	Int.	LCM 5	LCP 12	LCT 8	LCT 8	LCM 12	LCP 12	LCP 12
	R	2.22	1.53	1.08	0.95	1.08	1.53	3.30
	K	0.44	0.65	0.92	1.04	0.92	0.65	0.30
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Techo (G2)	Aisl.	EPS 6	EPS 2	EPS 4	EPS 2	EPS 6	EPS 4	EPS 20
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.82	0.67	1.24	0.67	1.82	1.24	5.82
	K	0.54	1.47	0.80	1.47	0.54	0.80	0.17
	Nivel IRAM 11605	B	>C	C	>C	B	C	A
Piso (G2)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	EPS 2	S/A	S/A	EPS 2	EPS 2	S/A	S/A
	R	0.63	0.06	0.06	0.63	0.63	0.06	0.06
Acrist. (G2)	Tipo	VS 6	VS 3	VS 6	DVH 3/6	DVH 3/6	VS 3	DVH 6/13
	U	5.89	5.78	5.89	2.72	2.72	5.78	2.511
	SHGC	0.91	0.81	0.91	0.76	0.76	0.81	0.704
Acrist. (G2)	Tipo	VS 6	VS 3	VS 3	DVH 3/6	VS 6	VS 3	DVH 6/13
	U	5.89	5.78	5.78	2.72	5.89	5.78	2.511
	SHGC	0.91	0.81	0.81	0.76	0.91	0.81	0.704
Muros (G3)	Ext.	S/L	LCT 8	LCT 8	S/L	LCT 8	LCT 8	LCP 12
	Aisl.	EPS 10	EPS 8	EPS 4	EPS 10	EPS 8	EPS 14	EPS 10
	Int.	S/L	S/L	S/L	LCT 12	S/L	S/L	LCP 12
	R	2.95	2.55	1.41	2.95	2.55	4.27	3.19
	K	0.33	0.39	0.70	0.33	0.39	0.23	0.31
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	A	A
Techo (G3)	Aisl.	EPS 8	EPS 4	EPS 10	EPS 4	EPS 10	EPS 8	EPS 20
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	2.39	1.24	2.96	1.24	2.96	2.39	5.82
	K	0.41	0.80	0.33	0.80	0.33	0.41	0.17
	Nivel IRAM 11605	B	C	B	C	B	B	A
Piso (G3)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	EPS 2	EPS 6	EPS 2	S/A	EPS 4	EPS 8	S/A
	R	0.63	1.77	0.63	0.06	1.20	2.34	0.06
Acrist. (G3)	Tipo	VS 3	VS 6	VS 3	VS 6	DVH 3/6	VS 6	DVH 6/13
	U	5.78	5.89	5.78	5.89	2.72	5.89	2.511
	SHGC	0.81	0.91	0.81	0.91	0.76	0.91	0.704
Aleros	m	0.51	0.18	0.42	0.24	0.27	0.30	0.2

8.6.7. Zona VI: Muy Fría

San Carlos de Bariloche, Río Negro.

Según la comparativa entre el CI y la E_{total} en Bariloche, el modelo de referencia $V1$, demanda de E_{cal} de aproximadamente 29 000 kWh/año lo que es inviable en esta zona, mientras que la optimización identifica soluciones rentables para la zona. Con la mínima inversión ($7 941) se logra minimizar la demanda a solo 1 658 kWh/año. Esta superioridad metodológica se confirma al observar que con la máxima inversión ($10 365) no solo consume un 28 % menos que el estándar normativo máximo $V2$ ($\approx$ 1 000 vs. 1 400 kWh/año), sino que lo hace con un ahorro de inversión superior a los $4 300, validando la capacidad de la SBO para generar soluciones de alta prestación a un costo significativamente menor.

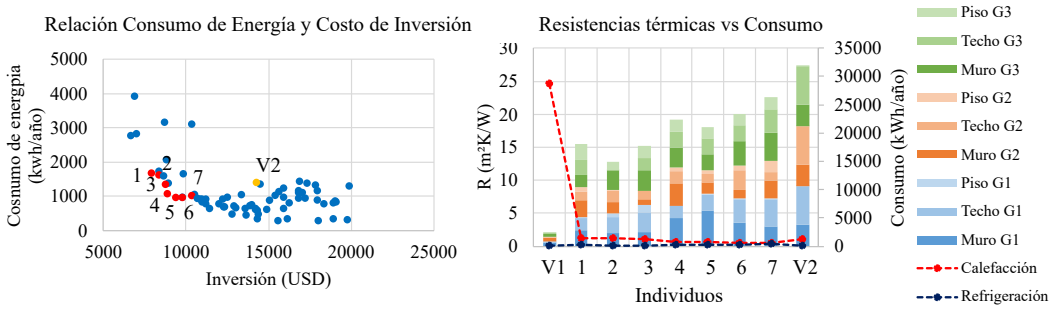


Figura 8.27: Relación entre el CI y el consumo E_{total} para San Carlos de Bariloche (Zona VI)

El balance energético está condicionado de forma absoluta por el la demanda E_{cal}, siendo el único componente crítico del diseño. Los resultados muestran que la demanda E_{cal} representa el 100 % de la demanda operativa. El algoritmo de optimización logra un consumo en torno a los 1 000 kWh/año en los individuos del conjunto. Asimismo, la demanda de refrigeración es mínima en todos los casos analizados, lo que indica que en climas fríos el esfuerzo debe centrarse íntegramente en la conservación de la energía interna y la captación solar.

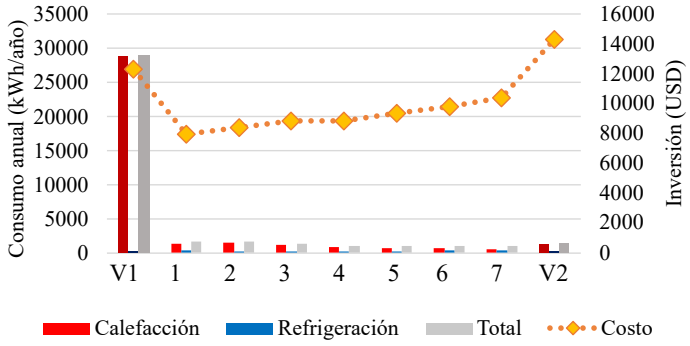


Figura 8.28: Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para San Carlos de Bariloche (Zona VI)

De acuerdo con los datos de las Tablas 8.34 y 8.35, las soluciones óptimas se basan en el confinamiento térmico, priorizando la reducción de las pérdidas por conducción.

- **Orientación y Color:** Existe una preferencia marcada por orientaciones en el cuadrante Sur-Sudeste (160° a 187°). Asimismo, se opta por muros en tonalidades beige y techos de chapa gris silver, buscando un equilibrio entre la absorción solar necesaria y la protección frente a la radiación térmica.

Tabla 8.34: Individuos óptimos para San Carlos de Bariloche (Terminaciones y Orientación)

Individuos	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Orientación	187.46	160.84	187.02	226.08	213.39	174.29	164.95
Term. techo	Ch. Gris Sil.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Gris Sil.	Ch. Gris Sil.
Term. muros	Beige	Beige	Blanca	Blanca	Blanca	Beige	Beige

Tabla 8.35: Individuos óptimos para San Carlos de Bariloche (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías)

Individuos		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Muros (G1)	Ext.	LCM 5	LCT 8	LCT 12	LCT 8	LCT 8	LCM 5	LCM 5
	Aisl.	EPS 8	EPS 6	EPS 6	EPS 14	EPS 18	EPS 12	EPS 10
	Int.	S/L	LCM 5	LCM 5	LCM 5	LCM 5	LCT 8	LCM 5
	R	2.48	2.02	2.14	4.30	5.45	3.62	3.05
	K	0.40	0.50	0.47	0.23	0.18	0.28	0.33
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	A	A	B	B
Techo (G1)	Aisl.	EPS 6	EPS 8	EPS 10	EPS 6	EPS 8	EPS 12	EPS 14
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.82	2.39	2.96	1.82	2.39	3.54	4.11
	K	0.55	0.42	0.34	0.55	0.42	0.28	0.24
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Piso (G1)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	S/A	EPS 2	EPS 4	S/A	S/A	S/A	S/A
	R	0.06	0.63	1.21	0.06	0.06	0.06	0.06
Acrist. (G1)	Tipo	DVH 3/6	DVH 6/6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6
	U	2.72	2.56	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72
	SHGC	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
Gal.	m	1.01	1.49	0.87	0.89	1.04	1.40	1.63
Muros (G2)	Ext.	LCP 12	LCT 12	LCM 5	LCT 12	LCP 18	LCM 5	LCT 12
	Aisl.	EPS 8	EPS 4	EPS 2	EPS 10	EPS 4	EPS 4	EPS 8
	Int.	S/L	LCM 5	LCT 8	LCM 12	LCT 12	LCT 12	LCM 5
	R	2.67	1.59	0.78	3.30	1.74	1.35	2.73
	K	0.37	0.63	1.28	0.30	0.58	0.74	0.37
	Nivel IRAM 11605	B	B	C	B	B	C	B
Techo (G2)	Aisl.	EPS 4	EPS 6	EPS 4	EPS 6	EPS 4	EPS 10	EPS 4
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.25	1.82	1.25	1.82	1.25	2.96	1.25
	K	0.80	0.55	0.80	0.55	0.80	0.34	0.80
	Nivel IRAM 11605	C	B	C	B	C	B	C
Piso (G2)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	EPS 2	S/A	S/A	EPS 2	EPS 2	EPS 2	EPS 6
	R	0.63	0.06	0.06	0.63	0.63	0.63	1.78
Acrist. (G2)	Tipo	VS 6	DVH 3/6	VS 6	VS 3	DVH 3/6	VS 6	DVH 6/6
	U	5.89	2.72	5.89	5.78	2.72	5.89	2.56
	SHGC	0.91	0.76	0.91	0.82	0.76	0.91	0.76
Acrist. (G2)	Tipo	DVH 6/6	DVH 6/6	DVH 6/6	VS 6	DVH 3/6	DVH 6/6	DVH 6/6
	U	2.56	2.56	2.56	5.89	2.72	2.56	2.56
	SHGC	0.76	0.76	0.76	0.91	0.76	0.76	0.76
Muros (G3)	Ext.	S/L	S/L	LCT 8	LCM 5	S/L	LCT 8	LCT 8
	Aisl.	EPS 6	EPS 10	EPS 10	EPS 10	EPS 8	EPS 12	EPS 14
	Int.	LCT 8	S/L	S/L	S/L	LCT 8	S/L	S/L
	R	1.82	2.96	3.14	3.03	2.39	3.71	4.28
	K	0.55	0.34	0.32	0.33	0.42	0.27	0.23
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	A
Techo (G3)	Aisl.	EPS 8	S/A	EPS 6	EPS 8	EPS 8	EPS 8	EPS 12
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	2.39	0.11	1.82	2.39	2.39	2.39	3.54
	K	0.42	9.35	0.55	0.42	0.42	0.42	0.28
	Nivel IRAM 11605	B	>C	B	B	B	B	B
Piso (G3)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	EPS 8	EPS 4	EPS 6	EPS 6	EPS 6	EPS 6	EPS 6
	R	2.35	1.21	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78
Acrist. (G3)	Tipo	VS 6	VS 3	VS 6	VS 6	VS 3	DVH 3/6	VS 6
	U	5.89	5.78	5.89	5.89	5.78	2.72	5.89
	SHGC	0.91	0.82	0.91	0.91	0.82	0.76	0.91
Aleros	m	0.40	0.41	0.26	0.31	0.39	0.34	0.47

- **Muros, Techos y Pisos:** Los espesores de aislante alcanzan los valores más elevados de todo el estudio. En muros del Sector Social (G_1), se emplean hasta 18 cm de EPS. En cubiertas,

el aislamiento llega a los 14 cm de EPS, garantizando una envolvente capaz de mitigar el flujo térmico hacia el exterior. El aislamiento del piso con el suelo es integral. En el sector de dormitorios (G_3), se observan espesores de hasta 8 cm de EPS. Dicha configuración es crucial para mitigar la transferencia de calor por conducción hacia el suelo; al anular este flujo constante durante el periodo invernal, se logra mantener la temperatura interior y mejorar el confort higrotérmico del local.

- **Acristalamientos:** El DVH se consolida como el estándar para el sector social (G_1).
- **Protecciones solares:** Los aleros son pequeños, alcanzado una dimensión de 0.5 m, y la galería un máximo de 1.5 m. esta garantiza la captación solar para mitigar el frío invernal.

Al contrastar los resultados de la optimización con las exigencias de la norma $IRAM$ 11605, se observa que las soluciones para Bariloche alcanzan los estándares elevados de la norma. Este cumplimiento no es un objetivo impuesto de manera externa, sino una consecuencia directa del flujo SBO. Esto valida que, en climas muy fríos, el equilibrio entre la inversión inicial y el ahorro a largo plazo solo es posible mediante envolventes que minimicen radicalmente las pérdidas por conducción, garantizando la habitabilidad incluso bajo condiciones climáticas críticas.

Ushuaia, Tierra del Fuego.

La complejidad del diseño en latitudes extremas se ve al analizar los resultados de Ushuaia. Mientras el modelo de referencia $V1$ exige un consumo operativo insostenible de 42 000 kWh/año para mantener el confort, la optimización minimiza el consumo desde su primera solución. El Individuo 1, con una inversión de apenas \$7 7150 logra un consumo de \$2 980 kWh/año demostrando que es posible disminuir simultáneamente los CI y la demanda E_{total}. Esta lógica se consolida en el Individuo 7, el cual, con una inversión de \$11 120, alcanza una eficiencia operativa un 58 % superior al estándar normativo máximo $V2$. Este hallazgo confirma que la metodología SBO permite alcanzar niveles de ahorro que los enfoques tradicionales no logran identificar.
En términos de perfil de demanda, el diseño de la vivienda en está regido por la necesidad de calefacción, dada la severidad del clima austral. La carga de calefacción constituye la totalidad del E_{total} de la vivienda. La intervención de la metodlogía SBO logra una estanqueidad energética que reduce el consumo de calefacción a valores por debajo del consumo del $V1$ que cumple el nivel B de la $IRAM$ 11605. La refrigeración se mantiene en un cero operativo absoluto en todos los casos, validando que en estas latitudes el esfuerzo proyectual debe concentrarse exclusivamente en la retención del calor interior y la neutralización de las pérdidas hacia el entorno.

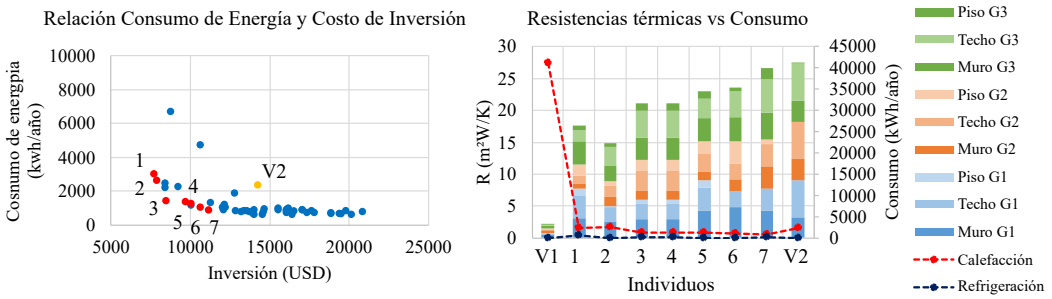


Figura 8.29: Relación entre el CI y el consumo E_{total} para Ushuaia (Zona VI)

El desglose de la demanda (Figura 8.30) confirma que en Ushuaia el balance energético está regido de forma absoluta por los requerimientos de calefacción (E_{cal}). La optimización multiobjetivo logra una disminución considerable de estos indicadores, demostrando que en este clima la inversión en la envolvente presenta la mayor tasa de retorno energético de todo el territorio nacional.

Debido a la persistencia de bajas temperaturas constantes. Esta particularidad climática permite que el algoritmo concentre el 100 % de las estrategias en la conservación del calor, transformando al prototipo en una barrera térmica altamente eficiente.

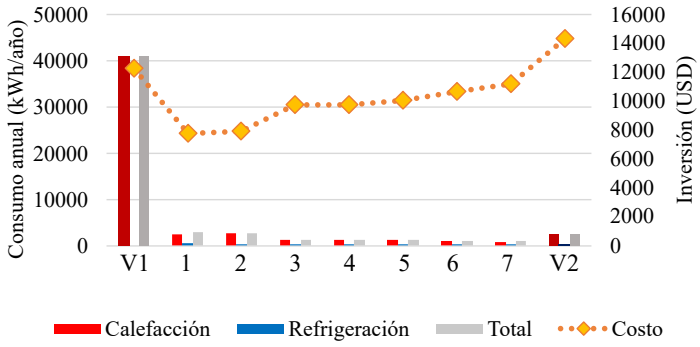


Figura 8.30: Análisis de CI y consumo E_{cal} y E_{ref} anual para Ushuaia (Zona VI)

Según las características de cada individuo mostradas en las Tablas 8.36 y 8.37, se puede concluir que:

- **Orientación:** Existe una dualidad en las soluciones, polarizándose hacia el Noreste (49°) y el Sur-Sudoeste (180° a 226°). Esta estrategia busca equilibrar la captación solar directa durante las escasas horas de insolación con la protección de las mayores superficies vidriadas frente a los vientos persistentes y agresivos del Sudoeste.
- **Envolvente Opaca:** En cubiertas el espesor de EPS alcanza 18. En muros, se utilizan espesores de entre 10 y 16 cm. La aislación del piso es una constante: los individuos incorporan entre 2 y 6 cm de EPS en todas las zonas térmicas, fundamental para desacoplar el interior y evitar pérdidas de calor manteniendo el confort.
- **Acristalamientos:** El DVH es el estándar base de todo el conjunto. La transición hacia esta tecnología desde el primer individuo evidencia que el VS es identificado por la SBO como el componente de mayor vulnerabilidad energética.
- **Protecciones solares:** En esta zona, las dimensiones de aleros y galerías son mínimas, garantizando una adecuada captación solar en los momentos disponibles.

Al realizar una comparativa entre la transmitancia térmica obtenida mediante la SBO en Ushuaia y los estándares de la norma $IRAM$ 11605, se observa que las soluciones óptimas se posicionan naturalmente en las exigencias de la normativa. El Individuo 7 presenta valores de K significativamente inferiores a los umbrales del Nivel A. Resulta notable que el diseño optimizado iguale estos parámetros, ya que muestra que alcanzar estos coeficientes de transferencia no es solo un objetivo reglamentario, sino una condición física esencial para garantizar la habitabilidad y la viabilidad económica del prototipo VERA. El ahorro operativo resultante valida la inversión inicial en la envolvente, consolidando un modelo de baja consumo energético en el extremo sur.

Tabla 8.36: Individuos óptimos para Ushuaia (Terminaciones y Orientación)

Individuos	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Orientación	96.27	49.01	181.98	181.98	205.51	226.33	200.13
Term. techo	Ch. Cinc.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Galv.	Ch. Gris Piz.
Term. muros	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca	Blanca	Beige	Beige

Tabla 8.37: Individuos óptimos para Ushuaia (Materiales y Dimensiones de aleros y galerías)

Individuos		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Muros (G1)	Ext.	LCM 5	LCM 5	S/L	S/L	LCT 8	LCT 8	LCM 5
	Aisl.	EPS 10	EPS 8	EPS 10	EPS 10	EPS 14	EPS 16	EPS 14
	Int.	S/L	S/L	LCT 12	LCT 12	LCT 8	LCM 5	LCM 5
	R	3.07	2.50	3.00	3.00	4.32	4.90	4.21
	K	0.33	0.40	0.33	0.33	0.23	0.20	0.24
	Nivel IRMA 11605	B	B	B	B	B	A	B
Techo (G1)	Aisl.	EPS 12	EPS 8	EPS 8	EPS 8	EPS 12	EPS 8	EPS 12
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	3.54	2.39	2.39	2.39	3.54	2.39	3.54
	K	0.28	0.42	0.42	0.42	0.28	0.42	0.28
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Piso (G1)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	EPS 4	S/A	EPS 2	EPS 2	EPS 4	S/A	S/A
	R	1.21	0.06	0.63	0.63	1.21	0.06	0.06
Acrist. (G1)	Tipo	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6
	U	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72
	SHGC	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
Gal.	m	1.05	1.19	1.34	1.34	1.55	0.96	1.58
Muros (G2)	Ext.	S/L	LCT 8	LCM 12	LCM 12	S/L	LCM 5	LCP 18
	Aisl.	EPS 2	EPS 4	EPS 4	EPS 4	EPS 4	EPS 6	EPS 10
	Int.	LCM 5	LCT 8	LCT 8	LCT 8	LCM 5	LCT 12	LCM 5
	R	0.72	1.47	1.45	1.45	1.29	1.93	3.46
	K	1.39	0.68	0.69	0.69	0.77	0.52	0.29
	Nivel IRAM 11605	>C	C	C	C	C	B	B
Techo (G2)	Aisl.	EPS 4	EPS 6	EPS 10	EPS 10	EPS 10	EPS 8	EPS 12
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.25	1.82	2.96	2.96	2.96	2.39	3.54
	K	0.80	0.55	0.34	0.34	0.34	0.42	0.28
	Nivel IRAM 11605	C	B	B	B	B	B	B
Piso (G2)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	EPS 6	EPS 2	EPS 6	EPS 6	EPS 6	EPS 12	EPS 2
	R	1.78	0.63	1.78	1.78	1.78	3.49	0.63
Acrist. (G2)	Tipo	DVH 6/6	VS 6	VS 3	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6	DVH 3/6
	U	2.56	5.89	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72
	SHGC	0.76	0.91	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
Acrist. (G2)	Tipo	VS 6	VS 6	DVH 3/6	DVH 3/6	VS 6	VS 6	DVH 3/6
	U	5.89	5.89	2.72	2.72	5.89	5.89	2.72
	SHGC	0.91	0.91	0.76	0.76	0.91	0.91	0.76
Muros (G3)	Ext.	S/L	S/L	S/L	S/L	LCT 8	LCT 8	LCM 5
	Aisl.	EPS 12	EPS 8	EPS 12	EPS 12	EPS 12	EPS 12	EPS 14
	Int.	S/L	LCT 8	LCT 8	LCT 8	S/L	LCT 8	LCM 5
	R	3.58	2.44	3.58	3.58	3.76	3.76	4.22
	K	0.28	0.41	0.28	0.28	0.27	0.27	0.24
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Techo (G3)	Aisl.	EPS 6	EPS 10	EPS 14	EPS 14	EPS 10	EPS 14	EPS 18
	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	R	1.82	2.96	4.11	4.11	2.96	4.11	5.25
	K	0.55	0.34	0.24	0.24	0.34	0.24	0.19
	Nivel IRAM 11605	B	B	B	B	B	B	B
Piso (G3)	Losa	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA	LHA
	Aisl.	EPS 2	EPS 2	EPS 4	EPS 4	EPS 4	EPS 2	EPS 6
	R	0.63	0.63	1.21	1.21	1.21	0.63	1.78
Acrist. (G3)	Tipo	VS 3	VS 3	VS 6	VS 6	VS 3	DVH 3/6	VS 6
	U	5.78	5.78	5.89	5.89	5.78	2.72	5.89
	SHGC	0.82	0.82	0.91	0.91	0.82	0.76	0.91
Aleros	m	0.41	0.32	0.32	0.32	0.47	0.24	0.55

8.6.8. Análisis comparativo de desempeño térmico de VERA 2 vs el Individuo Óptimo por zona

Tras el análisis detallado de la relación entre el CI, la demanda de E_{total}, E_{cal} y E_{ref}, y las características de la vivienda para cada zona, esta sección se propone integrar los hallazgos mediante un estudio comparativo de la respuesta térmica del prototipo $V2$ y el individuo óptimo de cada ciudad. El objetivo es identificar patrones de desempeño de una vivienda diseñada para satisfacer el Nivel A de la $IRAM$ 11605 y soluciones obtenidas mediante la metodología SBO.

Zona I: Rivadavia e Iguazú

En la Figura 8.31, se muestran los flujos de calor por elemento para el mes de Enero y Julio del prototipo $V2$ y el Individuo 7, considerado óptimo para la localidad de Rivadavia. Se puede ver que el Individuo 7 optimiza el balance térmico anual al maximizar la captación solar pasiva en invierno y utilizar el piso como un disipador de calor hacia el terreno durante el verano.

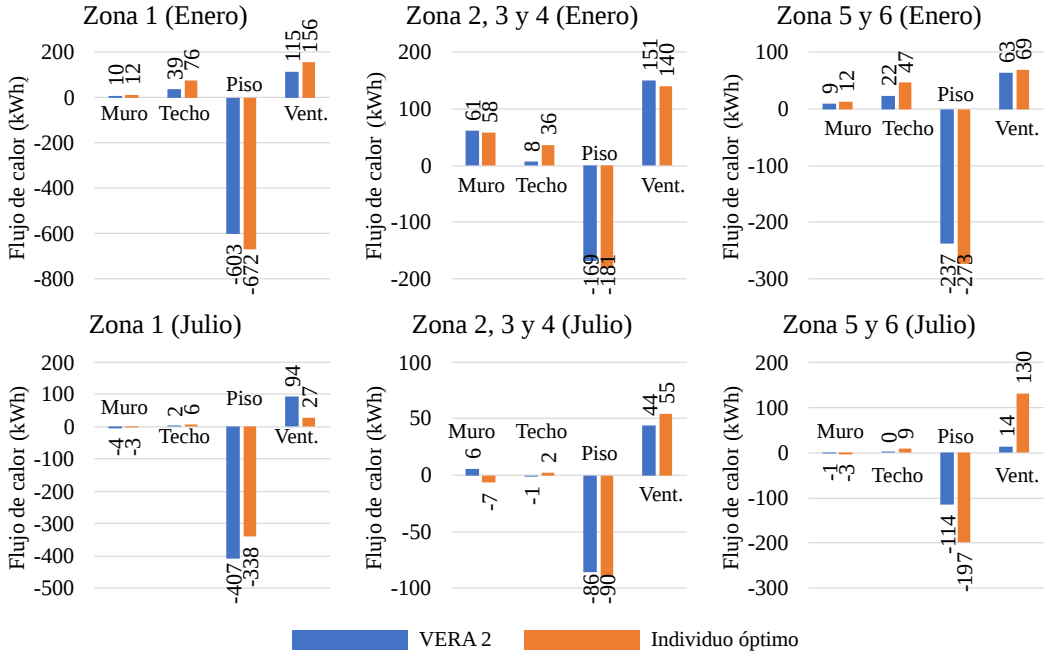


Figura 8.31: Balance térmico en Enero y Julio para Rivadavia (Zona Ia)

- En la Zona 1 (G_1) el Individuo 7, durante el mes de Enero, el intercambio de calor es mayor que $V2$. Registra un aumento significativo en las ganancias por techo (76.24 kWh frente a 39.37 kWh) y por ventanas (156.15 kWh frente a 115.05 kWh). Sin embargo, compensa este ingreso de calor con una mayor pérdida a través del piso (-672.20 kWh), lo que sugiere que utiliza el terreno como un refrigerante natural. En Julio, la dinámica cambia, mientras que $V2$ es mucho más eficiente captando radiación solar, con ganancias por ventana de 93.53 kWh, el Individuo 7 solo gana 26.67 kWh. No obstante, es mejor conservando el calor interno al reducir las pérdidas por el piso en casi 70 kWh respecto a $V2$, lo que tiene a equilibra el balance.

- Para las Zonas 2, 3 y 4 (G_2), el Individuo 7 muestra una vulnerabilidad clara en el techo, donde las ganancias suben a 35.96 kWh (casi 5 veces más que los 7.58 kWh de $V2$). A pesar de esto, logra una ligera mejora en la protección de las ventanas, reduciendo el ingreso de calor a 139.90 kWh. El balance neto es positivo para ambos, pero ligeramente superior

en el Individuo 7 ($+53.08$ kWh), indicando una mayor tendencia al sobrecalentamiento en estas zonas. En invierno, los dos modelos presentan un balance de pérdida neta similar. El Individuo 7 mejora la captación por ventana (54.54 kWh vs 44.10 kWh), pero el comportamiento de sus muros se vuelve negativo (-6.54 kWh de pérdida), mientras que en $V2$ los muros todavía aportan una ganancia de 5.75 kWh. Esto indica que la envolvente vertical de Individuo 7 es más fría en este período.

- En las Zonas 5 y 6 (G_3), el comportamiento es similar al de la Zona 1, El Individuo 7, tiene mayores ganancias por techo (47.47 kWh) y muros (12.47 kWh) en comparación con $V2$. Nuevamente, la estrategia para no sobrecalentar el ambiente parece ser el piso, que evacua -273.08 kWh hacia el terreno, manteniendo el balance neto muy cerca de los -142 kWh de $V2$. En Julio es donde la optimización del Indviduo 7 es más evidente. Logra un salto masivo en la captación solar por ventana, alcanzando los 129.63 kWh (frente a los escasos 14.14 kWh de $V2$). Aunque las pérdidas por el piso también aumentan considerablemente (-196.98 kWh), la ganancia solar es tan alta que el déficit térmico neto se reduce mente, haciendo que la zona sea mucho más confortable y eficiente.

En la Figura 8.32, se detallan los intercambios de calor por componente para los meses de Enero y Julio, contrastando el prototipo $V2$ con el Individuo 6, optimizado para el clima de Iguazú. Se observa que el Individuo 6 logra un equilibrio térmico anual superior al potenciar la ganancia solar directa en el periodo invernal y facilitar la descarga térmica hacia el suelo durante el verano, al igual que sucede en la localidad de Rivadavia.

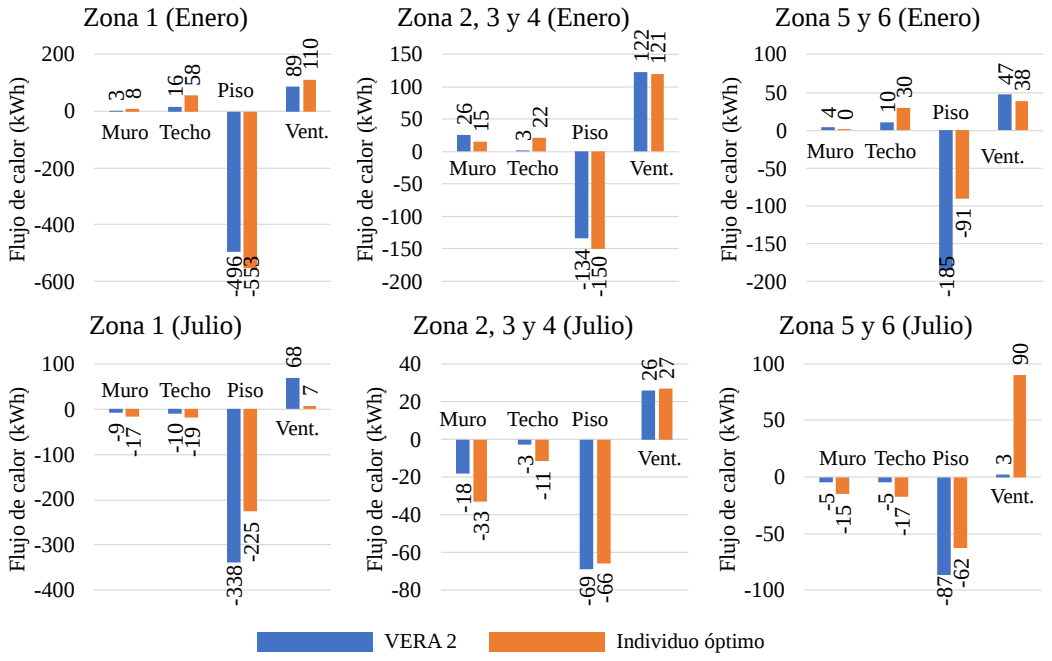


Figura 8.32: Balance térmico en Enero y Julio para Iguazú (Zona Ib)

- En la Zona 1 (G_1), el Individuo 6 exhibe un flujo de calor más elevado que el $V2$ durante el mes de Enero. Se aprecia un incremento notable en el aporte térmico por techo (57.85 kWh frente a 15.76 kWh) y vidriados (109.52 kWh frente a 88.94 kWh). No obstante, esta entrada energética se contrarresta con una transferencia superior hacia el terreno mediante el piso (-552.92 kWh), actuando este último como un recurso de enfriamiento. Durante Julio, el comportamiento se invierte; mientras que el $V2$ capta significativamente más radiación solar (67.92 kWh vs. 6.68 kWh), el Individuo 6 demuestra una mejor capacidad de retención

al disminuir las pérdidas por el suelo en más de 110 kWh, lo que permite minimizar el consumo energético.

- Respecto a las Zonas 2, 3 y 4 (G_2), el Individuo 6 presenta una mayor debilidad en el techo durante el verano, con ganancias de 21.82 kWh, superando ampliamente los 2.51 kWh de $V2$. A su vez, se observa un mejor desempeño en la envolvente lateral, reduciendo las ganancias por muros a 15.33 kWh. En el periodo invernal, ambos modelos tienen pérdidas de calor: el Individuo 6 a través de muros (-32.93 kWh) y techos (-11.26 kWh), evidenciando una envolvente opaca con mayor transferencia de calor hacia el exterior en comparación con el $V2$.

- Para las Zonas 5 y 6 (G_3), el Individuo 6 registra mayores ingresos por techo (30.21 kWh) en relación con el $V2$. Sin embargo, a diferencia de los otros sectores, aquí se reduce la disipación por el piso (-90.92 kWh vs. -184.88 kWh). Julio del Individuo 6 tiene una mayor captación solar por ventana, alcanzando los 90.46 kWh (frente a los apenas 2.57 kWh del $V2$). A pesar de que las pérdidas por muros y techos son mayores, el aporte solar es tan predominante que el déficit térmico global se atenúa de forma notable, optimizando la eficiencia de la zona.

Zona II: Chilecito y Sauce Viejo

En la Figura 8.33, se detallan los intercambios energéticos por componente para los meses de Enero y Julio, comparando el prototipo $V2$ con el Individuo 2, resultado de la optimización para el clima de Chilecito. El Individuo 2 propone una estrategia basada en un balance térmico anual que prioriza la captación selectiva en invierno y una transferencia controlada durante el verano que equilibra el consumo total de energía.

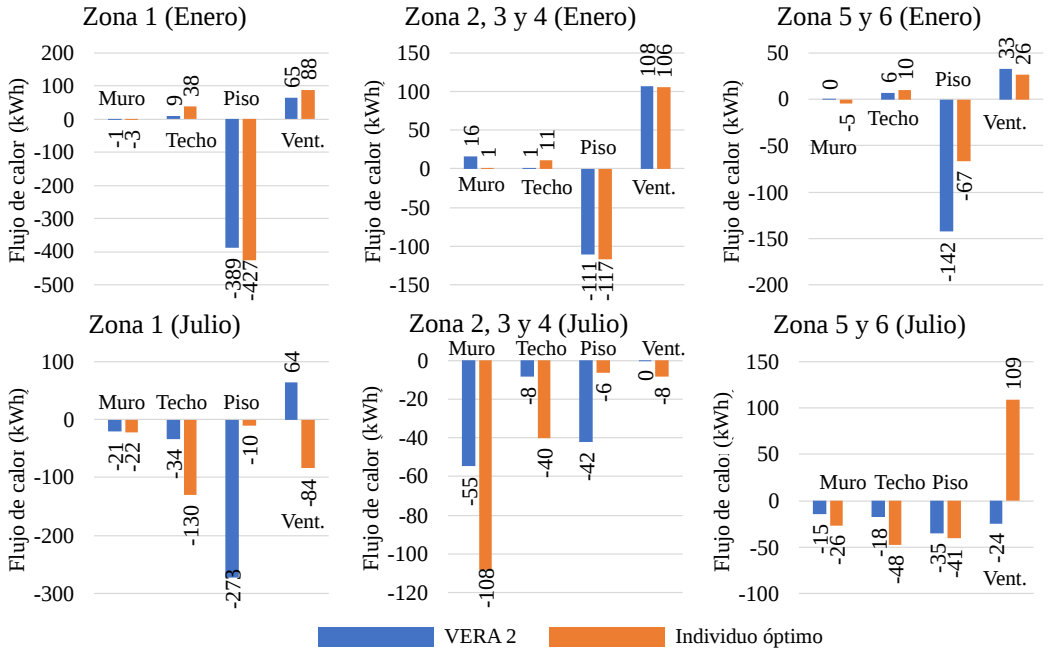


Figura 8.33: Balance térmico en Enero y Julio para Chilecito (Zona IIa)

- En la Zona 1 (G_1), el Individuo 2 muestra un flujo térmico más dinámico que el $V2$ durante el mes de Enero. Se observa un incremento considerable en las ganancias por techo (38.49 kWh frente a 9.29 kWh) y por acristalamientos (88.01 kWh frente a 65.23 kWh). Sin

embargo, este aumento en la carga se amortigua mediante una disipación a través del piso (-426.66 kWh), utilizando el suelo como sumidero térmico. En Julio, la estrategia de conservación varía significativamente; el Individuo 2 registra una pérdida por techo (-129.64 kWh) y una pérdidas por ventanas (-83.90 kWh), pero logra contrarrestar el déficit al reducir mente la fuga de calor por el piso en más de 260 kWh respecto a $V2$.

- Para las Zonas 2, 3 y 4 (G_2), el Individuo 2 tiene una mayor sensibilidad en la cubierta durante el verano, con ganancias que suben a 10.70 kWh en comparación con los escasos 1.09 kWh de $V2$. En contraposición, logra neutralizar casi por completo la ganancia por muros, bajándola a 0.90 kWh. Durante el periodo de invierno, ambos modelos operan en déficit; el Individuo 2 acentúa las pérdidas a través de muros de -108.20 kWh y techo de -39.98 kWh, lo que se traduce en una estructura que depende menos de la inercia del suelo, donde reduce las pérdidas a solo -6.49 kWh.

- En las Zonas 5 y 6 (G_3), la tendencia estival revela que el Individuo 2 disminuye la transferencia hacia el terreno a través del piso (-66.65 kWh frente a -142.24 kWh), mientras mantiene ganancias moderadas en el techo. Julio representa el punto de mayor divergencia en el Individuo 2: consigue una alta captación solar por ventana de 108.55 kWh, revirtiendo la pérdida de -24.45 kWh de $V2$. A pesar de que las pérdidas por muros y techos se incrementan, el notable aporte radiativo por ventana logra que el balance final sea mucho más favorable, optimizando el confort térmico de estas zonas en el mes más frío.

En la Figura 8.34, se detallan los intercambios de energía por componente para los meses de Enero y Julio, comparando el prototipo $V2$ con el Individuo 6, optimizado para el entorno de Sauce Viejo. Se observa que el Individuo 6 logra una gestión térmica anual más eficiente al potenciar la captación solar en los periodos de mayor demanda de calor y maximizar la descarga hacia el suelo durante la temporada estival.

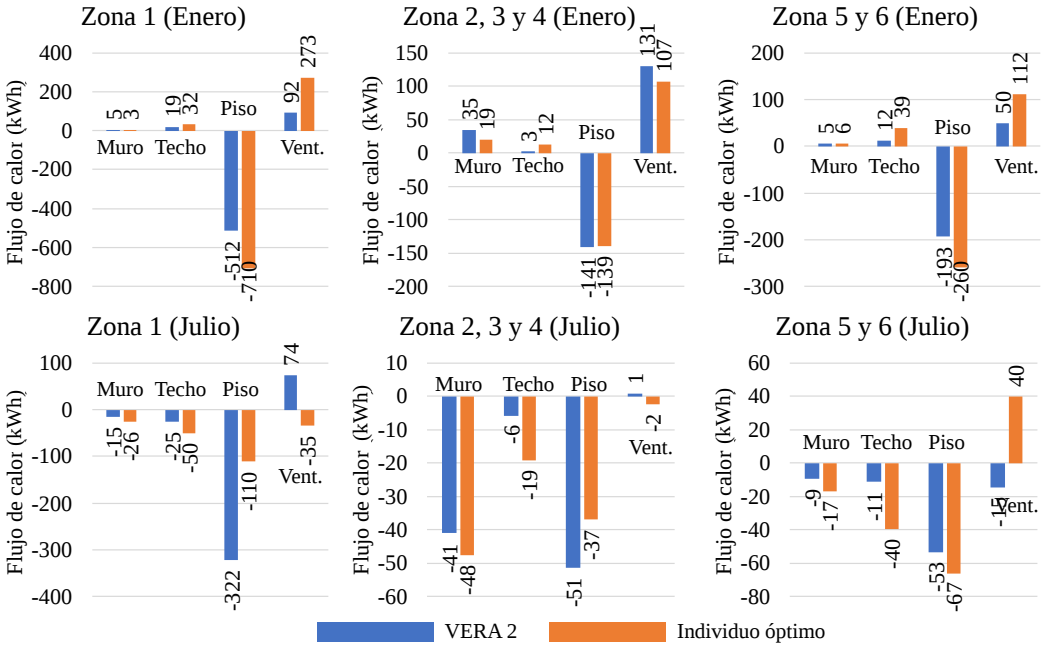


Figura 8.34: Balance térmico en Enero y Julio para Sauce Viejo (Zona IIb)

- En la Zona 1 (G_1), el Individuo 6 el flujo térmico global es mayor que el $V2$ durante el mes de Enero. Registra un incremento en las ganancias por ventanas (272.69 kWh frente

a 91.97 kWh) y un aumento en el techo (32.20 kWh frente a 18.71 kWh). Sin embargo, esta fuerte entrada de calor se ve compensada por una disipación a través del piso (-710.02 kWh). En Julio, la estrategia de conservación se hace evidente al reducir las pérdidas por el piso, -109.84 kWh frente a -322.00 kWh de $V2$, aunque esto conlleva una inversión en el balance de las ventanas, que pasan de ganar calor a perderlo (-34.89 kWh).

- Para las Zonas 2, 3 y 4 (G_2), el Individuo 6 logra optimizar la envolvente vertical en verano al reducir las ganancias por muros a casi la mitad (19.30 kWh frente a 34.75 kWh), a pesar de un leve incremento en la carga por techo (12.44 kWh). En invierno, ambos modelos mantienen un comportamiento de pérdida neta similar, aunque el Individuo 6 acentúa la descarga de calor hacia el exterior a través de techos y muros, lo que sugiere una envolvente diseñada para evacuar energía más rápidamente en esta parte del edificio.

- En las Zonas 5 y 6 (G_3), el comportamiento estival del Individuo 6 se caracteriza por un aumento notable en la captación por ventanas (111.93 kWh) y techo (39.42 kWh), contrarrestado nuevamente por un incremento en la transferencia hacia el suelo (-260.38 kWh frente a -192.51 kWh). En Julio el Individuo 6 consigue revertir la pérdida solar de $V2$ (-14.75 kWh), alcanzando una ganancia de 40.04 kWh por ventanas. Aunque las pérdidas por muros y techos se triplican en este mes, el aporte positivo de la radiación solar y la reducción relativa de pérdidas netas permiten que la zona sea considerablemente más eficiente en el periodo frío.

Zona III: Córdoba y Ezeiza

En la Figura 8.35, se presentan los flujos de energía por componente para los meses de Enero y Julio, comparando el prototipo $V2$ con el Individuo 4, optimizado para la región de Córdoba. Se observa que el Individuo 4 perfecciona el balance térmico mediante una estrategia que potencia la captación solar en sectores específicos durante el invierno y utiliza la transferencia al terreno como mecanismo de enfriamiento principal en verano.

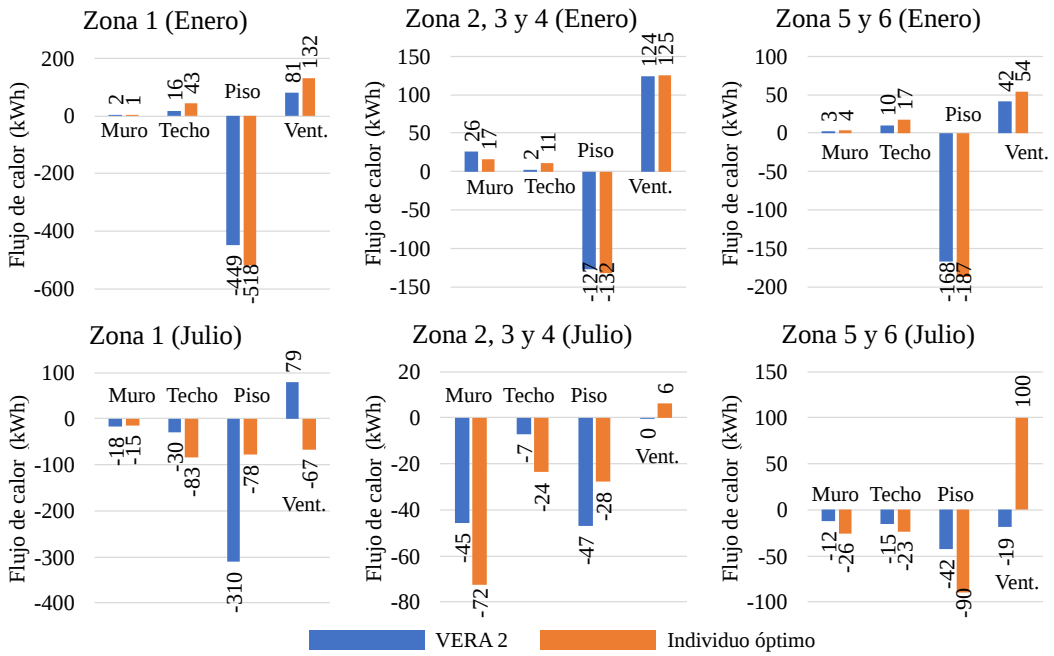


Figura 8.35: Balance térmico en Enero y Julio para Córdoba (Zona IIIa)

- En la Zona 1 (G_1), durante el mes de Enero, la respuesta térmica del Individuo 4 es similar al del $V2$ durante el mes de Enero. Se registra un incremento en las ganancias por techo (42.53 kWh frente a 15.91 kWh) y aberturas (131.87 kWh frente a 81.07 kWh). Esta carga es balanceada por una pérdida a través del piso (-517.56 kWh), consolidando el uso del suelo como disipador térmico. En Julio, la respuesta se transforma; aunque el Individuo 4 registra pérdidas por ventanas (-67.21 kWh) frente a la ganancia del $V2$, lo compensa con una reducción de las fugas de calor por el piso, que disminuyen de -309.97 kWh a solo -78.27 kWh, mejorando así el balance invernal.

- Para las Zonas 2, 3 y 4 (G_2), el Individuo 4 consigue perfeccionar el desempeño de los cerramientos verticales en verano al reducir las ganancias por muros a 16.61 kWh. No obstante, se percibe una mayor sensibilidad en el techo, donde las ganancias suben a 10.61 kWh. Durante el periodo invernal, el modelo optimizado muestra una envolvente más activa en la descarga de energía, aumentando las pérdidas por muros (-72.29 kWh) y techos (-23.67 kWh), pero logrando revertir la tendencia en las ventanas hacia una ganancia positiva de 6.31 kWh.

- En las Zonas 5 y 6 (G_3), el comportamiento estival del Individuo 4 repite la tendencia de mayor captación por techo (17.04 kWh) y vidriados (53.82 kWh), amortiguada por una mayor transferencia hacia el suelo (-186.68 kWh). En Julio el Individuo 4 alcanza un salto considerable en la captación solar por ventana, llegando a 100.04 kWh frente a la pérdida de -18.69 kWh registrada por el $V2$. A pesar del incremento en las pérdidas por piso y muros, el predominio de la ganancia solar permite una reducción sustancial del déficit térmico neto, mejorando la eficiencia global de la zona.

En la Figura 8.36, se muestras las variaciones térmicas por elemento constructivo para los meses de Enero y Julio, comparando el modelo base $V2$ con el Individuo 5, seleccionado como óptimo para Ezeiza. Se puede constatar que el Individuo 5 mejora el desempeño térmico global al mejorar la captación solar en los meses fríos y promover la disipación de calor hacia el terreno durante la temporada estival.

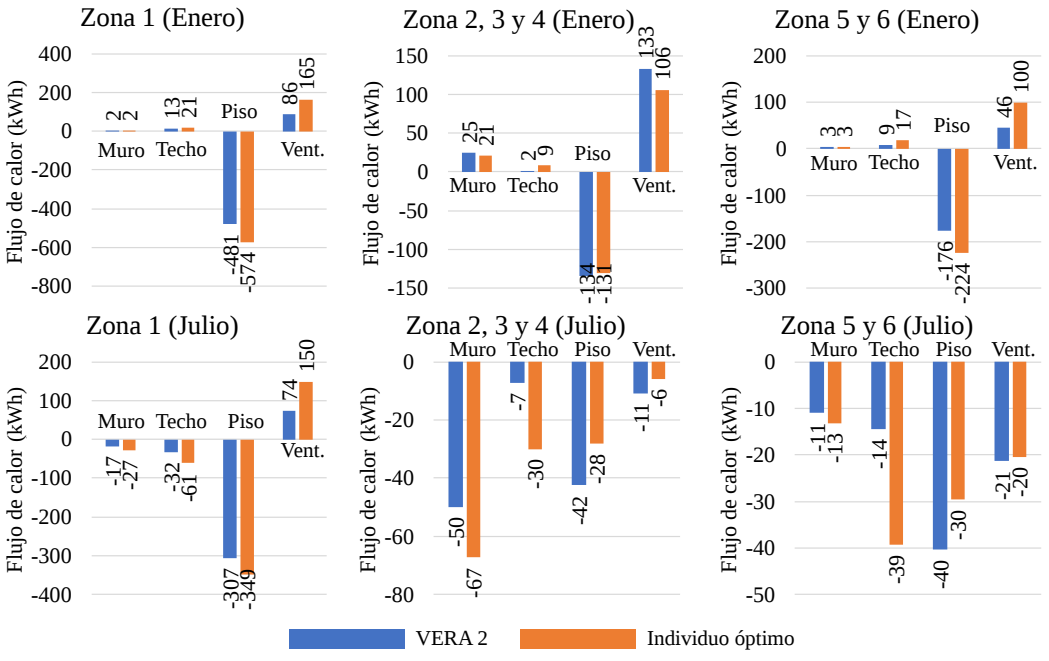


Figura 8.36: Balance térmico en Enero y Julio para Ezeiza (Zona IIIb)

- En la Zona 1 (G_1), el Individuo 5 tiene un intercambio térmico con el exterior más alto que el $V2$ durante el mes de Enero. Se observa que casi duplica la ganancia por ventanas (164.68 kWh frente a 86.27 kWh) y aumenta significativamente la carga por techo (20.90 kWh). Este ingreso de energía se mitiga mediante una pérdida superior a través del piso (-573.55 kWh), reafirmando la función del suelo como amortiguador térmico. En Julio, el modelo optimizado destaca por duplicar la captación solar en ventanas (149.51 kWh), aunque esto se acompaña de mayores pérdidas en muros y techo, lo que indica un diseño que prioriza el aprovechamiento de la radiación invernal disponible.
- Para las Zonas 2, 3 y 4 (G_2), el Individuo 5 logra un control más eficiente en verano, reduciendo las ganancias por aberturas (105.64 kWh) y muros (20.96 kWh). No obstante, la cubierta muestra un ligero incremento en el paso de calor, alcanzando los 8.79 kWh. Durante Julio, el Individuo 5 presenta mayores pérdidas por conducción en muros y techos, pero logra mantener un nivel de pérdida por ventanas menor (-5.82 kWh) que el prototipo $V2$, sugiriendo una configuración orientada a mitigar el déficit en los periodos más fríos.
- En las Zonas 5 y 6 (G_3), la tendencia estival revela que el Individuo 5 duplica la ganancia por aberturas (100.20 kWh) y aumenta la del techo (17.46 kWh), compensando este balance con una transferencia al piso de -224.09 kWh. Julio expone un comportamiento dispar: mientras que el Individuo 5 iguala prácticamente la pérdida por ventanas del $V2$, registra fugas por techo mucho más acentuadas (-39.39 kWh).

Observaciones de los resultados en las zonas bioclimáticas cálidas y templadas

Tras el análisis detallado de los flujos térmicos en las seis localidades correpondientes a climas cálidos y templados, se identifica una lógica de optimización consistente. A pesar de las diferencias climáticas entre el norte húmedo y el centro seco o templado, los individuos óptimos comparten estrategias comunes para mejorar el balance energético anual:

El piso como regulador térmico: Mientras que el prototipo $V2$ mantiene una resistencia térmica más conservadora, los individuos óptimos permiten una mayor transferencia hacia el terreno para compensar las ganancias solares de muros y techos.

Captación solar pasiva selectiva: La optimización de los acristalamientos es el factor más determinante para la eficiencia de invierno, especialmente en la Zonas 5 y 6. En localidades como Chilecito, Córdoba y Rivadavia, se observa un incremento en la ganancia por ventana en julio, revirtiendo balances negativos y transformándolos en aportes positivos de calor. En Iguazú y Sauce Viejo, la estrategia en invierno se orienta hacia la conservación, reduciendo las pérdidas por piso para compensar la menor disponibilidad de radiación efectiva.

Control térmico por muros y techos: Un patrón recurrente en los modelos optimizados es el aumento de la ganancia térmica por muros y techos. Esto sugiere que los algoritmos de optimización priorizan la reducción de costos materiales o la ganancia solar invernal en la cubierta, considerado la capacidad de disipación del piso para mantener el confort.
La optimización no busca un aislamiento absoluto, sino un acoplamiento inteligente con el entorno. El éxito de los individuos óptimos radica en su capacidad de transformar el edificio en un sistema dinámico que libera calor hacia el suelo en verano y lo captura activamente del sol en invierno.

Zona IV: Mendoza y Bahia Blanca

En la Figura 8.37, se ilustran las variaciones energéticas por elemento constructivo para los meses de Enero y Julio, contrastando el modelo base $V2$ con el Individuo 4, seleccionado como óptimo

para el clima de Mendoza. Se puede constatar que el Individuo 4 mejora el desempeño térmico global mediante una gestión balanceada de la envolvente, priorizando la reducción de pérdidas por el suelo en invierno y ajustando la captación solar según la zona.

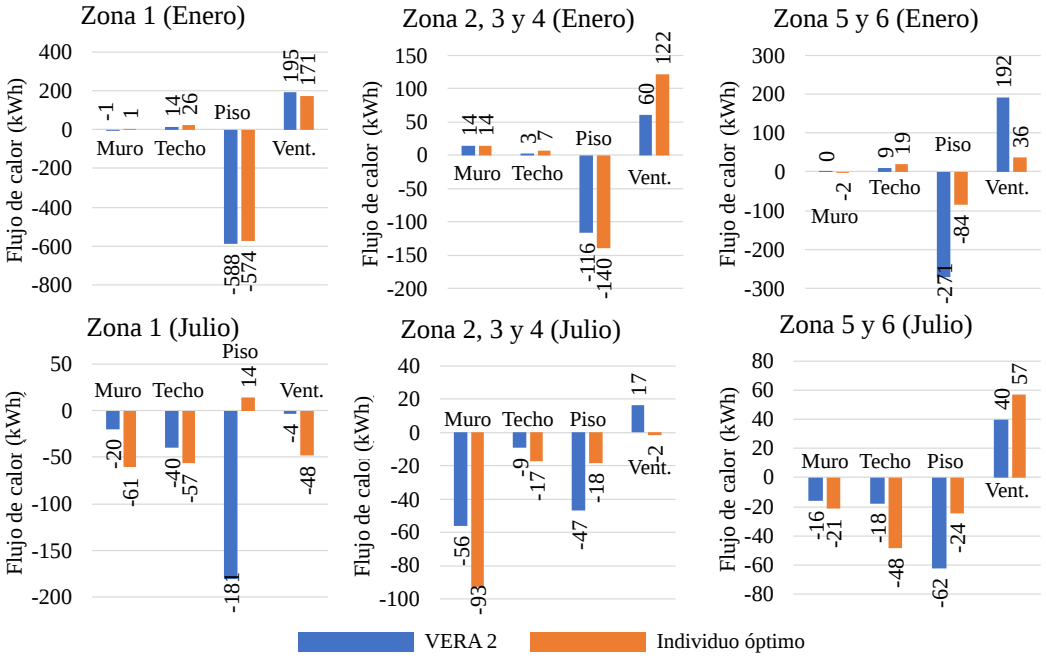


Figura 8.37: Balance térmico en Enero y Julio para Mendoza (Zona IVa)

- En la Zona 1 (G_1), el Individuo 4 muestra una estrategia de mitigación en verano al reducir ligeramente la ganancia por ventanas (171.18 kWh frente a 194.50 kWh) a pesar de un incremento en el paso de calor por el techo (26.06 kWh). El comportamiento más disruptivo ocurre en Julio, donde el modelo optimizado revierte la pérdida por el piso del $V2$ (-180.51 kWh), logrando una ganancia desde el terreno de 14.32 kWh. No obstante, este beneficio se ve contrarrestado por un aumento en las pérdidas por muros y techos, lo que refleja un diseño que busca compensar las pérdidas por muros, techos y ventanas con la estabilidad térmica del suelo.

- Para las Zonas 2, 3 y 4 (G_2), el Individuo 4 duplica la ganancia por ventanas (121.57 kWh frente a 59.97 kWh), balanceándolo con un aumento en la descarga térmica hacia el piso (-140.50 kWh). Durante el invierno, el modelo optimizado presenta una envolvente vertical mucho más fría, con pérdidas por muros que ascienden a -92.77 kWh. Sin embargo, logra minimizar el déficit en el piso (-18.18 kWh frente a -46.75 kWh de $V2$), sugiriendo una priorización del aislamiento del mismo en los meses fríos.

- En las Zonas 5 y 6 (G_3), el comportamiento en Enero del Individuo 4 se diferencia radicalmente del resto al reducir mente la ganancia por ventanas (36.48 kWh frente a 192.23 kWh) y disminuir la transferencia hacia el suelo (-84.08 kWh). Julio destaca como el mes de optimización solar: el Individuo 4 logra incrementar la captación solar por ventana a 56.89 kWh, superando los 39.57 kWh del modelo $V2$. A pesar de que las pérdidas por techos y muros se triplican en este periodo, la reducción de la descarga térmica hacia el piso contribuye significativamente a un balance invernal más controlado.

En la Figura 8.38, se detallan los flujos de calor por componente para los meses de Enero y Julio, comparando el prototipo $V2$ con el Individuo 5, optimizado para la región de Bahía Blanca. Se

observa que el Individuo 5 equilibra el balance térmico mediante una estrategia que reduce las ganancias solares excesivas en verano y optimiza la conservación del calor durante el invierno.

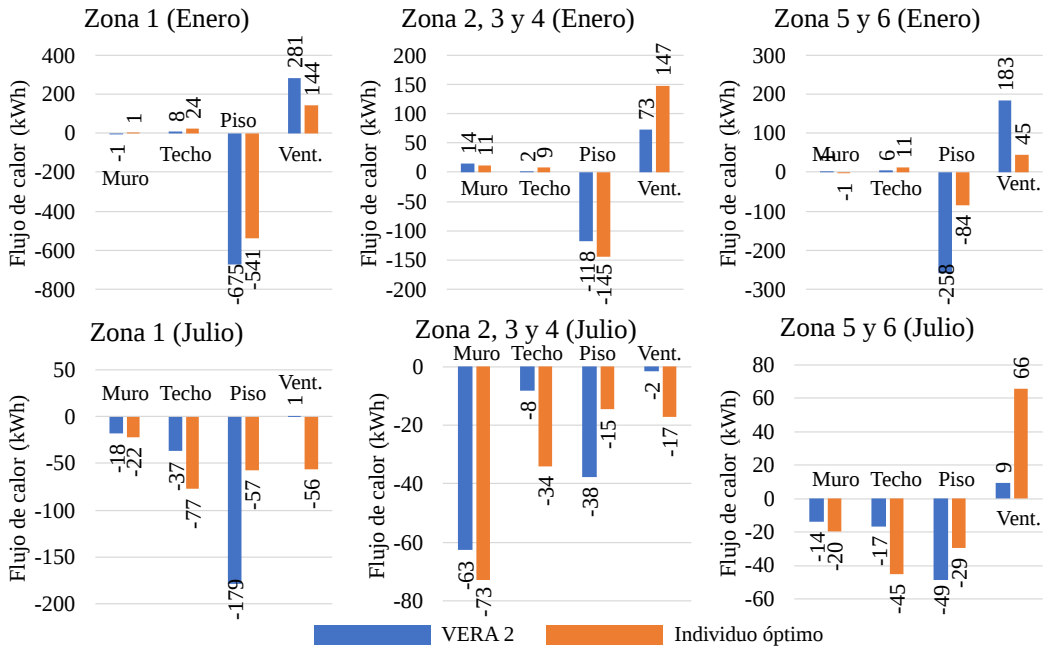


Figura 8.38: Balance térmico en Enero y Julio para Bahia Blanca (Zona IVb)

- En la Zona 1 (G_1), el Individuo 5 demuestra el control de la radiación estival al reducir las ganancias por ventanas a casi la mitad (144.12 kWh frente a 281.05 kWh de $V2$). Aunque se registra un leve aumento en el ingreso de calor por el techo (23.85 kWh), este se compensa con una disipación constante a través del piso (-540.90 kWh). En Julio, la optimización es clave al mitigar las fugas de calor hacia el terreno, reduciendo la pérdida por piso de -178.67 kWh a solo -57.41 kWh. No obstante, el modelo presenta mayores pérdidas por conducción en techos y muros en este periodo, lo que sugiere un diseño que prioriza la inercia del piso.

- Para las Zonas 2, 3 y 4 (G_2), el modelo optimizado tiene mayores ganancias en verano, duplicando las ganancias por ventana (147.20 kWh frente a 72.90 kWh), balanceando este flujo con una mayor descarga térmica hacia el piso (-144.89 kWh). Durante el periodo invernal, el Individuo 5 la envolvente se vuelve más fría, con pérdidas en techos (-33.97 kWh) y muros (-72.93 kWh) superiores al $V2$. Sin embargo, logra minimizar las pérdidas por el piso a menos de la mitad (-14.58 kWh frente a -37.69 kWh), reforzando la estrategia de aislamiento de la base para climas templado-fríos.

- En las Zonas 5 y 6 (G_3), la reducción de la captación solar por ventanas es notable, bajando de 183.29 kWh a solo 45.14 kWh en el Individuo 5. Esto permite disminuir también la transferencia hacia el suelo (-83.96 kWh frente a -258.09 kWh de $V2$). Julio representa el punto de mayor efectividad para este grupo: el modelo optimizado alcanza un salto masivo en la captación solar por ventana, llegando a 65.77 kWh (frente a los escasos 9.34 kWh de $V2$). A pesar del incremento en las pérdidas por conducción, el aporte solar predominante reduce sustancialmente el déficit térmico neto de la zona.

Zona V: Comodoro Rivadavia

En la Figura 8.39, se muestran los intercambios térmicos por componente para los meses de Enero y Julio, comparando el prototipo $V2$ con el Individuo 1, considerado óptimo para esta localidad. Se observa que el Individuo 1 implementa una estrategia de alta eficiencia basada en la mitigación de las pérdidas por el piso en invierno y un control selectivo de las ganancias solares en verano.

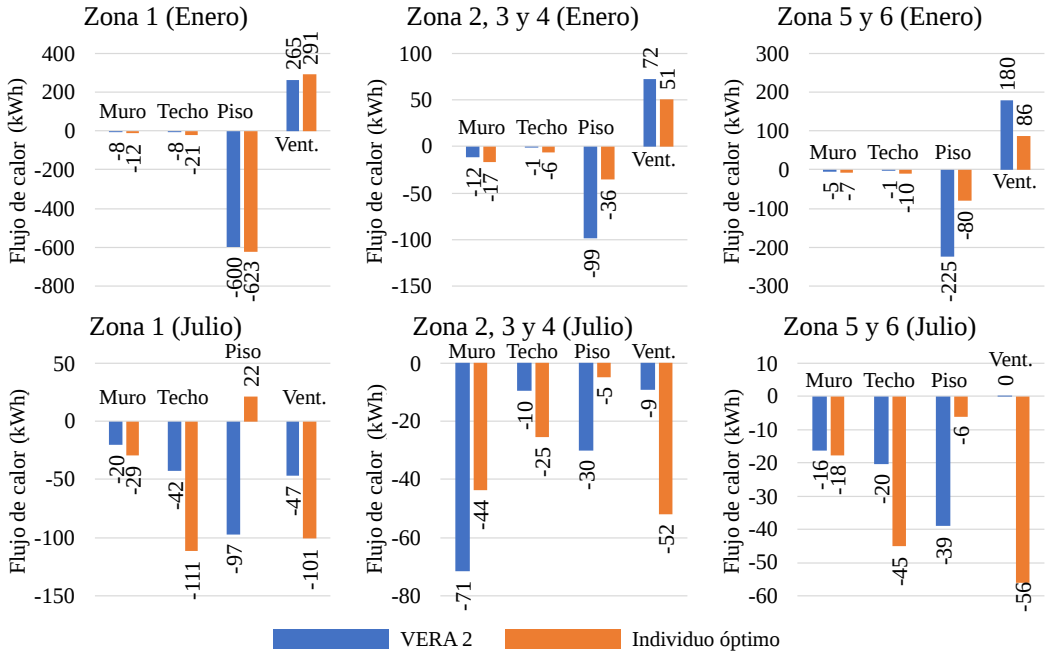


Figura 8.39: Balance térmico en Enero y Julio para Comodoro Rivadavia (Zona V)

- En la Zona 1 (G_1), el Individuo 1 incrementa la captación por ventana (291.48 kWh) y la compensa con una descarga térmica hacia el suelo de -623.19 kWh, superior a la del modelo $V2$. En Julio, mientras el $V2$ sigue perdiendo calor por el piso (-96.95 kWh), el Individuo 1 logra transformar este elemento en una fuente de ganancia térmica (21.50 kWh). No obstante, esto se equilibra con un aumento notable en las pérdidas por muros y techos, reflejando un diseño que prioriza el aporte del terreno frente a la aislación de muros y techos.

- Para las Zonas 2, 3 y 4 (G_2), el Individuo 1 optimiza el cerramiento inferior en invierno al reducir las pérdidas por piso a niveles casi neutros (-4.69 kWh frente a -30.00 kWh de $V2$). Durante Enero, el modelo óptimo logra un mejor desempeño en las aberturas, disminuyendo la ganancia solar a 50.68 kWh, y reduce significativamente la disipación hacia el suelo en comparación con el prototipo $V2$. Asimismo, en Julio se aprecia una mejora en el comportamiento de los muros, que pierden menos calor que en el $V2$ (-43.58 kWh frente a -71.49 kWh).

- En las Zonas 5 y 6 (G_3), el comportamiento en Enero del Individuo 1 se caracteriza por una reducción de la captación solar por ventanas, bajando a menos de la mitad del valor de $V2$ (85.99 kWh frente a 179.81 kWh). En Julio, el comportamiento de este grupo revela que el modelo optimizado experimenta mayores pérdidas por ventanas y techos que $V2$. Sin embargo, esta situación se compensa mediante el control por piso, que reduce sus pérdidas a solo -6.07 kWh, permitiendo que la zona mantenga su energía interna frente a las bajas temperaturas de la región.

Zona VI: San Carlos de Bariloche y Ushuaia

En la Figura 8.40, se grafican los intercambios térmicos por elemento para los meses de Enero y Julio, comparando el prototipo base $V2$ con el Individuo 1, el cual resulta óptimo para el clima de Bariloche. La envolvente del Individuo 1 se basa en una gestión de las pérdidas convencionales del piso en aportes energéticos positivos durante el invierno, compensando así las altas demandas de calefacción de la zona.

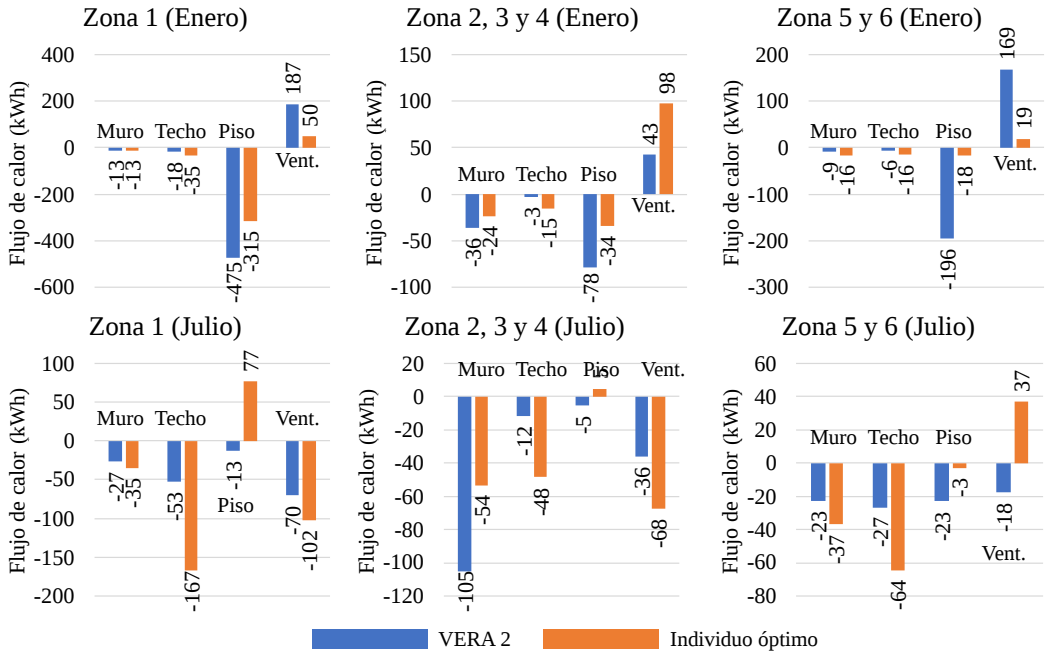


Figura 8.40: Balance térmico en Enero y Julio para San Carlos de Bariloche (Zona VI)

- En la Zona 1 (G_1), en el Individuo 1 se reduce la captación solar por ventanas durante Enero (49.98 kWh frente a 186.72 kWh de $V2$), limitando el sobrecalentamiento estival. No obstante, el rasgo más distintivo aparece en Julio, donde el piso deja de ser un componente de pérdida térmica (como en el $V2$, con -12.60 kWh) para convertirse en una fuente de ingreso neto de calor (77.36 kWh). Esto permite equilibrar el aumento en la transferencia negativa por el techo, la cual llega a -167.17 kWh en el modelo optimizado.

- Para el conjunto de Zonas 2, 3 y 4 (G_2), el Individuo 1 duplica la entrada de calor por ventanas en Enero, pero lo gestiona reduciendo las fugas por muros y piso respecto al modelo $V2$. En el mes de Julio, se evidencia un blindaje térmico superior en muros, logrando que pierdan solo -53.55 kWh en comparación con los -105.09 kWh del prototipo $V2$. Al igual que en el sector anterior, el piso compensa positivamente (4.82 kWh), eliminando el déficit que presentaba el $V2$ en este elemento.

- En las Zonas 5 y 6 (G_3), el comportamiento en Enero se centra en desacoplar el edificio del suelo, reduciendo las pérdidas por piso a una fracción mínima (-17.76 kWh frente a -195.77 kWh del prototipo base). Durante Julio, el Individuo 1 logra una captación solar activa a través de los vidriados de 36.75 kWh, revirtiendo la tendencia de pérdida que manifestaba el $V2$ (-17.74 kWh). Pese a que se incrementan las cargas negativas en techos y muros, neutraliza de las fugas por el piso (-3.23 kWh) asegura un balance invernal mucho más eficiente para el clima frío patagónico.

En la Figura 8.41, se detallan las transferencias energéticas por elemento constructivo para Enero y Julio, comparando en este caso el prototipo $V2$ con el Individuo 1, resultantes de la optimización bajo las condiciones climáticas de Ushuaia. La lógica del Individuo 1 en este entorno se basa en minimizar la fuga de calor hacia el suelo y administrar las cargas a través muros y techos.

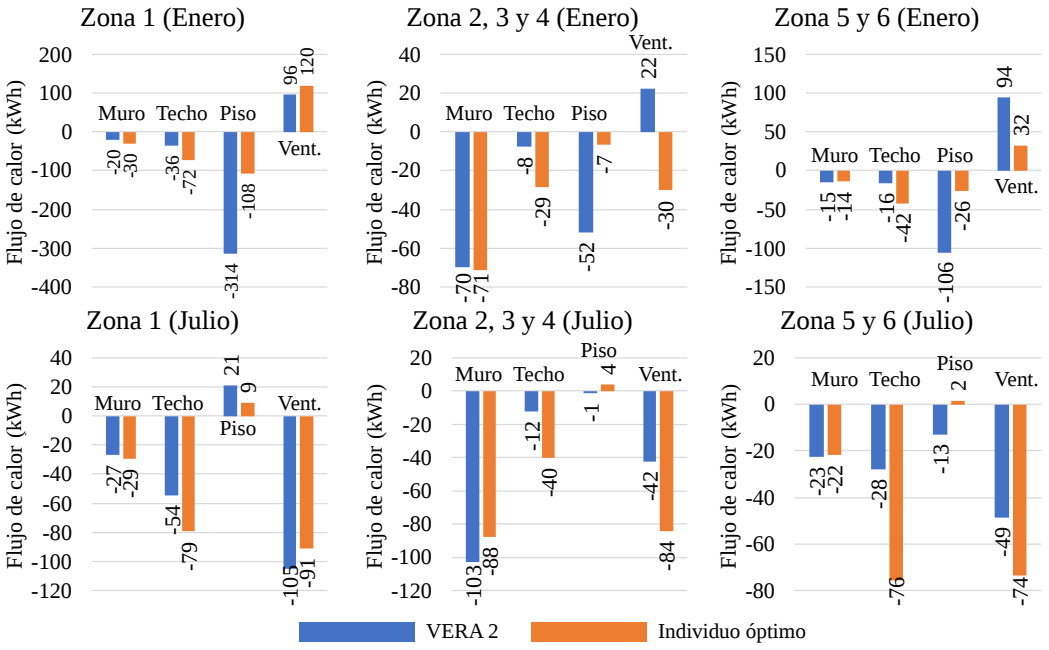


Figura 8.41: Balance térmico en Enero y Julio para Ushuaia (Zona VI)

- En la Zona 1 (G_1): durante el mes de Enero, el Individuo 1 potencia la entrada de calor por ventanas (119.57 kWh) al tiempo que reduce significativamente la descarga térmica por el piso, bajándola de -313.96 kWh a -108.46 kWh. En Julio, si bien el $V2$ muestra una ganancia mayor desde el terreno, el Individuo 1 mantiene un aporte positivo de 8.99 kWh. En este mes frío, el modelo optimizado tolera una mayor pérdida por conducción en muros y techos en favor de una gestión más estable de la temperatura del suelo.
- Para el conjunto de Zonas 2, 3 y 4 (G_2): el Individuo 1 consigue en verano una disminución notable de las pérdidas por el piso, situándolas en solo -6.83 kWh frente a los -51.68 kWh del modelo base. Por el contrario, las aberturas pasan de aportar calor en el $V2$ a registrar una pérdida de -30.17 kWh en el modelo optimizado. Durante Julio, se observa una mejora en la capacidad de retención de los muros (-87.63 kWh frente a -103.16 kWh) y el piso se convierte en una fuente de calor positiva (4.01 kWh), ayudando a amortiguar las bajas temperaturas exteriores.
- En las Zonas 5 y 6 (G_3): la tendencia de optimización para Enero implica un disminución en la captación solar y una reducción de las pérdidas por el piso, que caen un 75 % respecto al prototipo original. Julio representa el punto de mayor intercambio: el Individuo 1 triplica las pérdidas por techo y duplica las de muros en comparación con el modelo base. Sin embargo, esta dinámica se compensa mediante la anulación del déficit térmico en el piso, logrando una ganancia de 1.61 kWh que favorece la inercia térmica de estas estancias.

Observaciones de los resultados en las zonas bioclimáticas frías y muy frías

Al comparar los modelos optimizados de Mendoza, Bahía Blanca, Comodoro Rivadavia, Bariloche y Ushuaia, se identifica un gradiente de adaptación térmica definido por la latitud. La lógica de

diseño evoluciona de la atenuación de cargas térmicas de verano en el centro hacia la optimización de la captación y conservación energética en la región sur.

Transferencia de calor por piso: En las zonas más templadas, Mendoza y Bahia Blanca, el piso funciona como un regulador que estabiliza la temperatura interna, reduciendo significativamente la pérdida de calor hacia el terreno en invierno. En las zonas frías como Comodoro Rivadavia, se observa un fenómeno de desacoplamiento del suelo, que evita que sea un sumidero para convertirse en un emisor de calor neto en julio. En las zonas muy frías, Bariloche y Ushuaia, el objetivo del desacople térmico es neutralizar las pérdidas por conducción para proteger la energía generada internamente.

Gestión de la carga térmica por vidrios: La optimización de las aberturas responde a una lógica de selectividad radiativa. En Mendoza y Bahía Blanca, el diseño prioriza el bloqueo de la radiación directa en verano para evitar el sobrecalentamiento. En Bariloche y Ushuaia, las ventanas se transforman en colectores solares pasivos durante el invierno, logrando ganancias positivas que compensan las deficiencias de aislamiento del resto de la envolvente.

Control térmico por muros y techos: En todos los casos analizados, la transmitancia térmica de muros y techos de los modelos optimizados varía en comparación con el prototipo base. Esto indica que el balance energético global busca la eficiencia mediante el equilibrio entre el control solar y el aislamiento del piso, y el flujo de calor a través de muros y techos.
En conclusión, la optimización demuestra que la eficiencia en climas centro-sur no depende de un aislamiento uniforme, sino de una combinación de flujos de calor que utiliza la inercia del piso y la radiación solar para equilibrar las demandas estacionales.

8.7. Conclusiones del análisis y discusión de resultados

El análisis del desempeño del prototipo VERA a través de las diversas regiones de Argentina permite concluir que la optimización multiobjetivo es una herramienta determinante para la viabilidad de la vivienda de altas prestaciones energéticas. En términos generales, los resultados demuestran que es posible alcanzar reducciones en el consumo energético superiores al 70 % y hasta el 95 % en comparación con la vivienda de referencia tradicional ($V1$), requiriendo para ello una CI inicial significativamente menor. Este hallazgo rompe con la premisa de que la eficiencia energética extrema está ligada a costos elevados. Incluso al compararse con el estándar de alta prestación ($V2$), los individuos óptimos lograron ahorros de capital de entre el 20 % y el 45 %, ofreciendo un rendimiento térmico equivalente o superior mediante una selección de materiales mucho más racional y calibrada.

Comportamiento en climas de calor extremo (Zonas Ia y Ib) En las localidades de Rivadavia e Iguazú, la optimización reveló que la prioridad absoluta es la mitigación de las ganancias térmicas para reducir la carga de refrigeración, que domina el balance anual. En Rivadavia, el **Individuo 7** destacó al consumir solo un 19,8 % más de energía que la referencia $V2$ pero con un costo casi 44 % menor, basando su éxito en una orientación hacia el cuadrante sur y galerías de $1,3$ m. Por su parte, en Iguazú, se verificó que la optimización puede reducir el CI un 52 % respecto a la construcción tradicional y, simultáneamente, bajar la demanda a la mitad. En estos climas, el algoritmo priorizó el aislamiento en techos (espesores de EPS de hasta 10 cm) y el diseño de sombras por sobre la incorporación de vidriados técnicos, demostrando que la morfología y la protección solar pasiva son los recursos más costo-efectivos.

Desempeño en zonas cálidas y templadas (Zonas II y III) Para Chilecito, Sauce Viejo, Córdoba y Ezeiza, se observó una transición crítica en la eficiencia energética del edificio. Al incrementar la resistencia térmica de los muros para anular la demanda de calefacción, la refrigeración pasó a ser el componente principal del consumo debido a la retención de ganancias internas. En Chilecito, el **Individuo 2** demostró que con un presupuesto 48,7 % menor que la base $V1$, es factible recortar el consumo en un 97,1 %. En las zonas pampeanas como Ezeiza y Sauce Viejo, los individuos óptimos (como el **Individuo 5**) demostraron que espesores moderados de aislante (entre 4 y 10 cm) combinados con orientaciones noreste son suficientes para aproximarse al rendimiento de viviendas de alta gama, pero con una CI un 40 % menor a la de la referencia $V2$.

Estrategias para climas templado-fríos (Zona IV) En Mendoza y Bahía Blanca, la optimización subrayó la importancia de la inercia térmica y el control radiante coordinado. En Mendoza, el **Individuo 4** logró que las ventanas redujeran su carga térmica de verano de 192 kWh a solo 36 kWh mediante el uso de aleros y galerías calibradas. En Bahía Blanca, surgió un factor diferencial: la aislación de suelos en los dormitorios (G_3) empezó a aparecer como una variable necesaria para optimizar el balance térmico anual. Los resultados para esta zona consolidan la idea de que la estrategia ganadora no es el uso de soluciones comerciales costosas, sino una envolvente de alta resistencia térmica (con valores de K_{techo} cercanos a $0,33$ W/m^{2}K) que elimine los sobrecostos de materiales no optimizados.

Desafíos y logros en climas fríos y muy fríos (Zonas V y VI) En las latitudes más australes, como Comodoro Rivadavia, Bariloche y Ushuaia, el rigor climático exigió niveles de ultra-aislación que se aproximan o cumplen estrictamente el Nivel A de la norma $IRAM$ 11605. En Ushuaia, el **Individuo 1** alcanzó un hito de eficiencia al consumir un 61,6 % menos energía que la referencia $V2$, requiriendo una CI un 21,7 % inferior. En estas zonas, el algoritmo priorizó espesores de hasta 20 cm de EPS en cubiertas y el tratamiento integral de suelos en dormitorios (G_3) para evitar fugas térmicas hacia el terreno. Resulta notable que en Bariloche y Ushuaia, los individuos óptimos redujeron la calefacción entre un 94 % y un 98 %, evidenciando que la vivienda puede funcionar con requerimientos energéticos marginales incluso en climas subpolares si se aplica una arquitectura de precisión.

Conclusión sobre la zonificación funcional Finalmente, la investigación confirma la validez de aplicar estrategias diferenciadas por grupos funcionales (G_1, G_2 y G_3). El algoritmo demostró una tendencia sistemática a concentrar los recursos económicos en las áreas de permanencia prolongada (Estar y Dormitorios), mientras permitía configuraciones más austeras en las zonas de servicio (G_2). Esta sectorización inteligente no solo garantiza el cumplimiento de los estándares de confort higrotérmico donde más se necesitan, sino que asegura que el prototipo VERA sea una solución real, escalable y económicamente sustentable para enfrentar el déficit habitacional en todo el territorio nacional.

Capítulo 9

Conclusiones y Aportes del Módulo III

Este Módulo ha demostrado que el uso de la Optimización Multiobjetivo (MOO) permite transformar la envolvente edilicia en un filtro dinámico adaptativo. Al aplicar el flujo de trabajo SBO al prototipo VERA a través de las 11 localidades representativas de la norma $IRAM$ 11603, se ha logrado configuraciones de alta eficiencia energética y bajo costo de inversión para el prototipo en la República Argentina.
A continuación, se presentan las conclusiones transversales derivadas de la implementación del algoritmo $NSGA-II$ y el análisis de sensibilidad bioclimática realizado.

9.1. Síntesis de hallazgos para el diseño óptimo

El despliegue del marco metodológico sobre el gradiente latitudinal y climático del país permite establecer tres pilares sobre el diseño pasivo de alta eficiencia.

La ruptura del paradigma entre eficiencia y costo inicial

Los resultados obtenidos en todas las zonas bioclimáticas demuestran que es posible alcanzar reducciones en el consumo energético superiores al 70 % —y de hasta el 95 % en climas extremos— en comparación con la vivienda de referencia tradicional ($V1$), requiriendo para ello una inversión inicial significativamente menor a la construcción convencional no optimizada. Se verificó que los individuos óptimos logran ahorros de capital de entre el 20 % y el 45 % frente a la referencia de alta prestación ($V2$), ofreciendo un rendimiento térmico equivalente o superior.

Sinergia entre la envolvente opaca, el diseño de la protección solar y la orientación.

La investigación confirma que, en la diversidad climática argentina, la inversión es más rentable cuando se aplica de forma balanceada entre la aislación opaca y el diseño de elementos pasivos, por sobre capas de aislante sobredimensionadas en muros y techos, o la incorporación de vidriados de ultra-tecnología.

- En climas de calor extremo, el éxito del diseño no radicó en materiales costosos, sino en la orientación estratégica hacia el cuadrante Sur de la Zona 1, cuyo uso es diurno, el dimensionamiento de galerías y aleros para neutralizar la carga radiante, el desacople de masa térmica en paredes con muros dobles con núcleo aislante y la aislación por sobre la losa de hormigón de techo. La terminaciones exteriores minimizan la ganancia térmica por absorción solar con la elección de colores claros. El tipo acristalamiento, entonces, queda en función de estas configuraciones.

- En zonas templadas y frías, el algoritmo priorizó espesores de aislante por encima de los 10 cm en todos los elementos de la envolvente opaca, incluso en pisos, dimensiones de aleros

y galerías, y orientaciones que favorecen la ganancia térmica por radiación. En cuanto a los tipos de acristalamientos, la elección fueron aquellos de alto despeño térmico. La elección de estas estrategias neutralizó casi totalmente la demanda de calefacción.

Efectividad de la zonificación funcional y el acople al terreno

El hallazgo de que el algoritmo aplica recursos diferenciados por grupos de zonas (G_1, G_2 y G_3) constituye una de las mayores eficiencias del modelo VERA.

- Se demostró una tendencia sistemática a concentrar los recursos económicos en las áreas de permanencia prolongada (Estar y Dormitorios), mientras se permitían configuraciones más austeras en las zonas de servicio (G_2), optimizando el balance económico global sin sacrificar el confort.
- El análisis de cargas térmicas reveló que el acople estratégico con el piso funciona como un sumidero de calor natural indispensable en verano para disipar ganancias internas en envolventes altamente aisladas. Mientras que en zonas de frío extremo, la asilación del piso es fundamental para mantener las temperturas de confort.

9.2. Aportes al Estado del Arte

A partir de la integración de los resultados, este Módulo realiza las siguientes contribuciones originales:

Protocolo de diseño basado en SBO para el contexto nacional

Se define y valida un flujo de trabajo que supera las exigencias de la norma $IRAM$ 11603 logrando vectores de diseño óptimos por zona bioclimáticas con mejores prestaciones energéticas. Este protocolo permite abandonar las soluciones genéricas y adoptar configuraciones de envolvente específicas para cada subzona bioambiental, garantizando la viabilidad financiera de las obras.

Caracterización de la eficiencia energética por zona bioclimática

Este trabajo aporta evidencia científica sobre el cambio en el perfil de diseño de envolventes: la clásica envolvente con ultra-aislación y hermeticidad, exigida por las normativa vigente $IRAM$ 11605, no resultan eficientes debido a que el diseño responde a propiedades térmicas calculadas de forma estática y aislada, con temperaturas de diseño extremas. El diseño mediante la metodología SBO, demuestra que el efecto de las estrategias pasivas en el balance térmico calculadas de forma aislada quedaron obsoletos, demostrando que la compleja interrelación entre variables puede aprovecharse para disminuir el consumo energético de forma inteligente.

Base de datos para estándares de Vivienda de Alta Eficiencia Energética

Los conjuntos óptimos obtenidos para las 11 localidades y la metodología implementada, constituyen una base de datos de referencia para futuras políticas públicas de eficiencia energética en Argentina. Se demuestra que el cumplimiento del **Nivel A de IRAM 11605** es económicamente alcanzable si se utiliza una arquitectura de precisión.

Parte V

SÍNTESIS, CONCLUSIONES Y APORTES CIENTÍFICOS

Síntesis, Conclusiones y Aportes Científicos

Síntesis metodológica y cumplimiento de objetivos

La presente investigación ha consolidado y validado un marco metodológico integral que garantiza la fidelidad predictiva en la calibración BES mediante modelado inverso, así como la eficiencia en el diseño de envolventes a través de la optimización directa. Este avance ha sido posible gracias al acoplamiento dinámico entre el motor de simulación térmica $E+$ y el algoritmo de optimización metaheurístico GA.

Mediante esta integración, aplicada con éxito en los edificios **MEVIR** y **SOFIA**, se ha logrado trascender la calibración BES convencional. La metodología propuesta no solo integra mediciones de T_{sup} de forma simultánea a las de T_{aire}, sino que incorpora parámetros convectivos dinámicos (h_{int} y h_{ext}) y propiedades óptico-radiativas (α_S y α_T) al vector de variables de ajuste. A su vez, la implementación de una **Metodología de Calibración Escalonada** permite desacoplar los fenómenos físicos de la envolvente, garantizando una precisión que alcanza el límite de la resolución instrumental y mitigando de manera efectiva el fenómeno de la equifinalidad paramétrica.

Además, este acoplamiento permitió realizar un análisis de sensibilidad regional sistemático para el territorio argentino, logrando determinar con precisión las estrategias de diseño más eficientes según cada zona bioclimática. La implementación de este enfoque en el caso de estudio **VERA** marca una transición crítica: se pasa de una aplicación de estrategias bioclimáticas de carácter cualitativo a una cuantificación rigurosa de su impacto en el consumo energético E_{cal} y E_{ref} y en la inversión inicial CI. Este cambio de paradigma facilita la obtención de diseños de alta eficiencia que evitan el sobredimensionamiento, garantizando el equilibrio técnico-económico en edificios.

Conclusiones sobre la fidelidad física y la calibración

El desarrollo del Módulo II permite extraer conclusiones fundamentales sobre la naturaleza del modelado térmico y los procesos de calibración.

La insuficiencia de la calibración mono-objetivo y la superación de la equifinalidad. El estudio del edificio MEVIR evidenció que centrar el ajuste exclusivamente en la T_{aire} resulta en modelos con una validez física limitada, donde la precisión estadística suele enmascarar una distribución errónea de las cargas térmicas. Al implementar una optimización multiobjetivo que integra simultáneamente la T_{aire} y las T_{sup}, se garantiza que el ajuste de los flujos de calor en las superficies no quede supeditado al azar o a compensaciones matemáticas. Esta tesis concluye, reforzada por los resultados del edificio SOFIA, que la complejidad del modelo debe gestionarse mediante una estrategia de calibración secuencial. Este enfoque permite subdividir el problema en etapas lógicas, reduciendo drásticamente la interdependencia paramétrica y logrando una integridad termodinámica superior a los enfoques globales simultáneos.

Trascendencia de los parámetros convectivos y radiativos en la envolvente. Se concluye que la integración de los mecanismos de intercambio superficial, específicamente los coeficientes de transferencia convectiva (h_{int} y h_{ext}) y las absortividades ópticas (α_S y α_T), resultan indispensable para la robustez del modelo. La investigación demuestra que omitir estas variables impide capturar con fidelidad la dinámica de la capa límite y el balance radiativo exterior. Esta simplificación deriva en desviaciones críticas, alcanzando errores de hasta un $80\,\%$ en la caracterización térmica de componentes altamente expuestos como la cubierta, lo cual invalidaría cualquier análisis posterior de estrategias de rehabilitación o eficiencia energética.

Superación de la equifinalidad mediante el desacople físico y la jerarquización de variables. Uno de los hallazgos fundamentales de esta investigación es la validación de la **Metodología de Calibración Escalonada en Dos Pasos** como solución al problema de la interdependencia paramétrica. Se ha demostrado empíricamente que los enfoques de optimización global simultánea suelen incurrir en el fenómeno de la equifinalidad, donde un ajuste estadísticamente aceptable de la T_{aire} y T_{sup}, si bien aumentan las precisión del modelo, enmascaran distorsiones físicas críticas en la caracterización de la envolvente. Al desacoplar el problema y jerarquizar el ajuste, fijando inicialmente las propiedades de la envolvente opaca mediante T_{sup}, se logra restringir el espacio de búsqueda y estabilizar los parámetros térmicos, para luego determinar con mayor exactitud los parámetros globales. Esta metodología permitió alcanzar una precisión de $0.15\,°\text{C}$, valor que se sitúa en el límite nominal de la resolución instrumental, garantizando la obtención de modelos con una fidelidad física superior.

Robustez temporal y transferencia estacional. La metodología desarrollada en el Capítulo 5 ha demostrado una estabilidad notable, validando la capacidad del protocolo para capturar las propiedades termofísicas intrínsecas de la edificación. Se ha verificado que los parámetros calibrados en régimen de oscilación libre mantienen su validez al ser transferidos entre estaciones climáticas opuestas (invierno-verano) sin degradación del ajuste. Este hallazgo es de gran relevancia para la práctica científica y profesional, ya que confirma que el modelo es independiente de las condiciones de contorno momentáneas. En consecuencia, este enfoque permite optimizar las campañas de monitoreo experimental, reduciendo los tiempos de captura de datos sin sacrificar la confiabilidad de las predicciones a largo plazo o ante escenarios de cambio climático.

Conclusiones sobre el diseño bioclimático de envolventes en Argentina

La aplicación del marco de optimización al prototipo VERA en las diversas zonas de la norma $IRAM$ 11603 aporta conclusiones clave para el diseño óptimo de envolvetes.

Jerarquización bioclimática del diseño y sensibilidad regional. A través de la optimización aplicada al diseño de la envolvente del prototipo VERA, se ha verificado la existencia de las prioridades proyectuales según la latitud y la zona bioambiental de la norma $IRAM$ 11603. En las regiones cálidas y áridas (Zonas I y II), la eficiencia energética se logra mediante el control de carga térmica radiante y la reflectividad selectiva de la envolvente. En las zonas templadas (III y IV), se concluye que el diseño debe resolver la dualidad estacional mediante la gestión de la inercia térmica y el acoplamiento con el suelo, evitando el sobrecalentamiento estival en edificios ultra-aislados. Finalmente, en los climas fríos (V y VI), la edificación debe operar como una barrera térmica hermética, donde el aislamiento masivo y la captación solar pasiva constituyen las únicas vías para neutralizar la demanda de calefacción bajo niveles de confort rigurosos.

Optimización técnico-económica frente a los estándares convencionales. El análisis comparativo revela que la construcción tradicional ($V1$), caracterizada por una elevada inercia térmica sin

aislamiento, duplica o incluso triplica el consumo energético en la mayoría de las regiones bioclimáticas. No obstante, el hallazgo más disruptivo surge al contrastar los resultados con la referencia de alta prestación ($V2$), diseñada bajo los lineamientos del Nivel A de la norma $IRAM$ 11605. Se demuestra que, mediante el flujo de trabajo de optimización propuesto, es posible alcanzar niveles aún más altos de eficiencia térmica que la normativa de máxima exigencia, pero con una reducción sustancial en los costos de inversión inicial. Este equilibrio entre desempeño y factibilidad financiera no solo minimiza el impacto ambiental, sino que posiciona a la optimización multiobjetivo como un instrumento clave para la viabilidad técnica y económica de viviendas alto desempeño energético.

Equilibrio térmico como motor de eficiencia y optimización de costos. La investigación demuestra que el desempeño superior de la envolvente no depende de la acumulación indiscriminada de materiales, sino del equilibrio termodinámico entre sus componentes. Se ha comprobado que, mediante una gestión dinámica de las transferencias de calor, es posible superar los estándares más exigentes de la norma $IRAM$ 11605 (*Nivel A*) con una inversión inicial significativamente menor a la de las soluciones constructivas de alta prestación convencionales. Un hallazgo crítico en este sentido es el rol del acoplamiento con el terreno: mientras que en climas fríos el aislamiento del piso ($\sim$ 12,cm de EPS) es indispensable para evitar fugas térmicas hacia el suelo natural, en climas cálidos y templados la omisión deliberada del aislante permite utilizar el terreno como un sumidero térmico esencial para amortiguar las ganancias internas y solares. Esta precisión en la asignación de recursos evita la saturación tecnológica, donde el sobre-aislamiento sin coordinación bioclimática genera rendimientos marginales decrecientes y sobrecostos injustificados. Se concluye que las decisiones de diseño de costo cero —tales como la orientación estratégica y la geometría de protecciones solares— son las variables más determinantes del frente de Pareto, permitiendo alcanzar demandas inferiores a los 1 000 kWh/año mediante el aprovechamiento racional de los recursos pasivos.

Asignación diferenciada de recursos por grupos de zonas funcionales. La investigación demuestra que una de las estrategias de diseño de la envolvente es la especificidad del uso de cada espacio interior, reconociendo que el comportamiento térmico varía drásticamente según los perfiles de ocupación y los ciclos horarios. Mediante la optimización multiobjetivo, se ha validado que la asignación diferenciada de aislamiento y masa térmica entre áreas de permanencia prolongada (estares y dormitorios) y zonas de servicio permite maximizar el confort global sin incurrir en un sobredimensionamiento material. Este enfoque de segmentación funcional de la envolvente garantiza que cada recurso constructivo se aplique donde su impacto en la reducción de la demanda es mayor, optimizando la inversión y asegurando una respuesta dinámica eficiente de la edificación frente a las fluctuaciones climáticas diarias.

El diseño paramétrico como superación del paradigma estático. La implementación de modelos BES permite capturar la dinámica térmica compleja del edificio y dimensionar sus componentes en función de su comportamiento real, superando las limitaciones de los enfoques basados exclusivamente en la transmitancia térmica (K) de carácter estático propuestos por la norma $IRAM$ 11605. Este marco metodológico permite cuantificar con precisión la influencia de cada estrategia bioclimática, reconociendo su interdependencia sistémica y transformando el proceso proyectual de una práctica cualitativa en una disciplina cuantitativa basada en evidencia. Asimismo, el acoplamiento con algoritmos de optimización como $NSGA-II$ posibilita la exploración exhaustiva del espacio de soluciones, identificando un conjunto de individuos óptimos que resuelven el compromiso entre la minimización del consumo energético, la viabilidad de la inversión inicial y la reducción del impacto ambiental.

Aportes al estado del arte

A partir de la integración de los resultados y la validación de las metodologías propuestas, esta tesis realiza las siguientes contribuciones originales al campo de la simulación térmica y el diseño edilicio:

- **Contribuciones metodológicas a la calibración de modelos BES:** Se consolida la transición desde enfoques globales fuertemente acoplados hacia una estrategia de desacople físico secuencial. Esta metodología ofrece una solución robusta al problema de la interdependencia paramétrica, permitiendo aislar la respuesta térmica de la envolvente y garantizando la integridad termodinámica en modelos BES. Se propone la transición desde enfoques convencionales mono-objetivo (MO) —centrados exclusivamente en el ajuste de la temperatura del aire— hacia una estrategia de calibración multiobjetivo (MOO) con integración de temperaturas superficiales (T_{sup}). Este avance permite la inclusión de parámetros de alta incertidumbre y sensibilidad, tales como los coeficientes de transferencia convectiva (h_{int} y h_{ext}) y las absortividades ópticas (α_S y α_T). Al tratar estas variables de frontera de forma explícita, se logra reducir la interdependencia paramétrica y mejorar drásticamente la precisión en la caracterización térmica de la envolvente, garantizando que el ajuste estadístico responda a una representación fidedigna de los mecanismos de transferencia de calor.

- **Aportes al diseño óptimo de envolventes:** Se establece un marco metodológico para el diseño avanzado de envolventes basado en el acoplamiento directo BES-MOO, superando las limitaciones de los enfoques de diseño estáticos. La aplicación sistemática de este flujo de trabajo sobre el prototipo VERA en las diversas zonas de la norma $IRAM$ 11603 permite. **Cuantificación del impacto bioclimático:** Transpolar estrategias cualitativas tradicionales hacia una base de datos cuantitativa que revela la interdependencia sistémica de las variables (aislamiento, inercia, control solar y acople al terreno). Optimización técnico-económica: Identificar frentes de Pareto que demuestran la viabilidad de alcanzar estándares de alta eficiencia energética ($IRAM$ 11605 Nivel A) con una reducción significativa en la inversión inicial, evitando la saturación tecnológica y el sobredimensionamiento material. **Jerarquización de estrategias por zona:** Determinar con precisión las variables determinantes para cada clima (como el blindaje radiante en el norte o la barrera térmica hermética en el sur), estableciendo una guía de diseño basada en evidencia para la vivienda social en Argentina.

Recomendaciones y líneas de investigación futura

La robustez del marco metodológico desarrollado en esta tesis sienta las bases para futuras investigaciones orientadas a consolidar el paradigma del diseño edilicio resiliente:

- **Validación de prototipo VERA:** Contrastar los resultados de optimización del prototipo VERA con mediciones *in-situ* a fin de calibrar modelos para futuros análisis energéticos.

- **Integración del Análisis de Ciclo de Vida:** Incorporar la energía embebida y la huella de carbono de los componentes de la envolvente, para transpolar la optimización puramente operativa hacia una optimización de ciclo de vida, asegurando que la reducción de demanda no sea neutralizada por el impacto ambiental asociado a la producción y disposición final de los materiales.

- **Escalabilidad al entorno urbano y microclimas:** Estudiar el desempeño de los modelos optimizados en entornos urbanos densos, considerando fenómenos de sombreado mutuo, reflexión entre edificios y el efecto de isla de calor urbana, permitiendo una transición del diseño de la unidad hacia el planeamiento urbano eficiente.

- **Exploración de sistemas constructivos de bajo impacto:** Ampliar el vector de decisión hacia sistemas no tradicionales o de matriz regional (madera, tierra cruda, materiales reciclados) para determinar su potencial de optimización bajo el flujo de trabajo $BES\text{-}MOO$ en diferentes zonas bioambientales.

Parte VI

Apéndices

Apéndice A

Producción Científica y Transferencia

A.1. Aportes científicos del Capítulo III

Enhancing the Accuracy of Thermal Model Calibration: Integrating Zone Air and Surface Temperatures, Convection Coefficients, and Solar and Thermal Absorptivity.

Autores: M. Cecilia Demarchi, Sofía Gervaz Canessa, Gabriel Pena, Alejandro E. Albanesi, Federico Favre.
Año de publicación: 2025.
Revista: Energy and Buildings.
ULR: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115617.

Este trabajo describe el desarrollo y validación de una metodología de calibración avanzada para modelos de simulación energética edilicia. A diferencia de los enfoques convencionales basados únicamente en la temperatura del aire, esta investigación integra temperaturas superficiales, coeficientes de transferencia de calor por convección y absortividades (térmicas y solares). Utilizando datos de monitoreo en condiciones de oscilación libre y optimización mediante la métrica RMSE, se logró reducir el error predictivo en un 60 % para la temperatura del aire y hasta un 82 % en superficies interiores. Los resultados subrayan la importancia de los parámetros de interacción edificio-entorno para garantizar la fiabilidad del modelo.
El contenido de este artículo ha sido adaptado y expandido para conformar el cuerpo principal del Capítulo 4.

A.2. Aportes científicos del Capítulo IV

Congreso: XL Congreso Argentino de Mecánica Computacional. Resúmenes de Mecánica Computacional, Vol I.
ULR: https://doi.org/10.70567/rmc.v1i15.202

Modelo Inverso Iterativo Acoplado a Algoritmo Genético para la Calibración de Modelos de Simulación Térmica de Edificios

Autores: M. Cecilia Demarchi, Alejandro E. Albanesi, Federico Favre, Juan C. Alvarez Hostos
Año de publicación: 2024.
Congreso: XL Congreso Argentino de Mecánica Computacional. Resúmenes de Mecánica Computacional, Vol I.
ULR: https://doi.org/10.70567/rmc.v1i15.202

Este estudio implementa un modelo inverso iterativo que utiliza algoritmos genéticos para la calibración y validación de simulaciones térmicas. El modelo ajusta de manera dinámica variables clave como las resistencias térmicas del aire, la infiltración, el coeficiente convectivo y la absortancia térmica y solar de los materiales exteriores. El objetivo principal es minimizar las discrepancias entre las temperaturas de aire medidas y las simuladas, utilizando como caso de estudio los edificios del proyecto NRG STORAGE en Sofía, Bulgaria. Este enfoque permite una evaluación precisa del rendimiento energético, optimizando las estrategias de diseño desde una perspectiva computacional robusta.
Este trabajo constituye el núcleo metodológico del Capítulo 5. En él se presenta la metodología de calibración por pasos que permite realizar la calibración descrita en dicho capítulo.

A.3. Aportes científicos del Capítulo VII

Optimización multiobjetivo y simulación energética para el diseño eficiente de módulos funcionales

Autores: M. Cecilia Demarchi, Alejandro E. Albanesi, Federico Favre.
Año de publicación: 2025.
Congreso: XLI Congreso Argentino de Mecánica Computacional. Resúmenes de Mecánica Computacional, Vol. 42, Núm. 11: Optimización y Control: Teoría y Aplicaciones.
ULR: https://doi.org/10.70567/mc.v42.ocsid8279

Este trabajo desarrolla una metodología que acopla el motor de simulación EnergyPlus con un algoritmo genético de optimización multiobjetivo (NSGA II) para el diseño eficiente de módulos habitacionales prefabricados. El estudio utiliza como caso de estudio una vivienda modular en San Javier, Santa Fe, evaluando 85,680 configuraciones posibles basadas en variables de la envolvente opaca y orientación. Los resultados demuestran que la construcción modular reduce significativamente la demanda de energía para climatización en comparación con las técnicas tradicionales, gracias a un equilibrio óptimo entre la resistencia térmica de los materiales aislantes (EPS, PIR/PUR) y la capacidad de disipación de calor de la envolvente.
Este trabajo constituye el núcleo metodológico del Capítulo 8. En él se presenta la metodología de optimización para el diseño óptimo de envolventes.

Diseño de envolventes térmicamente eficientes: optimización multiobjetivo y simulación energética

Autores: M. Cecilia Demarchi, Alejandro E. Albanesi.
Año de publicación: 2025.
Revista: 1º Congreso DE Transición Energética del Norte Santafesino. Secretaría de Ciencia y Tecnología del rectorado de la Universidad Tecnológica Nacional. ISSN 1666-6933.

Mediante la metodología ya implementada, en este estudio se analiza una vivienda unifamiliar en tres localidades de la provincia de Santa Fe (Rosario, Sauce Viejo y Reconquista), evaluando orientaciones y materiales de la envolvente opaca y transparente. Los resultados demuestran que las envolventes optimizadas reducen el consumo total de energía entre un 40 % y 50 % respecto a construcciones clásicas. Se concluye que el aislamiento masivo no es sinónimo de eficiencia, sino que se requiere un equilibrio de propiedades térmicas que permitan, por ejemplo, la disipación de calor hacia el terreno a través del piso en climas locales.
En este trabajo se crea el prototipo VERA utilizado para el diseño óptimo de envolvente, Capítulo 8 de esta tesis.

Apéndice B

Tablas Auxiliares y Datos de Soporte

B.1. Datos complementarios al Capitulo III

Tabla B.1: Propiedades termofísicas de los materiales de mampostería de la vivienda MEVIR

Nombre	Espesor (m)	Cond. (W/m-K)	Densidad (kg/m^3)	Calor Esp. (J/kg-K)	Abs. Térm.	Abs. Solar
Lad. cerámico macizo 12 cm	0.12	0.65	1300	1000	0.93	0.55
Lad. cerámico macizo 5 cm a la vista	0.05	0.79	1300	1000	0.93	0.55
Lad. cerámico macizo 5 cm Blanco	0.05	0.79	1300	1000	0.93	0.55
EPS 5 cm	0.05	0.04	15	1300	0.90	0.60
Ceramico Blanco 8mm	0.008	1.00	2000	800	0.90	0.45
Revoque Impermeable 1 cm	0.01	1.40	2100	1000	0.90	0.60

Tabla B.2: Propiedades termofísicas de los materiales del piso de la vivienda MEVIR

Nombre	Espesor (m)	Cond. (W/m-K)	Densidad (kg/m^3)	Calor Esp. (J/kg-K)	Abs. Térm.	Abs. Solar
Mosaico Granitico 2.5 cm	0.025	1.00	2000	800	0.90	0.45
Mezcla de asiento 2cm	0.020	0.41	1000	1000	0.90	0.50
Contrapiso H°P° 12 cm	0.120	2.30	2300	1000	0.90	0.50

Tabla B.3: Propiedades termofísicas de los materiales de techo de la vivienda MEVIR

Nombre	Espesor (m)	Cond. (W/m-K)	Densidad (kg/m^3)	Calor Esp. (J/kg-K)	Abs. Térm.	Abs. Solar
Cahpa Blanca Ext/Inte	0.0061	50.00	7800	450	0.25	0.40
EPS 15 cm	0.1500	0.04	15	1300	0.90	0.60
Losa H°A° 10 cm (cielorraso baño)	0.1000	2.30	2300	1000	0.90	0.50

Tabla B.4: Propiedades ópticas y térmicas del material de acristalamiento de la vivienda MEVIR

Propiedad	Valor
Espesor (m)	0.003
Transmitancia Solar	0.837
Reflectancia Solar (Frontal/Posterior)	0.075 / 0.075
Transmitancia Visible	0.898
Reflectancia Visible (Frontal/Posterior)	0.081 / 0.081
Transmitancia Infrarroja	0.00
Emisividad Infrarroja (Frontal/Posterior)	0.84 / 0.84
Conductividad (W/m-K)	0.90

B.2. Datos complementarios al Capitulo IV

Tabla B.5: Propiedades termofísicas de componentes de mampostería del edificio SOFIA

Nombre	**Espesor (m)**	**Resist. (m^2-K/W)**	**Cond. (W/m-K)**	**Densidad (kg/m^3)**	**Abs. Térm.**	**Abs. Solar**
Material de frente	—	0.0313	—	—	0.90	0.25
EPS 10 cm	0.1000	3.03	0.033	20.00	0.90	0.60
Lad. cerámico portante 25 cm	0.25	0.8065	0.310	538.33	0.90	0.60
Revoque grueso	0.0143	0.0164	0.870	1750.00	0.90	0.25

Tabla B.6: Propiedades termofísicas de los materiales del piso edificio SOFIA

Nombre	**Espesor (m)**	**Cond. (W/m-K)**	**Densidad (kg/m^3)**	**Calor Esp. (J/kg-K)**	**Abs. Térm.**	**Abs. Solar**
Losa H°A° 20 cm	0.20	1.630	2400	960	0.90	0.60
EPS 10 cm	0.10	0.033	20	1500	0.90	0.60

Tabla B.7: Propiedades termofísicas de los materiales del techo del edificio SOFIA

Nombre	**Espesor (m)**	**Resist. (m^2-K/W)**	**Cond. (W/m-K)**	**Densidad (kg/m^3)**	**Abs. Térm.**	**Abs. Solar**
Aislación hidrófuga	—	0.0313	—	—	0.95	0.95
Estructura de madera	0.0150	0.0882	0.170	774.09	0.90	0.60
Lana de vidrio	0.1800	5.6250	0.032	45.00	0.90	0.60
Placa de yeso	0.0160	0.0762	0.210	900.00	0.90	0.25

Tabla B.8: Propiedades ópticas y térmicas del vidrio, Acristalamiento TVH, edificio SOFIA

Propiedad	**Valor**
Espesor (m)	0.060
Transmitancia Solar	0.778
Reflectancia Solar (Frontal/Posterior)	0.071 / 0.071
Transmitancia Visible	0.881
Reflectancia Visible (Frontal/Posterior)	0.080 / 0.080
Transmitancia Infrarroja	0.000
Emisividad Infrarroja (Frontal/Posterior)	0.840 / 0.840
Conductividad (W/m-K)	0.900
Factor de Corrección por Suciedad	0.6298

B.3. Datos complementarios al Capitulo VII

Tabla B.9: Propiedades termofísicas de materiales fijos de la envolvente (Muros, Pisos y Techos).

Elemento / Material	**Espesor (m)**	**Cond. (k) (W/mK)**	**Dens. (ρ) (kg/m³)**	**Calor Esp. (c_p) (J/kgK)**
Revoque Grueso (Ext/Int)	0,025	0,95	1900	920
Cerámico	0,010	1,20	2100	840
Carpeta de Asiento	0,020	1,00	2000	900
Losa H°A° Piso	0,100	1,60	2400	900
Losa H°A° Techo	0,100	1,60	2400	900

Tabla B.11: Propiedades termofísicas del material aislante (EPS) y su ubicación en la envolvente.

Elemento	**Espesor** [cm]	**Cond.** (k) [W/mK]	**Dens.** (ρ) [kg/m³]	**Posición**
Muro	2 a 20	0,035	15	Interior / Entre capas / Exterior
Piso	2 a 20	0,035	15	Inferior
Techo	2 a 20	0,035	15	Superior / Inferior

Tabla B.13: Propiedades ópticas de las terminaciones de pared del prototipo VERA

Color	**Abs. Térmica**	**Abs. Solar**
Blanco	0.85	0.25
Beige	0.85	0.30
Gris Claro	0.85	0.35

Tabla B.14: Propiedades termofísicas de ladrillos para el prototipo VERA

Descripción / Nombre	**Espesor (m)**	**Cond. (W/m-K)**	**Densidad (kg/m^3)**	**Calor Esp. (J/kg-K)**
Ladrillo Hueco 8cm	0.08	0.45	800	840
Ladrillo Hueco 12cm	0.12	0.40	800	840
Ladrillo Común 5cm	0.05	0.75	1800	840
Ladrillo Común 12cm	0.12	0.75	1800	840
Ladrillo Portante 12cm	0.12	0.50	1000	840
Ladrillo Portante 18cm	0.18	0.40	1000	840
Ladrillo Común 20cm	0.20	0.75	1800	840
Ladrillo Común 25cm	0.25	0.75	1800	840
Ladrillo Común 30cm	0.30	0.75	1800	840
Bloque Hormigón 14cm	0.14	1.10	2000	1000
Bloque Hormigón 19cm	0.19	1.10	2000	100

Tabla B.15: Propiedades termofísicas de los materiales para el techo prototipo VERA

Nombre / Acabado	**Espesor (m)**	**Cond. (W/m-K)**	**Densidad (kg/m^3)**	**Abs. Térm.**	**Abs. Solar**
Chapa acanalada n° 25	0.005	50	7850	**Var.**	**Var.**
— Galvanizado	-	-	-	0.10	0.25
— Cincalum	-	-	-	0.35	0.25
— Gris Silver	-	-	-	0.85	0.40
— Gris Pizarra	-	-	-	0.85	0.70
— Negro	-	-	-	0.95	0.95
Teja Francesa	0.0015	1	1900	**Var.**	**Var.**
— Roja	-	-	-	0.85	0.65
— Negra	-	-	-	0.85	0.95

Tabla B.16: Propiedades térmicas de acristalamientos para el prototipo VERA.

Tipo	**Configuración**	**U [W/m²K]**	**SHGC**
Vidrio Simple	3 mm	5.778	0.819
	6 mm	5.894	0.899
Doble Vidriado	3 / 6 / 3 mm	2.720	0.764
	6 / 6 / 6 mm	2.670	0.703
	3 / 13 / 3 mm	2.556	0.764
	6 / 13 / 6 mm	2.511	0.704
Triple Vidriado	3 / 13 / 3 / 13 / 3 mm	1.624	0.685

Tabla B.17: Costos de construcción Prototipo VERA.

Categoría / Material	**Espesor/Config.**	**Precio (USD)**
Mampostería (Precio por unidad)		
Ladrillo Hueco	0,08 m	16,00
Ladrillo Hueco	0,12 m	24,00
Ladrillo Común	0,05 m	12,50
Ladrillo Común	0,12 m	40,00
Ladrillo Portante	0,12 m	27,50
Ladrillo Portante	0,18 m	32,50
Ladrillo Común	0,20 m	57,50
Ladrillo Común	0,25 m	70,00
Ladrillo Común	0,30 m	80,00
Bloque Hormigón	0,14 m	32,50
Bloque Hormigón	0,19 m	37,50
Aislante Térmico EPS (Precio por m^2)		
EPS Aislante (Incremento cada 2 cm)	2 a 20 cm	2,60 a 26,00
Acristalamientos (Precio por m^2)		
Vidrio Simple	3 mm	20,00
Vidrio Simple	6 mm	40,00
Doble Vidriado Hermético	3 / 6 / 3 mm	80,00
Doble Vidriado Hermético	3 / 13 / 3 mm	126,60
Doble Vidriado Hermético	6 / 6 / 6 mm	120,00
Doble Vidriado Hermético	6 / 13 / 6 mm	166,60
Triple Vidriado Hermético	3 / 13 / 3 / 13 / 3 mm	233,20
Protecciones Solares (Precio por m^2)		
Aleros y Galerías	—	100,00

Bibliografía

[1] Abdou, N., Mghouchi, Y. E., Hamdaoui, S., Asri, N. E., and Mouqallid, M. (2021). Multi-objective optimization of passive energy efficiency measures for net-zero energy building in morocco. *Building and Environment*, 204:108141.

[2] Acar, U., Kaska, O., and Tokgoz, N. (2021). Multi-objective optimization of building envelope components at the preliminary design stage. *Journal of Building Engineering*, 42:102499.

[3] Afzal, S., Ziapour, B. M., et al. (2023). Building energy consumption prediction using multilayer perceptron neural network-assisted models. *Energy*, 282:128446.

[4] Al-Kabaha, Y., Bataineh, K., and Aburabi'e, M. (2025). Multi-objective optimization of energy consumption, cost and emission for a residential building. *Heliyon*, 11(3):e42139.

[5] Alaa, H., Yehia, M., and Ayoub, M. (2025). Metaheuristic optimization of roof designs to enhance energy performance and thermal comfort using parametrization and machine learning. *Solar Energy*, 286:113186.

[6] Alamino Naranjo, Y., Kuchen, E., et al. (2015). Monitoreo de funcionamiento para el edificio público de obras sanitarias san juan. *Hábitat Sustentable*, 5(1):14–23.

[7] Alesci, R., Fiorentini, M., Zanetti, E., and Scoccia, R. (2025). Energy flexibility quantification of the building's thermal mass for radiator and floor heating systems. *Energy*, 325:135903.

[8] Alexakis, K., Benekis, V., et al. (2025). Genetic algorithm-based multi-objective optimisation for energy-efficient building retrofitting: A systematic review. *Energy and Buildings*, 328:115216.

[9] Alias, H. M. (2024). Efecto de las protecciones solares en el requerimiento de energía. *ADNea*.

[10] Alimohamadi, R. and Jahangir, M. H. (2024). Multi-objective optimization of energy consumption pattern in order to provide thermal comfort and reduce costs in a residential building. *Energy Conversion and Management*, 305:118214.

[11] Allesina, G., Mussatti, E., Ferrari, F., and Muscio, A. (2018). A calibration methodology for building dynamic models based on data collected through survey and billings. *Energy and Buildings*, 158:406–416.

[12] Almeida, R. and Freitas, V. (2016). An insulation thickness optimization methodology for school buildings rehabilitation. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22:915–923.

[13] Alonso Frank, A. and Kuchen, E. (2016). Desarrollo de una herramienta para validar la influencia del comportamiento del usuario sobre la eficiencia energética. *Hábitat Sustentable*.

[14] Alsharif, R., Arashpour, M., Golafshani, E., Rashidi, A., and Li, H. (2023). Multi-objective optimization of shading devices using ensemble machine learning and orthogonal design of experiments. *Energy and Buildings*, 283:112840.

[15] Alvarez, A. A., Kurban, A. S., et al. (2012). Tipologías constructivas residenciales y consumo energético. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[16] Anand, J. (2026). Optimizing inner and outer surface radiative properties of exterior walls to minimize building energy use and urban heat release. *Energy and Buildings*, 351:116735.

[17] Andersen, M., Discoli, C. A., et al. (2017). Monitoreo energético y estrategias de retrofit para viviendas sociales en clima frío. *Hábitat Sustentable*, 7(2):50–63.

[18] Araújo, G. R., Gomes, R., et al. (2024). Optimizing building retrofit through data analytics. *Energy*

and Built Environment, 5(6).

[19] Arballo, B. D., Kuchen, E., and Chuk, D. (2019). Optimizacion de la eficiencia energética en san juan. *Hábitat Sustentable*, 9(1):58–67.

[20] Arballo, B. D., Kuchen, E., and Chuk, D. (2022). Optimizacion multiobjetivo de la eficiencia energética en san juan. *Hábitat Sustentable*, 12(1):102–113.

[21] Arboit, M. and Betman, E. (2017). Evaluation of the energy impact of green area surfaces and vegetation cover in mendoza. *Procedia Environmental Sciences*, 37:112–130.

[22] Arboit, M. E., Maglione, D. S., and Mutani, G. (2020). Determinacion del factor de forma (ff): el caso del área metropolitana de mendoza. *Cuaderno Urbano*.

[23] Arbulu, M., Perez-Bezos, S., et al. (2024). Opportunities and barriers of calibrating residential building performance simulation models. *Buildings*, 14(7).

[24] Aruta, G., Ascione, F., Bianco, N., Mauro, G. M., and Villano, F. (2025). Artificial neural networks to forecast building heating/cooling demand and climate resilience. *Journal of Building Engineering*, 108:112849.

[25] Asadi, E. et al. (2014). Multi-objective optimization for building retrofit: Genetic algorithm and ann. *Energy and Buildings*, 81.

[26] Asadi, S., Mostavi, E., et al. (2019). Building energy model calibration using automated optimization-based algorithm. *Energy and Buildings*, 198:106–114.

[27] Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M., and Vanoli, G. P. (2015a). Design of the building envelope: A novel multi-objective approach for the optimization of energy performance and thermal comfort. *Sustainability*, 7(8):10809–10836.

[28] Ascione, F., Bianco, N., et al. (2016a). Net zero-energy buildings in germany: Design, model calibration and lessons learned. *Energy and Buildings*, 133:688–710.

[29] Ascione, F., Bianco, N., et al. (2020). A real industrial building: Modeling, calibration and pareto optimization of energy retrofit. *Journal of Building Engineering*, 29:101186.

[30] Ascione, F., Bianco, N., Masi, R. F. D., Mauro, G. M., and Vanoli, G. P. (2017). Resilience of robust cost-optimal energy retrofit of buildings to global warming. *Energy and Buildings*, 153:150–167.

[31] Ascione, F., Bianco, N., Mauro, G. M., and Napolitano, D. F. (2019). Building envelope design: Multi-objective optimization to minimize energy consumption, global cost and thermal discomfort. application to different italian climatic zones. *Energy*, 174:359–374.

[32] Ascione, F., Bianco, N., Stasio, C. D., et al. (2016b). Simulation-based model predictive control by the multi-objective optimization of building energy performance and thermal comfort. *Energy and Buildings*, 111:131–144.

[33] Ascione, F., Bianco, N., Stasio, C. D., Mauro, G. M., and Vanoli, G. P. (2015b). A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance. *Energy and Buildings*, 88:78–90.

[34] Ascione, F., Bianco, N., Stasio, C. D., Mauro, G. M., and Vanoli, G. P. (2016c). Multi-stage and multi-objective optimization for energy retrofitting a developed hospital reference building: A new approach to assess cost-optimality. *Applied Energy*, 174:37–68.

[35] ASHRAE (2023a). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2023: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ASHRAE.

[36] ASHRAE (2023b). *ASHRAE Guideline 14-2023: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*. ASHRAE.

[37] Atanasoska, K. (2024). Optimizacion del diseño de un edificio público en mar chiquita. *Anales de Investigacion en Arquitectura*, 14(2).

[38] Azari, R. (2014). Integrated energy and environmental life cycle assessment of office building envelopes. *Energy and Buildings*, 82.

[39] Baba, F. M., Ge, H., et al. (2022). Calibration of building model based on indoor temperature for

overheating assessment using genetic algorithm. *Building and Environment*, 207:108518.

[40] Balter, J., Ganem, C., and Barea, G. (2020). Mejoras en el desempeño energético mediante envolventes ventiladas. *Hábitat Sustentable*, 10(2):94–105.

[41] Balter, J., Ganem, C., and Canton, M. A. (2010). Edificios vidriados en ciudades oasis. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[42] Balter, J., Ganem, C., and Discoli, C. (2015). Edificios en altura másicos y livianos en ciudades-oasis. *Ambiente Construído*, 16(1):39–54.

[43] Balter, J., Ganem, C., and Discoli, C. (2016). On high-rise residential buildings in an oasis-city. *Energy and Buildings*, 113:61–73.

[44] Balter, J., Ganem, C., and Mercado, M. V. (2023). Desempeño energético de una vivienda en mendoza mediante rehabilitacion con envolvente ventilada. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 50:22–28.

[45] Balter, J., Mercado, M. V., and Ganem, C. (2019). Desempeño termo-energético de viviendas en altura en mendoza. *VI Congreso Latinoamericano de Simulacion de Edificios*.

[46] Barbero, D. A., Urteneche, E., and Martini, I. (2024). Soluciones tecnologico-constructivas frecuentes para mejorar eficiencia energética. *Estudios del hábitat*, 21(2):e134.

[47] Barea Paci, G. J., Ganem, C., and Esteves Miramont, A. (2009). Análisis térmico invernal de una vivienda unifamiliar no-tradicional en la ciudad de mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[48] Bastos Porsani, G., Echeverría Trueba, J. B., et al. (2024). Triple validation of calibrated building energy models with different air infiltration values. *Applied Sciences*, 14(23).

[49] Bayomi, N., Nagpal, S., Rakha, T., and Fernandez, J. E. (2021). Building envelope modeling calibration using aerial thermography. *Energy and Buildings*, 233:110648.

[50] Beaulac, A., Lalonde, T., et al. (2024). Energy modeling, calibration, and validation of a small-scale greenhouse using trnsys. *Applied Thermal Engineering*, 248:123195.

[51] Belarbi, Y. E., Ferroukhi, M. Y., Issaadi, N., Poullain, P., and Bonnet, S. (2024). Assessment of hygrothermal performance of raw earth envelope at overall building scale. *Energy and Buildings*, 310:114119.

[52] Belloum, R., Agoudjil, B., Chennouf, N., and Boudenne, A. (2022). Hygrothermal performance assessment of a bio-based building made with date palm concrete walls. *Building and Environment*, 223:109467.

[53] Benaddi, F. Z., Boukhattem, L., and Tabares-Velasco, P. C. (2024). Multi-objective optimization of building envelope components based on economic, environmental, and thermal comfort criteria. *Energy and Buildings*, 305:113909.

[54] Benincá, L., Sánchez, E. C., Passuello, A., Leitzke, R. K., da Cunha, E. G., and Barroso, J. M. G. (2023). Multi-objective optimization of the solar orientation of two residential multifamily buildings in south brazil. *Energy and Buildings*, 285:112838.

[55] Berardi, U. (2017). A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends. *Resources, Conservation and Recycling*, 123:230–241.

[56] Betman, A., Balter, J., et al. (2024). Influencia de los parámetros de diseño de protecciones solares en mendoza. *Hábitat Sustentable*, 14(2):122–133.

[57] Bichiou, Y. and Krarti, M. (2011). Optimization of envelope and hvac systems selection for residential buildings. *Energy and Buildings*, 43(12):3373–3382.

[58] Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., Pérez-Ordoñez, J. L., and Moyano, J. (2019). Optimizing the evaluation of thermal transmittance with the thermometric method using multilayer perceptrons. *Energy and Buildings*, 198:395–411.

[59] Boutet, M. L. and Hernández, A. L. (2024). Optimizacion bioclimática de parámetros de la envolvente de un jardín de infantes. *Arquitecno*, (23).

[60] Braulio-Gonzalo, M. and Bovea, M. D. (2017). Environmental and cost performance of building's

envelope insulation materials to reduce energy demand: Thickness optimisation. *Energy and Buildings*, 150:527–545.

[61] Bre, F. and Fachinotti, V. D. (2017). A computational multi-objective optimization method to improve energy efficiency and thermal comfort in dwellings. *Energy and Buildings*, 154:283–294.

[62] Bre, F., Silva, A. S., Ghisi, E., and Fachinotti, V. D. (2016). Residential building design optimisation using sensitivity analysis and genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 133:853–866.

[63] Cacabelos, A., Eguía, P., Febrero, L., and Granada, E. (2017). Development of a new multi-stage building energy model calibration methodology and validation in a public library. *Energy and Buildings*, 146:182–199.

[64] Camporeale, P. and Czajkowski, J. (2018). Optimizacion de consumo energético de un modelo de diseño paramétrico. *Estudios del hábitat*, 16:e041.

[65] Carlucci, S., Cattarin, G., Causone, F., and Pagliano, L. (2015). Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (nsga-ii). *Energy and Buildings*, 104:378–394.

[66] Chae, Y. and Kim, S. H. (2022). Selection of retrofit measures for reasonable energy and hygrothermal performances of modern heritage building under dry cold and hot humid climate. *Case Studies in Thermal Engineering*, 36:102243.

[67] Chang, S., Castro-Lacouture, D., and Yamagata, Y. (2020). Decision support for retrofitting building envelopes using multi-objective optimization under uncertainties. *Journal of Building Engineering*, 32:101413.

[68] Chegari, B., Tabaa, M., Simeu, E., Moutaouakkil, F., and Medromi, H. (2021). Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort by combining artificial neural networks and metaheuristic algorithms. *Energy and Buildings*, 239:110839.

[69] Chen, K. W., Janssen, P., and Schlueter, A. (2018). Multi-objective optimisation of building form, envelope and cooling system for improved building energy performance. *Automation in Construction*, 94:449–457.

[70] Cho, H. M., Yang, S., Wi, S., Chang, S. J., and Kim, S. (2020). Hygrothermal and energy retrofit planning of masonry façade historic building used as museum and office: A cultural properties case study. *Energy*, 201:117607.

[71] Chong, A., Augenbroe, G., and Yan, D. (2021a). Occupancy data at different spatial resolutions: Building energy performance and model calibration. *Applied Energy*, 286:116492.

[72] Chong, A., Gu, Y., and Jia, H. (2021b). Calibrating building energy simulation models: A review of the basics to guide future work. *Energy and Buildings*, 253:111533.

[73] Chong, A. and Menberg, K. (2018). Guidelines for the bayesian calibration of building energy models. *Energy and Buildings*, 174:527–547.

[74] Ciardiello, A., Rosso, F., et al. (2020). Multi-objective approach to the optimization of shape and envelope in building energy design. *Applied Energy*, 280:115984.

[75] Cipriano, J., Mor, G., et al. (2015). Evaluation of a multi-stage guided search approach for the calibration of building energy simulation models. *Energy and Buildings*, 87:370–385.

[76] Coakley, D., Raftery, P., and Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37:123–141.

[77] Coelho, G. B. A. and Henriques, F. M. A. (2021). Performance of passive retrofit measures for historic buildings that house artefacts viable for future conditions. *Sustainable Cities and Society*, 71:102982.

[78] Coelho, G. B. A. and Kraniotis, D. (2023). A multistep approach for the hygrothermal assessment of a hybrid timber and aluminium based facade system exposed to different sub-climates in norway. *Energy and Buildings*, 296:113368.

[79] Coronato, T., Navone, H. D., and Abalone, R. M. (2017). Coronato, tanea; navone, hugo daniel; abalone, rita monica. *Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[80] Costa-Carrapiço, I., Raslan, R., and González, J. N. (2020). A systematic review of genetic algorithm-based multi-objective optimisation for building retrofitting strategies towards energy efficiency. *Energy and Buildings*, 210:109690.

[81] Costantini Romero, A. B. et al. (2016). Evaluacion del comportamiento térmico reemplazando material por suelo-cemento. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[82] Cui, W., Liu, G., Wang, Y., and Li, K. (2024). Integrated optimization of the building envelope and the hvac system in office building retrofitting. *Case Studies in Thermal Engineering*, 62:105185.

[83] Cuitino-Rosales, M. G. et al. (2024). Análisis térmico de muros de quincha alivianada para diferentes temperaturas de diseño en argentina. *Revista hábitat sustentable*, 14:134–147.

[84] Cunsulo, M. E. and Martinez, C. (2018). Evaluacion térmica de vivienda rural bioclimática en tierra cruda. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[85] D'Agostino, D. and Parker, D. (2018). A framework for the cost-optimal design of nearly zero energy buildings (nzebs) in representative climates across europe. *Energy*, 149:814–829.

[86] D'Amanzo, M., Ganem, C., and Mercado, M. V. (2022). Comportamiento térmico y balance energético neto de un edificio de oficina de mendoza. *Arquitecno*, (20):22–32.

[87] Deb, K., Pratap, A., et al. (2000). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. In *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI*, pages 849–858. Springer.

[88] Delgarm, N., Sajadi, B., Kowsary, F., and Delgarm, S. (2016). Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (pso). *Applied Energy*, 170:293–303.

[89] Demarchi, M. C., Canessa, S. G., Pena, G., Albanesi, A. E., and Favre, F. (2025). Enhancing the accuracy of thermal model calibration: Integrating zone air and surface temperatures, convection coefficients, and solar and thermal absorptivity. *Energy and Buildings*, 336:115617.

[90] Di Bernardo, Á., Alias, H. M., and Filippin, M. C. (2024). El microclima del entorno en el desempeño termoenergético residencial. *Cuaderno urbano*.

[91] Di Bernardo, A., Filippin, M. C., and Pipa, D. A. (2011). Desempeño térmico-energético de un prototipo demostrativo de vivienda de interés social. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[92] Diulio, M. d. l. P., Reus Netto, G., et al. (2016). Impacto de la envolvente en la demanda de energía en calefaccion residencial. *Ambiente Construido*.

[93] Dlimi, M., Iken, O., Agounoun, R., et al. (2019). Energy performance and thickness optimization of hemp wool insulation and air cavity layers integrated in moroccan building walls. *Sustainable Production and Consumption*, 20:273–288.

[94] Documentation, E. (2023a). *Engineering Reference*. U.S. Department of Energy.

[95] Documentation, E. (2023b). *Input Output Reference*. U.S. Department of Energy.

[96] Dong, B., O'Neill, Z., et al. (2014). Development and calibration of an online energy model for campus buildings. *Energy and Buildings*, 76:316–327.

[97] Dubrow, D. T. and Krarti, M. (2010). Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and Environment*, 45:1574–1581.

[98] Elsinger, D., Fernández, A., and Garzon, B. S. (2021). Calculator integral de eficiencia energética de la envolvente arquitectonica: Cidee-ea. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[99] Es-sakali, N., Pfafferott, J., Mghazli, M. O., and Cherkaoui, M. (2025). Towards climate-responsive net zero energy rural schools: A multi-objective passive design optimization with bio-based insulations, shading, and roof vegetation. *Sustainable Cities and Society*, 120:106142.

[100] Eskander, M. M., Sandoval-Reyes, M., Silva, C. A., et al. (2017). Assessment of energy efficiency measures using multi-objective optimization in portuguese households. *Sustainable Cities and Society*, 35:764–773.

[101] Esteves, A., Esteves, M. J., et al. (2024). Sustainable building in rural area: the remodeling and expansion of the health center n132 malargüe. *Revista Produção e Desenvolvimento*, 10:e656.

[102] Esteves, A., Mercado, M. V., and Ortiz Baeza, J. (2021). Arquitectura sustentable. viviendas de montaña para el centro-oeste de argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16:123–129.

[103] Esteves Miramont, A. and Gelardi, D. (2010). Relacion entre la ganancia solar y la calefaccion auxiliar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[104] Esteves Miramont, A., Gelardi, D., et al. (2004). Eficiencia economica de la masa térmica en el acondicionamiento térmico. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[105] Esteves Miramont, A., Scalia, A., et al. (2021). Impacto economico de estrategias bioclimáticas utilizando programa btes. *Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[106] Fachinotti, V. D., Bre, F., et al. (2020). Optimization of multilayered walls for building envelopes including pcm-based composites. *Materials*, 13(12).

[107] Fang, A., Chen, Y., and Wu, L. (2021). Modeling and numerical investigation for hygrothermal behavior of porous building envelope subjected to the wind driven rain. *Energy and Buildings*, 231:110572.

[108] Feehan, A., Nagpal, H., Marvuglia, A., and Gallagher, J. (2021). Adopting an integrated building energy simulation and life cycle assessment framework for the optimisation of facades and fenestration in building envelopes. *Journal of Building Engineering*, 43:103138.

[109] Feng, G., Chen, X., Chang, S., Cheng, Y., and Tang, Y. (2025). Collaborative multi-objective optimization of active and passive technologies for zero-carbon buildings. *Journal of Building Engineering*, 115:114402.

[110] Fernández, A. and Garzon, B. (2020). Evaluacion energética y mejoras tecnologicas en un centro de salud. *Extensionismo, Innovacion y Transferencia Tecnologica*, 6:359–367.

[111] Fernández, A. and Garzon, B. (2021). Rehabilitacion de muros exteriores en centros de salud en tucumán. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 24:31–40.

[112] Fernández, A. and Garzon, B. S. (2023). Comportamiento higrotérmico y consumo energético de un centro de salud en san miguel de tucumán. *Arquitecno*, (22):1–11.

[113] Fernández, A. and Garzon, B. S. (2024). Rehabilitacion térmica de la envolvente edilicia de edificios en altura. *Estudios del hábitat*, 21(2):e130.

[114] Fernandez, A., Garzon, B. S., and Elsinger, D. (2020). Incidencia de las estrategias pasivas en la etiqueta de eficiencia energética. *Hábitat Sustentable*, 10(1):56–67.

[115] Fernandez, A. and Silvia Garzon, B. (2025). Estrategias de rehabilitacion de aplicacion generalizada en muros de caps en tucumán. *Hábitat Sustentable*, 15(1):44–53.

[116] Fernández Bandera, C., Muñoz Mardones, A. F., et al. (2018). Exergy as a measure of sustainable retrofitting of buildings. *Energies*, 11(11).

[117] Filippin, M. C. and Flores Larsen, S. E. (2023). Ejemplos de arquitectura bioclimática. *Asociacion Argentina para el Progreso de las Ciencias*.

[118] Filippin, M. C., Flores Larsen, S. E., and Marek, L. (2020). Performance térmico energética de un edificio bioclimático. *Ambiente and Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[119] Flores-Larsen, S., Filippín, C., and Barea, G. (2019). Impact of climate change on energy use and bioclimatic design in argentina. *Energy and Buildings*, 184:216–229.

[120] Flores Larsen, S. E., Hernández, A. L., et al. (2013). Las cargas de calefaccion y el dimensionamiento de colectores solares de aire. *Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[121] Fouladfar, M. H. et al. (2023). Adaptive thermal load prediction in residential buildings using artificial neural networks. *Journal of Building Engineering*, 77:107464.

[122] Fragnito, A., Andreasen, C. S., Iasiello, M., Mauro, G. M., and Bianco, N. (2025). Exploring thermal insulation enhancement in differentially heated cavities through topology optimization. *International Journal of Thermal Sciences*, 212:109748.

[123] Ganem Karlen, C., Balter, J., et al. (2015). Evaluacion del desempeño ambiental de dos bodegas en mendoza. *Hábitat Sustentable*, 5(1):4–13.

[124] Gea-Salim, C., Flores-Larsen, S., et al. (2024). A framework for multi-objective optimization in energy retrofit of heritage museums. *Heritage*, 7:7210–7235.

[125] Gea Salim, C., Hongn, M. E., et al. (2019). Evaluacion térmica y de confort en salas del cabildo de salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[126] Gelardi, D., Esteves Miramont, A., and Barea Paci, G. J. (2012). Ampliacion bioclimática de vivienda urbana con tecnología no tradicional. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[127] Gemici, Z., Sevindir, M. K., and Demir, H. (2026). A second-law analysis-based analytical method for insulation thickness optimization in a space with constant insulation volume. *Applied Thermal Engineering*, 282:128880.

[128] Gimenez, J. M., Bre, F., et al. (2018). Computational modeling of natural ventilation in low-rise non-rectangular floor-plan buildings. *Building Simulation*, 11.

[129] Giovino, M. L. and Dellicompagni, P. (2023). Desempeño higrotérmico de una vivienda de quincha en alta montaña andina. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 51:47–56.

[130] Giuliani, M., Henze, G. P., and Florita, A. R. (2016). Modelling and calibration of a high-mass historic building. *Energy and Buildings*, 116:434–448.

[131] Giuliano, G., Saez, V., and Garzon, B. (2022). University building with almost zero energy and carbon. *ARQUISUR Revista*, 12(22):56–65.

[132] Giuliano Raimondi, G. and Garzon, B. S. (2016). Prototipo rural de educacion inicial en santiago del estero. *Revista de Estudios del Hábitat*.

[133] Giuliano Raimondi, G. and Garzon, B. S. (2020). Evaluacion del confort higrotérmico de una escuela rural y su rediseño en silípica. *PENSUM*.

[134] Gong, Q., Ding, W., et al. (2025). Multi-objective optimization framework for the building envelope of public rental housing in china's cold regions. *Journal of Building Engineering*, 104:112261.

[135] González, V. G. and Bandera, C. F. (2022). A building energy models calibration methodology based on inverse modelling approach. *Building Simulation*, 15:1883–1898.

[136] Gossard, D., Lartigue, B., and Thellier, F. (2013). Multi-objective optimization of a building envelope for thermal performance using genetic algorithms and artificial neural network. *Energy and Buildings*, 67:253–260.

[137] Gutiérrez González, V., Ramos Ruiz, G., et al. (2020). Empirical and comparative validation for a building energy model calibration methodology. *Sensors*, 20(17).

[138] Gutiérrez González, V. and Fernández Bandera, C. (2022). A building energy models calibration methodology based on inverse modelling approach. *Building Simulation*, 15(2).

[139] Guyot, D., Giraud, F., et al. (2020). Building energy model calibration: A detailed case study using sub-hourly measured data. *Energy and Buildings*, 223:110189.

[140] Hagentoft, C.-E. and Pallin, S. (2021). A conceptual model for how to design for building envelope characteristics. impact of thermal comfort intervals and thermal mass on commercial buildings in u.s. climates. *Journal of Building Engineering*, 35:101994.

[141] Hamdy, M., Hasan, A., and Siren, K. (2011). Applying a multi-objective optimization approach for design of low-emission cost-effective dwellings. *Building and Environment*, 46(1):109–123.

[142] Hamdy, M., Palonen, M., and Hasan, A. (2012). Implementation of pareto-archive nsga-ii algorithms to a nearly-zero-energy building optimisation problem. In *Proceedings of BSO Conference 2012*, pages 181–188, Loughborough, UK.

[143] Harmathy, N., Magyar, Z., and Folić, R. (2016). Multi-criterion optimization of building envelope in the function of indoor illumination quality towards overall energy performance improvement. *Energy*, 114:302–317.

[144] Harshalatha, Patil, S., and Kini, P. G. (2024). Calibration of simulation model to analyze hospital building energy performance. *Energy and Buildings*, 313:114242.

[145] Hashempour, N., Taherkhani, R., and Mahdikhani, M. (2020). Energy performance optimization of

existing buildings: A literature review. *Sustainable Cities and Society*, 54:101967.

[146] Havinga, L. and Schellen, H. (2019). The impact of convective vapour transport on the hygrothermal risk of the internal insulation of post-war lightweight prefab housing. *Energy and Buildings*, 204:109418.

[147] He, L. and Wang, W. (2024). Design optimization of public building envelope based on multi-objective quantum genetic algorithm. *Journal of Building Engineering*, 91:109714.

[148] He, L. and Zhang, L. (2022). A bi-objective optimization of energy consumption and investment cost for public building envelope design based on the epsilon-constraint method. *Energy and Buildings*, 266:112133.

[149] Heo, J., Cho, W., Han, C., Kim, J., and Kim, Y. (2023). Multi-objective optimization and performance evaluation of an integrated dedicated outdoor air system with sensible cooling unit for passive houses. *Energy and Buildings*, 297:113494.

[150] Herbinger, F., Vandenhof, C., and Kummert, M. (2023). Building energy model calibration using a surrogate neural network. *Energy and Buildings*, 289:113057.

[151] Herrera, M. M., Gomez Piovano, M. J., et al. (2012). Evaluacion térmica y economica comparativa de tecnologías alternativas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[152] Holm, A., Kuenzel, H., and Sedlbauer, K. (2003). The hygrothermal behaviour of rooms: Combining thermal building simulation and hygrothermal envelope calculation. *Proceedings of Building Simulation 2003*, pages 499–505.

[153] Hosamo, H., Coelho, G. B. A., Rolfsen, C. N., and Kraniotis, D. (2024). Building performance optimization through sensitivity analysis, and economic insights using ai. *Energy and Buildings*, 325:114999.

[154] Hou, D., Zhan, D., et al. (2023). Development and performance assessment of a new opensource bayesian inference r platform for building energy model calibration. *Discover Mechanical Engineering*, 2.

[155] Hwang, R.-L., Fang, P.-L., and Chen, W.-A. (2023). Impact of solar radiation on indoor thermal comfort near highly glazed façades. *Building and Environment*, 243.

[156] Idris, Y. M. and Mae, M. (2017). Anti-insulation mitigation by altering the envelope layers' configuration. *Energy and Buildings*, 141:186–204.

[157] International Energy Agency (2025). *World Energy Outlook 2025. IEA, Paris*.

[158] IPMVP (2022). *International Performance Measurement and Verification Protocol: Core Concepts*. EVO, Washington, DC.

[159] Janssen, H., Carmeliet, J., and Hens, H. (2004). The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground. *Building and Environment*, 39(7):825–836.

[160] Javed, H., Brambilla, A., and Strang, M. (2022). An australian climate-based characterization of hygrothermal risks for buildings. *Energy and Buildings*, 265:112086.

[161] Ji, Y., Lee, A., and Swan, W. (2019). Building dynamic thermal model calibration using the energy house facility at salford. *Energy and Buildings*, 191:224–234.

[162] Ji, Y., Lv, J., Li, H. X., Liu, Y., Yao, F., Liu, X., and Wang, S. (2024). Improving the performance of prefabricated houses through multi-objective optimization design. *Journal of Building Engineering*, 84:108579.

[163] Jirgensone, B., Birjukovs, M., Sinka, M., Jakovics, A., and Bajare, D. (2024). Hygrothermal performance of hempcrete in a multi-layer wall envelope. *Journal of Building Engineering*, 84:108359.

[164] Johra, H. and Heiselberg, P. (2017). Influence of internal thermal mass on the indoor thermal dynamics and integration of phase change materials in furniture for building energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69:12–32.

[165] Johra, H., Heiselberg, P., and Dréau, J. L. (2019). Influence of envelope, structural thermal mass and indoor content on the building heating energy flexibility. *Energy and Buildings*, 183:325–339.

[166] Junghans, L. and Kim, H. (2025). Evaluation of multiple predictive control strategies to optimally

use building thermal mass to reduce annual operation costs and associated ghg emissions. *Journal of Building Engineering*, 112:113963.

[167] Kamazani, M. A. and Dixit, M. K. (2023). Multi-objective optimization of embodied and operational energy and carbon emission of a building envelope. *Journal of Cleaner Production*, 428:139510.

[168] Kang, Y., Jo, H. H., and Kim, S. (2024). Enhancing indoor comfort and building energy efficiency with cross-laminated timber (clt) in hygrothermal environments. *Journal of Building Engineering*, 84:108582.

[169] Khoso, S., Bakhtavar, E., Abouyoussef, A., Zahid, M., Hewage, K., and Sadiq, R. (2025). Optimizing hybrid insulation systems for diverse climates: A comparative analysis of composite material combinations in residential buildings. *Energy and Buildings*, 348:116433.

[170] Kilis, V., Ploskas, N., and Panaras, G. (2025). Investigation of multi-objective decision making approaches for the optimization in building envelope thermal design. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 82:104506.

[171] Kim, H. and Clayton, M. J. (2020). A multi-objective optimization approach for climate-adaptive building envelope design. *Building and Environment*, 185:107292.

[172] Kim, Y.-S., Heidarinejad, M., et al. (2017). Building energy model calibration with schedules derived from electricity use data. *Applied Energy*, 190:997–1007.

[173] Kolaitis, D. I., Malliotakis, E., Kontogeorgos, D. A., Mandilaras, I., Katsourinis, D. I., and Founti, M. A. (2013). Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings. *Energy and Buildings*, 64:123–131.

[174] Kounni, A. E. et al. (2023). Building energy model automated calibration using pymoo. *Energy and Buildings*, 298:113524.

[175] Kouzzi, S., Hassani, S. E., Morsli, S., Ganaoui, M. E., and lhassane Lahlaouti, M. (2025). Hygrothermal analysis of external walls with hemp wool and phase change materials insulation in mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 336:115602.

[176] Kuchen, E. (2011). Eec – eficiencia energética y confort en el espacio de trabajo. *Andinas*.

[177] Kuchen, E. (2013). Ventilacion de espacios de trabajo en edificios de oficina. *Hábitat Sustentable*, 3(2):55–65.

[178] Kumar, D., Alam, M., Memon, R. A., and Bhayo, B. A. (2022). A critical review for formulation and conceptualization of an ideal building envelope and novel sustainability framework for building applications. *Cleaner Engineering and Technology*, 11:100555.

[179] Kunwar, N., Cetin, K. S., and Passe, U. (2021). Calibration of energy simulation using optimization for buildings with dynamic shading systems. *Energy and Buildings*, 236:110787.

[180] Kurbán, A., Papparelli, A., et al. (2021). Arquitectura bioclimática en zonas áridas del corredor bioceánico central. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16:1–8.

[181] Larsen, S. F., Filippín, C., and Lesino, G. (2015). Modeling double skin green façades with traditional thermal simulation software. *Solar Energy*, 121:56–67.

[182] Le, D. M., Christopher, P., and Ngo, T. (2025). Optimising building envelope retrofits under future climates: Integrating passive, active, and renewable strategies. *Case Studies in Thermal Engineering*, 72:106219.

[183] Li, G., Xiong, J., et al. (2023). Validation of virtual sensor-assisted bayesian inference-based in-situ sensor calibration. *Building Simulation*, 16(2).

[184] Li, K., Pan, L., Xue, W., et al. (2017). Multi-objective optimization for energy performance improvement of residential buildings: A comparative study. *Energies*, 10(2).

[185] Li, L., Zu, S., Miraba, S., Dehkordi, S. A. H. H., Mehr, A. K., Baghoolizadeh, M., Baghaie, S., and Marzouki, R. (2025a). Multi-objective optimization of building performance: Integrating sensitivity analysis for energy efficiency and comfort. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 165:109009.

[186] Li, M., Shen, X., Wu, W., et al. (2025b). Cooling demand reduction with nighttime natural ventilation to cool internal thermal mass under harmonic design-day weather conditions. *Applied Energy*, 379:124947.

[187] Li, W., Tian, Z., Lu, Y., and Fu, F. (2018). Stepwise calibration for residential building thermal performance model using hourly heat consumption data. *Energy and Buildings*, 181:10–25.

[188] Lin, Y. and Yang, W. (2021). Tri-optimization of building shape and envelope properties using taguchi and constraint limit method. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(3):1284–1306.

[189] Lin, Y.-H., Lin, M.-D., et al. (2021). Multi-objective optimization design of green building envelopes and air conditioning systems. *Sustainable Cities and Society*, 64:102555.

[190] Lind, J., Möllerström, E., Averfalk, H., and Ottermo, F. (2023). Energy flexibility using the thermal mass of residential buildings. *Energy and Buildings*, 301:113698.

[191] Liu, H., Du, Z., Xue, T., and Jiang, T. (2025). An integrated artificial intelligence-driven approach to multi-criteria optimization of building energy efficiency and occupants' comfort: A case study. *Journal of Building Engineering*, 103:111944.

[192] Liu, P., Hussein, A. A., et al. (2024a). Multi-objective optimization of office building envelopes properties and venetian blinds using nsga-ii. *Case Studies in Thermal Engineering*, 64:105484.

[193] Liu, R., Wang, G., and Deng, Q. (2024b). Multi-objective optimization of rural residential envelopes in cold regions of china based on performance and economic efficiency. *Case Studies in Thermal Engineering*, 61:104937.

[194] Liu, Y., Chen, H., Zhang, L., and Feng, Z. (2021). Enhancing building energy efficiency using a random forest model: A hybrid prediction approach. *Energy Reports*, 7:5003–5012.

[195] Lopez-Guerrero, R. E., Cruz, A. S., Hong, T., and Carpio, M. (2024). Optimizing urban housing design: Improving thermo-energy performance and mitigating heat emissions from buildings – a latin american case study. *Urban Climate*, 57:102119.

[196] Lozinsky, C. H. and Touchie, M. F. (2018). Improving energy model calibration of multi-unit residential buildings. *Building and Environment*, 134:218–229.

[197] Lu, Y., Hu, J., and Zhong, K. (2022). Optimization of insulation layer location and distribution considering maximum time lag and damping factor. *Case Studies in Thermal Engineering*, 30:101766.

[198] Luo, X., Wang, K., Fan, Y., Fan, Y., Gao, W., and Ge, J. (2025). Multi-objective optimization for green retrofitting of existing school buildings considering life cycle carbon emissions, energy use intensity and indoor environment. *Energy*, 336:138388.

[199] Luo, X., Zhang, Y., et al. (2024). Multi-objective optimization of the office park building envelope with the goal of nearly zero energy consumption. *Journal of Building Engineering*, 84:108552.

[200] Magnier, L. and Haghighat, F. (2010). Multiobjective optimization of building design using trnsys simulations, genetic algorithm, and artificial neural network. *Building and Environment*, 45(3):739–746.

[201] Malatji, E. M., Zhang, J., and Xia, X. (2013). A multiple objective optimisation model for building energy efficiency investment decision. *Energy and Buildings*, 61:81–87.

[202] Mantesi, E., Hopfe, C. J., Cook, M. J., Glass, J., and Strachan, P. (2018). The modelling gap: Quantifying the discrepancy in the representation of thermal mass in building simulation. *Building and Environment*, 131:74–98.

[203] Manzan, M. (2014). Genetic optimization of external fixed shading devices. *Energy and Buildings*, 72:431–440.

[204] Marcilese, M. I. and Czajkowski, J. D. (2013). Análisis simplificado de la eficiencia energética de una escuela rural en la pampa. *Hábitat Sustentable*, 3(1):3–14.

[205] Marino, B. M., Muñoz, N., and Thomas, L. P. (2020). Correlacion entre el comportamiento térmico de muros y las características climáticas del sitio de construccion. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[206] Martínez, S., Eguía, P., et al. (2020). A performance comparison of multi-objective optimization-based approaches for calibrating white-box building energy models. *Energy and Buildings*, page 109942.

[207] Martínez-Mariño, S. et al. (2021). Simulation and validation of indoor temperatures and relative humidity in multi-zone buildings. *Building and Environment*, 200:107973.

[208] Mazzocco, M. P., Filippin, M. C., et al. (2018). Performance energética de una vivienda social en argentina. *Ambiente Construido*.

[209] Mazzocco, M. P., Filippin, M. C., and Flores Larsen, S. E. (2017). Impacto potencial del cambio climático en una escuela solar en argentina. *Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[210] Melchiori, M., San Juan, G., and Discoli, C. (2014). Comparacion del comportamiento energético en dos establecimientos educativos. *Estudios del hábitat*, 12(2):63–81.

[211] Mercado, M. V., Barea-Paci, G. J., et al. (2023). Construccion de modelos matemáticos simples para el cálculo del requerimiento energético. *Hábitat Sustentable*, 13(2):50–61.

[212] Mercado, M. V., Esteves Miramont, A., and Chavez, C. (2009). Evaluacion termo-energético de una vivienda bioclimática en mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[213] Mercado, M. V., Filippín, C., and Barea, G. (2019). Influencia de la aislacion térmica de la envolvente en el consumo energético. *VI Congreso Latinoamericano de Simulacion de Edificios*.

[214] Michaux, C., Viegas, G. M., et al. (2023). Normativas internacionales sobre eficiencia energética edilicia. *Anales de Investigacion en Arquitectura*, 13(1).

[215] Mo, W., Yao, X., Liu, Z.-A., Chen, S., Li, Q., Jiang, J., Zhang, G., and Dewancker, B. J. (2024). Towards sustainable living in high radiation cold climates: A two-phase genetic algorithm approach for residential building optimization. *Building and Environment*, 266:112133.

[216] Montenegro, F., Hongn, M., et al. (2024). Desempeño térmico de un sistema de enfriamiento radiante mediante tubos embebidos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 27:113–123.

[217] Montoya Florez, O. L. and San Juan, G. A. (2022). Recomendaciones de diseño para situaciones de confort térmico en aulas. *Revista de Arquitectura*.

[218] Moon, H. J., Ryu, S. H., and Kim, J. T. (2014). The effect of moisture transportation on energy efficiency and iaq in residential buildings. *Energy and Buildings*, 75:439–446.

[219] Mosca, F., Calbi, M., Roccotiello, E., and Perini, K. (2025). A computational approach to assess the effects of ecological building envelopes on outdoor thermal comfort. *Sustainable Cities and Society*, 120:106170.

[220] Mounir, S., Maaloufa, Y., Khabbazi, A., et al. (2024). Energy efficiency of a solar green building using bio-sourced materials for indoor temperature and humidity optimization. *Energy Engineering*, 122(1):41–62.

[221] Mousavi, S., Gijon-Rivera, M., Rivera-Solorio, C. I., and Rangel, C. G. (2022). Energy, comfort, and environmental assessment of passive techniques integrated into low-energy residential buildings in semi-arid climate. *Energy and Buildings*, 263:112053.

[222] Muñoz, N., Marino, B. M., and Thomas, L. P. (2020). Efectos de la evolucion de la temperatura sol-aire sobre el flujo de calor. *Energías Renovables y Medio Ambiente*.

[223] Muñoz-Salcedo, M., Saquinaula-Brito, J. L., et al. (2025). A simple simultaneous envelope/system optimization for energy efficiency improvement in near-zero energy buildings. *Energy Conversion and Management: X*, 26:100951.

[224] Murphy, M. D., O'Sullivan, P. D., et al. (2021). Development, calibration and validation of an internal air temperature model for a naturally ventilated nearly zero energy building. *Energies*, 14(4).

[225] Mustufa, A., Anwar, M., and Khan, T. I. (2024). Energy optimization of an institutional building to reduce the energy and air conditioning demand. *Journal of Building Engineering*, 98:111309.

[226] Nazari, F., Dixit, M., Yan, W., and Aryal, A. (2024). Building shape optimization based on interconnected embodied and operational energy and carbon impacts. *Energy and Buildings*, 325:114933.

[227] Nguyen, A.-T., Reiter, S., and Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods

applied to building performance analysis. *Applied Energy*, 113:1043–1058.

[NRG Storage] NRG Storage. *Integrated Porous Cementitious Nanocomposites in Non-Residential Building Envelopes for Green Active/Passice Energy Storage*.

[229] O'Donovan, A., O'Sullivan, P. D., and Murphy, M. D. (2019). Predicting air temperatures in a naturally ventilated nearly zero energy building. *Applied Energy*, 250:991–1010.

[230] Ortega, M., Fernández, A., and Garzon, B. (2021). Comportamiento térmico de una vivienda pro.cre.ar. de tierra en tucumán. *Arquitecno*, (17):43–52.

[231] Ouanes, S. and Sriti, L. (2024). Regression-based sensitivity analysis and multi-objective optimisation of energy performance and thermal comfort. *Building and Environment*, 248:111099.

[232] Ozel, M. (2014). Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness. *Energy and Buildings*, 72:288–295.

[233] Pachano, J., Fernández-Vigil, M., et al. (2023). Two-stage multi-step energy model calibration of the cooling systems of a large-space commercial building. *Applied Thermal Engineering*, 230:120638.

[234] Pachano, J. E. and Bandera, C. F. (2021). Multi-step building energy model calibration process based on measured data. *Energy and Buildings*, 252:111380.

[235] Pachano, J. E., Peppas, A., and Bandera, C. F. (2022). Seasonal adaptation of vrf hvac model calibration process to a mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 261:111941.

[236] Palaić, D., Štajduhar, I., et al. (2023). Development, calibration, and validation of a simulation model for indoor temperature prediction. *Buildings*, 13(6).

[237] Paliouras, P., Matzaflaras, N., Peuhkuri, R. H., and Kolarik, J. (2015). Using measured indoor environment parameters for calibration of building simulation model- a passive house case study. *Energy Procedia*, 78:1227–1232.

[238] Paneru, S., Wang, J., Elmi, M., Chi, G., and Hu, Y. (2025). Envelope impact on indoor thermal resilience across different housing types during extreme heatwaves and power outages. *Journal of Building Engineering*, 115:114516.

[239] Panico, S., Larcher, M., Marincioni, V., Troi, A., Baglivo, C., and Congedo, P. M. (2023). Identifying key parameters through a sensitivity analysis for realistic hygrothermal simulations at wall level supported by monitored data. *Building and Environment*, 229:109969.

[240] Pathirana, S., Rodrigo, A., and Halwatura, R. (2019). Effect of building shape, orientation, window to wall ratios on energy efficiency. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 10.

[241] Peinturier, L. and Wallom, D. (2024). Using an evidence-based approach to improve calibration of non-domestic building digital twins. In *2024 7th International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE)*, pages 1–6.

[242] Penna, P., Prada, A., Cappelletti, F., and Gasparella, A. (2015). Multi-objectives optimization of energy efficiency measures in existing buildings. *Energy and Buildings*, 95:57–69.

[243] Piggot-Navarrete, J., Blanchet, P., Cogulet, A., and Cabral, M. R. (2024). Hygrothermal and airtightness performance assessment of prefabricated lightweight wall systems for cold climates. *Journal of Building Engineering*, 98:111500.

[244] Pihelo, P., Lelumees, M., and Kalamees, T. (2016). Influence of moisture dry-out on hygrothermal performance of prefabricated modular renovation elements. *Energy Procedia*, 96:745–755.

[245] Pour, M. B. (2025). A multi-criteria decision analysis for building envelope design: Bridging moisture safety and health risks. *Indoor Environments*, 2(4):100134.

[246] Pour, M. B. and Hamid, A. A. (2024). Towards a sustainable decision analysis approach for moisture-safe building envelope design. *Journal of Building Engineering*, 97:110955.

[247] Pour, M. B., Niklewski, J., Naghibi, A., and Hansson, E. F. (2024). A literature review of probabilistic hygrothermal assessment for building envelopes. *Building and Environment*, 261:111756.

[PRONEV] PRONEV. *Programa Nacional de Etiquetado de Viviendas*.

[249] Pungercar, V., Zhan, Q., Xiao, Y., Musso, F., Dinkel, A., and Pflug, T. (2021). A new retrofitting strategy for the improvement of indoor environment quality and energy efficiency in residential buildings in temperate climate using prefabricated elements. *Energy and Buildings*, 241:110951.

[250] Qin, M., Walton, G., Belarbi, R., and Allard, F. (2011). Simulation of whole building coupled hygrothermal-airflow transfer in different climates. *Energy Conversion and Management*, 52(2):1470–1478.

[251] Rabani, M., Madessa, H. B., and Nord, N. (2021). Achieving zero-energy building performance with thermal and visual comfort enhancement through optimization of fenestration, envelope, shading device, and energy supply system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44:101020.

[252] Rana, M. J., Hasan, M. R., et al. (2020). Impact assessment of window to wall ratio on energy consumption. *International Journal of Construction Management*, 22.

[253] Rapone, G. and Saro, O. (2012). Optimisation of curtain wall façades for office buildings by means of pso algorithm. *Energy and Buildings*, 45:189–196.

[254] Re, M. G., Blasco Lucas, I., and Filippin, M. C. (2016). Evaluacion higrotérmica y energética de un edificio escolar. *Hábitat Sustentable*.

[255] Re, M. G. and Filippin, M. C. (2021). Evaluacion energética y rehabilitacion de envolvente de una escuela. *Informes de la Construccion*.

[256] Ré, M. G., Mazzocco, M. P., and Filippín, C. (2021). Mejoras de eficiencia energética en calefaccion en san juan. *Hábitat Sustentable*, 11(1):20–31.

[257] Ré, M. G. and Michaux, M. C. (2023). Envolvente y comportamiento térmico. caso de estudio escuela en san juan. *Modulo arquitectura - CUC*, 31:147–166.

[258] Recart, C. and Dossick, C. S. (2022). Hygrothermal behavior of post-retrofit housing: A review of the impacts of the energy efficiency upgrade strategies. *Energy and Buildings*, 262:112001.

[259] Rodrigues, E., Fereidani, N. A., Fernandes, M. S., and Gaspar, A. R. (2024). Diminishing benefits of thermal mass in iranian climate: Present and future scenarios. *Building and Environment*, 258:111635.

[260] Rojas-Herrera, C., Martínez-Soto, A., Batres, R., Carrasco, R. C., and Barbato, N. R. (2025). Multi-objective optimization of an industrialized wall system for sustainable housing. *Case Studies in Thermal Engineering*, 76:107306.

[261] Rouges Forcada, M. d. M. and Ajmat, R. F. (2023). Desempeño térmico-energético de una vivienda social: materiales tradicionales y reciclados. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 26:57–68.

[262] Royapoor, M. and Roskilly, T. (2015). Building model calibration using energy and environmental data. *Energy and Buildings*, 94:109–120.

[263] Ruggeri, A. G., Calzolari, M., Scarpa, M., Gabrielli, L., and Davoli, P. (2020). Planning energy retrofit on historic building stocks: A score-driven decision support system. *Energy and Buildings*, 224:110066.

[264] Ruiz, G. R. and Bandera, C. F. (2017). Validation of calibrated energy models: Common errors. *Energies*, 10(10).

[265] Ruiz, G. R., Bandera, C. F., et al. (2016). Genetic algorithm for building envelope calibration. *Applied Energy*, 168:691–705.

[266] Sahyoun, S., Ge, H., Lacasse, M. A., and Defo, M. (2021). Reliability of existing climate indices in assessing the freeze-thaw damage risk of internally insulated masonry walls. *Buildings*, 11(10).

[267] Saikia, P., Pancholi, M., Sood, D., and Rakshit, D. (2020). Dynamic optimization of multi-retrofit building envelope for enhanced energy performance with a case study in hot indian climate. *Energy*, 197:117263.

[268] Salvalai, G., Brutti, D., and Sesana, M. M. (2025). Design, construction, and operation of a novel open innovation test bed for real-life performance assessment of multilayer building envelope solutions. *Journal of Cleaner Production*, 525:146511.

[269] Samarasinghalage, T. I. et al. (2022). A multi-objective optimization framework for building-integrated pv envelope design balancing energy and cost. *Journal of Cleaner Production*, 342:130930.

[270] Sanchez, G., Zalamea, E., and Astudillo, M. (2024). Comparative analysis of thermal simulation tools precision. *Civil Engineering and Architecture*, 12:3637–3663.

[271] Sánchez Amono, M. P. and Sulaiman, H. C. (2025). Análisis comparativo mediante etiquetado energético de un proyecto de vivienda social bioclimático. *Revista AUS - Arquitectura / Urbanismo / Sustentabilidad*, pages 46–54.

[272] Schroderus, S., Kuurola, P., Kempe, M., Fedorik, F., Leivo, V., and Haverinen-Shaughnessy, U. (2025a). Impacts of building energy retrofits on energy consumption, indoor environment, and hygrothermal performance in future climate scenarios. *Energy and Buildings*, 347:116413.

[273] Schroderus, S., Lähteenmäki, V.-M., Barbero-Lopez, A., Haapala, A., and Fedorik, F. (2025b). Effect of climate change on hygrothermal performance of timber framed wall with different insulation materials. *Building and Environment*, 269:112438.

[274] Schwartz, Y., Raslan, R., and Mumovic, D. (2016). Implementing multi objective genetic algorithm for life cycle carbon footprint and life cycle cost minimisation: A building refurbishment case study. *Energy*, 97:58–68.

[275] Sharif, S. A. and Hammad, A. (2019). Simulation-based multi-objective optimization of institutional building renovation considering energy consumption, life-cycle cost and life-cycle assessment. *Journal of Building Engineering*, 21:429–445.

[276] Sood, D., Alhindawi, I., Ali, U., Finn, D., McGrath, J. A., Byrne, M. A., and O'Donnell, J. (2025). Machine learning based multi-objective optimisation of energy consumption, thermal comfort and co2 concentration in energy-efficient naturally ventilated residential dwellings. *Building and Environment*, 267:112255.

[277] Stazi, F., Tittarelli, F., Politi, G., Perna, C. D., and Munafò, P. (2014). Assessment of the actual hygrothermal performance of glass mineral wool insulation applied 25 years ago in masonry cavity walls. *Energy and Buildings*, 68:292–304.

[278] Sugár, V., Talamon, A., Horkai, A., and Kita, M. (2020). Energy saving retrofit in a heritage district: The case of the budapest. *Journal of Building Engineering*, 27:100982.

[279] Sukop, L. and Ostrý, M. (2025). Hygrothermal performance of structures with diffusion-open and semi-diffusion-open internal insulation systems: A literature review. *Journal of Building Engineering*, 108:112954.

[280] Sulaiman, H. and Olsina, F. (2014). Comfort reliability evaluation of building designs by stochastic hygrothermal simulation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40:171–184.

[281] Sulaiman, H., Olsina, F., Blasco, I., and Filippin, C. (2012). Optimizacion economica bivariada del diseño higrotérmico de edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16:107–114.

[282] Sulaiman, H. C. and Olsina, F. G. (2012). Evaluacion del riesgo de disconfort higrotérmico en edificios. *Andinas*.

[283] Talami, R., Wright, J., and Howard, B. (2025). Evaluating the effectiveness, reliability and efficiency of a multi-objective sequential optimization approach for building performance design. *Energy and Buildings*, 329:115242.

[284] Thomas, G. E., Muñoz, N., Marino, B. M., and Thomas, L. P. (2018). Respuesta dinámica de los muros de la envolvente edilicia a variaciones diurnas de la temperatura exterior. *Anales (Asociacion Física Argentina)*, 29:20–28.

[285] Thomas, L. P., Marino, B. M., and Muñoz Vásquez, N. (2021). Cuantificacion de las resistencias térmicas superficiales aplicando termografía. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 18:55–64.

[286] Tian, C., Ahmad, N. A., et al. (2025). Parametric multi-objective optimization of rural building envelopes using nsga-ii. *Case Studies in Thermal Engineering*, 76:107297.

[287] Tomrukçu, G., Kizildag, H., Avgan, G., Dal, A., Ganiç Sağlam, N., Kalaycıoğlu, E., and Ashrafian,

T. (2024). A systematic approach to manual calibration and validation of building energy simulation. *Smart and Sustainable Built Environment*.

[288] Toranzo, E., Kuchen, E., and Alonso, A. (2021). Potenciales de eficiencia y confort de la unsj. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16:157–164.

[289] Torres, J., Garay-Martinez, R., Oregi, X., Torrens-Galdiz, J. I., Uriarte-Arrien, A., Pracucci, A., Casadei, O., Magnani, S., Arroyo, N., and Cea, A. M. (2021). Plug and play modular façade construction system for renovation for residential buildings. *Buildings*, 11(9).

[290] Torres-Rivas, A., Palumbo, M., Haddad, A., Cabeza, L. F., Jiménez, L., and Boer, D. (2018). Multi-objective optimisation of bio-based thermal insulation materials in building envelopes considering condensation risk. *Applied Energy*, 224:602–614.

[291] Tuysuz, F. and Sozer, H. (2020). Calibrating the building energy model with the short term monitored data. *Energy and Buildings*, 224:110207.

[292] Vagge, C. S. and Czajkowski, J. D. (2012). Impacto de la aplicacion de la ley 13059 de eficiencia energética. *Ambiente Construído*, 12(2):23–35.

[293] Vandemeulebroucke, I., Caluwaerts, S., and Bossche, N. V. D. (2024). Geographical variability in hygrothermal simulation results of historical building envelopes with interior insulation in belgium. *Journal of Building Engineering*, 98:111229.

[294] Vereecken, E., Gelder, L. V., Janssen, H., and Roels, S. (2015). Interior insulation for wall retrofitting – a probabilistic analysis of energy savings and hygrothermal risks. *Energy and Buildings*, 89:231–244.

[295] Verma, R. and Rakshit, D. (2023). Comparison of reflective coating with other passive strategies: A climate based design and optimization study of building envelope. *Energy and Buildings*, 287:112973.

[296] Viegas, G. M., Esparza, J. B., and San Juan, G. A. (2023). Evaluacion térmica, lumínica y termográfica de una solucion de madera. *Hábitat Sustentable*, 13(1):84–95.

[297] Wang, D., Yu, W., Zhao, X., Dai, W., and Ruan, Y. (2016). The influence of thermal insulation position in building exterior walls on indoor thermal comfort and energy consumption of residential buildings in chongqing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 40:012081.

[298] Wang, W., Zmeureanu, R., and Rivard, H. (2005). Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. *Building and Environment*, 40(11):1512–1525.

[299] Wright, J. A., Loosemore, H. A., and Farmani, R. (2002). Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 34(9):959–972.

[300] Wu, D., Rahim, M., Ganaoui, M. E., Bennacer, R., and Liu, B. (2022). Multilayer assembly of phase change material and bio-based concrete: A passive envelope to improve the energy and hygrothermal performance of buildings. *Energy Conversion and Management*, 257:115454.

[301] Wu, H. and Zhang, T. (2022). Multi-objective optimization of energy, visual, and thermal performance for building envelopes. *Journal of Building Engineering*, 59:105034.

[302] Wu, L. and Fang, A. (2026). Study on design optimization of thermal protection and moisture buffer for building envelope in the southern coastal area based on improved machine learning. *Energy and Buildings*, 350:116622.

[303] Wu, W. and Skye, H. M. (2021). Residential net-zero energy buildings: Review and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142:110859.

[304] Wu, Z., Shi, X., Fang, F., Wen, G., and Mi, Y. (2023). Co-optimization of building energy systems with renewable generations combining active and passive energy-saving. *Applied Energy*, 351:121514.

[305] Xie, L., Chen, T., Joshi, N., and Li, Z. (2025). Climate-responsive retrofitting strategy of elderly housing. *Building and Environment*, 285:113554.

[306] Xu, Y., Zhang, G., et al. (2021). A two-stage multi-objective optimization method for envelope and energy generation systems. *Building and Environment*, 204:108142.

[307] Xue, Y., Fan, Y., Wang, Z., Gao, W., Sun, Z., and Ge, J. (2022). Facilitator of moisture accumulation in building envelopes and its influences on condensation and mould growth. *Energy and Buildings*,

277:112528.

[308] Yan, H., Ji, G., and Yan, K. (2022). Data-driven prediction and optimization of residential building performance in singapore considering the impact of climate change. *Building and Environment*, 226:109735.

[309] Yang, J., Lin, Z., Wu, H., et al. (2020). Inverse optimization of building thermal resistance and capacitance for minimizing air conditioning loads. *Renewable Energy*, 148:975–986.

[310] Yao, B., Salehi, A., Baghoolizadeh, M., Khairy, Y., and Baghaei, S. (2024). Multi-objective optimization of office egg shadings using nsga-ii to save energy consumption and enhance thermal and visual comfort. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 157:107697.

[311] Yao, S., Jiang, Z., et al. (2022). Multi-objective optimization of transparent building envelope of rural residences. *Case Studies in Thermal Engineering*, 34:102052.

[312] Yin, R., Kiliccote, S., and Piette, M. A. (2016). Linking measurements and models in commercial buildings. *Energy and Buildings*, 124:222–235.

[313] Yu, W., Li, B., Jia, H., Zhang, M., and Wang, D. (2015). Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design. *Energy and Buildings*, 88:135–143.

[314] Yuan, J., Yu, Q., Yao, S., Ma, X., and Sun, Z. (2023). Multi-objective optimization for the daylighting and thermal comfort performance of elevated subway station buildings in cold climate zone of china. *Journal of Building Engineering*, 78:107771.

[315] Yuk, H., Park, J. H., Kang, Y., and Kim, S. (2025). Advancing retrofitting practices for heritage masonry: The role of insulation materials in thermal and hygrothermal performance. *Applied Thermal Engineering*, 279:127570.

[316] Yun, G. Y. and Song, K. (2017). Development of an automatic calibration method of a vrf energy model. *Energy and Buildings*, 135:156–165.

[317] Zhai, Y., Wang, Y., Huang, Y., and Meng, X. (2019). A multi-objective optimization methodology for window design considering energy consumption, thermal environment and visual performance. *Renewable Energy*, 134:1190–1199.

[318] Zhan, S., Chakrabarty, A., et al. (2023). A virtual testbed for robust and reproducible calibration of building energy simulation models.

[319] Zhang, G., Wu, H., Liu, J., Huang, H., and Liu, Y. (2024). A multi-objective design optimization for the exterior wall coatings of residential buildings in hot summer and warm winter regions. *Building and Environment*, 262:111776.

[320] Zhang, L., Alizadeh, A., Baghoolizadeh, M., Salahshour, S., Ali, E., and Escorcia-Gutierrez, J. (2025). Multi-objective optimization of vertical and horizontal solar shading in residential buildings to increase power output while reducing yearly electricity usage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 215:115578.

[321] Zhang, M., Qin, M., Rode, C., and Chen, Z. (2017). Moisture buffering phenomenon and its impact on building energy consumption. *Applied Thermal Engineering*, 124:337–345.

[322] Zhang, T., Tan, Y., Yang, H., and Zhang, X. (2016). The application of air layers in building envelopes: A review. *Applied Energy*, 165:707–734.

[323] Zhao, T., Zhuang, Z., Chang, T., et al. (2025). Performance-oriented design of thermal-activated building envelope based on multi-objective optimization. *Energy and Buildings*, 328:115198.

[324] Zhen, X., Li, S., Peng, J., Zhao, Z., Zhang, X., Tan, C., Jiao, R., and Wu, W. (2025). Analysis of building envelope for energy consumption and indoor comfort in a near-zero-energy building in northwest china. *Results in Engineering*, 25:104243.

[325] Zheng, Z., Xiao, J., Yang, Y., Xu, F., Zhou, J., and Liu, H. (2024). Optimization of exterior wall insulation in office buildings based on wall orientation: Economic, energy and carbon saving potential in china. *Energy*, 290:130300.

[326] Zuhaib, S., Hajdukiewicz, M., and Goggins, J. (2019). Application of a staged automated calibration

methodology to a partially-retrofitted university building energy model. *Journal of Building Engineering*, 26:100866.

Doctorado en Ingeniería
Mención Mecánica Computacional

Título de la obra:

Optimización basada en simulación de la eficiencia energética de edificios

Autor: María Cecilia Demarchi

Lugar: Santa Fe, Argentina

Palabras Claves:

Eficiencia energética regionalizada,
simulación BES acoplada a MOO, EnergyPlus, NSGA-II,
calibración de modelos, optimización bioclimática de envolventes.