

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
VALPARAÍSO, CHILE - CHILE



“MODELO DE PRECALIFICACIÓN
ENERGÉTICA Y RECOMENDACIONES DE
DISEÑO PARA VIVIENDAS EN CHILE: CASO
BIO PLANNER”

DIEGO ALEJANDRO CONCHA BEROÍZA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN INFORMÁTICA

Profesora Guía: Carolina Saavedra
Profesor Correferente: Pedro Godoy

Julio - 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: MODELO DE PRECALIFICACIÓN ENERGÉTICA Y RECOMENDACIONES DE DISEÑO PARA VIVIENDAS EN CHILE: CASO BIO PLANNER

Nombre del candidato(a): DIEGO ALEJANDRO CONCHA BEROÍZA

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Informática

Campus: Casa Central

Departamento: Departamento de Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carolina Verónica Saavedra Ruiz, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 22/07/2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 22/07/2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que me han acompañado durante este camino.

A mi profesora guía, Carolina Saavedra, por su acompañamiento y orientación durante la realización de esta memoria, que marca el cierre de mi formación universitaria.

A Danae y Andrea, de Acua Plan, por su colaboración y disposición durante el desarrollo de este trabajo.

A los amigos que conocí durante la carrera, por compartir este proceso y hacerlo más liviano, y a mis amigos de fuera de la universidad, que aunque no veo tan seguido, siempre han sido un apoyo para mí.

A mi familia, por el apoyo que me han dado durante toda mi vida, y en especial a mi mamá, que no podría estar aquí si no fuese por ella. Muchas gracias.

RESUMEN

Resumen— La eficiencia energética residencial es un desafío vigente en Chile: el 63,3 % de las viviendas carece de aislamiento térmico adecuado. Como respuesta normativa, desde octubre de 2025 la Calificación Energética de Viviendas (CEV) es obligatoria para construcciones nuevas. Bio Planner es una aplicación móvil que estima la demanda energética de una vivienda y genera recomendaciones de materiales constructivos sin requerir conocimientos técnicos. Su módulo de recomendaciones operaba bajo un enfoque ligado a letras CEV, con restricciones inflexibles y sin reporte del impacto de las alternativas. Esta memoria reorienta el enfoque hacia la comparación de alternativas según criterios de costo y demanda energética. Se incorporó el estado actual de la vivienda como referencia en la interfaz, se redefinieron las restricciones como márgenes relativos configurables y se implementaron funcionalidades de descarte de materiales y reporte de impacto porcentual sobre demanda y costo. Se evaluaron tres solvers: CBC, HiGHS y SCIP, en tiempo y calidad de solución. Las mejoras fueron validadas por Acua Plan. El benchmark mostró que SCIP es un 36–43 % más rápido que CBC para la configuración por defecto, con igual calidad en todos los escenarios evaluados.

Palabras Clave— Eficiencia energética, optimización combinatoria, envolvente térmica, recomendación de materiales, programación entera binaria.

ABSTRACT

Abstract— Residential energy efficiency is an ongoing challenge in Chile: 63.3 % of homes lack adequate thermal insulation. As a regulatory response, since October 2025 the Housing Energy Rating (CEV) is mandatory for new constructions. Bio Planner is a mobile application that estimates a home's energy demand and provides building material recommendations without technical expertise. Its recommendation module operated under an approach tied to CEV letter ratings, with inflexible constraints and no reporting of the impact of alternatives. This thesis reorients the focus toward comparing material alternatives based on cost and energy demand criteria. The home's current state was incorporated as a reference in the interface, constraints were redefined as user-configurable relative margins, and material exclusion and percentage impact reporting functionalities were implemented. Three solvers: CBC, HiGHS, and SCIP, were evaluated in terms of solution time and quality. The improvements were validated by the architecture firm Acua Plan. The benchmark showed that SCIP is 36–43 % faster than CBC for the default configuration, with equal solution quality across all evaluated scenarios.

Keywords— Energy efficiency, combinatorial optimization, building envelope, material recommendation, binary integer programming.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	IV
ABSTRACT	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VII
INTRODUCCIÓN	1
Organización del Informe	1
CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.1. Objetivo General	3
1.2. Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL	4
2.1. Termodinámica	4
2.1.1. Mecanismos de Transferencia de Calor	4
2.1.2. Resistencia y Transmitancia Térmica	5
2.2. Normativa en Chile	6
2.2.1. Calificación Energética	7
2.3. Optimización	8
2.3.1. Programación Lineal	9
2.3.2. Programación Entera	9
2.3.3. Optimización Multiobjetivo	9
2.3.4. Implementación Computacional	10
2.4. Estado del Arte	10
2.4.1. Simplificación de Modelos	11
2.4.2. Optimización de Envolvente	11
2.4.3. Contexto Chileno	12
CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE SOLUCIÓN	13
3.1. Modelo Base (Usado en FESW 2025)	13
3.1.1. Parámetros del Cálculo	13
3.1.2. Cálculo de la Demanda Energética	14
3.1.3. Optimización	15
3.2. Conjunto de Datos	18
3.3. Modelo Propuesto	19
3.3.1. Roadmap para la Implementación de Mejoras	19
3.3.2. Revisión y Diagnóstico del Sistema Base	19
3.4. Implementación de Mejoras	20

3.4.1.	Normalización de la Función Objetivo por Valores Base	20
3.4.2.	Restricciones Configurables como Márgenes Relativos	20
3.4.3.	Reporte del Impacto de la Decisión	21
3.4.4.	Descarte de Materiales del Catálogo	21
3.4.5.	Rediseño para Mostrar Más Información	22
3.4.6.	Evaluación de Solvers Alternativos	27
CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN		28
4.1.	Benchmark de Solvers	28
4.2.	Validación con Acua Plan	29
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES		31
5.1.	Cumplimiento de Objetivos	31
5.2.	Contribuciones	31
5.3.	Limitaciones	31
5.4.	Trabajo Futuro	32

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Flujo de calor por conducción.	5
2.	Zonas Térmicas en Chile.	6
3.	Escala de Calificación CEV.	7
4.	Flujo balance de cálculo.	8
5.	Vista de optimización: comparación entre estado previo (a) y estado nuevo, (b) y (c).	23
6.	Modal de resultado: comparación entre estado previo (a) y estado nuevo (b).	24
7.	Vista de recomendaciones: comparación entre estado previo (a) y estado nuevo (b).	25
8.	Interfaz de exclusión de materiales.	26
9.	Carta de validación Acua Plan.	30

ÍNDICE DE TABLAS

1.	Tiempos de resolución p50 (ms) para $\alpha = 0,5$	28
2.	Tiempos de resolución p50 promedio (ms) sobre $\alpha \in \{0; 0,5; 1\}$	28

INTRODUCCIÓN

En Chile, la eficiencia energética de las viviendas es un problema con consecuencias concretas sobre la calidad de vida de las personas y el medio ambiente. Frente a este escenario, el Estado ha avanzado en la normativa: desde octubre de 2025, la Calificación Energética de Viviendas (CEV) es obligatoria para todas las viviendas nuevas. La CEV evalúa el desempeño energético de una vivienda y le asigna una letra en una escala que va de A+, la más eficiente, hasta G, siendo E el estándar mínimo legal.

En este contexto surge Bio Planner, una aplicación móvil orientada a la simulación y evaluación de la eficiencia energética en viviendas chilenas, desarrollada en colaboración con la oficina de arquitectos Acua Plan. El sistema permite a los usuarios estimar la demanda energética de una vivienda sin requerir conocimientos técnicos avanzados, a partir de la ubicación geográfica, las características del diseño y los materiales de la envolvente térmica.

Bio Planner incorpora además un módulo de recomendaciones de materiales constructivos: dado un diseño base, el sistema sugiere alternativas de materiales para los elementos de la envolvente: muros, pisos, techos, ventanas y puertas, buscando mejorar la eficiencia energética. En su versión inicial, este módulo operaba bajo un enfoque ligado a la escala CEV: las restricciones y criterios del modelo estaban atados a las letras de calificación, y los resultados se presentaban sin información cuantitativa sobre el impacto de las alternativas recomendadas.

A partir de reuniones con Acua Plan, se identificó la necesidad de reorientar el enfoque del módulo de recomendaciones. El valor de la herramienta reside en la comparación de alternativas, no en la precisión del valor absoluto de demanda. Esta reorientación, de una herramienta centrada en la calificación a una centrada en la decisión, es el eje de la presente memoria.

Organización del Informe

El **Capítulo 1** define el problema en detalle, describe el contexto en que surge la necesidad de mejora y enuncia los objetivos de la memoria. El **Capítulo 2** desarrolla el marco conceptual, abordando los principios físicos de transferencia de calor y resistencia térmica, la normativa chilena vigente (CEV, Reglamentación Térmica, NCh1079), los fundamentos de la optimización matemática y el estado del arte en optimización de envolventes térmicas. El **Capítulo 3** presenta la propuesta de solución: el modelo base desarrollado previamente, el conjunto de datos utilizado y las mejoras implementadas al sistema de recomendaciones. El **Capítulo 4** valida la solución mediante la retroalimentación de Acua Plan y un benchmark de solvers. Finalmente, el **Capítulo 5** expone las conclusiones del trabajo, sus limitaciones y las líneas de trabajo futuro identificadas.

CAPÍTULO 1

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En Chile, muchas viviendas presentan un desempeño energético insuficiente, lo que se traduce en altos costos de calefacción y refrigeración, deficiente confort térmico y un impacto ambiental negativo debido al mayor consumo de energía y las emisiones asociadas. Durante 2024, se construyeron aproximadamente 72.000 viviendas nuevas [1], muchas de las cuales podrían desconocer la reglamentación vigente y no incorporar criterios de eficiencia térmica desde sus etapas iniciales de diseño o construcción, especialmente considerando que desde noviembre de 2025 entraron en vigor nuevas exigencias mínimas de comportamiento térmico para edificaciones residenciales [2]. Esto restringe las opciones constructivas disponibles y aumenta la probabilidad de errores en la planificación energética.

El consumo energético en los hogares representa un 23 % del consumo total de energía en los sectores residencial, comercial y público. La calefacción es el principal gasto energético, alcanzando hasta un 50 % del consumo total en viviendas promedio y más del 80 % en el sur del país, donde las condiciones climáticas son más extremas. Esta situación se ve agravada por el hecho de que el 63,3 % de las viviendas en Chile carece de aislamiento térmico adecuado, lo que genera un uso ineficiente de la energía y mayores costos para los habitantes [3]. Además, uno de cada tres hogares no cuenta con calefacción ni aislación apropiada, lo que implica que una de cada cinco personas pasa frío dentro de sus viviendas durante el invierno, evidenciando la dimensión social del problema energético residencial [4].

Desde la perspectiva de ingeniería, mejorar la eficiencia energética en viviendas representa un desafío multidimensional. Se requiere integrar planificación térmica, modelamiento y simulación energética, optimización de materiales y estrategias constructivas, análisis geoespacial y cumplimiento normativo en un proceso de diseño o evaluación temprana. Cada una de estas dimensiones implica modelos, cálculos y evaluaciones complejas que deben interactuar de manera coherente para generar resultados fiables y aplicables.

En este contexto, surge la necesidad de herramientas que permitan intervenir desde las primeras etapas del diseño o construcción, o bien evaluar rápidamente viviendas existentes. Bio Planner se plantea como una solución basada en simulación térmica, capaz de entregar una precalificación energética sin requerir conocimientos técnicos especializados, complementada con un módulo de recomendaciones de diseño.

Si bien la simulación proporciona una estimación del desempeño energético, la verdadera relevancia de la aplicación radica en la comparación de materiales y la generación de recomendaciones personalizadas. Estas funcionalidades permiten a los usuarios identificar alternativas constructivas más eficientes y sostenibles, considerando sus criterios de costo y demanda energética. Por esta razón, la presente memoria se enfocará en mejorar

el sistema de recomendaciones de Bio Planner, priorizando la comparación de soluciones y optimizando la manera en que se presentan las alternativas al usuario, maximizando el valor práctico y aplicable de la herramienta.

1.1. Objetivo General

Mejorar el sistema de recomendaciones de materiales constructivos de Bio Planner, que optimice la eficiencia energética de las viviendas, permitiendo comparar alternativas según criterios de costo y demanda energética, utilizando modelos de optimización.

1.2. Objetivos Específicos

- Incorporar información del estado actual de la vivienda en la interfaz, permitiendo contrastar el escenario base con las alternativas recomendadas por el modelo.
- Incorporar restricciones configurables que permitan adaptar la búsqueda de soluciones a las preferencias del usuario.
- Desarrollar funcionalidades que permitan descartar materiales según sus necesidades.
- Reportar el impacto de las decisiones de materiales sobre la demanda energética y el costo total de la vivienda.
- Evaluar el desempeño del modelo y distintos solvers en términos de tiempo de resolución y calidad de las soluciones.

CAPÍTULO 2

MARCO CONCEPTUAL

Esta sección presenta los conceptos necesarios para comprender el funcionamiento de Bio Planner y las decisiones de diseño del sistema de recomendaciones: los fundamentos físicos de la transferencia de calor, el marco normativo chileno, los modelos de optimización empleados y el estado del arte en la materia.

2.1. Termodinámica

La eficiencia energética en una vivienda se define como la capacidad de utilizar la energía de manera óptima para satisfacer las necesidades de confort térmico y funcionamiento del hogar, minimizando las pérdidas de calor en invierno y manteniendo una temperatura fresca en verano [5]. Físicamente, esto se logra mediante el control de la transferencia de energía que ocurre debido a las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior; esta energía transferida es el calor.

2.1.1. Mecanismos de Transferencia de Calor

Solo hay transferencia de calor entre regiones que están a diferente temperatura, y la dirección del flujo es de la temperatura más alta a la más baja. Los tres mecanismos principales son la conducción, la convección y la radiación [6].

De particular interés es la conducción, ya que representa la transferencia de calor entre el contacto de cuerpos, por ejemplo, entre los materiales sólidos de una vivienda. Como muestra la Figura 1, si se tienen dos cuerpos C y F , separados por un cuerpo de longitud L con área transversal A . La corriente de calor H es proporcional al área transversal y a la diferencia de temperatura ($T_C - T_F$) entre los cuerpos, e inversamente proporcional a la distancia entre ambos:

$$H = kA \frac{T_C - T_F}{L} \quad (1)$$

donde k es la conductividad térmica del material. Los materiales con k mayor son buenos conductores del calor; aquellos con valores menores son conductores o aislantes deficientes.

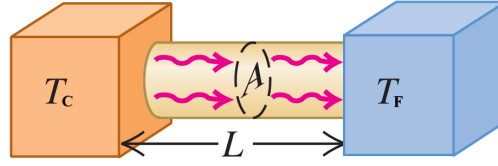


Figura 1: Flujo de calor por conducción. El cuerpo caliente C (T_C) y el frío F (T_F) están separados por un material de longitud L , área A y conductividad térmica k . Fuente: Sears y Zemansky, 12^a ed., Vol. 1.

2.1.2. Resistencia y Transmitancia Térmica

En el campo de aislantes térmicos, los ingenieros usan el concepto de resistencia térmica. La resistencia térmica R de una placa de material con espesor L y conductividad térmica k está dada por:

$$R = \frac{L}{k} \quad (2)$$

Y, por lo tanto, la Ecuación 1 se puede escribir como:

$$H = A \frac{(T_C - T_F)}{R} \quad (3)$$

Complementariamente, se define la transmitancia térmica U , como el inverso de la resistencia térmica R .

$$U = \frac{1}{R} \quad (4)$$

Este valor permite conocer el nivel de aislación térmica en relación al porcentaje de energía que atraviesa la envolvente: si el número resultante es bajo, se tiene una superficie bien aislada y, por el contrario, un número alto nos alerta de una superficie deficiente térmicamente [7].

Debido a que el paso del calor no puede detenerse, solo puede enlentecerse a través de materiales que se opongan a su traspaso, se priorizan materiales aislantes. De esta manera, se busca reducir la velocidad en que el calor del verano entra en el hogar y que el calor que se genera en los interiores, se escape en el invierno [8].

2.2. Normativa en Chile

En Chile, la eficiencia energética de las viviendas ha sido un objetivo prioritario, impulsando mejoras continuas en la normativa térmica del país a lo largo de las últimas décadas.

En el año 2000, se dio inicio a la primera etapa de la Reglamentación Térmica, incorporando los primeros lineamientos de exigencia energética para viviendas a través de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC). Esta normativa fue ampliada posteriormente en 2007 [9].

En 2012, el MINVU sumó un mecanismo para evaluar la eficiencia energética de las viviendas que se construyen en el país, poniendo en marcha, en conjunto con el Ministerio de Energía, la primera versión de la Calificación Energética de Viviendas (CEV).

En 2015, el MINVU desarrolló una propuesta para la actualización de la OGUC que modifica el artículo 4.1.10, que exige estándares mínimos para aproximarse a un ambiente confortable y saludable. Estas exigencias se deben aplicar a todos los elementos que conforman la envolvente de la vivienda: complejos de techumbre, muros perimetrales y pisos ventilados. Las condiciones de las normativas varían según la zona térmica en que se encuentre el proyecto, definida por los planos de zonificación térmica [10].

En mayo de 2024, se publicó en el Diario Oficial, la actualización de la Reglamentación Térmica, la cual entró en vigor en noviembre de 2025. La nueva normativa mejora las actuales exigencias a la envolvente y considera nuevas zonificaciones que reconocen la diversidad climática del país, la oscilación térmica y la radiación, así como el efecto del mar, los valles centrales y la cordillera de los Andes (Ver Figura 2) [2].

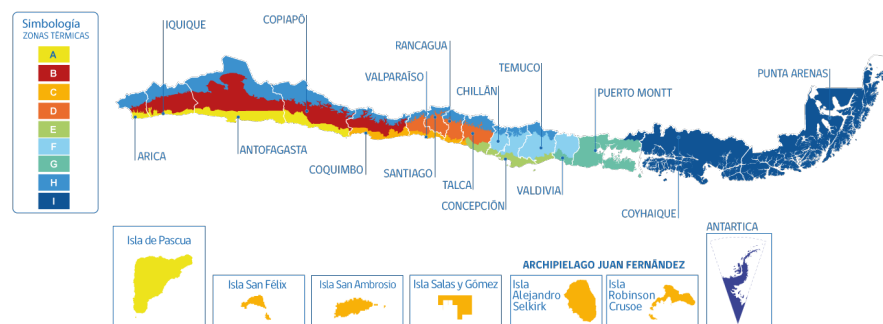


Figura 2: Zonas Térmicas en Chile.

Fuente: MINVU

En octubre de 2025, la CEV comenzó una etapa de obligatoriedad. Como dictamina la Ley de Eficiencia Energética (N° 21.305 del Ministerio de Energía), todas las viviendas nuevas deberán contar con esta evaluación [11].

2.2.1. Calificación Energética

La CEV busca mejorar la calidad de vida de las familias, a través de la entrega de información objetiva y estandarizada [12].

El sistema contempla dos modalidades de evaluación: existe una Precalificación y una Calificación Energética. La Precalificación se realiza en proyectos de arquitectura que tengan permiso de edificación aprobado por el director de Obras Municipales. Es provisoria y su vigencia es válida hasta que el proyecto obtenga la recepción municipal definitiva. La Calificación, corresponde a la evaluación final y definitiva de la obra terminada. Para emitirla se califica nuevamente el proyecto, según los planos y especificaciones técnicas finales, con recepción municipal aprobada por el director de Obras Municipales, y la documentación adicional acreditada por el propietario. Tiene una duración de 10 años, o hasta que se realice alguna modificación que altere los parámetros con los que fue evaluada la vivienda [13].

Las viviendas calificadas cuentan con una etiqueta con colores, porcentajes y letras, que van desde la A+ a la G (Ver Figura 3), siendo esta última la menos eficiente, mientras que la letra E representa el estándar actual de construcción, establecido en el artículo 4.1.10 de la OGUC [12].



Figura 3: Escala de Calificación CEV.
Fuente: MINVU

Los tres indicadores principales incluidos en la etiqueta son:

- Porcentaje de ahorro: Comparando la demanda de energía de la vivienda evaluada, con la demanda de energía de una vivienda de referencia, representa la eficiencia energética de la arquitectura.

- Nivel de eficiencia energética: Letra asignada a la vivienda en función del porcentaje de disminución de la demanda energética. Mejor letra es A+, que representa los porcentajes más altos de ahorro. Mientras que G, representa un consumo mayor al estándar mínimo.
- Requerimiento energético: Demanda de energía por metro cuadrado de la vivienda (kWh/m^2) [14].

El cálculo de la demanda energética se realiza mediante tres Planillas de Balance Térmico Dinámico (PBDT), herramientas en Excel desarrolladas por el MINVU. La planilla de balance térmico dinámico realiza un balance térmico cada 60 segundos, evaluando la temperatura al interior del recinto con base a los flujos de las distintas variables de entrada [15]. La demanda energética resultante queda expresada por la ecuación reflejada en la Figura 4.

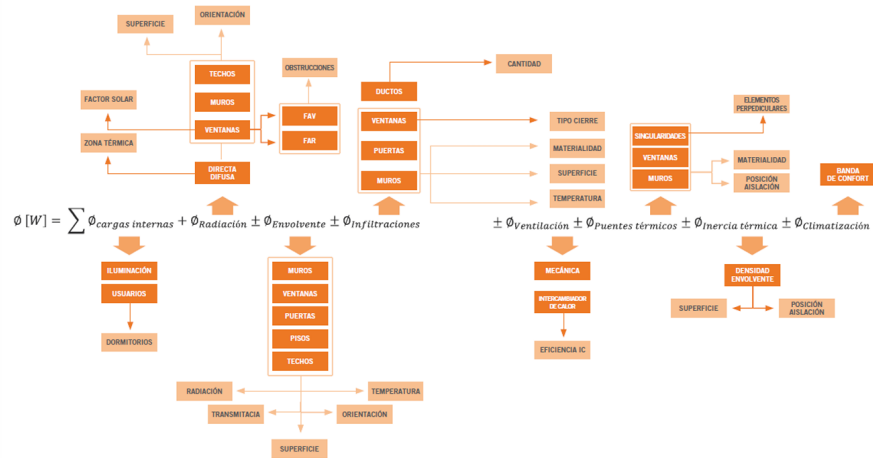


Figura 4: Flujo balance de cálculo.

Fuente: MINVU

2.3. Optimización

Un problema de optimización consiste en seleccionar los valores de un conjunto de variables de decisión de manera que se minimice o maximice una función objetivo, sujeto a un conjunto de restricciones que limitan los valores posibles de las variables [16]. Sus tres componentes principales son:

- Variables de decisión: Valores incógnitos del modelo que representan las alternativas sobre las cuales se decide.
- Función objetivo: Expresión matemática que cuantifica el criterio a optimizar, ya sea minimizar o maximizar.
- Restricciones: Conjunto de ecuaciones o inecuaciones que imponen límites a las variables de decisión.

2.3.1. Programación Lineal

La Programación Lineal es un problema de optimización en donde la función objetivo y las restricciones pueden ser representadas por relaciones lineales con las variables de decisión. Su forma estándar es:

$$\begin{aligned} \text{mín} \quad & \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ \text{sujeto a} \quad & \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i, \quad i = 1, \dots, m \\ & x_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n \end{aligned} \tag{5}$$

donde c_j , a_{ij} y b_i son constantes reales, y x_j son las variables continuas buscadas [16].

2.3.2. Programación Entera

La formulación previa representa un modelo continuo: las variables pueden ser fracciones. Sin embargo, existen situaciones en que las soluciones fraccionarias no son realistas. Cuando esto ocurre, una restricción puede imponer a las variables que sean enteras. Este problema se denomina Programación Entera. Cuando solo algunas de las variables están restringidas a ser enteras, se tiene un problema entero mixto; cuando todas lo son, es un problema entero puro [17].

Un caso particular de la programación entera es la programación binaria, en que cada variable de decisión x_i puede tomar solo dos valores:

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j. \tag{6}$$

El valor $x_j = 1$ puede interpretarse como que la alternativa j es seleccionada, mientras que $x_j = 0$ indica que es descartada.

2.3.3. Optimización Multiobjetivo

Las formulaciones anteriores consideran una única función objetivo a optimizar. Sin embargo, en aplicaciones prácticas, es frecuente encontrar problemas con múltiples objetivos. Cuando esto ocurre, el problema se denomina optimización multiobjetivo, y su resolución requiere de técnicas más específicas. Las dos más utilizadas son [18]:

- Método de la suma ponderada (*weighted sum method*): combina los objetivos en una única función escalar mediante coeficientes de ponderación.
- Método ε -restricción: optimiza una de las funciones objetivos manteniendo las restantes como restricciones acotadas.

En problemas multiobjetivo, las soluciones óptimas no se reducen a un único punto sino a un conjunto. Una solución factible se denomina Pareto-óptima o no-dominada si no existe otra solución factible que sea mejor en todos los objetivos simultáneamente. El conjunto de todas las soluciones no-dominadas se denomina frente de Pareto, y representa el conjunto de soluciones óptimas donde es imposible mejorar un objetivo sin empeorar otro.

2.3.4. Implementación Computacional

La resolución de problemas de optimización se apoya principalmente en dos capas de software. La primera es el solver: motor computacional encargado de ejecutar el algoritmo de resolución y entregar la solución óptima. Para un problema de programación lineal, el algoritmo estándar es el Método Simplex, que recorre sistemáticamente soluciones factibles (aquellas que cumplen con todas las restricciones) hasta encontrar el óptimo. Para problemas de programación entera y binaria, se utiliza el algoritmo Branch and Bound, que divide el problema en subproblemas más pequeños, descartando aquellos que no pueden mejorar la mejor solución encontrada hasta ese momento.

La segunda capa es la interfaz de modelamiento, que permite formular el modelo en términos de variables, función objetivo y restricciones, sin interactuar directamente con el solver de fondo. Algunos ejemplos de interfaces de uso común son Google OR-Tools y PuLP, ambas de código abierto.

2.4. Estado del Arte

En los últimos años ha aumentado considerablemente la cantidad de estudios en el área de optimización energética de viviendas, impulsado por normativas y políticas que exigen estándares de eficiencia cada vez más exigentes. En consecuencia, durante el proceso de diseño arquitectónico, ha incrementado el uso de herramientas que apoyan toma de decisiones sobre la eficiencia energética en la construcción [19]. Para la presente memoria, se estudian las siguientes tres líneas de trabajo: simplificación de los modelos de simulación, métodos de optimización aplicados a la envolvente térmica, y los estudios desarrollados en el contexto chileno.

2.4.1. Simplificación de Modelos

Actualmente hay múltiples herramientas de simulación energética detallada: TRNSYS, DOE-2 y EnergyPlus. Estas herramientas resuelven balances térmicos transitorios con resolución horaria o sub-horaria, lo que requiere información detallada del diseño arquitectónico y constructivo, así como dominio de conceptos especializados. Por esta razón, se han desarrollado interfaces que facilitan su utilización. Por ejemplo, entre las más utilizadas sobre EnergyPlus, se encuentran DesignBuilder y BeOpt [19].

Los motores de simulación energética detallados permiten entregar resultados de eficiencia energética con un bajo margen de error. Sin embargo, su costo computacional es elevado, particularmente al integrarlos en procesos iterativos de optimización donde se requiere evaluar miles de configuraciones candidatas. Una manera de tratar esto, es el uso de modelos simplificados. Los modelos simplificados pueden estimar el consumo de energía basado en principios de termodinámica y transferencia de calor, aunque pueden no llegar a tener la precisión deseada [19].

2.4.2. Optimización de Envolvente

El diseño de la envolvente térmica de una vivienda puede formularse como un problema de optimización matemática. Gustafsson [20] fue uno de los primeros en plantear la eficiencia energética de edificios como un problema de programación lineal entera mixta, donde las decisiones constructivas (tipos de ventanas, opciones de aislamiento) se modelan mediante variables enteras o binarias. Mientras que los objetivos, se expresan como funciones lineales del consumo energético y el costo. Este enfoque ha sido extendido posteriormente por diversos autores. Por ejemplo, Kim et al. [21], formulan el problema de eficiencia energética como un problema de programación lineal entera de dos etapas; la primera para la selección de materiales, donde se usan variables binarias para decidir si se selecciona o no un candidato específico, y la segunda para minimizar las pérdidas económicas asociadas al plan de implementación.

En cuanto a las funciones objetivo, la literatura considera frecuentemente la demanda o consumo energético y el costo, este último expresado típicamente como costo global del ciclo de vida (LCC) [19]. Dado que estos objetivos suelen ser contrapuestos, numerosos estudios adoptan una formulación multiobjetivo. En esta línea, predominan los algoritmos metaheurísticos, en particular las variantes del algoritmo genético, entre las cuales destaca el Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) propuesto por Deb et al. [22], ampliamente utilizado por su capacidad de entregar el frente de Pareto en una sola ejecución. Las formulaciones de programación lineal entera, por su parte, abordan la naturaleza multiobjetivo mediante técnicas como el método de la suma ponderada o el método ϵ -restricción, aplicados iterativamente para recorrer el frente.

Entre las restricciones que pueden incorporarse en problemas de optimización de en-

volventes se encuentran los límites normativos de transmitancia térmica U , la exclusión mutua entre soluciones constructivas para un mismo elemento, las restricciones presupuestarias y los límites de espesor mínimo y máximo de los materiales aislantes.

2.4.3. Contexto Chileno

En Chile se han desarrollado diversos estudios de simulación y optimización energética de viviendas, particularmente enfocados en vivienda social del centro y sur del país, dadas las altas demandas de calefacción y los problemas asociados de contaminación. Larrea-Sáez et al. [23] optimizan conjuntamente materiales aislantes, espesores y sistemas de calefacción para vivienda social en cuatro ciudades del centro-sur del país, considerando demanda energética, impactos ambientales y costos globales como objetivos contrapuestos. La demanda de calefacción se estima mediante simulaciones en EnergyPlus, mientras que la optimización multiobjetivo se implementa en Matlab. Para resolver el problema emplean el frente de Pareto, identificando las soluciones no dominadas, y luego aplican el método de la suma ponderada como procedimiento de decisión multicriterio.

Otros trabajos en la misma línea, como el de Martínez-Soto et al. [24], comparan una vivienda típica, una optimizada y una Passivhaus (estándar de construcción alemán de consumo energético casi nulo) en 8 zonas climáticas del país, utilizando EnergyPlus como motor de simulación dentro de un flujo OpenBIM. La función objetivo minimiza la demanda de calefacción y refrigeración variando material del muro, tipo y espesor de aislante, y tipo de ventana, evaluando además los impactos ambientales. Los resultados revelan una fuerte asimetría norte-sur: en climas cálidos la refrigeración domina el consumo, mientras que en el sur la calefacción es crítica. Por esta razón, la Passivhaus muestra mejores resultados en el sur que en el norte, ya que su diseño está orientado a climas fríos. Esto evidencia que la geografía de Chile obliga a diseñar soluciones diferenciadas por zona climática, ya que no existe una tipología óptima universal y las decisiones de diseño dependen críticamente del clima local.

En conjunto, estos trabajos muestran que la optimización energética de viviendas en Chile combina simulación dinámica, análisis multiobjetivo y consideraciones climáticas locales como elementos centrales del problema.

CAPÍTULO 3

PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Bio Planner es una aplicación móvil orientada a la simulación y evaluación de la eficiencia energética en el diseño de viviendas, adaptada a la normativa chilena. Su principal objetivo es permitir a los usuarios estimar la demanda energética, optimizar el diseño y seleccionar materiales constructivos de manera sencilla: sin requerir de conocimientos técnicos avanzados.

3.1. Modelo Base (Usado en FESW 2025)

En la Feria de Software (FESW) de 2025, se desarrolló Bio Planner en colaboración con la oficina de arquitectos Acua Plan. El proyecto consistió en el diseño e implementación de una simplificación del motor de cálculo del CEV, con el objetivo de estimar la eficiencia energética de una vivienda de manera accesible, sin requerir conocimientos técnicos avanzados. El enfoque de esta simplificación fue permitir a los usuarios comprender el desempeño energético de su diseño en el contexto de las nuevas exigencias normativas del país.

3.1.1. Parámetros del Cálculo

Los parámetros necesarios para simular la eficiencia energética se organizan en tres categorías: características de la zona climática, datos generales de la vivienda, y características de la envolvente térmica.

Zona Climática

La zona climática de una vivienda se determina según su ubicación geográfica: región, provincia, comuna, meridiano y altitud. Los parámetros asociados a cada zona son extraídos de la Norma NCh1079 y corresponden a:

- HC : Horas de calefacción promedio por año.
- HR : Horas de refrigeración promedio por año.
- $T_{int,inv}$: Temperatura interior promedio en invierno.
- $T_{ext,inv}$: Temperatura exterior promedio en invierno.
- $DE_{ref,cal}$: Demanda de calefacción de la vivienda de referencia definida por el MINVU.
- $DE_{ref,enf}$: Demanda de enfriamiento de la vivienda de referencia definida por el MINVU.

La vivienda de referencia es un estándar definido por el MINVU que sirve como base para calcular el porcentaje de ahorro energético y asignar la letra de precalificación CEV.

Datos generales de la vivienda

- S : Superficie habitable promedio [m^2].
- h : Altura interior promedio [m].
- V : Volumen interior promedio [m^3], definido como $V = S \times h$.

Envolvente térmica

- Tipo de elemento: Muro, Piso, Techo, Ventana o Puerta.
- Orientación: Norte, Sur, Este u Oeste.
- A_i : Área del elemento i , medida en [m^2].
- U_i : Transmitancia térmica del elemento i , medida en [W/m^2K].

3.1.2. Cálculo de la Demanda Energética

La demanda energética total DE se obtiene como la suma de la demanda de calefacción y la demanda de refrigeración:

$$DE = DE_{cal} + DE_{enf} \quad (7)$$

Demanda de calefacción

Las pérdidas de calor en invierno se asocian a dos mecanismos: la transmisión a través de los elementos de la envolvente y la infiltración de aire.

Las pérdidas por transmisión se calculan sumando la contribución de cada elemento i de la envolvente:

$$Q_{trans} = \sum_i U_i \cdot A_i \cdot \Delta T \quad (8)$$

donde $\Delta T = T_{int,inv} - T_{ext,inv}$.

Las pérdidas de infiltración de aire corresponden al calor perdido por renovación natural del aire interior:

$$Q_{inf} = 0,33 \cdot ACH \cdot V \cdot \Delta T \quad (9)$$

donde $0,33[Wh/m^3K]$ es la capacidad calorífica volumétrica del aire y $ACH = 1,0$ es

el valor estándar de renovaciones de aire por hora para viviendas no herméticas según la normativa.

Entonces, la demanda anual de calefacción es:

$$DE_{cal} = \frac{HC \cdot (Q_{trans} + Q_{inf})}{1000 \cdot S} \quad (10)$$

Demanda de refrigeración

La ganancia de calor en verano se modela a partir de la radiación solar incidente sobre el muro poniente, que corresponde a la orientación de mayor exposición solar en verano:

$$Q_{solar} = A_{mo} \cdot R \quad (11)$$

donde A_{mo} es el área del muro poniente y R es la radiación solar promedio en verano de la zona climática.

La demanda anual de refrigeración es:

$$DE_{enf} = \frac{HR \cdot Q_{solar}}{1000 \cdot S} \quad (12)$$

Demanda total

$$DE = DE_{cal} + DE_{enf} \quad (13)$$

Porcentaje de ahorro y calificación

Según la ubicación de la vivienda y su respectiva demanda de referencia, se calcula el porcentaje de ahorro para poder comparar las viviendas y obtener la calificación del ahorro energético.

$$\text{Porcentaje de ahorro} = \left(1 - \frac{DE}{DE_{ref}} \right) \times 100 \quad (14)$$

3.1.3. Optimización

El problema consiste en seleccionar, para cada elemento de la envolvente térmica, el material óptimo de un conjunto de alternativas disponibles. Dado que la decisión es binaria (se

selecciona o no un material), el problema se formula como un modelo de programación entera binaria.

Se consideran dos funciones objetivo: minimizar la demanda energética y minimizar el costo de la vivienda. Ambas pueden optimizarse de forma independiente o combinada mediante un parámetro $\alpha \in [0, 1]$, que pondera la importancia relativa de cada criterio.

Variables de decisión

Cada variable de decisión es binaria: toma el valor 1 si el material es seleccionado; 0 si es descartado. Se definen variables separadas por tipo de elemento, permitiendo al usuario poder escoger qué materiales se optimizarán y cuáles quedarán fijados.

- m_i : selección del material i para el muro.
- p_j : selección del material j para el piso.
- t_k : selección del material k para el techo.
- d_m : material de puerta fijado por el usuario.
- v_n : material de ventana fijado por el usuario.
- dnf_o : selección del material o para puertas no fijadas.
- vnf_p : selección del material p para ventanas no fijadas.

Para ventanas y puertas se distinguen dos grupos: los elementos fijados por el usuario, cuyo material y área son conocidos, y los no fijados, para los que el modelo selecciona del catálogo disponible. Esto se debe a que puede haber múltiples instancias de cada una.

Un material fijado se incorpora al modelo como una restricción de igualdad. Por ejemplo:

$$m_i = 1 \quad (\text{muro fijado por el usuario}) \quad (15)$$

De esta forma, el optimizador respeta la decisión del usuario y solo decide sobre los elementos no fijados.

Constantes

- V : Volumen interior promedio.
- R : Radiación solar que incide sobre el muro oeste.
- S : Superficie habitable promedio.
- HC : Horas de calefacción por año.
- HR : Horas de refrigeración por año.
- ΔT : Diferencia de temperatura promedio interior y exterior en invierno.
- A_i : Área del elemento i .
- U_i : Transmitancia térmica del elemento i .
- C_i : Costo del elemento i .

- A_{mo} : Área del muro poniente.
- ND : Cantidad de puertas fijadas por el usuario.
- NV : Cantidad de ventanas fijadas por el usuario.

Funciones objetivo

La demanda energética, en función de las variables de decisión, corresponde a la parte variable de la ecuación de simulación. Los términos constantes se agrupan en el término b .

$$z_{DE} = \frac{0,001 \cdot HC}{S} \cdot \Delta T \sum_{\forall x} X_x U_x A_x + b \quad (16)$$

donde:

$$b = \frac{0,001 \cdot HC}{S} \cdot 0,33 \cdot V \cdot \Delta T + \frac{0,001 \cdot HR \cdot R \cdot A_{mo}}{S} \quad (17)$$

$$X = \{m, p, t, d, v, dnf, vnf\} \quad (18)$$

$$x = \{i, j, k, m, n, o, p\} \quad (19)$$

La función objetivo de costo corresponde al costo total de los materiales seleccionados:

$$z_C = \sum_{\forall x} X_x C_x A_x \quad (20)$$

Ambas funciones se combinan mediante el parámetro α en una función objetivo única normalizada:

$$z = \alpha \cdot \hat{z}_{DE} + (1 - \alpha) \cdot \hat{z}_C \quad (21)$$

donde $\hat{z}_{DE}$ y $\hat{z}_C$ corresponden a las funciones normalizadas. $\alpha \in [0, 1]$: si $\alpha = 1$ se minimiza exclusivamente la demanda energética; si $\alpha = 0$ se minimiza exclusivamente el costo; valores intermedios ponderan ambos criterios simultáneamente.

Restricciones

Se selecciona exactamente un material por cada tipo de elemento libre:

$$\sum_{\forall i} m_i = 1, \quad \sum_{\forall j} p_j = 1, \quad \sum_{\forall k} t_k = 1, \quad \sum_{\forall o} dn f_o = 1, \quad \sum_{\forall p} vn f_p = 1 \quad (22)$$

Para los elementos fijados por el usuario, la cantidad de materiales seleccionados equivale a la cantidad de unidades fijadas:

$$\sum_{\forall m} d_m = ND, \quad \sum_{\forall n} v_n = NV \quad (23)$$

Adicionalmente, se imponen restricciones sobre el impacto de la selección:

- Al minimizar la demanda energética: el costo total de los materiales seleccionados no puede superar en más del 10% del costo base de la simulación.
- Al minimizar el costo, la demanda energética resultante no puede aumentar en más de $50[kWh/m^2]$ respecto a la demanda base. Además, como el estándar de construcción exige una calificación mínima igual a E, no se aceptan optimizaciones que no cumplan con esta exigencia.

El modelamiento del problema se realiza con la interfaz PuLP en Python 3.12. La revisión de esta implementación permitió identificar oportunidades de mejora en la estructura del código y la interacción entre componentes del módulo de recomendaciones, las cuales sentaron las bases para las funcionalidades descritas en las secciones siguientes.

3.2. Conjunto de Datos

El conjunto de materiales utilizado en el sistema de recomendaciones proviene del Listado Oficial de Soluciones Constructivas del MINVU, y fue proporcionado por Acua Plan. El listado contiene 119 soluciones constructivas distribuidas entre los tipos de elemento de la envolvente: muros, pisos, techos, ventanas y puertas.

Un atributo relevante del listado es que cada solución constructiva incluye su espesor mínimo de aislante, junto con la transmitancia térmica U y el costo por metro cuadrado asociados a ese espesor. Dado que un mismo material puede presentarse en múltiples espesores, cada combinación (material, espesor) constituye una alternativa independiente en el modelo de optimización, con su propio valor de U y costo. Esto permite que el solver no solo seleccione el material más adecuado para cada elemento de la envolvente, sino también el espesor óptimo, entregando una solución que satisface simultáneamente criterios técnicos, territoriales y normativos.

Los costos por metro cuadrado incluidos en el conjunto de datos son valores referenciales. Al no disponer de precios oficiales vinculados a cada solución constructiva del listado, se asignaron costos aproximados bajo el criterio de que a menor transmitancia

térmica U (mejor aislación), mayor costo unitario. Esta aproximación preserva la relación cualitativa entre calidad aislante y precio, pero no refleja valores de mercado reales.

3.3. Modelo Propuesto

El modelo desarrollado en la FESW 2025 sentó las bases de Bio Planner. Sin embargo, a partir de reuniones con la oficina de arquitectos Acua Plan, se identificó la necesidad de reorientar el enfoque de la aplicación.

En esta versión, el resultado de la simulación pasa a ser orientativo. El protagonismo lo toman las recomendaciones y la comparación de materiales de envolvente: el usuario no busca un valor de demanda exacto, sino entender qué elementos de su diseño tienen mayor impacto energético y qué alternativas existen para mejorarlos.

3.3.1. Roadmap para la Implementación de Mejoras

La implementación de mejoras siguió un proceso iterativo estructurado en las siguientes etapas:

1. Revisión del sistema base: retomar el trabajo realizado en la FESW 2025, comprendiendo la estructura, componentes y lógica general del código existente.
2. Diagnóstico del estado previo: a partir del nuevo enfoque definido con Acua Plan, identificar las limitaciones de la aplicación y proponer las mejoras correspondientes.
3. Validación con Acua Plan: presentar las mejoras propuestas a la oficina de arquitectos y ajustar el alcance según su retroalimentación.
4. Implementación de mejoras: desarrollar los cambios de forma iterativa, priorizando aquellos de mayor impacto para el usuario final.
5. Análisis de resultados: validar las soluciones obtenidas junto a Acua Plan, evaluando su pertinencia técnica y utilidad práctica.

3.3.2. Revisión y Diagnóstico del Sistema Base

La revisión abarcó las tres capas principales del sistema: la interfaz de usuario, la lógica de la aplicación, y el módulo de optimización. El foco del diagnóstico recayó sobre esta última, dado que concentra la lógica del sistema de recomendaciones. A nivel de la API de optimización, se identificó deuda técnica acumulada: redundancia de código, estructuración insuficiente de módulos y consultas que dificultaban la extensión del sistema. Se realizaron mejoras de ingeniería: reestructuración de código, eliminación de redundancias

y redefinición de la interacción entre componentes. Estos cambios sentaron las bases para la implementación de las mejoras descritas en la sección siguiente.

3.4. Implementación de Mejoras

A continuación se describen las mejoras implementadas al sistema de recomendaciones, que abarcan tanto el modelo subyacente como la presentación de resultados al usuario.

3.4.1. Normalización de la Función Objetivo por Valores Base

Estado previo. La función objetivo combinada normalizaba los términos de demanda y costo mediante constantes fijas: $z_{DE,max} = 100$ y $z_{C,max} = 10.000.000$, independientes de la vivienda concreta. Para una vivienda con demanda base de 50 kWh/m² y costo base de 8.000.000 CLP, al fijar $\alpha = 0,5$ el término de costo pesaba 1,6 veces más que el de demanda, rompiendo la interpretación simétrica del parámetro.

Cambios implementados. Los escalares fijos fueron reemplazados por los valores base de cada instancia:

$$z = \alpha \cdot \frac{z_{DE}}{DE_{base}} + (1 - \alpha) \cdot \frac{z_C}{C_{base}} \quad (24)$$

donde z_{DE} es la demanda energética resultante de los materiales seleccionados, z_C es su costo total, DE_{base} es la demanda energética del estado actual de la vivienda y C_{base} es su costo base.

Estado nuevo. Ambos términos representan fracciones relativas al estado actual de la vivienda. El valor $\alpha = 0,5$ garantiza igual ponderación entre demanda y costo para cualquier vivienda y zona climática, haciendo la interpretación del parámetro robusta ante diferencias de escala entre instancias.

3.4.2. Restricciones Configurables como Márgenes Relativos

Estado previo. La restricción de demanda se expresaba como un umbral absoluto ligado a las letras de calificación energética CEV. La restricción de costo estaba fijada como $z_C \leq 1,1 \cdot C_{base}$. Ambos umbrales eran inflexibles e incompatibles con el enfoque orientativo adoptado, en el que las letras CEV no son meta del modelo.

Cambios implementados. Las restricciones se redefinieron como márgenes relativos al estado actual de la vivienda:

$$z_{DE} \leq DE_{\text{base}} \cdot (1 + \delta_D) \quad (25)$$

$$z_C \leq C_{\text{base}} \cdot (1 + \delta_C) \quad (26)$$

donde δ_D es el cambio máximo de la demanda y δ_C es el cambio máximo del costo. Estos parámetros son configurables por el usuario en la aplicación.

Estado nuevo. El usuario puede ajustar ambos umbrales sin necesidad de conocer la escala CEV (Ver Figura 5b). Los valores por defecto mantienen un comportamiento conservador: la demanda no puede empeorar más de un 25 % y el costo no puede superar en más de un 10 % respecto al estado actual.

3.4.3. Reporte del Impacto de la Decisión

Estado previo. La vista de resultados no incluía información cuantitativa sobre la variación entre la solución recomendada y el estado actual de la vivienda. El usuario podía ver los materiales sugeridos, pero no cuantificar el beneficio concreto de adoptarlos.

Estado nuevo. Cada solución presentada incluye la variación porcentual en demanda energética y en costo respecto al estado base:

$$\Delta_{DE} = \frac{z_{DE} - DE_{\text{base}}}{DE_{\text{base}}} \times 100 \% \quad (27)$$

$$\Delta_C = \frac{z_C - C_{\text{base}}}{C_{\text{base}}} \times 100 \% \quad (28)$$

El impacto se refleja en dos niveles. Primero, un modal resumen confirma el resultado (Ver Figura 6b). Luego, una vista de resultados detalla la variación porcentual (Ver Figura 7b). Esta información permite comparar alternativas no solo en términos absolutos, sino también en relación al punto de partida del proyecto.

3.4.4. Descarte de Materiales del Catálogo

Estado previo. El sistema consideraba todos los materiales disponibles en el catálogo como candidatos válidos para cada tipo de elemento, sin posibilidad de exclusión. Si el usuario quería evitar un material específico, no contaba con ningún mecanismo para expresar esa preferencia dentro del modelo.

Estado nuevo. El usuario puede descartar materiales específicos antes de ejecutar la optimización (Ver Figura 8). Los materiales excluidos no son considerados para buscar la solución.

3.4.5. Rediseño para Mostrar Más Información

Las mejoras al modelo descritas en las secciones anteriores permitieron enriquecer la presentación de resultados al usuario. A partir del diagnóstico del sistema base, se identificaron además datos relevantes omitidos para la toma de decisiones. Se realizaron los siguientes cambios de presentación:

- **Nombres de materiales:** la interfaz original mostraba únicamente el tipo de elemento (por ejemplo, “Muro” o “Ventana”), sin indicar el nombre del material recomendado. Se incorporó el nombre proveniente del catálogo en cada resultado (Ver Figura 5).
- **Resumen del estado actual:** se agregó un panel que muestra la demanda energética (kWh/m^2) y el costo total de los materiales actuales antes de ejecutar la optimización, sirviendo como referencia para evaluar la magnitud de las mejoras obtenidas (Ver Figura 5b).
- **Resultados en el modal:** el modal de resultados mostraba únicamente un mensaje genérico. Se rediseñó para incluir la demanda resultante y el costo total de la solución (Ver Figura 6).
- **Distinción entre materiales fijados y optimizados:** la interfaz no distinguía entre un material fijado por el usuario y uno seleccionado por el solver. Se agregó la distinción visual correspondiente (Ver Figura 7).

Selecciona qué deseas optimizar

COSTOS **EFICIENCIA** **AMBOS**

Peso entre Costo y Eficiencia

Costo: 0.10 | Eficiencia: 0.90

MUROS

Muros (todos) ☒

PISOS

Piso ☒

TECHOS

Techo ☒

VENTANAS

Ventana norte ☐

Ventana sur ☐

PUERTAS

Optimizar Proyecto

(a) Estado previo.

Optimizar proyecto

TU PROYECTO HOY

Costo **\$10.8M** Demanda **103 kWh/m²**

¿Hacia dónde inclinar?

Mueve el deslizador para priorizar ahorro o eficiencia.

Costo **10%** Eficiencia **90%**

\$ Más barato Equilibrio Más eficiente

Restricciones

Topes para el cambio respecto a tu proyecto actual.

LÍMITES DE CAMBIO vacío = sin límite

Costo no debe subir más de **10** % Demanda no debe subir más de **25** %

Marca lo que sí puede cambiar

Lo que dejes sin marcar quedará igual.

Optimizar proyecto →

(b) Estado nuevo - resumen y restricciones.

Marca lo que sí puede cambiar

Lo que dejes sin marcar quedará igual.

☒ **Muros** **OPTIMIZAR**
Ladrillo artesanal de 300x150x60mm y poliestireno expandido interior (p...

☒ **Pisos** **OPTIMIZAR**
Poliestireno Expandido

☒ **Techo** **OPTIMIZAR**
POLIESTIRENO EXPANDIDO 15 kg/ m3 y Yeso Carton de 10 mm

☐ **Ventanas** FIJO >
2 elementos

☐ **Puertas** FIJO >
1 elementos

Excluir materiales

El solver no considerará estos materiales al recomendar.

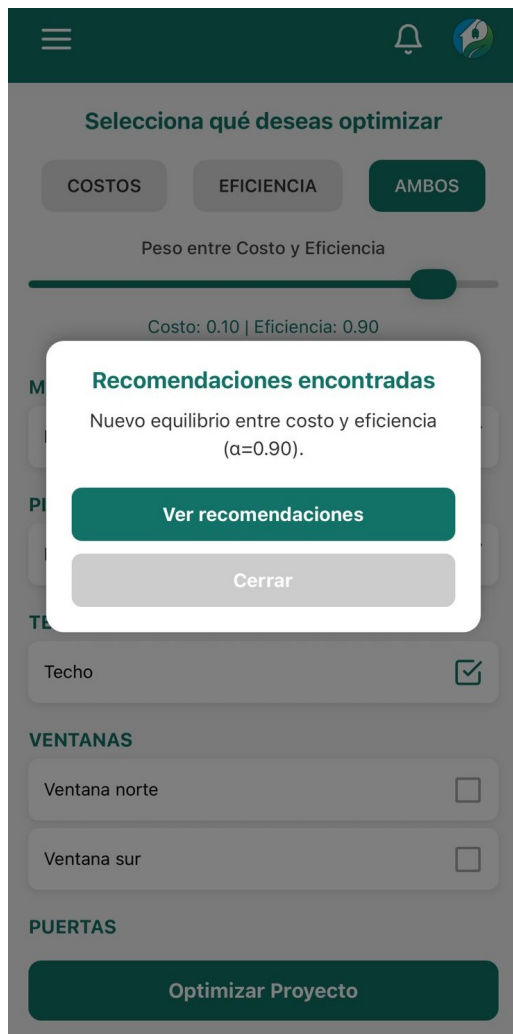
1 excluido · Editar

Ladrillo artesanal d... X

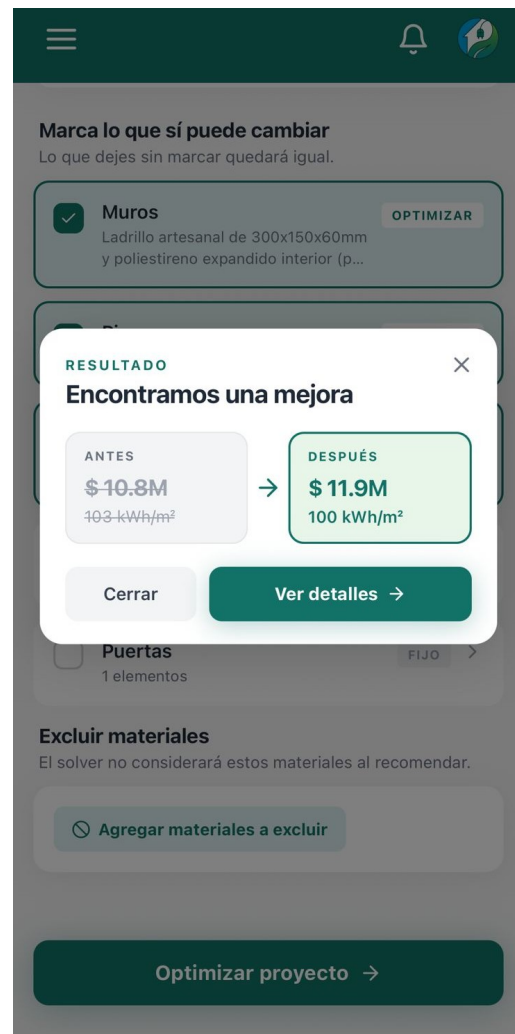
Optimizar proyecto →

(c) Estado nuevo — elementos y exclusiones.

Figura 5: Vista de optimización: comparación entre estado previo (a) y estado nuevo, (b) y (c).



(a) Estado previo: mensaje genérico sin información cuantitativa.



(b) Estado nuevo: comparación antes/después con demanda y costo.

Figura 6: Modal de resultado: comparación entre estado previo (a) y estado nuevo (b).



(a) Estado previo: materiales sin costo y sin reporte de impacto.



(b) Estado nuevo: variación porcentual de demanda y costo, con material anterior tachado.

Figura 7: Vista de recomendaciones: comparación entre estado previo (a) y estado nuevo (b).

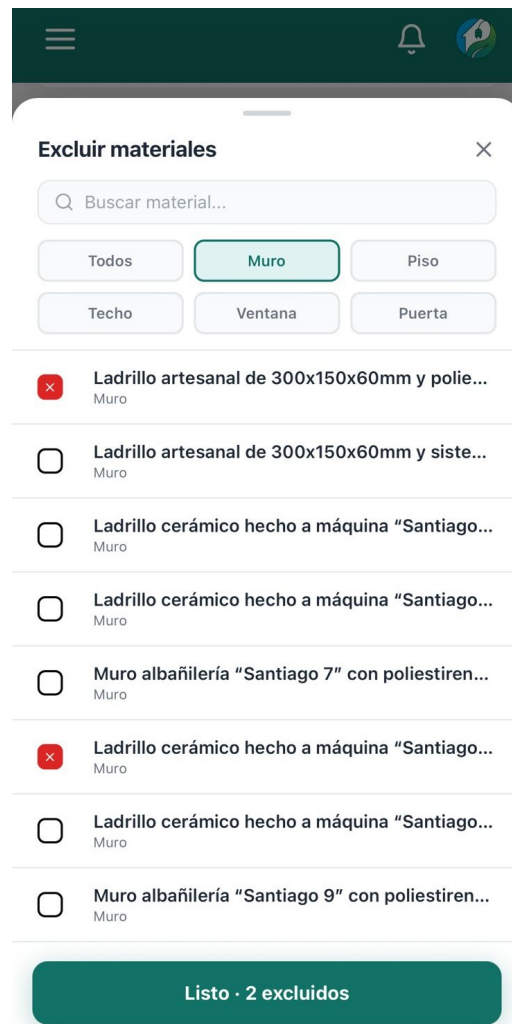


Figura 8: Interfaz de exclusión de materiales: el usuario puede buscar y descartar materiales del catálogo antes de ejecutar la optimización.

3.4.6. Evaluación de Solvers Alternativos

El solver utilizado en el modelo base era CBC (COIN-OR Branch and Cut), el solver por defecto de PuLP. Si bien resuelve correctamente las instancias del sistema, se propone explorar otros solvers en términos de rapidez y calidad de la solución.

- CBC: solver de referencia, incluido en PuLP sin dependencias adicionales. Paradigma Branch & Bound clásico.
- HiGHS: solver open source moderno en el espacio LP/MIP, compatible con PuLP directamente mediante `HiGHS_CMD` sin necesidad de reescribir el modelo.
- SCIP: solver open source de alto rendimiento, disponible bajo licencia Apache 2.0 desde su versión 9 (2024). Combina técnicas MIP, programación por restricciones y resolución no lineal mediante Branch, Cut & Price.

El experimento se ejecutó sobre instancias de distinto tamaño generadas desde un proyecto real de vivienda en Casablanca (zona climática C), proporcionado por Acua Plan. Los tres solvers alcanzaron el mismo óptimo global en todos los escenarios evaluados. En términos de tiempo de resolución, SCIP resultó el más rápido en las instancias pequeña y grande. Los resultados completos se presentan en la siguiente sección.

A partir de estos resultados, se reemplaza CBC por SCIP como solver de producción del módulo de recomendaciones de Bio Planner.

CAPÍTULO 4

VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Las mejoras implementadas fueron evaluadas desde dos perspectivas complementarias: la validación cuantitativa mediante el benchmark de solvers y la validación cualitativa con Acua Plan.

4.1. Benchmark de Solvers

El benchmark comparó los tres solvers evaluados: CBC, HiGHS y SCIP, sobre instancias de distinto tamaño generadas desde el proyecto de Casablanca. El experimento varió el parámetro $\alpha \in \{0; 0,5; 1\}$ (ponderación de la demanda en la función objetivo) y se ejecutó diez veces por celda, registrando la mediana de tiempo de resolución (p50). Los tres solvers alcanzaron el óptimo global en los nueve escenarios evaluados, obteniendo resultados idénticos en términos de función objetivo normalizada.

Tabla 1: Tiempos de resolución p50 (ms) para $\alpha = 0,5$.

Instancia	Elementos libres	CBC (ms)	HiGHS (ms)	SCIP (ms)
Pequeña	4	75	146	48
Mediana	6	104	220	94
Grande	13	220	328	126

Tabla 2: Tiempos de resolución p50 promedio (ms) sobre $\alpha \in \{0; 0,5; 1\}$.

Instancia	Elementos libres	CBC (ms)	HiGHS (ms)	SCIP (ms)
Pequeña	4	74	142	58
Mediana	6	115	244	166
Grande	13	256	418	168

Para $\alpha = 0,5$, configuración por defecto, SCIP es el más rápido en las tres instancias, con una ventaja que crece con el tamaño del problema: un 36 % más rápido que CBC en la instancia pequeña y un 43 % en la grande (véase la Tabla 1).

Al promediar sobre los tres valores de α , CBC resulta más rápido en la instancia mediana (115 ms), como muestra la Tabla 2. Esta excepción se explica por un valor atípico en el escenario de $\alpha = 1$ (minimizar exclusivamente demanda, sin considerar costo), donde SCIP alcanza una mediana de 329 ms con alta varianza; en los demás escenarios de la instancia mediana es el más rápido.

HiGHS, pese a superar a CBC en benchmarks públicos, presenta mayor latencia en este entorno debido a la sobrecarga de la interfaz Python nativa (highspy) en Windows, por

lo que se considera un candidato para futuras evaluaciones en entornos Linux utilizando el binario nativo.

4.2. Validación con Acua Plan

Las mejoras propuestas e implementadas fueron presentadas a la oficina de arquitectos Acua Plan en el transcurso del proceso de desarrollo. La retroalimentación recibida confirmó la pertinencia de los cambios en restricciones configurables, reporte de impacto y descarte de materiales, así como la utilidad práctica del rediseño de la interfaz. Esta validación quedó formalizada mediante una carta emitida por Acua Plan (Ver Figura [9](#)).

Valparaíso, 03 de junio del 2026

A quien corresponda

Por medio de la presente, Danae Esper Tala, Rut: 10.981.470-9, directora de ACUA PLAN, certifica que ha participado como usuario final en el proceso de desarrollo de la memoria de título *“Modelo de Precalificación Energética y Recomendaciones de Diseño para Viviendas en Chile: Caso Bio Planner”* del alumno **Diego Alejandro Concha Beroiza**, de la carrera de Ingeniería Civil Informática de la Universidad Técnica Federico Santa María.

En el transcurso del proyecto se revisaron e implementaron las siguientes mejoras al sistema de recomendaciones de materiales de Bio Planner:

- Restricciones configurables como márgenes relativos al estado actual de la vivienda.
- Reporte de impacto en demanda energética y costo para cada alternativa.
- Funcionalidad de descarte de materiales del catálogo.
- Rediseño de la interfaz para presentar información más completa al usuario.

Se confirma que las mejoras descritas responden a necesidades reales del flujo de trabajo de la oficina y que su implementación es pertinente para el contexto de aplicación del sistema.

Sin otro particular, se suscribe atentamente,



Danae Esper Tala
Directora— ACUA PLAN

Figura 9: Carta de validación Acua Plan.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Bio Planner nació como una herramienta de simulación energética. El eje central de esta memoria fue reorientar ese enfoque: la simulación pasa a ser un medio, y las recomendaciones de materiales y la comparación de alternativas se convierten en el producto de valor para el usuario. Este cambio de prioridad, definido en conjunto con la oficina de arquitectos Acua Plan, guió todas las decisiones de diseño e implementación del trabajo.

5.1. Cumplimiento de Objetivos

Los cinco objetivos específicos fueron abordados e implementados. El estado actual de la vivienda se incorporó a la interfaz como referencia visible antes de ejecutar la optimización. Las restricciones del modelo se redefinieron como márgenes relativos configurables, eliminando la dependencia con la escala CEV. Se desarrolló la funcionalidad de descarte de materiales del catálogo. Cada solución presentada reporta la variación porcentual de demanda y costo respecto al estado base. Por último, se evaluaron tres solvers (CBC, HiGHS y SCIP) en tiempo de resolución y calidad de la solución, seleccionando SCIP como solver de producción.

Las mejoras implementadas fueron validadas por Acua Plan, quien emitió una carta de validación que confirma la pertinencia y utilidad práctica del sistema.

5.2. Contribuciones

El conjunto de mejoras le entrega al usuario común la capacidad de calcular la demanda energética estimada de su vivienda y obtener recomendaciones de materiales adaptadas a su proyecto específico: su ubicación geográfica, los elementos constructivos de su diseño y sus preferencias en cuanto a costo y eficiencia energética. Antes de esta memoria, el sistema entregaba sugerencias genéricas sin contexto cuantitativo. Ahora el usuario puede ver cuánto mejora o empeora su demanda y costo al adoptar cada alternativa, con parámetros que puede ajustar según su realidad.

5.3. Limitaciones

El catálogo de materiales contiene 119 soluciones constructivas, lo que acota el espacio de búsqueda del modelo. Si bien esto es suficiente para demostrar el enfoque, un sistema de uso real requiere un catálogo más amplio y actualizado.

Los costos asociados a cada material son valores representativos, asignados bajo el criterio de que menor transmitancia implica mayor costo. No reflejan precios de mercado reales, lo que limita la utilidad prescriptiva de la optimización de costo a un rol comparativo.

El motor de simulación energética es una simplificación significativa del cálculo CEV oficial. Factores como inercia térmica, puentes térmicos, cargas internas y comportamiento de equipos de calefacción no están modelados. Los valores de demanda obtenidos son orientativos y no equivalen a una precalificación CEV formal.

5.4. Trabajo Futuro

Ampliar el catálogo de materiales con más soluciones del listado MINVU, e idealmente con costos reales de mercado, es la mejora de mayor impacto inmediato sobre la utilidad del sistema.

A nivel del modelo, la función objetivo podría reestructurarse para incorporar nuevas variables relevantes en la decisión de diseño, como el impacto ambiental o el ciclo de vida de los materiales. Una extensión más ambiciosa sería permitir que el usuario varíe las dimensiones de la vivienda como parte de la optimización; sin embargo, esto introduciría no linealidades en el modelo que lo sacarían del dominio de la programación lineal entera, requiriendo un replanteamiento de la formulación o el uso de solvers de programación no lineal entera mixta.

Finalmente, la interfaz fue validada con el cliente, pero no con usuarios finales en condiciones reales de uso. Una experimentación con usuarios, arquitectos o propietarios de vivienda sin formación técnica, permitiría identificar barreras de usabilidad que la validación con el cliente no captura.

Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadísticas. *Permisos de Edificación Disminuyeron 0,8% En 2024*. 2025. URL: <http://www.ine.gob.cl/sala-de-prensa/prensa/general/noticia/2025/05/22/permisos-de-edificaci%C3%B3n-disminuyeron-0-8-en-2024> (visitado 28-03-2026).
- [2] MINVU. *Nueva Reglamentación Térmica*. 2024. URL: <https://www.minvu.gob.cl/nueva-reglamentacion-termica/> (visitado 28-03-2026).
- [3] Javier Piedra Fierro. *Eficiencia Energética en viviendas: cuando el Ministerio de Energía abandona un compromiso*. Oct. de 2022. URL: <https://www.ciperchile.cl/2022/10/20/eficiencia-energetica-en-viviendas/> (visitado 28-03-2026).
- [4] Karen González T. *Pobreza energética: Uno de cada tres hogares en Chile no cuenta con calefacción adecuada*. Mayo de 2019. URL: <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/pobreza-energetica-en-chile/675794/> (visitado 28-03-2026).
- [5] CaixaBank. *¿Qué es la eficiencia energética de una casa o piso?* URL: https://www.caixabank.es/particular/hipotecas/eficiencia-energetica-vivienda-p.html?Origen=Facebook-Like-%c2%bfQu%c3%a9_es_la_eficiencia_energ%c3%a9tica_de_una_casa_o_piso%3f-es (visitado 18-04-2026).
- [6] Hugh D. Young y Roger A. Freedman. *Física universitaria con física moderna, Volumen 1*. 12.^a ed. Pearson Educación, 2009.
- [7] José Tomás Franco. *¿Cómo calcular la transmitancia térmica (Valor U) en la envolvente material de un edificio?* Jul. de 2018. URL: <https://www.archdaily.cl/cl/898485/como-calcular-la-transmitancia-termica-valor-u-en-la-envolvente-material-de-un-edificio> (visitado 19-04-2026).
- [8] Volcan. *Aislación térmica según zona geográfica*. URL: <https://volcan.cl/aislacion-termica-zona/> (visitado 19-04-2026).
- [9] Ministerio de Vivienda y Urbanismo. *Comunicado Reglamentación Térmica*. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2025.
- [10] catalogoarquitectura.cl. *Reglamentación Térmica, según OGUC (explicada)*. 2022. URL: <https://www.catalogoarquitectura.cl/cl/oguc/reglamentacion-termica-segun-oguc> (visitado 21-04-2026).
- [11] Biblioteca del Congreso Nacional. *Ley N° 21.305 sobre Eficiencia Energética*. Feb. de 2021. URL: <https://www.bcn.cl/leychile> (visitado 21-04-2026).
- [12] Ministerio de Vivienda y Urbanismo. *¿Qué es la CEV? — Calificación Energética de Viviendas*. URL: <https://www.calificacionenergetica.cl/que-evalua-la-calificacion-energetica-de-viviendas/> (visitado 21-04-2026).

- [13] Ministerio de Vivienda y Urbanismo. *Tipos de Calificación — Calificación Energética de Viviendas*. URL: <https://www.calificacionenergetica.cl/tipos-de-calificacion/> (visitado 21-04-2026).
- [14] Ministerio de Vivienda y Urbanismo. *Principales Indicadores de la CEV — Calificación Energética de Viviendas*. URL: <https://www.calificacionenergetica.cl/principales-indicadores-de-la-cev/> (visitado 21-04-2026).
- [15] Ministerio de Vivienda y Urbanismo. *Curso Evaluadores Energéticos: Sistema de Calificación Energética de Vivienda (CEV v2.0)*. 2019.
- [16] David G. Luenberger y Yinyu Ye. *Linear and Nonlinear Programming*. 4th. New York, NY: Springer, 2008. ISBN: 9780387745022.
- [17] Stephen P. Bradley, Arnoldo C. Hax y Thomas L. Magnanti. *Applied Mathematical Programming*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1977.
- [18] Massimiliano Caramia y Paolo Dell’Olmo. «Multi-Objective Optimization». En: *Multi-Objective Management in Freight Logistics: Increasing Capacity, Service Level, Sustainability, and Safety with Optimization Algorithms*. Ed. por Massimiliano Caramia y Paolo Dell’Olmo. Cham: Springer International Publishing, 2020, págs. 21-51. ISBN: 978-3-030-50812-8. DOI: [10.1007/978-3-030-50812-8_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50812-8_2). URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50812-8_2 (visitado 23-05-2026).
- [19] Farshad Kheiri. «A Review on Optimization Methods Applied in Energy-Efficient Building Geometry and Envelope Design». En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 92 (sep. de 2018), págs. 897-920. ISSN: 1364-0321. DOI: [10.1016/j.rser.2018.04.080](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.080). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118302624> (visitado 09-05-2026).
- [20] Stig-Inge Gustafsson. «Mixed Integer Linear Programming and Building Retrofits». En: *Energy and Buildings* 28.2 (oct. de 1998), págs. 191-196. ISSN: 03787788. DOI: [10.1016/S0378-7788\(98\)00019-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00019-X). (Visitado 23-05-2026).
- [21] Joonrak Kim, Dongmin Son y Bongju Jeong. «Two-Stage Integer Programming Model for Building Retrofit Planning for Energy Saving in South Korea». En: *Sustainability* 9.11 (nov. de 2017), pág. 2087. ISSN: 2071-1050. DOI: [10.3390/su9112087](https://doi.org/10.3390/su9112087). URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/11/2087> (visitado 23-05-2026).
- [22] Kalyanmoy Deb et al. «A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II». En: *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6.2 (2002), págs. 182-197. ISSN: 1089-778X. DOI: [10.1109/4235.996017](https://doi.org/10.1109/4235.996017).
- [23] Lorena Larrea-Sáez et al. «Optimizing Insulation and Heating Systems for Social Housing in Chile: Insights for Sustainable Energy Policies». En: *Energy* 290 (mar. de 2024), pág. 130024. ISSN: 0360-5442. DOI: [10.1016/j.energy.2023.130024](https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130024). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223034187> (visitado 23-05-2026).

- [24] Aner Martinez-Soto et al. «Towards Low-Carbon Housing in Chile: Optimisation and Life Cycle Analysis of Energy-Efficient Solutions». En: *Case Studies in Thermal Engineering* 28 (dic. de 2021), pág. 101579. ISSN: 2214-157X. DOI: [10.1016/j.csite.2021.101579](https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101579). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X21007425> (visitado 23-05-2026).