

**Implementación de la optimización multiobjetivo en el diseño arquitectónico de un  
proyecto ecoturístico**

Diana Marcela Gómez Rodríguez

Trabajo de Grado para optar el título de Maestría en Ingeniería Civil

Modalidad Investigación

Director:

Oscar Javier Begambre Carrillo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2026

**Dedicatoria**

Primeramente, a Dios, por darme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar este proceso.

A mi familia, por su apoyo incondicional y por brindarme la motivación constante para seguir adelante. Su compañía y confianza en mis capacidades fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

A mis profesores y asesores, en especial a mi director, cuya guía y conocimiento contribuyeron de manera significativa a mi formación académica y profesional.

A mis colegas y compañeros de la maestría, con quienes compartí experiencias y aprendizajes que enriquecieron este camino.

### Agradecimiento

Expreso mi más profundo agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Civil por brindarme el espacio académico e investigativo necesario para la culminación de esta maestría.

A mi director de tesis, el profesor Oscar Javier Begambre Carrillo, por su guía, exigencia académica, orientación constante y apoyo en cada etapa de este proceso. Su compromiso y experiencia fueron determinantes para alcanzar los objetivos planteados y para fortalecer mi formación como investigadora.

Extiendo también mi gratitud a todos los profesores de la Maestría en Ingeniería Civil, así como al director del programa, el profesor Álvaro Viviescas Jaimes, quienes con sus conocimientos y enseñanzas enriquecieron mi formación académica y profesional, ampliando mi visión crítica e interdisciplinar. Al Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción (INME), por facilitar espacios y herramientas que contribuyeron al desarrollo de este trabajo.

Asimismo, a la señora Ludy Andrea Cáceres Mariño, secretaria de la maestría, por su apoyo constante, su disposición y gestión oportuna en todos los trámites administrativos que acompañaron este proceso. Finalmente, a mis compañeros de la maestría, por el intercambio de ideas, experiencias y aprendizajes compartidos que hicieron de este camino un proceso más significativo y enriquecedor.

## Contenido

Introducción.....	18
Presentación del problema.....	28
1. Objetivos .....	32
1.1. Objetivo general .....	33
1.2. Objetivos específicos .....	33
2. Estado del arte.....	33
3. Marco teórico.....	39
3.1. Diseño arquitectónico .....	39
3.2. Optimización multiobjetivo.....	53
3.3. Confort térmico.....	59
3.4. Ecoturismo .....	75
4. Metodología y ejemplos de validación con sus resultados.....	80
4.1. Fase I: Formulación del problema de optimización .....	83
4.1.1. Límites de los rangos posibles.....	89
4.1.1.1. Maximizar el área de las ventanas .....	90
4.1.1.2. Maximizar el porcentaje neutral .....	91
4.1.1.3. Minimizar el volumen del modelo.....	94
4.2. Fase II: Definición de la distribución interna.....	95
4.3. Fase III: Optimización de aberturas en fachada .....	96
4.4. Fase IV: Determinación del emplazamiento y orientación .....	97
4.5. Fase V: Integración y validación .....	97
4.5.1. Validación optimización con Octopus .....	98
4.5.2. Validación del modelo de optimización térmica .....	107
5. Resultados de la metodología de optimización multiobjetivo en el diseño conceptual.....	111
5.1. Implementación de un método de optimización multiobjetivo para el diseño arquitectónico de un proyecto ecoturístico. ....	113
5.1.1. Configuración de una herramienta interactiva automatizada que permite presentar opciones de diseño esquemático. ....	117
5.1.2. Distribución de los usos internos en planta de una unidad habitacional basado en la sintaxis del espacio.....	124
5.1.3. Soluciones no dominadas para el confort térmico interior y la configuración de las aberturas en las fachadas de una unidad habitacional según las funciones objetivo. ....	131

5.1.4.	Emplazamiento de una unidad habitacional, en términos de orientación medida en grados de rotación en el plano XY.....	147
6.	Análisis.....	154
6.1.	Falta de conflicto real entre los objetivos. ....	156
6.2.	Diferencias de escala entre los objetivos. ....	156
6.3.	Posible insensibilidad del modelo de confort.....	157
6.4.	Análisis del Frente de Pareto en 3D.....	163
6.4.1.	Relación entre ventanas y desempeño energético .....	164
6.4.2.	Interacción entre volumen y eficiencia .....	165
6.4.3.	Impacto de la orientación (rotación en XY).....	165
6.5.	Análisis del Frente de Pareto 3D – Comparativa por Rango del Factor de Proporción de Ventanas.....	166
6.6.	Frente de Pareto 3D – Factor de proporción de ventanas entre 0.3 y 0.7 .....	167
7.	Discusión .....	170
8.	Conclusiones.....	173
8.1.	Objetivo general: <i>Implementar un método de optimización multiobjetivo para el diseño arquitectónico de un proyecto ecoturístico.</i> (Ver Sección 6.1.) .....	173
8.2.	Objetivo 1: <i>Configurar una herramienta interactiva automatizada que permita presentar opciones de diseño esquemático.</i> (Ver Sección 6.1.1.).....	174
8.3.	Objetivo 2: <i>Definir la distribución de los usos internos en planta de una unidad habitacional basado en la sintaxis del espacio.</i> (Ver Sección 6.1.2.).....	174
8.4.	Objetivo 3: <i>Hallar soluciones no dominadas para el confort térmico interior y la configuración de las aberturas en las fachadas de una unidad habitacional según las funciones objetivo.</i> (Ver Sección 6.1.3.).....	174
8.5.	Objetivo 4: <i>Determinar el emplazamiento de una unidad habitacional en términos de orientación medida en grados de rotación en el plano XY.</i> (Ver Sección 6.1.4.).....	175
8.6.	Consideraciones adicionales y limitaciones .....	175
8.6.1.	Definición de materiales: .....	176
8.6.2.	Información climática limitada:.....	176
8.6.3.	Ausencia de análisis energético en Honeybee:.....	177
8.6.4.	Errores en la geometría inicial:.....	178
8.6.5.	Problemas por exceso de información en memoria:.....	178
8.6.6.	Tiempo de cómputo: .....	178
8.6.7.	Requerimientos computacionales accesibles:.....	179

9. Recomendaciones .....180

10. Trabajos futuros.....184

Referencias .....186

Apéndices .....199

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> Ejemplos arquitectónicos con conceptos de ingeniería innovadores .....	21
<b>Figura 2</b> Objetivos de desarrollo sostenible (ODS) .....	24
<b>Figura 3</b> Resultados de la búsqueda “Multi-objective optimization in architectural design” .....	35
<b>Figura 4</b> Diagrama del ciclo de diseño según H.A. Simon, 1981 .....	40
<b>Figura 5</b> Gráfico de ejemplo con restricción de 3 pixeles con 2 colores .....	40
<b>Figura 6</b> Ejemplo de arquitectura digital .....	43
<b>Figura 7</b> Ejemplo de arquitectura paramétrica .....	44
<b>Figura 8</b> Ejemplo de arquitectura algorítmica .....	45
<b>Figura 9</b> Ejemplo de edificio de complejidad formal. Walt Disney Concert Hall por Frank Gehry, Los Ángeles (2003) .....	46
<b>Figura 10</b> Maqueta funicular de la Sagrada Familia, Antonio Gaudí .....	47
<b>Figura 11</b> Ejemplo de arquitectura modular. Hábitat 67 por Arq. Moshe Safdie en Montreal, Canadá (1967) .....	48
<b>Figura 12</b> Ejemplo de Sintaxis espacial .....	49
<b>Figura 13</b> Etapas del diseño y construcción de un proyecto .....	50
<b>Figura 14</b> Proceso clásico de diseño .....	51
<b>Figura 15</b> Proceso de diseño generativo .....	51
<b>Figura 16</b> Proceso de diseño generativo .....	52
<b>Figura 17</b> Proceso de diseño paramétrico .....	53
<b>Figura 18</b> Estados en la optimización topológica de una viga simplemente apoyada .....	54
<b>Figura 19</b> Espacios de búsqueda, realizable y de los objetos .....	56
<b>Figura 20</b> Puntos ideales, frente de Pareto .....	57
<b>Figura 21</b> Ejemplo de optimización topológica de viga en voladizo .....	58
<b>Figura 22</b> Fórmulas parámetros físicos .....	65
<b>Figura 23</b> Fórmula actividad metabólica .....	66
<b>Figura 24</b> Proceso de adaptación térmica en ambientes interiores .....	69
<b>Figura 25</b> Esquema del proceso de sensación y percepción térmica .....	71
<b>Figura 26</b> Ejemplo nacional de arquitectura ecoturística. Ecohabs, PNN Tayrona .....	77
<b>Figura 27</b> Ejemplo internacional de arquitectura ecoturística. Parque Nacional de Malí, Kere Architecture (2010) .....	77
<b>Figura 28</b> Ecosistemas de alta montaña .....	79
<b>Figura 29</b> Metodología planteada para el diseño conceptual usando optimización multiobjetivo .....	81
<b>Figura 30</b> Diagrama visto en planta del rango de áreas del diseño conceptual .....	84
<b>Figura 31</b> Diagrama alzado del rango de alturas del diseño conceptual .....	85
<b>Figura 32</b> Variables del problema de optimización multiobjetivo planteado .....	88
<b>Figura 33</b> Periodo de análisis del modelo .....	89
<b>Figura 34</b> Definición volúmenes y contexto .....	90
<b>Figura 35</b> Funciones para validación de resultados en Octopus .....	98
<b>Figura 36</b> Configuración de la optimización en Octopus de la Función Sphere .....	99
<b>Figura 37</b> Configuración de la optimización en Octopus de la Función Rastrigin .....	100

<b>Figura 38</b> Configuración de la optimización en Octopus de la Función ZDT1 .....	101
<b>Figura 39</b> Resultados de la optimización en Octopus de la Función Sphere .....	103
<b>Figura 40</b> Resultados de la optimización en Octopus de la Función Rastrigin, gráfico 2D: Contorno + soluciones (200 generaciones) .....	104
<b>Figura 41</b> Resultados de la optimización en Octopus de la Función ZDT1, gráfico 2D después de 500 generaciones.....	106
<b>Figura 42</b> Comparación de las variables de diseño, funciones objetivo y resultados en el entorno paramétrico del artículo de referencia con lo obtenido en la validación usando Ladybug, Honeybee y Octopus en Grasshopper .....	109
<b>Figura 43</b> Configuración de nueve cubos entrelazados usados como volumen de búsqueda para la optimización multiobjetivo .....	112
<b>Figura 44</b> Datos condición térmica durante el año y porcentaje neutral de confort adaptativo del lugar sin el modelo.....	115
<b>Figura 45</b> Resultado de la función objetivo 2 en el modelo de 9 cubos .....	116
<b>Figura 46</b> Resultado LB Hourly Plot de las condiciones térmicas adaptativas con el modelo de 9 cubos ubicado en Bridgeport .....	116
<b>Figura 47</b> Construcción de 9 cubos iniciales del modelo esquemático.....	117
<b>Figura 48</b> Plan of Work.....	120
<b>Figura 49</b> Herramienta de diseño esquemático con optimización multiobjetivo que incorpora: Syntax espacial, análisis y confort térmico adaptativo.....	121
<b>Figura 50</b> Integración herramienta Space Syntax al modelo.....	125
<b>Figura 51</b> Grafos del modelo en Space Syntax.....	126
<b>Figura 52</b> Organización espacial del modelo .....	127
<b>Figura 53</b> Análisis del modelo en Space Syntax .....	128
<b>Figura 54</b> Gráfico de jerarquía espacial .....	128
<b>Figura 55</b> Creación programa y análisis de integración, entropía, control y proximidad en el modelo.....	130
<b>Figura 56</b> Todas las soluciones estudiadas de la optimización multiobjetivo de dos funciones	132
<b>Figura 57</b> Gráfico de dispersión del FP por cada generación (120). La representación gráfica muestra únicamente la distribución relativa de las soluciones sin valores numéricos explícitos, debido a la interfaz de Octopus. Los valores completos de las funciones objetivo y parámetros de cada generación (23.576 soluciones) se presentan en el Apéndice H.....	133
<b>Figura 58</b> Frente de Pareto en la generación 17 en 3D activando diversidad de parámetros.....	135
<b>Figura 59</b> Gráfico de dispersión del Frente de Pareto 120 generaciones para optimización de dos objetivos .....	136
<b>Figura 60</b> Gráfico de dispersión del Frente de Pareto 120 generaciones optimizando dos objetivos .....	139
<b>Figura 61</b> Ejemplos de soluciones formales dadas por Octopus al realizar la optimización de dos objetivos .....	139
<b>Figura 62</b> Frente de Pareto por generación de la segunda optimización con rotación entre 167- 172 grados, variando la altura del cubo central y el factor de proporción de las ventanas para dos funciones objetivo.....	143

<b>Figura 63</b> Gráfico de dispersión del Frente de Pareto optimización con restricción en grados de rotación, entre 167-172 para dos funciones objetivo .....	145
<b>Figura 64</b> Soluciones formales del Frente de Pareto de la segunda optimización con rotación entre 167-172 grados para dos funciones objetivo .....	145
<b>Figura 65</b> Parámetros establecidos para evaluar relaciones causales entre las variables en ejercicio de prueba (1 cubo) cambiando el periodo .....	148
<b>Figura 66</b> Comparación relaciones causales de variables en ejercicio de prueba (1 cubo) cambiando el periodo .....	149
<b>Figura 67</b> Resultado dos funciones objetivo con los valores mínimos posibles en las variables de distancia en X, Y, Z y factor de proporción ventanas .....	151
<b>Figura 68</b> Resultado dos funciones objetivo con los valores máximos posibles en las variables de distancia en X, Y, Z y factor de proporción ventanas .....	151
<b>Figura 69</b> Resultado 170° de rotación en el plano XY datos tres funciones objetivo con los valores mínimos posibles en las variables de distancia en X, Y, Z y factor de proporción ventanas .....	152
<b>Figura 70</b> Resultado 0° de rotación en el plano XY datos tres funciones objetivo con los valores máximos posibles en las variables de distancia en X, Y, Z y factor de proporción ventanas .....	153
<b>Figura 71</b> Resultados de la Función objetivo 2: Maximizar el confort térmico adaptativo .....	155
<b>Figura 72</b> Frente de Pareto optimización de tres funciones objetivo con 460 soluciones .....	155
<b>Figura 73</b> Frente de Pareto optimización de tres funciones objetivo normalizadas .....	158
<b>Figura 74</b> Resultado obtenido en la interfaz de Octopus al evaluar tres funciones objetivo .....	161
<b>Figura 75</b> Muestra formal de seis soluciones de la optimización de tres funciones objetivo en Octopus.....	162
<b>Figura 76</b> Frente de Pareto al optimizar tres funciones objetivo con restricción de WWR.....	168
<b>Figura 77</b> Muestra formal de seis soluciones de la optimización de tres funciones objetivo en Octopus con restricción de WWR.....	169
<b>Figura 78</b> Resultados muestras por generación (15, 33, 73, 106, 131 y 161) de la optimización de tres objetivos .....	172
<b>Figura 79</b> Disponibilidad de archivos EPW .....	177

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> Resumen y comparación de resultados de la búsqueda de palabras claves en Scopus de los último 5 años .....	36
<b>Tabla 2</b> Factores y parámetros que determinan el confort térmico.....	60
<b>Tabla 3</b> Tipos de modelos adaptativos que determinan el confort térmico .....	63
<b>Tabla 4</b> Parámetros físicos del ambiente .....	64
<b>Tabla 5</b> Valores de los coeficientes en fórmula PMV .....	68
<b>Tabla 6</b> Comparativo entre modelos de confort térmico interior.....	68
<b>Tabla 7</b> Límites de confort para una aceptabilidad del 90% y 80% .....	70
<b>Tabla 8</b> Tipos de herramientas computacionales para lograr diseños energéticamente eficientes en arquitectura.....	73
<b>Tabla 9</b> Soluciones no dominadas que conforman el Frente de Pareto.....	138
<b>Tabla 10</b> Justificación de parámetros de entrada de la segunda optimización con rotación entre 167-172 grados .....	142
<b>Tabla 11</b> Comparación de seis soluciones de la optimización de tres funciones objetivo en Octopus.....	162
<b>Tabla 12</b> Comparación de seis soluciones de la optimización de tres funciones objetivo en Octopus con restricción de WWR.....	170

**Lista de Apéndices**

Apéndice A. Nomenclatura .....	199
Apéndice B. Diagrama de flujo de la metodología propuesta .....	202
Apéndice C. Pseudocódigo del SPEA-II (Alvarado et al, 2005).....	203
Apéndice D. Localización del modelo analizado .....	203
Apéndice E. Código en Python para organizar en Excel los resultados del proceso de optimización multiobjetivo arrojados por Octopus.....	204
Apéndice F. Script Frente de Pareto soluciones de Octopus .....	206
Apéndice G. Resultados parámetros y funciones objetivo de la optimización de dos objetivos con 120 generaciones y 23,576 soluciones .....	209
Apéndice H. Análisis de la influencia de la orientación (grados de rotación en el plano XY) en los resultados de la optimización, contemplando el área mínima de ventana en fachadas (factor de proporción: 0,01).....	209
Apéndice I. Análisis de la influencia de la orientación (grados de rotación en el plano XY) en los resultados de la optimización, contemplando el área máxima de ventanas en fachadas (factor de proporción: 0,95).....	218
Apéndice J. Código en Python para organizar en Excel y graficar en 3D los resultados del proceso de optimización multiobjetivo arrojados por Octopus .....	227
Apéndice K. Resultados parámetros y funciones objetivo de las 460 soluciones que componen el Frente de Pareto de la optimización de tres objetivos con 161 generaciones .....	230
Apéndice L. Código en Python para graficar las 161 generaciones del proceso de optimización de 3 objetivos.....	230
Apéndice M. Bibliografía consultada como material de apoyo .....	233

## Glosario

**Optimización multiobjetivo:** Proceso mediante el cual se buscan simultáneamente soluciones que satisfagan múltiples objetivos en conflicto.

**Diseño conceptual arquitectónico:** Etapa inicial del diseño en la que se definen las ideas generales, principios espaciales, volumetría, orientación y relación con el entorno, sin entrar en detalles constructivos.

**Orientación:** Dirección cardinal hacia la cual está orientado un espacio o edificio, lo cual influye en aspectos como iluminación natural, ganancias térmicas y ventilación.

**Sintaxis espacial:** Herramienta teórica y analítica que estudia la configuración espacial de un entorno construido, evaluando la conectividad y accesibilidad de sus elementos mediante representaciones gráficas y métricas.

**Integración:** Mide qué tan conectado y accesible está un espacio en relación con todos los demás. Un valor alto de integración significa que el espacio es central y fácil de alcanzar.

**Control:** Mide cuánto “determina” un espacio el acceso a otros. Si un nodo es el único que conecta a varios otros, tiene alto control.

**Intermediación:** Mide cuántas veces un espacio se encuentra en el camino más corto entre otros dos espacios. Un valor alto significa que muchas rutas pasan por allí, indicando flujo o paso obligado.

**Factor de diferenciación:** Mide la variación o desigualdad en las conexiones de los nodos del sistema. Sirve para identificar jerarquías espaciales (algunos espacios con muchas conexiones y otros con pocas).

**Confort térmico:** Estado de satisfacción del usuario con las condiciones térmicas del entorno, influenciado por temperatura, humedad, velocidad del aire, radiación y características personales como ropa y actividad.

**Neutralidad térmica:** Temperatura ambiente a la cual la mayoría de las personas no sienten ni frío ni calor, considerada ideal para el confort.

**Balance térmico:** Estado de equilibrio entre el calor producido por el cuerpo humano y el intercambiado con el ambiente. Es la base del modelo de confort de Fanger y del índice PMV, que predice la respuesta térmica promedio en condiciones controladas.

**Teoría adaptativa:** Modelo que propone que el confort térmico varía según la adaptación fisiológica y psicológica de las personas al clima y contexto en el que habitan, especialmente en edificios naturalmente ventilados.

**ASHRAE 55:2004:** Norma estadounidense que establece los requisitos para lograr condiciones aceptables de confort térmico en interiores, considerando variables ambientales y personales.

**UNE-EN 15251:2007:** Norma europea que define los parámetros interiores para el diseño y evaluación de la calidad del ambiente interior, incluyendo confort térmico, calidad del aire e iluminación.

**Norma ISO 7730:** Norma internacional que proporciona métodos para predecir el nivel de confort térmico mediante índices como PMV (voto medio previsto) y PPD (porcentaje de personas insatisfechas).

**Temperatura media radiante:** Promedio ponderado de la temperatura de todas las superficies que rodean a una persona, que influye en el intercambio de calor por radiación.

**Temperatura equivalente:** Temperatura uniforme imaginaria que produce la misma sensación térmica en una persona que el ambiente real, considerando la combinación de convección (aire) y radiación (superficies).

**Temperatura operativa:** Promedio ponderado entre la temperatura del aire y la temperatura de las superficies que rodean a una persona. Representa mejor la sensación térmica real en un espacio interior.

**Rhinoceros:** Software de modelado 3D que permite diseñar objetos con gran precisión, ampliamente utilizado en arquitectura y diseño industrial.

**Grasshopper:** Editor gráfico de algoritmos para modelado paramétrico, usado como complemento de Rhinoceros. Permite crear geometrías complejas y procesos automatizados mediante programación visual.

**Octopus:** Herramienta de optimización evolutiva basada en algoritmos genéticos, que permite encontrar soluciones óptimas múltiples (multiobjetivo) en el entorno de Grasshopper.

**Ladybug:** Plugin de Grasshopper que permite analizar datos climáticos, simulaciones solares y condiciones de confort, enfocado en el diseño ambiental.

**Honeybee:** Extensión de Ladybug que conecta Grasshopper con motores de simulación como EnergyPlus y Radiance, para análisis térmico, energético y lumínico detallado.

**Factor de proporción (ventanas):** Relación entre el área de una ventana y el área total de la pared en la que se encuentra. En Honeybee, este factor permite definir automáticamente el tamaño de las ventanas como un porcentaje de la superficie del muro, facilitando análisis de iluminación natural y desempeño térmico.

**Visuales:** Perspectivas o líneas de visión desde el interior de un espacio arquitectónico hacia el exterior o entre zonas internas. Son clave para la percepción del entorno y el confort visual. Las

ventanas son aberturas diseñadas para facilitar estas visuales, aportando además iluminación natural y conexión visual con el exterior.

**Fachada:** Parte exterior del edificio que define su apariencia. Su diseño influye en la estética, el desempeño térmico y la relación entre el interior y el exterior. Puede incluir ventanas, puertas y otros elementos que permiten la entrada de luz, aire y vistas.

## Resumen

**Título:** Implementación de la optimización multiobjetivo en el diseño arquitectónico de un proyecto ecoturístico.<sup>1</sup>

**Autor:** Diana Marcela Gómez Rodríguez.<sup>2</sup>

**Palabras Clave:** Arquitectura generativa; Diseño esquemático; Optimización multiobjetivo; Confort térmico, Grasshopper.

### Descripción:

La morfogénesis estudia la generación, evolución y las propiedades de la forma. En esta investigación se aplica al diseño arquitectónico en etapa esquemática de una unidad habitacional de un hotel ecoturístico en clima frío. Las herramientas de programación no lineal empleadas buscan resolver un problema de optimización multiobjetivo maximizando el confort térmico, representado por el porcentaje de horas en las que las condiciones térmicas se consideran confortables (evaluado con la teoría adaptativa); y maximizando las visuales del proyecto, es decir, el área de abertura en las fachadas (las ventanas).

Se desarrolló una herramienta de diseño arquitectónico generativo, enfocada en la etapa esquemática de una unidad habitacional, mediante la integración de diferentes complementos de Grasshopper (Space Syntax, Ladybug, Honeybee y Octopus). Esta permitió comparar las configuraciones formales resultantes de dos estrategias de optimización multiobjetivo y, posteriormente, establecer relaciones causales entre las variables estudiadas. Primero se definió la distribución de usos en planta de la unidad habitacional por medio de relaciones espaciales parametrizadas como datos de entrada. Seguidamente, con base al análisis climático, se generaron opciones de orientación óptima en planta. Simultáneamente, se permitió la variación en el tamaño de los volúmenes (distancias en los ejes X, Y y Z) que conforman la unidad habitacional (habitaciones, baños, cocina, sala, pasillo, comedor y estudio), así como en las dimensiones de las aberturas que configuran las fachadas. Los resultados mostraron que el diseño esquemático, apoyado en la herramienta desarrollada, facilita la obtención de soluciones con porcentajes de confort térmico neutral cercanos al 40 % en el periodo del 22 de enero al 22 de febrero, y de alrededor del 90 % entre el 22 de junio y el 22 de julio, valor que corresponde al umbral de cumplimiento estricto de la norma ASHRAE 55 (Adaptive Comfort Standard), únicamente mediante el uso de estrategias pasivas.

---

<sup>1</sup> Trabajo de Grado de Maestría en Ingeniería Civil.

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo, Doctor en Ingeniería Civil.

### Abstract

**Title:** Implementation of Multi-Objective Optimization in the Architectural Design of an Ecotourism Project.<sup>3</sup>

**Author:** Diana Marcela Gómez Rodríguez.<sup>4</sup>

**Keywords:** Generative Architecture; Schematic Design; Multi-Objective Optimization; Thermal Comfort; Grasshopper.

### Description:

Morphogenesis examines the generation, evolution, and properties of form. In this research, the concept is applied to architectural design at the schematic stage of a housing unit within an ecotourism hotel located in a cold-climate context. Using not linear programming tools as design support, the objective is to address a multi-objective optimization problem: maximizing thermal comfort—defined as the percentage of hours in which thermal conditions are considered comfortable (evaluated through adaptive comfort theory)—and maximizing project views, understood as the window opening area on the façades.

In this work, a generative architectural design tool was developed, focused on the schematic stage of a housing unit, through the integration of different Grasshopper plugins (Space Syntax, Ladybug, Honeybee, and Octopus). This tool enabled the comparison of formal configurations resulting from two multi-objective optimization strategies and, subsequently, the establishment of causal relationships among the variables studied. To this end, the spatial distribution of uses within the housing unit was first defined through parametrized relationships set as input data. Next, based on the climatic analysis, options for optimal orientation in plan were generated. Simultaneously, variations were allowed in the size of the volumes (distances along the X, Y, and Z axes) that define the housing unit (bedrooms, bathrooms, kitchen, living room, hallway, dining room, and study), as well as in the dimensions of the openings that configure the façades. The results showed that schematic design, supported by the developed tool, facilitates the achievement of solutions with neutral thermal comfort percentages close to 40% during the period from January 22 to February 22, and around 90% between June 22 and July 22, a value that corresponds to the strict compliance threshold of ASHRAE 55 (Adaptive Comfort Standard), achieved solely through passive strategies.

---

<sup>3</sup> Master's Thesis in Civil Engineering

<sup>4</sup> Faculty of Physicomechanical Engineering, School of Civil Engineering. Advisor: Oscar Javier Begambre Carrillo, PhD in Civil Engineering

### Introducción

En este trabajo, el diseño arquitectónico en etapa esquemática de un proyecto ecoturístico en ecosistema de subpáramo se realizó teniendo en cuenta las condiciones ambientales extremas, caracterizadas por bajas temperaturas, elevada radiación solar, humedad alta, y variaciones bruscas de temperatura. En este contexto climático, el desempeño pasivo de la envolvente edificada se convierte en un factor determinante para garantizar la habitabilidad, la resiliencia del edificio y la reducción de futuras cargas energéticas. Estudios bioclimáticos clásicos y contemporáneos han demostrado que, en climas fríos, la mayor parte de las pérdidas térmicas se produce a través de las superficies de menor resistencia térmica, en particular las ventanas (Givoni, 1998; Bansal, Hauser & Minke, 1994). Esto hace indispensable orientar el proyecto conceptual hacia estrategias que maximicen el porcentaje de horas de confort térmico interior adaptativo con estrategias pasivas desde las etapas iniciales de diseño.

De manera simultánea, en zona de subpáramo la relación visual con el entorno constituye un valor arquitectónico y sociocultural significativo. Las vistas amplias hacia el paisaje natural generan bienestar psicológico, aumentan la percepción de amplitud y favorecen la integración armónica del usuario con el territorio (Heschong, 2002). En este sentido, la maximización del área de ventanas se plantea como un objetivo relevante para elevar la calidad espacial y la experiencia del usuario dentro del proyecto. No obstante, la evidencia científica señala que el aumento indiscriminado del área acristalada en climas fríos genera incrementos notables de pérdida térmica, riesgo de condensación y sobreexposición a ganancias solares no deseadas en determinadas orientaciones (Olgyay et al., 2015). Esto evidencia la existencia de un conflicto inherente entre visibilidad y desempeño térmico, que debe abordarse mediante metodologías de análisis avanzadas.

Frente a este conflicto, el presente trabajo se fundamenta en la aplicación de optimización multiobjetivo como herramienta de apoyo al diseño arquitectónico. Esta metodología permite explorar soluciones de compromiso entre objetivos contrapuestos —en este caso, la maximización del porcentaje de horas de confort térmico interior adaptativo y la maximización del área de ventanas, incluyendo simultánea y posteriormente la minimización del volumen— mediante el estudio de frentes de Pareto y algoritmos evolutivos (Deb, 2001; Zhang & Li, 2007; Evins, 2013). Investigaciones recientes en edificaciones ubicadas en zonas andinas y en climas fríos similares demuestran la pertinencia de esta aproximación para obtener configuraciones de envolvente equilibradas, eficientes y compatibles con expectativas de confort y percepción espacial (Torres et al., 2019 & Ascione et al., 2015).

Adicionalmente, es importante aclarar que otros componentes fundamentales del proyecto de ecoturismo —como la definición y diseño de actividades ecoturísticas (senderos interpretativos, rutas de observación, miradores), la localización de infraestructura únicamente en zonas de baja sensibilidad ecológica y la protección estricta de áreas críticas del ecosistema de subpáramo— se consideran decisiones previamente establecidas y, en consecuencia, no forman parte del alcance de este trabajo. Estos aspectos responden a lineamientos de conservación ampliamente respaldados por investigaciones sobre el manejo sostenible en ecosistemas de alta montaña, donde se enfatiza la reducción del impacto ecológico, la protección de la biodiversidad y la preservación de los servicios ecosistémicos propios del páramo. Así, el presente anteproyecto se concentra específicamente en la evaluación y optimización de la envolvente arquitectónica, dejando explícitamente delimitado su alcance metodológico.

La justificación de la metodología aquí propuesta se sustenta en tres aspectos centrales:

1. La necesidad de garantizar un confort térmico interior óptimo (según la norma ASHRAE 55) en un clima particularmente exigente como el del subpáramo colombiano
2. El reconocimiento de las vistas al paisaje como componente intrínseco de la calidad ambiental y arquitectónica del espacio.
3. La pertinencia comprobada de los métodos de optimización multiobjetivo para integrar simultáneamente criterios ambientales, funcionales y perceptuales desde etapas tempranas del diseño.

En consecuencia, el presente trabajo propone una base metodológica sólida para orientar el proceso de diseño esquemático hacia soluciones arquitectónicas eficientes, sensibles al contexto y sustentadas en evidencia científica.

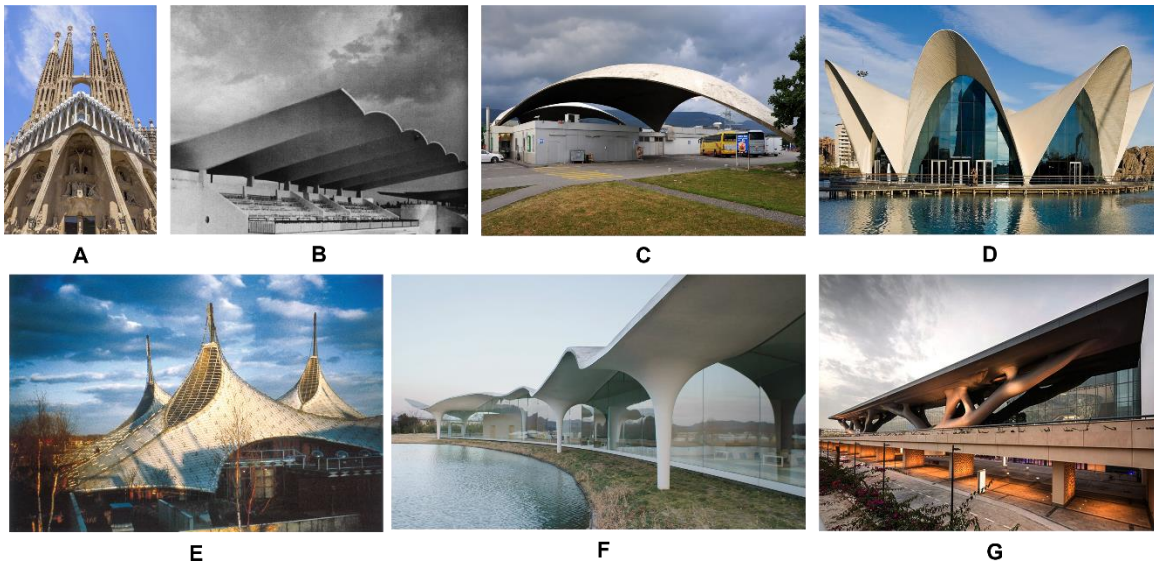
Más allá del enfoque metodológico adoptado, el problema abordado en este trabajo remite a una cuestión central del diseño arquitectónico: la relación entre forma y función. En arquitectura, esta relación constituye una condición ineludible. A diferencia de otras artes, requiere que el resultado de su práctica genere obras estéticamente agradables, estructuralmente estables y funcionales.

Determinar la forma, en relación con la función de un edificio es la actividad principal del proceso de diseño arquitectónico (Castro Pena et al., 2021). La experiencia y creatividad de un arquitecto, junto con una visión integral de la función, forma y estructura desde la etapa inicial del diseño, permite ampliar el campo de soluciones y posibilidades formales adecuadas, más allá de las convencionales. Ejemplos de lo anterior son las formas percibidas en los proyectos de Antonio Gaudí (1852-1926), Eduardo Torroja (1899-1961), Heinz Isler (1926-2009), Félix Candela (1910-1997), Frei Otto (1925-2015), Matsuoto Sasaki (1946-), Arata Isozaki (1931-), entre otros (Ver

Figura 1). En sus edificaciones se percibe la estructura como un elemento integral de la arquitectura antes que como una simple técnica aplicada (Charleson, 2007).

### Figura 1

*Ejemplos arquitectónicos con conceptos de ingeniería innovadores*



A. Basílica de la Sagrada Familia, Barcelona (1882). B. Hipódromo de la Zarzuela, Madrid (1941). C. Estación de servicio Deitingen, Soleura (1968). D. Oceanográfico, Valencia (2003). E. Pabellón Alemán, Montreal (1967). F. Crematorio Kakamigahara, Japón (2006). G. Centro Nacional de Convenciones de Catar, Doha (2011).

Nota. A. Veniamin Kraskov, 2016. <https://mymodernmet.com/es/sagrada-familia-datos-gaudi/> B. Mathias Weise, 2019. <https://loff.it/society/efemerides/eduardo-torreja-miret-el-ingeniero-que-relaciono-tecnica-con-estetica-251689/> C. CC-BY-SA/© Chriusha <https://spa.archinform.net/projekte/18901.htm> D. <https://x5696965.blogs.upv.es/pa4-el-tiempo-de-la-arquitectura/> E. 2015. <https://www.archdaily.co/co/768540/clasicos-de-arquitectura-pabellon-aleman-expo-67-frei-otto-rolf-gutbrod> F. <https://juliaknz.de/post/184173964918/toyo-ito-crematorium-kakamigahara-gifu-japan> G. Nelson Garrido, 2019. <https://www.archdaily.co/co/912595/la-obra-completa-de-arata-izozaki-premio-pritzker-2019>

Un proyecto arquitectónico no solo busca satisfacer una necesidad funcional, sino que también plantea una propuesta creativa. El proceso de composición arquitectónica es complejo e involucra múltiples factores que deben ser sintetizados en una propuesta capaz de responder integralmente al problema inicial. Tradicionalmente, este proceso ha sido descrito como una “caja negra”, en la que se conocen los datos de entrada y el resultado final, pero no siempre los mecanismos internos que lo producen (Ambriz, 2008).

La implementación de análisis asistidos por computador y los métodos contemporáneos de diseño han promovido la definición de formas arquitectónicas eficientes en función de sus capacidades, entendidas como su desempeño ambiental (confort térmico, iluminación, ventilación), su funcionalidad (adecuación de espacios a los usos), su eficiencia estructural (optimización de materiales y estabilidad) y su potencial estético o expresivo. El diseño computacional ha sido objeto de investigación desde los años sesenta del siglo XX. Durante décadas su práctica estuvo restringida, pues solo grandes empresas como Arup<sup>5</sup> podían contratar programadores y especialistas. En consecuencia, el uso de técnicas de diseño computacional se limitaba a unos pocos actores. Según Nourian (2016), herramientas como: Generative Components<sup>6</sup> (GC), Grasshopper3D<sup>7</sup> (GH), Dynamo<sup>8</sup> y Design Script<sup>9</sup> permitieron que la práctica del diseño computacional fuera significativamente más fácil, manejable, económicamente factible y más comprensible para la mayoría de los diseñadores (Nourian, 2016).

En el contexto descrito, el propósito de esta investigación fue implementar un método de optimización multiobjetivo (OM) aplicado al diseño arquitectónico conceptual de un proyecto ecoturístico. Lo que se logró con este trabajo fue generar un abanico de posibilidades que aumentó la cantidad de alternativas disponibles durante la fase inicial de diseño en comparación con los métodos clásicos.

Adicionalmente, la OM permite definir un frente de Pareto que contiene múltiples soluciones óptimas posibles para el problema de diseño arquitectónico conceptual y promueve la

---

<sup>5</sup> Empresa de ingeniería, diseño, planificación, gestión de proyectos y consultoría, fundada por Ove Arup en 1946 en Londres.

<sup>6</sup> Software de diseño asistido por computador (CAD) paramétrico desarrollado por Bentley Systems en el año 2003.

<sup>7</sup> Lenguaje de programación visual desarrollado por David Rutten en Robert McNeel & Associates, que corre dentro de la aplicación CAD Rhinoceros 3D®.

<sup>8</sup> Según Autodesk, es una interfaz de programación gráfica que permite personalizar el flujo de trabajo de la información de construcción.

<sup>9</sup> Lenguaje de programación que permite generar y evaluar modelos de diseño geométrico complejos.

definición de formas eficientes en función de los objetivos de diseño iniciales. La integración de objetivos de diseño en la OM, expresados mediante funciones objetivo, permite ampliar el espectro de posibles soluciones iniciales y opciones formales. Dicha herramienta permitió escoger unas funciones objetivo (2 o 3, para efectos de este trabajo de investigación) y obtener una morfología optimizada relacionada a cada punto del frente de Pareto.

En la actualidad, se ha hecho necesario incluir en las etapas iniciales del diseño arquitectónico criterios relativos a la eficiencia energética para tratar de mitigar los efectos del cambio climático (como se define en Europa Horizonte 2020). Teniendo en cuenta que, en la Unión Europea (U.E.) el 36% del consumo energético está representado por edificaciones residenciales y de servicios (Castilla Nieto et al., 2016).

En este contexto, en el año 2015 la Organización de las Naciones Unidas (ONU) estableció los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Cada objetivo tiene unas metas que deben alcanzarse hacia el año 2030. De forma particular, puede decirse que los O.D.S. #9, #11 y #13 (Ver Figura 2) que promueven la protección del ambiente, se relacionan con esta investigación. Indirectamente también repercutirá en el O.D.S. #7 ya que, sugiere una alternativa que vincula el entorno, sus características de temperatura y asoleación, en el proceso de diseño; favoreciendo la calidad de los espacios sin necesidad de usar energías o sistemas térmicos que aumenten la cantidad de emisiones contaminantes al medio.

**Figura 2***Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)*

*Nota.* Naciones Unidas, 2015. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Además de los acuerdos para mitigar impactos ambientales, ha habido un interés creciente en utilizar la optimización multidisciplinar en el proceso de diseño de edificios de alto rendimiento durante las dos últimas décadas, como lo señalan Emmerich et al. (2008) y Hoes et al. (2011). Durante el diseño convencional, el arquitecto debe explorar manualmente el espacio cambiando las variables de diseño en función de su experticia con el fin de mejorar el rendimiento del edificio (Wang et al. 2005). Este proceso demanda mucho tiempo y limita las iteraciones por parte del diseñador, lo cual hace que haya soluciones prometedoras sin explorar. Esta actividad manual es ineficaz. Solo con la aplicación de herramientas computacionales y OM multidisciplinaria se puede realizar una exploración amplia del espacio de diseño en las etapas iniciales del proyecto arquitectónico, con una mejora en los tiempos de desarrollo (Asl et al., 2011).

Generalmente, las simulaciones usadas en la industria de la construcción requieren de una gran cantidad de insumos e información correlacionada. En la etapa inicial (diseño esquemático), las simulaciones pueden no requerir altos volúmenes de información detallada. De esta forma, usando técnicas de simulación paramétrica, un diseñador puede obtener y probar, rápidamente, una serie de diseños iniciales potenciales y generar recomendaciones morfológicas que respondan asertivamente a las necesidades del proyecto, generalmente planteadas como funciones objetivo (Ahmad et al., 2022).

Un objetivo de diseño podría ser mejorar el comportamiento de una edificación desde el punto de vista del confort térmico interior. Para esto, es necesario considerar otros factores, además de la configuración morfológica (vinculada a la estructura), como: su función (uso de la edificación) y tanto las características del sitio como de los usuarios. Este trabajo de investigación abarcó el objetivo anterior sumado a maximizar las dimensiones de las visuales, es decir, aumentar el área de las ventanas. Se planteó la regulación del clima (característico de un sitio determinado para ecoturismo) al interior de la unidad habitacional del proyecto. En este contexto, las dos funciones objetivo mencionadas (confort térmico interior y aberturas de la edificación), no permiten una mejora simultánea ya que son funciones opuestas, debido, principalmente, a que obtener un buen resultado para el primer criterio supone afectar negativamente el desempeño del segundo objetivo. Es por esta razón que, en este trabajo, el diseño esquemático se trató como un problema de optimización multiobjetivo (OM). Generalmente, para conseguir una situación de confort óptima en una localización de clima frío se opta por cerrar la fachada al paisaje, atribuir la solución a la elección de materiales o aumentar el consumo energético.

A raíz de lo mencionado anteriormente, surge una serie de variables que se modifican para obtener soluciones óptimas para las funciones objetivo, tales como:

1. Áreas del programa arquitectónico correspondiente a la unidad habitacional.
2. El factor de proporción para el área de las aberturas de cada fachada.
3. La orientación, en grados, respecto a los puntos cardinales, de la fachada principal de la unidad habitacional (en este trabajo se define en el plano XY).
4. El volumen de cada cubo (9 en total) que representan un espacio de la unidad habitacional (baños, dormitorios, cocina, comedor, sala, pasillo y estudio).

Con el fin de obtener soluciones óptimas y presentar una herramienta funcional para el diseño esquemático del proyecto arquitectónico se entrelazaron, para este trabajo, las siguientes herramientas de diseño computacional performativo:

1. Space Syntax
2. Ladybug
3. Honeybee
4. Octopus

Estos programas fueron desarrollados por los investigadores: Pirouz Nourian (Space Syntax<sup>10</sup>); Mostapha Sadeghipour Roudsari y Chris Mackey (Ladybug<sup>11</sup>/Honeybee<sup>12</sup>); y Robert Vierlinger (Octopus<sup>13</sup>).

La estructura del documento es la siguiente: en primer lugar, se presenta el resumen del trabajo junto con sus palabras clave y el abstract en inglés. El Capítulo 1 corresponde a la introducción del tema, donde se plantea el problema de investigación. En el Capítulo 2 se formulan los objetivos (general y específicos). El Capítulo 3 desarrolla el estado del arte, mientras que el Capítulo 4 expone el marco teórico, dentro del cual se abordan los conceptos de diseño arquitectónico, optimización multiobjetivo, confort térmico y ecoturismo.

El Capítulo 5 describe la metodología, organizada en fases que incluyen la formulación del problema de optimización, la definición de la distribución interna, la optimización de aberturas en fachada, la determinación del emplazamiento y orientación, y finalmente la integración y validación.

En el Capítulo 6 se presentan los resultados, entre ellos la implementación del método de optimización multiobjetivo aplicado al diseño arquitectónico en el proyecto ecoturístico. Este capítulo incluye la configuración de la herramienta interactiva, la distribución de usos internos, las

---

<sup>10</sup> SYNTACTIC (Designing with Space Syntax) es un complemento para Grasshopper© creado por Pirouz Nourian y Samaneh Rezvani en TU Delft, Facultad de Arquitectura, Departamento de Ingeniería Arquitectónica + Tecnología.

<sup>11</sup> Ladybug te permite visualizar y analizar datos meteorológicos en Grasshopper©. Esto incluye diagramas como la trayectoria del sol, la rosa de los vientos, un cuadro psicrométrico, entre otros. Además de estudios de geometría como análisis de radiación, estudios de sombras y análisis de vistas.

<sup>12</sup> Honeybee conecta Grasshopper3D© a motores de simulación validados, incluidos EnergyPlus/OpenStudio (para energía de edificios, dimensionamiento de HVAC, confort térmico, etc.) y Radiance (para simulación de iluminación natural y deslumbramiento).

<sup>13</sup> Octopus se creó originalmente para la optimización evolutiva multiobjetivo. Permite la búsqueda de muchos objetivos a la vez, produciendo una gama de soluciones de compensación optimizadas entre los extremos de cada objetivo. Se utiliza y funciona de manera similar a Galápagos® de David Rutten, pero introduce el Principio de Pareto para objetivos múltiples.

soluciones no dominadas para confort térmico y fachadas, el emplazamiento de la unidad habitacional, así como una extensión metodológica con la incorporación de un tercer objetivo de optimización.

El Capítulo 7 desarrolla el análisis, el Capítulo 8 la discusión, y el Capítulo 9 recoge las conclusiones. Posteriormente, el Capítulo 10 plantea recomendaciones derivadas del trabajo. Finalmente, se incluyen las referencias, la bibliografía y los apéndices.

### **Presentación del problema**

La etapa inicial del diseño arquitectónico se conoce como diseño conceptual (DC). Este término puede definirse como una exploración de los posibles requerimientos u objetivos del diseño y las soluciones propuestas para satisfacerlos. Dichas soluciones pueden ser: arquitectónicas y de ingeniería. (Yang et al, 2020; Castro et al, 2021). Tradicionalmente, el DC se fundamenta en la experiencia y la visión del arquitecto, quien define las ideas iniciales sobre la forma, la función, los principios de diseño y la tecnología requerida para definir el objeto arquitectónico. Lo anterior puede conducir a una definición de todo el proyecto con un rango limitado de objetivos, o no tener claridad en ellos, comprometiendo el éxito del proceso (Chong et al, 2009).

Cuando se decide emplear la optimización en el enfoque tradicional, esta solo ocurre después de que la idealización y conceptualización se han producido. Según Wang (2021), lo anterior se debe a que las herramientas existentes para diseño requieren que el DC este previamente definido a fin de poder comenzar con el modelado paramétrico y la etapa de optimización. Esta situación hace que se pase por alto el entendimiento temprano de la interacción entre el proceso de diseño, los requisitos de diseño, los posibles espacios de solución y las soluciones.

En arquitectura se entiende por forma aquella que contiene el espacio interior y genera, también, afectaciones al espacio exterior. Esta percepción externa se da por medio del volumen (envolvente que contiene el espacio habitable para el ser humano), que a su vez debe cumplir con una(s) función(es) (objetivos del diseño).

A partir de lo anterior surge la inquietud: ¿La apariencia refleja la funcionalidad para la que fue creado un proyecto? El espacio es el resultado de la respuesta al entorno y contexto que lo rodea; es el reflejo de aspectos de una época, como lo político, social, económico y cultural de una sociedad (Ureta, 2016). El uso de formas singulares en las obras de arquitectura ha estado enlazado a los principios estructurales de la época que las resolvían.

De igual forma, cabe preguntarse: ¿Existen razones suficientes para enfocarse en la forma de un proyecto arquitectónico? En este trabajo se estableció una relación sólida entre forma y función, en donde el primer concepto sirvió para solucionar los planteamientos o posibles problemas funcionales arquitectónicos, como el confort térmico interior y la relación a través de visuales con el paisaje y el volumen de la unidad. Con tal fin, se propuso el análisis climático de la localización; pero ¿Cómo hacerlo?

La arquitectura entendida como la materialización de un diseño integral deberá proporcionar soluciones funcionales a las relaciones entre seres vivos, entorno y naturaleza en un espacio finito y en un tiempo determinado. Desde lo espacial, la envolvente juega un papel importante. Esta es la imagen de frontera, el límite expresado como una piel, una membrana, un contorno, un margen, un umbral, un perfil o caparazón que determina una interface o una fachada comunicativa a través de la transparencia. Es también, una gradación espacial, una articulación e interacción entre distintos territorios, o un cerramiento protector como aislamiento frente al exterior (Ruiz Esteban, 2013).

Teniendo en cuenta el papel clave que juega la geometría en el diseño arquitectónico orientado por el desempeño, es indispensable integrarla en las fases tempranas del proyecto (DC), no solo con los requerimientos de funcionalidad y estéticos sino también con las exigencias de confort térmico o estructurales (entre otras). La satisfacción a los requerimientos mencionados anteriormente puede afectar en gran medida la configuración final del diseño arquitectónico (Turrin et al, 2011).

Por ejemplo, en el trabajo de Wang (2021) se concluye que existe una falta de estudios sobre la influencia que los esquemas de fachada pueden tener sobre la forma y el desempeño de la edificación, y cómo este problema podría ser abordado mediante la aplicación de la OM en el DC. En este sentido, Moreno De Luca y Begambre (2013) afirman que la OM (heurística y clásica) se puede convertir en un componente importante del DC, con capacidad de apoyar la creación de objetos arquitectónicos con valor estético, creativos y eficientes.

Los aspectos que plantean mayores retos para la aplicación de la OM al DC en arquitectura son:

1. La formulación matemática de las intenciones de diseño como funciones objetivo a optimizar.
2. La definición de los respectivos modelos paramétricos y/o de simulación necesarios (con sus variables y restricciones).
3. La selección de los métodos de optimización (Wortmann, 2022).

Una tendencia actual dominante dentro de la comunidad de arquitectos e ingenieros diseñadores, según el estudio de Wortmann et al. (2022), para realizar DC usando OM es el empleo de herramientas de programación visual que vinculen modelos paramétricos, de simulación y de optimización que, casi siempre, se encuentran dispersos.

Por otra parte, el turismo, junto con las industrias de la construcción, la energía y del transporte, es uno de los sectores más perjudiciales para el ambiente, como se resume en el trabajo de Yadegaridehkordi (2021). De forma particular, Han et al (2018) afirman que el sector hotelero, como segmento más importante de la industria del turismo, se ha transformado en un consumidor voraz de agua y energía para su operación diaria. Como respuesta a este estado de derroche, los actores involucrados en la hotelería vienen desarrollando proyectos verdes como estrategia para incrementar su competitividad. A la vez, tienen como objetivo aumentar su participación en el mercado atrayendo a un segmento creciente de viajeros con sensibilidad hacia el problema de la sostenibilidad.

Es crucial considerar la multitud de posibles estrategias de diseño de adaptación de edificios para mejorar las condiciones. La integración de herramientas de simulación basadas en la toma de decisiones, como la OM, en el proceso de diseño permite escoger opciones de diseño optimizadas para un alto rendimiento de la edificación (Shahi et al, 2021).

En este contexto, Yang et al (2020) plantean el uso de una exploración lateral para el proceso de DC de un proyecto ecoturístico empleando la OM bajo un ambiente de programación visual. Esta exploración permite, al contrario de la vertical o clásica (que refina una sola idea/diseño), identificar y examinar ideas nuevas (diseños nuevos) mediante la OM. El empleo de diversas funciones objetivo, generalmente conflictivas, posibilita el análisis de las interacciones entre los requerimientos y las restricciones de diseño al mismo tiempo que, a través del Frente de Pareto (FP), se identifica un amplio espectro de soluciones para el DC. La formulación del proceso de DC usando OM permite, como ventaja principal, identificar cuales DC responden mejor y porqué a los objetivos arquitectónicos (y/o de ingeniería) planteados.

Dentro de los programas más empleados por los diseñadores se encuentran Rhino® GH y Revit Dynamo (Wortmann et al., 2022). Para implementar con éxito la OM en el DC en estos ambientes de programación visual se realizó una integración de procesos que permitió, como resultado final, determinar y visualizar los puntos del FP (soluciones para el DC).

Como se mencionó anteriormente, el problema del DC óptimo se abordó vinculando los complementos de Grasshopper: Sapace Syntax, Ladybug, Honeybee y Octopus en la configuración de una herramienta que realizó el proceso de manera automatizada. Este trabajo permitió obtener diversas configuraciones morfológicas optimizadas en términos de confort térmico interior (adaptativo) y aberturas en la envolvente (12 ventanas correspondientes a las fachadas de los 9 volúmenes de la unidad). De forma específica, se abordó el problema de la falta de una metodología objetiva para la concepción de la forma (DC) en la etapa preliminar de un proyecto arquitectónico. Con esta finalidad se plantearon los siguientes objetivos.

## 1. Objetivos

El objetivo principal del estudio es **aplicar una metodología de optimización multiobjetivo como herramienta de apoyo al diseño arquitectónico**, orientada a evaluar y balancear objetivos potencialmente contrapuestos desde las etapas tempranas del proceso proyectual. En particular, se plantean como objetivos de diseño:

1. **Maximizar el porcentaje de horas de confort térmico interior adaptativo,**
2. **Maximizar el área de ventanas, y**
3. **Minimizar el volumen arquitectónico,** como estrategia indirecta de reducción de pérdidas térmicas y compacidad formal.

### **1.1. Objetivo general**

Implementar un método de optimización multiobjetivo para el diseño arquitectónico de un proyecto ecoturístico.

### **1.2. Objetivos específicos**

Configurar una herramienta interactiva automatizada que permita presentar opciones de diseño esquemático.

Definir la distribución de los usos internos en planta de una unidad habitacional basado en la sintaxis del espacio.

Hallar soluciones no dominadas para el confort térmico interior y la configuración de las aberturas en las fachadas de una unidad habitacional según las funciones objetivo.

Determinar el emplazamiento de una unidad habitacional, en términos de orientación medida en grados de rotación en el plano XY.

## **2. Estado del arte**

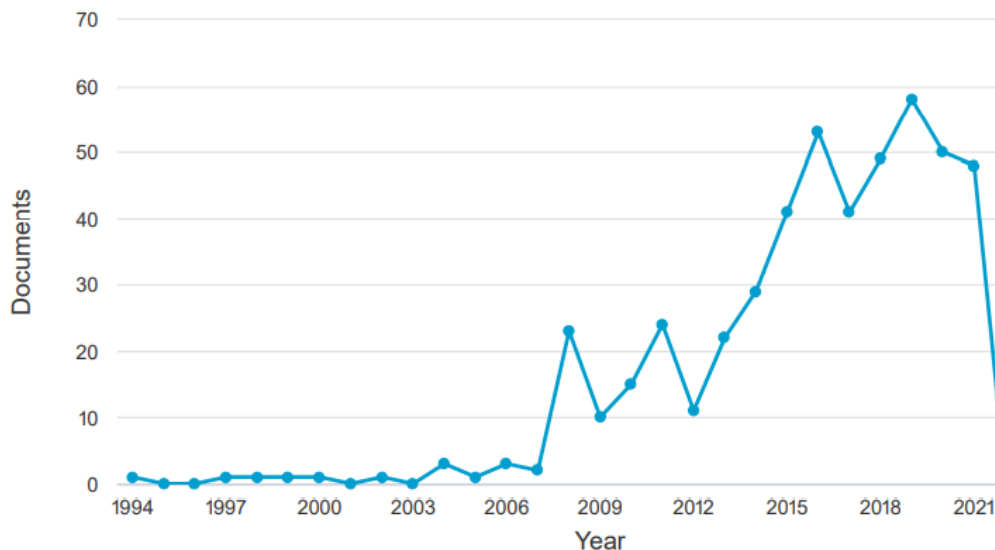
El análisis bibliométrico parte del reconocimiento de que, aunque la investigación en metodologías para el diseño arquitectónico ha avanzado en las últimas décadas, su alcance sigue siendo más limitado que el de las investigaciones en diseño en ingeniería, lo que hace necesario fortalecer su rigor científico, teórico y metodológico (Cash, 2018; Christensen & Ball, 2019). Desde las ciencias del diseño se plantea que muchos problemas prácticos pueden resolverse mediante artefactos como: planos, dibujos, prototipos, algoritmos o guías, que median entre teoría y práctica y apoyan la actividad profesional (Johannesson & Perjons, 2021).

Asimismo, se reconoce que, a diferencia de la ciencia, los resultados del diseño no requieren ser repetibles, por lo que la combinación de enfoques cualitativos y cuantitativos permite una comprensión más completa del fenómeno (Cross, citado en Frankel & Racine, 2010). En este contexto, la interdisciplinariedad ha sido un catalizador de la producción científica reciente, articulando saberes como la matemática, la biología, la arquitectura y la ingeniería (Narváez, 2014). La arquitectura contemporánea, influenciada por las nuevas ciencias de la complejidad — fractales, dinámicas no lineales, caos y sistemas autoorganizados— (Jencks & Kropf, 2006), incorpora estas perspectivas para generar formas geométricas complejas a partir de parámetros que pueden modificarse y relacionarse en el tiempo (Narváez, 2014).

Con el fin de caracterizar el panorama actual en diseño arquitectónico y su relación con la optimización y el ecoturismo, se realizó una búsqueda en Scopus® utilizando siete palabras clave: “Architectural design”, “Bioclimatic architecture”, “Ecotourism”, “Multi-objective programming”, “Parametric architecture”, “Parametric optimization” y “Space syntax”. Al especificar los criterios de búsqueda con la expresión “*multi-objective optimization in architectural design*”, se identificaron **490 documentos entre 1994 y 2022** (Ver Figura 3), con un máximo de **58 publicaciones en 2019** (Scopus, 2021). En contraste, el filtro “*optimization in architectural ecotourism design*” arrojó solo un documento en 2021, desarrollado en Perú en el campo de las ciencias ambientales (Arteaga et al., 2021).

**Figura 3**

*Resultados de la búsqueda “Multi-objective optimization in architectural design”*



*Nota.* Resultado de los documentos publicados por año según la base de datos de Scopus, 2021.

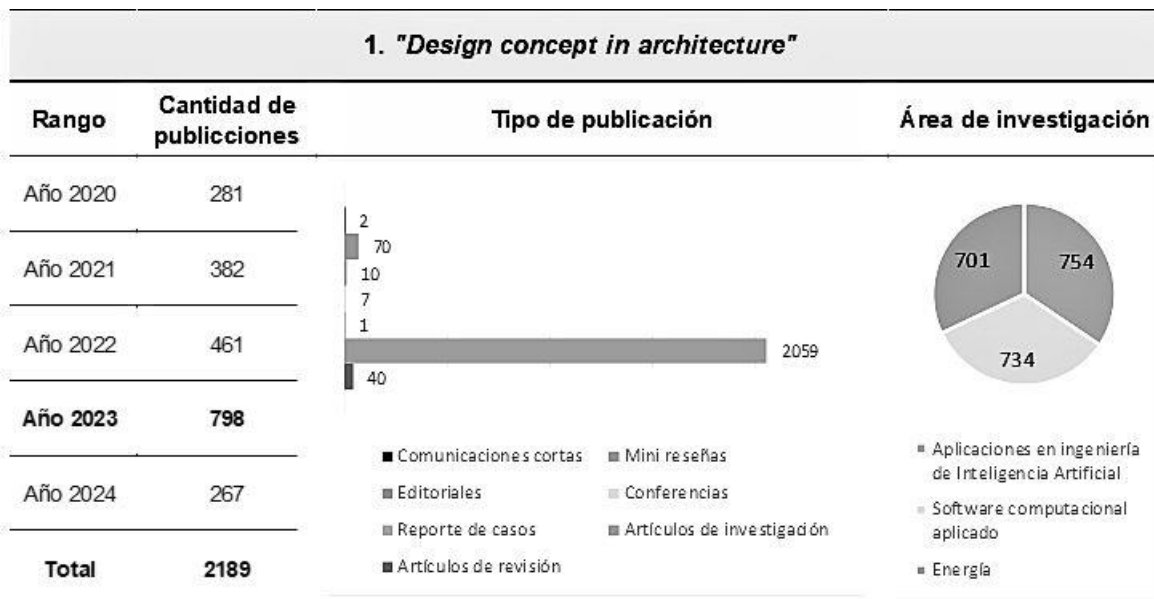
La combinación “*multi-objective optimization in architectural ecotourism design*” no produjo resultados, evidenciando la escasez de estudios que articulen de manera explícita optimización multiobjetivo, diseño arquitectónico y ecoturismo. Se observa además que la arquitectura bioclimática presenta el menor número de publicaciones, mientras que el ecoturismo ha sido abordado principalmente desde las ciencias sociales y ambientales, lo que sugiere un amplio potencial de desarrollo interdisciplinar.

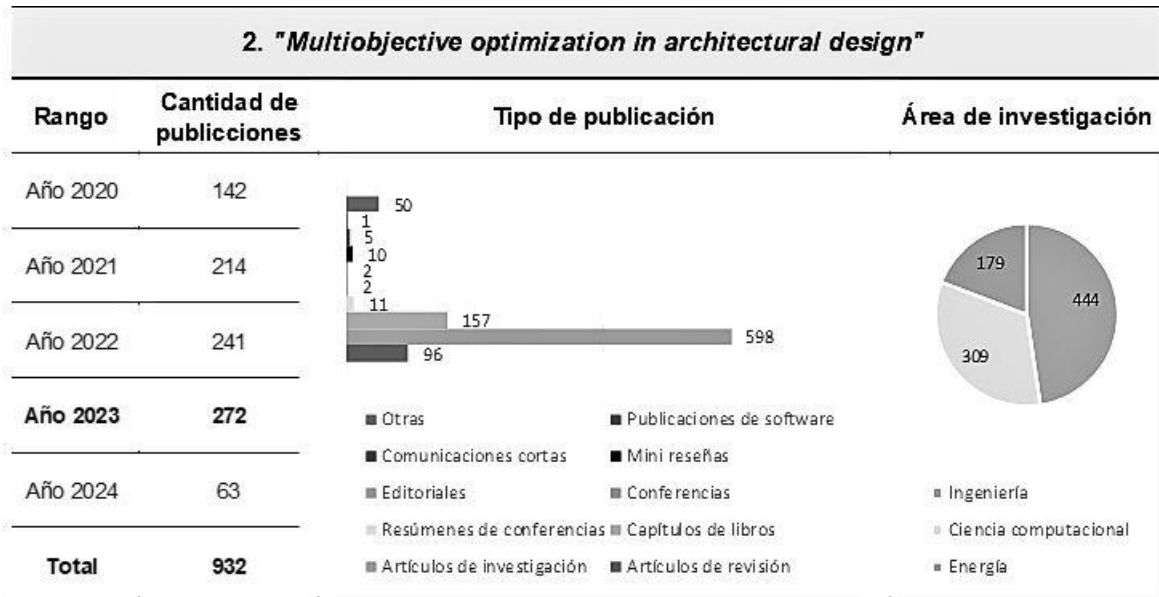
Una actualización de la búsqueda realizada en enero de 2024 incorporó palabras clave más específicas vinculadas con esta investigación (Ver Tabla 1), cuyos resultados se comparan con los cinco años anteriores y se presentan en la **Tabla 1** (Scopus, 2024). Adicionalmente, mediante la

herramienta VOSviewer se analizaron las co-ocurrencias de términos asociados con “*multiobjective optimization in architectural design*” y “*optimization in architectural ecotourism design*”, identificando relaciones de proximidad semántica entre palabras clave y la estructura científica del campo. Estos análisis muestran vacíos entre los términos “*diseño*”, “*ecoturismo*” y “*ciencia computacional*”, corroborando que el campo de interés de esta investigación es pertinente y aún poco explorado.

**Tabla 1**

*Resumen y comparación de resultados de la búsqueda de palabras claves en Scopus de los último 5 años*





*Nota.* Elaboración propia a partir del resultado de los documentos publicados por año, por territorio y temática. Scopus, 2024.

En años recientes, la integración del diseño paramétrico como Rhinoceros, la optimización multiobjetivo mediante algoritmos genéticos y la simulación ambiental se han constituido en un nuevo enfoque metodológico robusto para la generación de formas arquitectónicas en la etapa conceptual del diseño (Javanroodi, Nik & Mahdavinejad, 2019). A continuación, se hace un análisis de la literatura relevante relacionada con este trabajo.

Goharian (2023) presenta una metodología de optimización multiobjetivo centrada en confort térmico y daylighting para edificios de oficina en Teherán. Utiliza el entorno paramétrico de Rhino + Grasshopper con los plugins Honeybee, Ladybug y Octopus, aplicando análisis de sensibilidad y algoritmos genéticos. Este trabajo demuestra la eficacia de integrar dichos plugins para optimizar simultáneamente confort y luz natural.

De manera complementaria, Duan et al. (2024) estudian viviendas rurales en climas fríos de China, optimizando geometría y fachadas para reducir la demanda energética, mejorar el confort térmico y aumentar la luminancia. En este caso, se emplea nuevamente Octopus junto a EnergyPlus, Ladybug y Honeybee en Grasshopper, logrando reducciones de hasta el 88,7 % en consumo energético mientras se mantienen niveles adecuados de confort y daylighting.

Por otra parte, en contextos urbanos se han desarrollado flujos paramétricos que permiten evaluar y optimizar el microclima exterior mediante Grasshopper. Estos enfoques evitan simulaciones computacionalmente costosas (como la Dinámica de Fluidos Computacional, CFD en inglés) al recurrir a modelos estadísticos que integran indicadores espaciales como el Factor de Vista del Cielo (Sky View Factor) y el Índice Universal de Clima Térmico (Universal Thermal Climate Index), proporcionando retroalimentación inmediata en los procesos de diseño.

En cuanto a las herramientas de optimización, plataformas como Wallacei, Octopus y Galapagos están ampliamente documentadas como recursos efectivos para la optimización paramétrica en Grasshopper. Mientras Wallacei se distingue por su análisis visual del frente de Pareto, Octopus sobresale en la coordinación de objetivos contrapuestos y Galapagos resulta útil para optimizaciones más simples.

Finalmente, Ladybug y Octopus, integrados en Grasshopper, ofrecen herramientas avanzadas para el análisis ambiental y la optimización multiobjetivo en diseño paramétrico, permitiendo encontrar la mejor solución global para objetivos contradictorios, como, por ejemplo,

la disponibilidad de luz natural y la eficiencia energética (Noorzai et al., (2023) y Aksin y Selcuk (2021)) Facilitando así, la toma de decisiones informadas en etapas tempranas del diseño.

### 3. Marco teórico

#### 3.1. Diseño arquitectónico

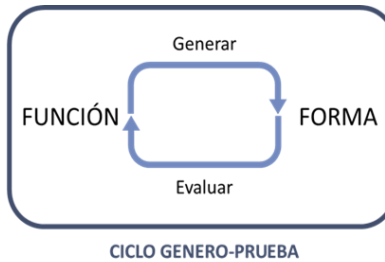
Este capítulo parte de las preguntas: ¿Qué es el diseño? ¿Cómo este proceso se puede representar computacionalmente? ¿Cuál ha sido la evolución en el proceso de diseño arquitectónico? ¿Cuáles son las etapas de diseño arquitectónico? y ¿A qué hace referencia el diseño generativo?

Según el Dr. Sven Schneider, en el curso de Design and Computation de la Universidad Bauhaus de Weïmar, el diseño es la actividad cuyo objetivo es cambiar una situación existente por una deseada (H.A., 1981), sin conocer de antemano las acciones que se realizarán para alcanzarla, es decir, es el proceso para resolver un problema. La solución en el diseño ha sido abordada en términos de la función y la forma, donde el primer concepto describe lo que puede hacer, sus cualidades y el segundo hace referencia a las características físicas del objeto, tales como la geometría y color.

Cada proceso varía, en aquellos problemas donde no hay una solución directa se puede aplicar un proceso de optimización, donde por medio de iteraciones (Ver Figura 4), paso a paso se intenta encontrar las mejores soluciones.

#### Figura 4

*Diagrama del ciclo de diseño según H.A. Simon, 1981*



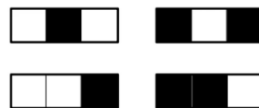
*Nota.* Elaboración propia a partir de la información de *The Sciences of the Artificial*, MIT Press, Cambridge.

Teorías del diseño plantean metodologías de transformación que parten desde el uso de un edificio a su estética. Sin embargo, no existe una forma directa. Puede haber funciones vagas o contradictorias y un sinnúmero de posibilidades de formas debido a la cantidad de elementos que se pueden combinar. Se restringe el número de posibilidades (formas) por las cualidades (funciones) que debe satisfacer el diseño, de no ser así produciría imágenes infinitas. Por ejemplo, al contemplar dos colores (blanco y negro) en 3 píxeles (Ver Figura 5), se obtendrían 8 imágenes posibles. De ser 4 píxeles, el resultado sería 16 imágenes y así sucesivamente, dada la fórmula:

$$\text{Número de imágenes} = \text{Número de colores}^{\text{Número de píxeles}}$$

#### Figura 5

*Gráfico de ejemplo con restricción de 3 píxeles con 2 colores*



*Nota.* Schneider, 2020.

Generalmente, la forma clásica de aproximación al diseño es un método caja negra, en donde el diseñador muestra un resultado en el cual tiene confianza y frecuentemente funciona, mas no se sabe con certeza como fue obtenido (Jones, 1969). Dicho proceso de diseño puede ser considerado poco satisfactorio, debido a que se basa en la experiencia y particularidades subjetivas del diseñador. En contra parte, si se aborda el proceso racionalmente e incorpora los avances computacionales y herramienta digitales; usando una serie de parámetros de entrada que son analizados, sintetizados, evaluados y finalmente optimizados; se podrá mantener la diversidad de ideas o incluso aumentarlas. Además, de disminuir el tiempo de ejecución y proporcionalmente los costos operativos.

El diseño es una actividad multidisciplinaria, cognitiva y sofisticada que ocurre en múltiples áreas de aplicación y que involucra a múltiples partes interesadas (Blessing & Chakrabarti, 2009). Es el proceso creativo de generar productos útiles y estéticos. Esta disciplina engloba todas las actividades complejas que permiten generar y desarrollar un producto o proyecto a partir de una necesidad. Por lo tanto, el diseño es una actividad de planificación e implementación de nuevos productos, incluidos los subproductos de los procesos involucrados como: dibujos, modelos, planos u objetos fabricados. (Frankel & Racine, 2010)

Una metodología de investigación en el diseño es el modelo SightPlan, este demuestra cómo y hasta qué punto se puede emular los pasos seguidos por un experto en el dominio que realiza el diseño. Adicionalmente, demuestra cómo una computadora se puede programar para admitir diseños (por ejemplo: rastrear conjuntos de ubicaciones factibles de objetos de diseño) y

cómo los gráficos interactivos, combinados con un sistema experto, pueden aumentar la toma de decisiones (Tommelein, 2020).

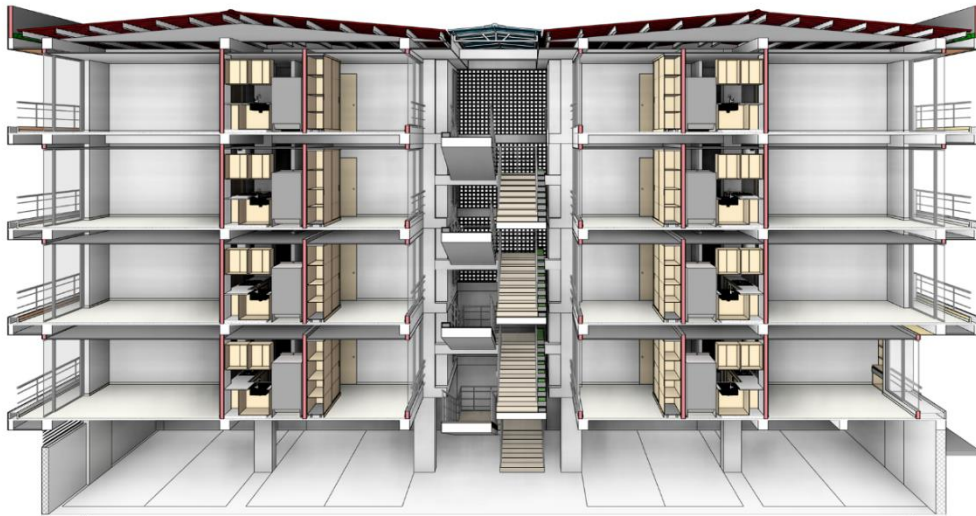
Su aplicación se extiende a diversos campos. En arquitectura, esta actividad comienza generando una idea abstracta y continúa transformándola en formaciones espaciales concretas. Ya sea llamado como "imagen" (Alexander, 1964), "generador primario" (Darke, 1984), "conjetura" (Hillier, et al., 1984), "principio organizador" (Rowe, 1987) o concepto (Lawson, 2003) todos se refieren a lo mismo: la idea que hace que un diseño arquitectónico sea único o diferente a todos los demás (Dursun, 1978). También hace referencia a la idea de satisfacer las necesidades de los usuarios con espacios habitables, usando tecnologías para su posterior construcción, sin dejar de lado la estética. Según el arquitecto británico, John Pawson: “El objetivo de la arquitectura es hallar la mejor manera de repartir el espacio para que la gente se sienta bien en él” (Petrovici, 2019).

Al proceso de evolución de la forma mediante principios (físicos, biológicos, sociales o computacionales) se le denomina Morfogénesis. Por ejemplo, en la naturaleza, una hoja resulta ser un problema de manifiesta complejidad. Debe tener canalizaciones para la óptima distribución de nutrientes, lograr la máxima exposición solar, disponer de un punto de apoyo y ser flexible. Restricciones y características presentes en un solo problema de diseño que configuran una aproximación formal óptima. La matemática es intrínseca a la naturaleza, a sus leyes y formas, todas explicadas mediante un conjunto de orden numérico. Esta realidad no es nueva para la arquitectura, en cuyos cánones contempla el estudio del número de oro, la serie de Fibonacci, entre otras constantes aplicables en diseño. Estas leyes cobran un verdadero sentido en la arquitectura contemporánea, al contar con herramientas computacionales que permiten desarrollar cálculos complejos en cuanto a la generación de una forma (Moreno López & Klempau, 2010).

La incorporación de las herramientas digitales de diseño en el ámbito de la arquitectura es el resultado de un largo proceso de desarrollo. Desde el surgimiento de los primeros planteamientos relativos a la computación y la informática, hasta su plena implementación en el seno de la disciplina a lo largo de la década de 1990, donde la computación experimentó un crecimiento y una difusión sin precedentes, dando lugar a la “revolución digital”. La revolución digital provocó transformaciones en el diseño arquitectónico y urbano, modificando herramientas y metodologías de trabajo. Además, transformó el contexto y las condiciones a las que el diseño debe hacer frente. Gracias a la tecnología digital la arquitectura logró fusionar vertientes discursivas, entre el interés del discurso (especialmente preocupado por la experimentación formal) y el potencial ofrecido para representar y manipular geometrías complejas; marcando el inicio de la nueva “arquitectura digital” (Ver Figura 6) (Arteta, 2017).

### Figura 6

*Ejemplo de arquitectura digital*



*Nota.* Modelado arquitectónico en Revit, bajo la metodología BIM. Larva Arquitectura.

<https://www.larva-arq.com/desarrollos-bim>

Las herramientas digitales permiten trabajar con geometrías difícilmente abordables desde los métodos y técnicas tradicionales, abriendo así un nuevo y fructífero campo para la experimentación formal. Por consiguiente, se implementaron parámetros para la configuración de la geometría y espacialidad de un diseño.

### **Figura 7**

*Ejemplo de arquitectura paramétrica*



*Nota.* Gabriela Wagner, 2017. <https://egabrielawagner.wordpress.com/2017/04/18/arquitectura-parametrica/>

Un parámetro es un dato que es tomado como necesario para analizar o valorar una situación; a partir de este, una determinada circunstancia puede entenderse o situarse en perspectiva. Para las matemáticas, un parámetro es una variable que permite identificar, en una familia de elementos, a cada uno de ellos mediante su valor numérico. En el caso de la estadística, un parámetro es una función definida sobre los valores numéricos de una población, es decir, un valor representativo que permite modelizar la realidad. (Navarrete, 2014) Un recurso innovador y versátil para el área creativa es el diseño paramétrico, por su aplicabilidad a diferentes escalas, desde diseño industrial y arquitectónico hasta urbanismo. El método del diseño paramétrico es crear una lógica a partir de relaciones específicas, que se pueden ir modificando según los requerimientos sociales y contextuales de cada proyecto (Ver Figura 7).

Asimismo, un algoritmo es una serie definida de instrucciones que emplea datos de entrada y genera datos de salida (Ver Figura 8). Si los datos de entrada están fuera de ciertos rangos necesarios, se producen errores. Esto permite que los resultados arquitectónicos se generen y se modifiquen alterando los datos de entrada y el algoritmo. Según Bruce Mau en “Incomplete Manifest for Growth” (1998), el diseño de la arquitectura se convierte en el diseño del algoritmo y la elección del resultado. “El proceso es más importante que el resultado. Cuando el resultado conduce al proceso, sólo llegaremos a donde ya hemos estado. Si el proceso conduce al resultado, quizás no sabemos a dónde vamos, pero sabremos que queremos estar ahí” (Petrovici, 2019).

### Figura 8

*Ejemplo de arquitectura algorítmica*



*Nota.* Angus, 2008. Centro acuático nacional de Pekín.

Arquitectos e ingenieros como: Félix Candela (1910-1997), Heinz Isler (1926-2009), Frei Otto (1925-2015), Frank Gehry(1929-), Arata Isozaki (1931-), Matsuro Sasaki (1946-), Zaha Hadid (1950-2016), Greg Lynn (1964-) o Coop Himmelblau, son algunos de los representantes de estas técnicas analógicas y digitales para el diseño y ejecución de edificios de gran complejidad formal (Ver Figura 9), tales como el acuario Oceanográfico en València España (2003), el Pavillon Sicli en Genève, Suiza (1970), el Estadio Olímpico en Múnich, Alemania (1972), el museo

Guggenheim de Bilbao (1997) o el Disney Concert Hall de Los Ángeles (2003), entre otros. Además de estudios arquitectónicos como Foreign Office Architects (1992-2011) situado en Londres, compuesto por la pareja iraní-británica Farshid Moussavi (1965-) y el español Alejandro Zaera (1963); y NOX (1905-), una oficina de diseño en Róterdam, Países bajos, fundada por el Profesor Lars Spuybroek (1959-).

### Figura 9

*Ejemplo de edificio de complejidad formal. Walt Disney Concert Hall por Frank Gehry, Los Ángeles (2003)*



*Nota.* Richard Anderson, 2009.

Esta constante búsqueda de la forma a lo largo de la historia ha dependido tanto de la capacidad de construcción como de la representación. Cambió el modo de proyectar, pasando de los modelos analógicos (Ver Figura 10) como los implementaba Gaudí (1852-1926) a la aplicación de las fuerzas en el diseño de la arquitectura mediante simulaciones físicas por ordenador. Al incorporar la simulación de la gravedad, apoyos, restricciones y otras fuerzas es posible generar una superficie elástica en la que se minimiza la variación de las tensiones internas hasta llegar a un punto de equilibrio, que se puede edificar (Petrovici, 2019).

**Figura 10**

*Maqueta funicular de la Sagrada Familia, Antonio Gaudí*



*Nota.* Carlos Canaan, 2009.

Si un proceso es replicado, conduce a un modularidad (Ver Figura 11). Concepto entendido en programación orientada como la propiedad que permite subdividir en partes más pequeñas (módulos) y cada una de las partes es tan independiente como sea posible de la aplicación en sí y de los otros módulos. El módulo es el instrumento más representativo de la arquitectura en serie. Inicialmente promovido por el movimiento moderno, propugnaba un modelo estandarizado-mecanicista, con un sistema de producción prefabricado en masa; una producción de objetos sin variaciones, rigurosamente idénticos de acuerdo con una estricta geometría euclidiana. Al reemplazar la fabricación lineal, que imposibilitaba las correcciones durante la ejecución, por un modelo paramétrico que integra el diseño y la producción, se pueden realizar formas complejas, flexibles y adaptables constantemente, bajo un régimen de altísimo rendimiento. Pasando de una “producción en masa”, a una producción de un conjunto diferenciado de productos flexibles y adaptables en el tiempo, que permiten ser modificados frecuentemente en su fabricación sin bajar con esto la producción (Narvaez, 2014).

**Figura 11**

*Ejemplo de arquitectura modular. Hábitat 67 por Arq. Moshe Safdie en Montreal, Canadá*



*Nota.* Simon S.A., 2017. <https://www.detailerssimon.com/arquitectura-modular-el-futuro-de-la-construccion/>

Aunque el diseño paramétrico ha existido desde la década de 1960, fue en este siglo, con los avances en materia de tecnología digital, que se ha convertido en una nueva conceptualización de la actividad de diseñar, reduciendo los esfuerzos necesarios para crear y modificar variantes en el proyecto.

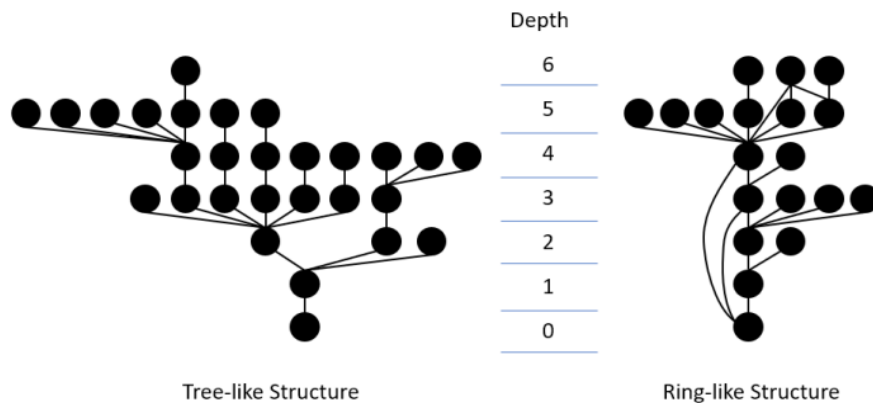
El modelado paramétrico es un método matemático, que permite alterar determinadas características del modelo, en cualquier instancia del proceso, sin tener que volver a calcular otras características que se verían afectadas frente al cambio realizado. Este sistema codificado (modificable y adaptable), es capaz de detectar y evaluar automáticamente, en tiempo real y mientras se diseña, una serie de alternativas del proyecto, de acuerdo con parámetros preestablecidos, tales como: sistemas constructivos, adecuación al terreno y orientación. Obteniendo así una infinita cantidad de variantes, que son seleccionadas de acuerdo con términos comparativos numéricos. La utilización de algoritmos matemáticos facilita el análisis, extrae

particularidades, encuentra relaciones, poniendo de manifiesto reglas. Mientras proyectamos, es posible simular la eficacia termodinámica, el consumo energético, el costo de su construcción o cualquier otro parámetro inherente a las características generales del proyecto (Narvaez, 2014).

La naturaleza no se rige por funciones estéticas, sino que busca la forma que menos cantidad de energía consume para realizar una función específica y vital. Así como lo afirma Félix Candela Outeriño, arquitecto español con nacionalidad mexicana, la historia de las estructuras muestra una marcada tendencia a cubrir mayores espacios con menos material (Marínez Villarroya, 2019). Para arquitectura, se encuentra Space Syntax (Ver Figura 12), teoría del entorno construido que busca explicar el efecto de las configuraciones espaciales en los patrones de comportamiento de las personas. Las herramientas SYNTACTIC incorporan la teoría de la sintaxis espacial a los flujos de trabajo de diseño paramétrico. Disponible en GH del programa Rhinoceros® (software de gráficos 3D).

### Figura 12

*Ejemplo de Sintaxis espacial*



*Nota.* (Andi et al., 2021)

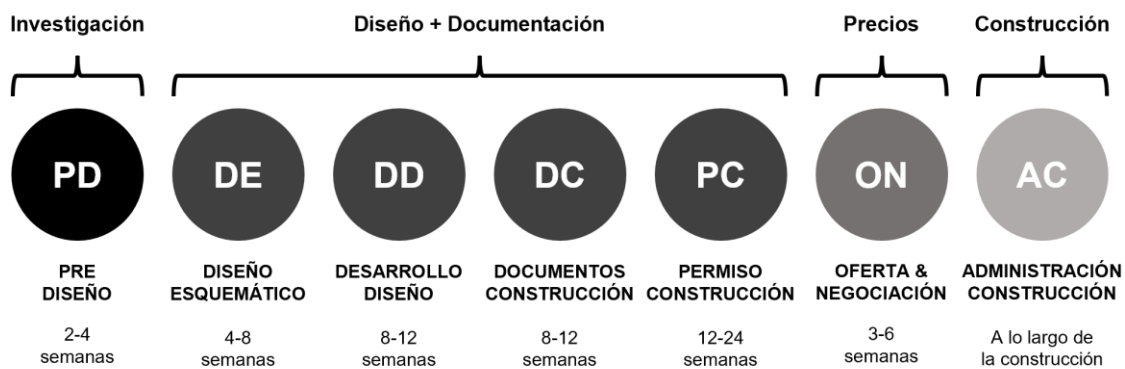
El diseño generativo o GD por sus siglas en inglés, es un proceso de diseño iterativo basado en reglas (Meinties, 2017). Parte de un modelado algorítmico y paramétrico para explorar, iterar y

optimizar automáticamente las posibilidades de diseño mediante la definición de restricciones y objetivos de alto nivel (Nagy & Villaggi, 2020).

Lo llamativo de esta forma de proyectar es que el GD tiene la capacidad de explorar e iterar automáticamente las posibilidades de diseño y permutar las mejores soluciones a los diseñadores humanos para la toma de decisiones (Singh & Gu, 2012). Aunque el GD es útil para las áreas de arquitectura, ingeniería y construcción, este proceso ocurre generalmente en la etapa de DC (Ma et al., 2021).

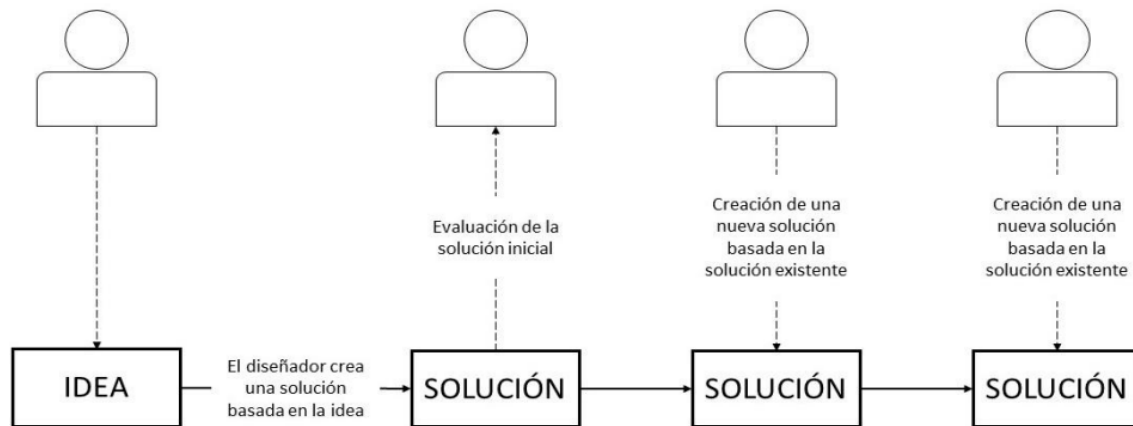
### Figura 13

*Etapas del diseño y construcción de un proyecto*



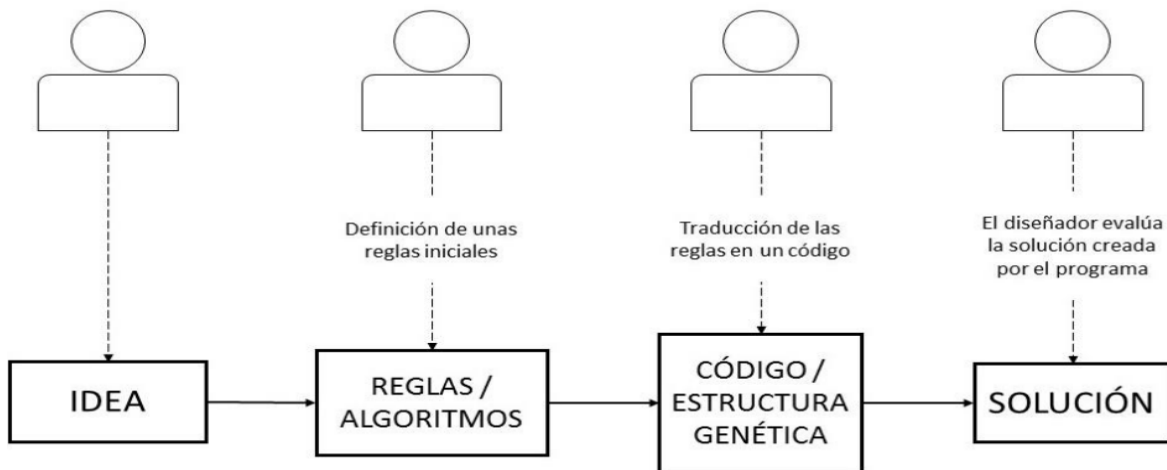
*Nota.* (Chintis, 2020)

En las etapas del diseño arquitectónico, el esquemático corresponde a la segunda (Ver Figura 13). Durante esta fase se inicia el proceso de transformación del programa arquitectónico a un diseño de una edificación eficiente. Es aquí donde se exploran conceptos, ideas y relaciones, se prueban las opciones para obtener una idea general del aspecto y la sensación. ¿Qué se involucra en el diseño esquemático? Se desarrollan bocetos y modelos que son sometidos a prueba, hay una retroalimentación por parte del cliente y se generan planos preliminares.

**Figura 14***Proceso clásico de diseño*

*Nota.* (Velasco, 2015)

En contraste con el proceso clásico de diseño (Ver Figura 14), en el proceso de diseño generativo el diseñador tiene una idea y piensa cómo puede traducirla en un conjunto de reglas o algoritmos. Dicho conjunto de reglas son la base para crear un código que dará forma a la idea, obteniendo así una solución (Ver Figura 15).

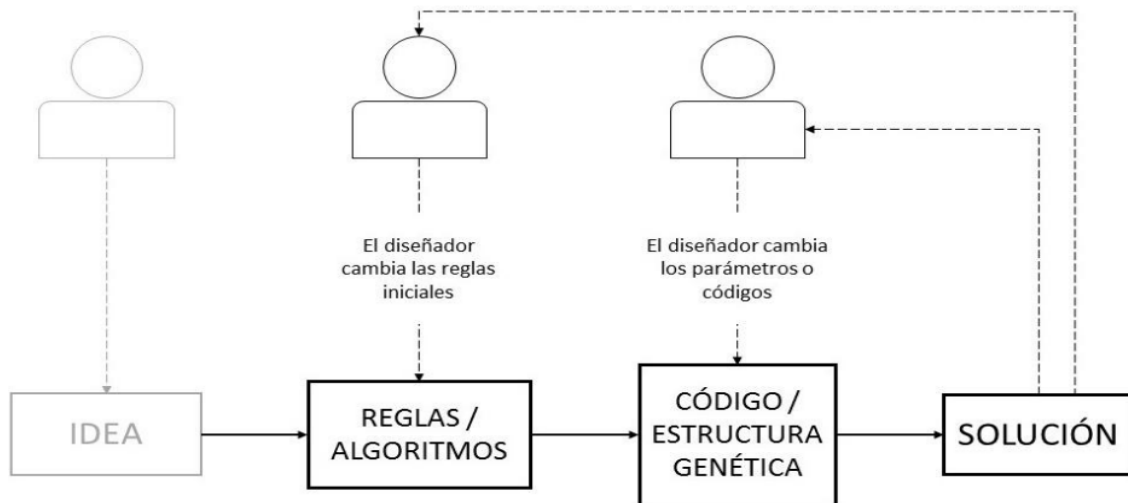
**Figura 15***Proceso de diseño generativo*

*Nota.* (Velasco, 2015)

Dicha solución obtenida en el proceso de diseño generativo, es modificable y evita que el diseñador tenga que volver al principio del proceso si la solución no es conforme a las necesidades. Permite generar nuevas soluciones, al modificar el conjunto de reglas, algoritmos, códigos y/o parámetros (Ver Figura 16).

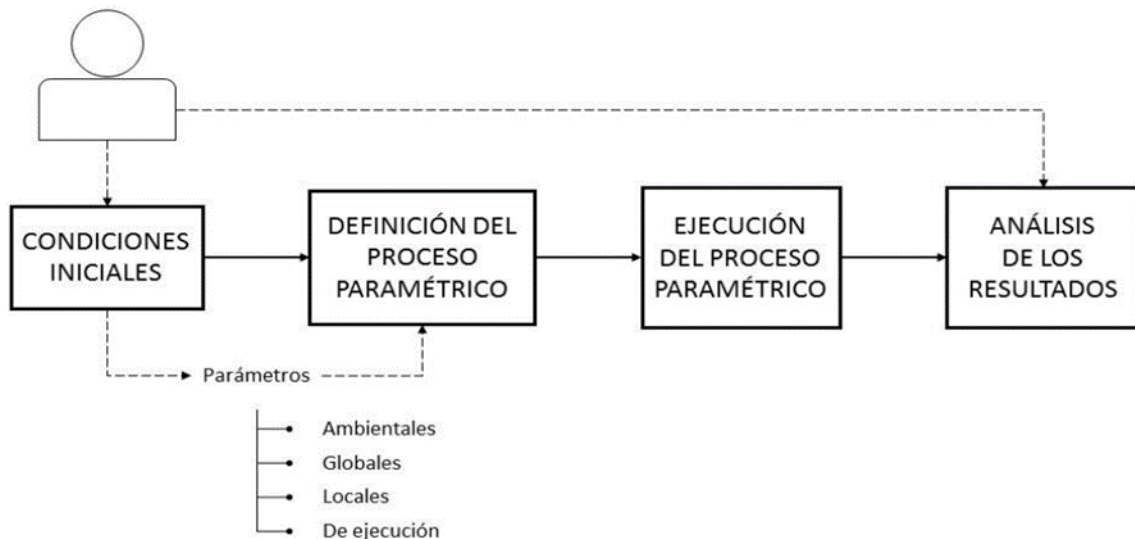
**Figura 16**

*Proceso de diseño generativo*



*Nota.* (Velasco, 2015)

Entonces, ¿El diseño generativo reemplazará el proceso creativo del arquitecto? El objetivo de usar esta metodología es cocrear. El arquitecto define el problema y organiza los parámetros del modelo de optimización a emplear (Ver Figura 17), incluyendo las restricciones o limitaciones que usualmente suelen ser complejas y contradictorias. Posteriormente, el computador genera algorítmicamente diez de miles de soluciones que superan las capacidades de exploración si se usara el proceso clásico. Estas soluciones generadas sinérgicamente inspiran al arquitecto a abordar la solución del problema de maneras inesperadas.

**Figura 17***Proceso de diseño paramétrico**Nota.* (Velasco, 2015)

### 3.2. Optimización multiobjetivo

El estudio de la forma óptima de una viga en voladizo con una carga puntual en su extremo sin apoyo comenzó a enmarcar un modelo científico en 1638, con la obra “Discorsi e dimonstrazioni matematiche, intorno, a due nuove scienze attenenti alla meccanica et i movimenti local” de Galileo Galilei (1564-1642). Seguidamente, el problema de la optimización estructural enfocado en la minimización y maximización de funciones matemáticas fue abordado por Leibniz (1646-1716) y Lagrange (1736-1813).

En el siglo XX se estableció un método con las investigaciones de Michell, apoyado en los estudios de optimización de estructuras de Clerk Maxwell. Autores como Owen, Chan, Prager y Rozvany lograron estructuras más prácticas que las obtenidas anteriormente, a raíz de modificaciones y extensiones a la teoría de Michell (Ochoa Sánchez, 2018).

La programación matemática llegó a la optimización de estructuras con las investigaciones de Dorn, Gomory y Greenberg, y Hemp y Chan a mediados del siglo XX. Quienes plantearon el desarrollo de la optimización desde un punto de vista nodal. Determinando la estructura óptima con relación al valor de una función objetivo: la sumatoria de los desplazamientos virtuales de cada nodo. Este método lograba eliminar las barras que no tuvieran una demanda mecánica importante. (Petrovici, 2019)

En 1970 Corcoran, y posteriormente Pedersen, generaron algoritmos no lineales, basados en técnicas geométricas, que funcionaban de manera satisfactoria llegando a obtener métodos iterativos eficientes para la optimización de estructuras estáticamente determinadas con un único estado de cargas. Pederson logró realizar un análisis de sensibilidades respecto a las áreas y al peso propio.

Farshi, en 1974, logró un método para librarse de los problemas procedentes de trabajar con un espacio de soluciones factibles disjuntos. Los trabajos de Bendsøe, Achtziger y Sigmund reformularon el diseño estructural al convertirlo en un problema de Programación Lineal. De esta manera, se busca la estructura con la máxima rigidez cumpliendo con la restricción del volumen inicial y tomando los desplazamientos como variables (Ochoa Sánchez, 2018).

### **Figura 18**

*Estados en la optimización topológica de una viga simplemente apoyada*



*Nota.* (Parra Blanco, 2013)

Kirsh y Rozvany, en 1994, incluyeron nuevas formulaciones que involucraban un criterio de optimalidad (CO). De igual manera en la década de los noventa investigadores como Zhou and Rozvany (1991), Meljnek (1992), Sigmund y Bendsoe (1994/1997) desarrollaron los fundamentos de la formulación contemporánea de la optimización topológica, utilizando métodos de densidad, como el diseño de 0-1 y el modelo SIMP(Solid Isotropic Material with Penalization) (Ver Figura 18), y correcciones a los problemas de Checkboard, y a la dependencia de la malla de los elementos finitos, con el uso de los filtros en las sensibilidades o en las densidades.

Técnicas de optimización topológica que involucran algoritmos evolutivos, enfoques level-set, o aquellas que involucran el manejo de la derivada topológica se extendieron en la década de los dos mil con las investigaciones de Osher y Wang (2003), Allaire (2002-2005), y Challis (2007), entre otros (Petrovici, 2019).

Los investigadores han desarrollado previamente muchas herramientas de optimización computacional, en las cuales el objetivo es reducir el costo o el uso de material en una estructura mientras se satisfacen criterios de diseño específicos. Entre estas herramientas, se encuentran los casos de optimización de tamaño, optimización de formas, optimización de topología y otros (Beghini et al., 2014).

Un problema de OM se puede definir como la búsqueda de un vector de variables de decisión capaz de satisfacer ciertas restricciones (Ver Figura 19) y, al mismo tiempo, optimizar un vector cuyos elementos representan funciones objetivo (Ramírez et al., 2012). Por consiguiente, debe tener dos o más objetivos contrapuestos que serán minimizados o maximizados simultáneamente satisfaciendo ciertas restricciones.

$$\mathbf{F} = \underline{\text{mín}}(F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x)) \quad (1)$$

Donde,  $x \in X$

Sujeto a:

$$g_i(x) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \tag{2}$$

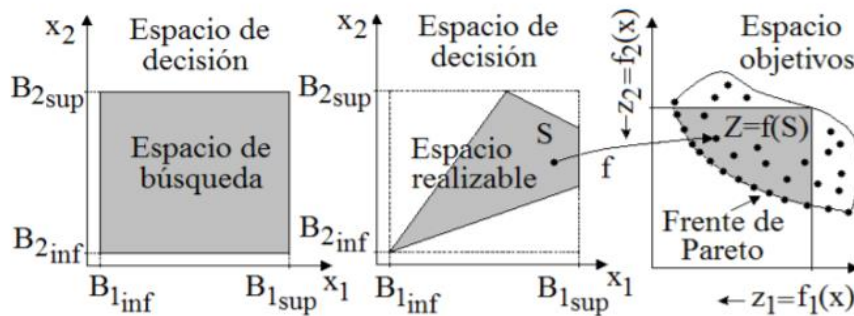
$$h_i(x) = 0, i = 1, 2, \dots, p \tag{3}$$

Donde  $F$  es el vector con las funciones objetivo,  $g_i$  y  $h_i$  las restricciones, y  $x$  las variables (el factor de proporción para las ventanas en las fachadas y los grados de rotación en el plano XY, según este trabajo de investigación).

En este tipo de problemas no es posible encontrar una solución ideal capaz de optimizar todas las funciones objetivo. Sin embargo, es posible hallar un conjunto de soluciones no dominadas (Ver Figura 20) conocido como “Frente óptimo de Pareto” (Liu, 2003), a partir del cual, se puede seleccionar una solución de compromiso. Concretamente, dicha elección se realiza mediante el uso técnicas de decisión basadas en diferentes criterios, por ejemplo, estableciendo restricciones en torno a los valores límite de temperatura o de exposición solar permitidos (Castilla Nieto et al., 2016).

**Figura 19**

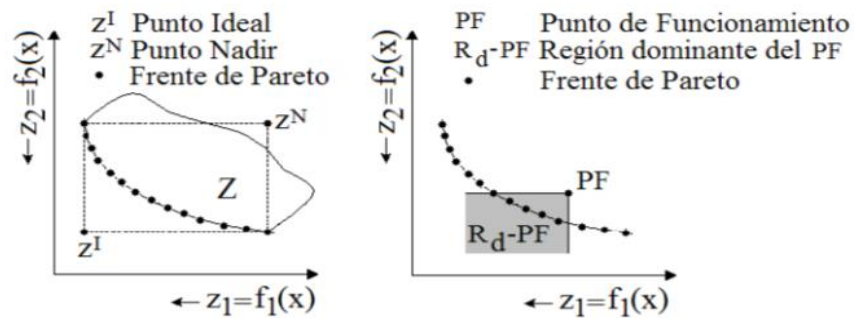
*Espacios de búsqueda, realizable y de los objetos*



Nota. (Méndez et al., n.d.)

## Figura 20

*Puntos ideales, frente de Pareto*



Nota. (Méndez et al., n.d.)

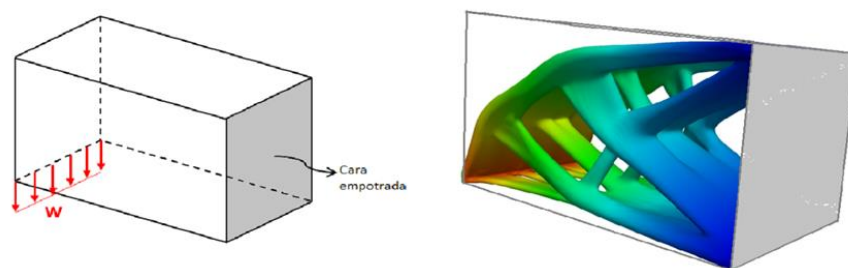
Al implementar la OM, se busca incorporar estrategias bioclimáticas al diseño arquitectónico, concepto que surge con el fin de mejorar la relación y conservación del ambiente (Torres et al., 2021). Las medidas adaptadas a esta línea de acción son: la reducción o el aumento de la temperatura interior sin hacer uso de aparatos que requieran energía eléctrica, y el aumento o reducción del área de visualización en las fachadas.

En la Rama de las matemáticas, otro concepto ligado a la OM es la topología, que trata especialmente de las propiedades de las figuras con independencia de su tamaño o forma. Como lo definen Aish y colaboradores (Aish, et al., 2018):

“Los edificios encierran y dividen el espacio y se construyen a partir de conjuntos de componentes conectados. Las múltiples formas de compartimentación y conexión espacial y material de los edificios pueden representarse mediante la topología”

**Figura 21**

*Ejemplo de optimización topológica de viga en voladizo*



*Nota.* (Ochoa Sánchez, 2018)

A partir de la optimización topológica, una técnica de programación matemática, es posible obtener una distribución eficiente del material a partir de restricciones de diseño (Ver Figura 21). El proceso de diseño de cualquier tipo de estructura es complejo y requiere establecer una topología (patrón de conectividad de los elementos), geometría (coordenadas de los nodos) y un conjunto de perfiles que permitan dar cumplimiento a las restricciones normativas de diseño. En este sentido, el proceso de diseño arquitectónico puede ser planteado como un problema de OM, que permita facilitar y establecer la mejor opción de diseño dentro de un conjunto de soluciones Pareto óptimas disponibles (Niño, Guevara & Begambre, 2020). En la actualidad las herramientas de Rhinoceros® junto a los complementos de GH permiten llevar a cabo optimizaciones multiobjetivo y generar morfológicamente los resultados de las funciones objetivo optimizadas.

Octopus es un complemento (plug-in) de Grasshopper desarrollado por Robert Vierlinger y Christoph Postl, diseñado para realizar optimización multiobjetivo mediante algoritmos evolutivos. Se basa en el algoritmo SPEA-2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2), el cual simula procesos de selección natural para identificar simultáneamente múltiples soluciones óptimas no dominadas dentro de un frente de Pareto. En cada generación, Octopus evalúa una

población de individuos (cada uno representando una combinación distinta de parámetros geométricos o de desempeño) y los clasifica según su dominancia y diversidad, preservando las soluciones más aptas para las siguientes iteraciones. Este enfoque permite explorar el espacio de diseño paramétrico y visualizar morfológicamente las alternativas óptimas en tiempo real, lo que facilita la toma de decisiones en proyectos arquitectónicos complejos (Vierlinger, 2018).

### **3.3. Confort térmico**

¿Qué es el confort térmico? Se entiende como la percepción subjetiva de bienestar frente a las condiciones térmicas del entorno. De acuerdo con la ISO 7730 (2005), esta sensación se alcanza cuando se logra la neutralidad térmica, es decir, un estado en el que el calor producido por el metabolismo humano se encuentra en equilibrio con la pérdida de calor hacia el ambiente, evitando la percepción de frío o calor.

Por su parte, el estándar ASHRAE 55 (ASHRAE, 2020) describe el confort térmico como una condición mental en la que una persona manifiesta satisfacción con el ambiente térmico. Este documento amplía la perspectiva al considerar otros factores que influyen en la calidad del ambiente interior (Ver Tabla 2), relevantes tanto para el diseño de sistemas de acondicionamiento como para la construcción del inmueble, más allá del control estricto de la temperatura. Los siguientes factores forman parte de la Indoor Environmental Quality (IEQ):

Tabla 2

*Factores y parámetros que determinan el confort térmico*

Factores			Parámetros	
Ambientales Exteriores	Personales		Ambientales Interiores	Arquitectónicos
	Fisiológicos y Contributivos	Socioculturales y Psicológicos		Adaptabilidad del espacio
Temperatura del aire	Sexo	Tipo de vestimenta	Temperatura del aire	Movilidad del ocupante dentro del espacio
Temperatura radiante	Edad	Expectativas de confort	Temperatura radiante	Modificación de elementos y dispositivos de control ambiental
Humedad relativa	Peso	Contacto visual con el exterior	Humedad relativa	
Velocidad del aire	Tasa de metabolismo: -Basal -Muscular (nivel de actividad) Estado de salud Intercambio de calor por ingestión de bebidas y alimentos Historial térmico: -Inmediato -Mediato Tiempo de permanencia Variabilidad temporal y espacial de los estímulos físicos ambientales		Velocidad del aire	

*Nota.* (Marchante González & González Santos, 2020)

Existen modelos teóricos, empíricos, adaptativos y computacionales para evaluar el confort térmico. En ellos se tienen en cuenta variables, factores y parámetros que influyen en la zona de confort térmico del ocupante. Los modelos teóricos son: PMV (Predicted Mean Vote), PPD (Predicted Percent Dissatisfied), TSENS (Thermal Sensation), DISC (Thermal Discomfort), ET (Effective Temperature), SET (Standard Effective Temperature) y PET (Physiological Equivalent Temperature).

A continuación, se hace una breve descripción de cada modelo:

En la escala de sensación térmica, el **PMV** representa el voto medio previsto de un grupo de personas expuestas a un cierto ambiente (Valle, 2002). Se basa en la transferencia de calor en estado estacionario entre un cuerpo y el ambiente, asignando un voto de confort a dicha sensación. Una vez calculado el PMV se puede determinar el porcentaje de insatisfacción (PPD). El índice TSENS es un modelo de balance térmico que predice el confort térmico. El modelo evoluciona

con el tiempo, a diferencia del estado estacionario del PMV. Estos modelos pueden ser calculados usando el modelo “2-Node”, el cual determina el flujo de calor en principio de minuto a minuto, entre el ambiente, las áreas de la piel y el núcleo del cuerpo. La contraparte DISC predice el discomfort, se relaciona con la piel cuando la regulación es a través de la sudoración. Basada en 11 puntos de una escala numérica donde los valores positivos representan la zona caliente y la sensación neutral de confort; y los valores negativos representan el frío. TSENS es basado en la misma escala del PMV pero con términos extras para  $\pm 4$  (muy caliente/frío) y  $\pm 5$  (intolerablemente caliente/frío) (ASHRAE,2017). DISC se define, reconociendo la misma convención positiva/negativa para el discomfort caliente/frío, como: 5-intolerable; 4-límite de tolerancia; 3-muy incómodo; 2-incómodo y desagradable; 1-singularmente incómodo pero aceptable y 0-confortable.

**ET**, es un índice determinado experimentalmente a través de varias combinaciones de la temperatura de bulbo seco, la humedad y la velocidad del aire que produce la misma sensación térmica. La temperatura de bulbo seco, es la temperatura de un gas o mezcla de gases tomada con un bulbo seco que está protegido de intercambio radiante (ASHRAE,2017).

SET se basa en el modelo del metabolismo humano, incluyendo los mecanismos de termorregulación causados por las condiciones ambientales o por los niveles de actividad (transpiración, sudoración, vasoconstricción o dilatación). La idea central es convertir las condiciones ambientales estudiadas en una sola temperatura para un caso de referencia: baja velocidad del aire (0.1 m/s), temperatura media radiante igual a la temperatura del aire y la humedad relativa del ambiente de un 50%. En estas condiciones el SET\* es la temperatura operativa con las mismas reacciones fisiológicas que las condiciones del ambiente estudiado. Esto significa que después de un tiempo de exposición dado, la humedad y la temperatura de la piel del

ambiente imaginario son iguales a las del ambiente real (Marchante González & González Santos, 2020).

**PET** representa la temperatura psicológica equivalente, y al igual que el **PMV**, da una estimación de la componente térmica de un ambiente dado. Algunos términos dependen de la temperatura media de la superficie de la ropa, la temperatura media de la piel o la tasa de sudor, todos los cuales se ven afectados por las condiciones ambientales (Chirag, 2010).

Dentro de los modelos empíricos se clasifican: **PD** (Percent Dissatisfied), **PS** (Percent Satisfaction) y **TS** (Thermal Sensation). El primero permite conocer el porcentaje de personas que expresan disconfort térmico debido a las corrientes de aire. El índice **PS** predice la velocidad del aire que puede ser elegida por la persona expuesta a cierta temperatura del aire, cuando dicha persona tiene control de la fuente de velocidad del aire; representa el porcentaje acumulativo de personas eligiendo una velocidad del aire particular a las temperaturas específicas. La sensación térmica (**TS**), es el índice que predice el voto de sensación térmica usando una función lineal de la temperatura del aire y la presión parcial del vapor (Valle, 2002).

El enfoque adaptativo establece que si ocurre una variación que produce incomodidad, las personas reaccionan de diferentes maneras para recuperar su comodidad. Además, sugiere que la satisfacción de las personas con un clima interior se logra haciendo coincidir las condiciones ambientales térmicas reales en el tiempo y espacio existentes con sus expectativas térmicas individuales. El confort térmico es una situación en la que el ocupante se siente satisfecho con el ambiente interior. El modelo **PMV**, se basa en un concepto de termoneutralidad, fue desarrollado para determinar el nivel de confort térmico para los ocupantes dentro de una habitación o un edificio (Yau & Chew, 2014).

Los modelos adaptativos (Ver Tabla 3) incluyen las variaciones en el clima exterior para determinar las preferencias térmicas en el interior. Entre ellos se encuentran los siguientes:

**Tabla 3**

*Tipos de modelos adaptativos que determinan el confort térmico*

MODELOS ADAPTATIVOS					
TIPO	TEMPERATURA NEUTRAL			TEMPERATURA DE CONFORT	ÍNDICE DE ESTRÉS TÉRMICO
	Michael Humphreys	Fergus Nicol	Andres Aulicliems	Griffiths	ITS (Index of Thermal Stress)
Año de origen	1975	1960's - 1970's	1981	1990	1960's - 1970's
Fuente	(Nicol et al., 2017)	(Hom B. Rijal, et al., 2020)	(Aulicliems & de Dear, 1998)	(Kumar et al., 2017)	(Marchante & González, 2020)
Descripción	<p>Demostró que la sustitución de la temperatura interior por la temperatura media exterior produce resultados similares en edificios sin sistemas de acondicionamiento mecánico del aire.</p>	<p>Transforma la regresión lineal en exponencial con una considerable pérdida de predicción cuando se aplica a edificios con sistemas mecánicos para la climatización.</p>	<p>La preferencia térmica es vista como el resultado de ambas respuestas fisiológicas a los parámetros interiores inmediatos y a las expectativas basadas en experiencias del pasado</p>	<p>Estudio de edificios europeos con sistemas pasivos. Donde <math>T_c</math> es la temperatura de confort (°C), <math>T_g</math> es la temperatura del globo interior (°C), TSV es el voto de sensación térmica y G es la constante de Griffith (0,50 °C -1) .</p>	<p>Modelo biofísico. Describe el mecanismo de intercambio de calor entre el cuerpo y el ambiente, del que se puede calcular el estrés total del cuerpo.</p>
Ecuación	$T_{n,i} = 2.6 + 0.831 T_i$ $T_{n,o} = 11.9 + 0.534 T_o$	$T_n = 23.9 + 0.0295 * (T_m - 22) * e^{-\left(\frac{T_m - 22}{34 * \sqrt{2}}\right)^2}$	$T_{n,i} = 5.41 + 0.731 T_i$ $T_{n,o} = 17.6 + 0.31 T_o$ $T_{n,i,o} = 9.22 + 0.48 T_i + 0.14 T_o$	$T_c = T_a + (0 - TSV)/G$	$S = [(M - W) \pm C \pm R] * (1/f)$
Ventajas	<p>Contempla respuestas a sensación de frío o calor. Ante un cambio, se opta por reestablecer el confort (acciones físicas).</p>	<p>Considera que las acciones son el resultado de una regeneración iterativa entre la sensación de los sujetos y su comportamiento.</p>	<p>Énfasis en el papel de la psicofísica y las expectativas.</p>	<p>Modelo amplio, tiene en cuenta más parámetros y variables que lo hacen teóricamente más concluyente.</p>	<p>Asume el rango de condiciones en las que es posible mantener un equilibrio térmico, contemplando el sudor como relación de enfriamiento.</p>
Desventajas	<p>Los cambios diarios en la temperatura operativa media interior durante las horas ocupadas no debe exceder alrededor de 1K, ni debe superar los 3K el cambio acumulativo de una semana. Estas cifras se aplican a personas sedentarias o poco activas.</p>	<p>Refleja parámetros ambientales o solamente la temperatura del aire, ya sea en el interior o en el exterior. A diferencia de los modelos computacionales (como: PMV-PPD, TSENS-DISC, ET*, SET*, PET, ITS, PMV Fuzzy y PMV Neuronal) que tienen variables referentes al individuo: nivel de actividad metabólica, aislamiento térmico de la ropa, entre otras; o una combinación de estas con los parámetros anteriores.</p>	<p>Solo es válida para valores de temperatura entre 18 y 29°C.</p>	<p>En la práctica poseen menos aplicabilidad, no ocurriendo así con los adaptativos y los empíricos que dependen de variables que pueden ser medidas físicamente.</p>	<p>Aplicar en tiempo real estos índices supone a veces un reto pues, desde el más sencillo hasta el más complejo, requiere de mediciones de varias variables lo que implica tiempo de cómputo y una medición exacta para que el confort que se está ofreciendo no sea erróneo, lo que contribuye a un ahorro energético óptimo.</p>

Nota. (Marchante González & González Santos, 2020)

Sin embargo, estudios realizados por Yau & Chew en el 2014 muestran que el modelo PMV subestima las impresiones térmicas debido a las suposiciones de estado estacionario en el laboratorio durante la derivación del modelo. Aparte, la tasa metabólica y el valor de la ropa derivados de solo una muestra de un grupo de personas dentro del laboratorio también podrían conducir a la inexactitud del modelo PMV. Por esto concluyeron que el modelo PMV no era adecuado para usar en edificios reales debido al entorno físico inestable y las tasas metabólicas (Yau & Chew, 2014).

Estudios mostrados por Alfonso Godoy (Godoy Muñoz, 2012), sirvieron de base para la implantación del modelo adaptativo en el estándar ASHRAE 55 y en el EN UNE 15251. La expresión lineal finalmente adoptada fue la siguiente.

$$T_{\text{comf}} = 0.31 \times T_{\text{a, out}} + 17.8 \quad (4)$$

Macpherson (1962) identificó seis factores claves que influyen en la sensación térmica (Ver Tabla 4): cuatro variables ambientales —temperatura del aire, velocidad del aire, humedad relativa y temperatura radiante media—, junto con dos variables personales —aislamiento de la

#### Tabla 4

##### *Parámetros físicos del ambiente*

vestimenta y nivel de actividad (tasa metabólica)— (Lin & Deng, 2008).

VARIABLES FÍSICAS	VARIABLES PERSONALES
T° del aire (°C)	Nivel de arropamiento (clo)
Velocidad del aire (m/s)	
Humedad relativa (%)	Nivel de actividad (met)
T° media radiante (°C)	

*Nota.* Elaboración propia (2024), empleando Canva a partir de (Lin & Deng, 2008).

Existen también parámetros físicos (Ver Figura 22) derivados de las variables mencionadas, los cuales se utilizan ampliamente para caracterizar y establecer las condiciones de un ambiente térmico (Ver Apéndice A).

**Figura 22**

*Fórmulas parámetros físicos*

**TEMPERATURA MEDIA RADIANTE**

$$T_{mr} = t_a + 0.24 (t_a - t_s) v_a^{1/2} \quad T_{mr} = \frac{\sum T \cdot A}{\sum A}$$

**TEMPERATURA EQUIVALENTE**

$$T_{eq} = \frac{t_s + T_{mr}}{2}$$

**TEMPERATURA OPERATIVA**

$$t_o = \frac{hc \cdot t_s + hr \cdot T_{mr}}{hc + hr}$$

*Nota.* Elaboración propia (2024), empleando Canva a partir de (Lin & Deng, 2008).

El balance térmico del cuerpo humano está directamente relacionado con la conversión de la energía química contenida en los alimentos, medida en calorías, en otras formas de energía útiles para el organismo. Una parte de esta energía se transforma en energía mecánica, utilizada para la contracción muscular y el movimiento; otra se convierte en energía eléctrica, necesaria para la transmisión de impulsos nerviosos; y una fracción importante se libera en forma de calor, contribuyendo al mantenimiento de la temperatura corporal (Fanger, 1970; ISO, 2005). La energía que no logra transformarse en estas formas se almacena en el organismo como compuestos más simples, principalmente grasas e hidratos de carbono, que constituyen reservas energéticas (Guyton & Hall, 2016).

La temperatura corporal humana se mantiene, en condiciones saludables, alrededor de los 37 °C, lo que permite el adecuado funcionamiento de los procesos fisiológicos y enzimáticos

(Guyton & Hall, 2016). El bienestar higrotérmico se alcanza cuando el organismo pierde calor a una velocidad compatible con sus necesidades metabólicas, evitando tanto el sobrecalentamiento como la pérdida excesiva de calor. Este equilibrio se logra mediante procesos homeostáticos que regulan la temperatura corporal y la velocidad o actividad metabólica (M), definida como el ritmo al que el organismo intercambia calor con el medio (Parsons, 2014).

La actividad del metabolismo y del resto de mecanismos de intercambio de energía entre el cuerpo y su entorno se cuantifican en la siguiente expresión (Ver Figura 23):

### Figura 23

#### *Fórmula actividad metabólica*

$$M - W = \pm CV \pm R \pm CC \pm RS + EV + D + A$$

Donde:

M	Velocidad del metabolismo.
W	Energía mecánica efectiva exterior.
CV	Intercambios por convección.
R	Intercambios por radiación.
CC	Intercambios por conducción.
RS	Intercambios de calor latente (evaporación respiratoria) y sensible de productos en la respiración.
EV	Pérdidas por evapotranspiración.
D	Difusión de vapor de agua desde la piel.
A	Energía acumulada.

*Nota.* (Lin & Deng, 2008).

La ecuación simplificada:

$$M = \pm CV \pm R + EV \quad (5)$$

Donde:

M	Velocidad del metabolismo
CV	Intercambios por convección
R	Intercambios por radiación
EV	Pérdidas por evotranspiración

- + Pérdidas, cuando el entorno está a menor T° que el cuerpo
- Ganancias, cuando el entorno está a mayor T° que el cuerpo

La ecuación de confort (Predicted Mean Vote) de Fanger (1972) predice las condiciones necesarias para que el ocupante sienta neutralidad térmica.

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5\,733 - 6,99 \cdot (M - W) - P_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \\ -1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5\,867 - P_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ -3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\}$$

Donde:

- M* Actividad metabólica (W/m<sup>2</sup>)
- P<sub>a</sub>* Presión parcial de vapor de agua en *P<sub>a</sub>*
- W* Trabajo externo; generalmente cero (W/m<sup>2</sup>)
- F<sub>cl</sub>* Factor de superficie de la ropa

Expresión del PMV con parámetros más fácilmente asimilables:

$$PMV = aT + bP_v - c \quad (7)$$

Valores de los coeficientes, a, b, c según sexo y tiempo de exposición (Ver Tabla 5):

**Tabla 5**

Valores de los coeficientes en fórmula PMV

Tiempo	Sexo	a	b	c
1 hora	Hombre	0.220	0.233	5.673
	Mujer	0.272	0.248	7.245
	Ambos	0.245	0.248	6.475
2 horas	Hombre	0.221	0.270	6.024
	Mujer	0.283	0.210	7.694
	Ambos	0.252	0.240	6.859
3 horas	Hombre	0.212	0.293	5.949
	Mujer	0.275	0.255	8.620
	Ambos	0.243	0.278	6.802

Nota. (Fanger, 1970)

La ecuación de insatisfacción (Predicted Percentage of Dissatisfied):

$$PPD = 100 - 95 \exp(-(0,03353 PMV^4 + 0,2179 PMV^2)) \tag{8}$$

A continuación, se presenta una comparación sintética entre los modelos de confort térmico basados en el balance térmico y aquellos sustentados en la teoría adaptativa (Ver Tabla 6), destacando sus fundamentos teóricos, fórmulas, métodos de medición, aplicaciones y limitaciones en diferentes contextos de climatización.

**Tabla 6**

Comparativo entre modelos de confort térmico interior

Comparación	CONFORT TÉRMICO INTERIOR				
	Balance Térmico		Teoría Adaptativa		
Modelos	Estacionarios / Estáticos		Variantes / Adaptativos		
Teorías	PMV (Fanger)	PPD (Fanger)	Nicol & Roaf	Humphreys	Auliciems
Fórmulas	$PMV = aT + bP_{a-c}$	$PPD = 100 - 95 \exp(-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2))$	$T_{m,o} = 17 + 0.38 T_o$	$T_{n,i} = 2.6 + 0.831 T_i$ $T_{m,o} = 11.9 + 0.534 T_o$	$T_{n,i} = 5.41 + 0.731 T_i$ $T_{n,o} = 17.6 + 0.31 T_o$ $T_{n,i,o} = 9.22 + 0.48 t_i + 0.14 T_o$
Medición	Cámaras climáticas		Estudio de campo		
Procesos	Nivel de actividad		Adaptación térmica		
fisiológicos	Tasa de sudoración	T° de la piel	Ajuste de comportamiento	Fisiológicos	Psicológicos
Usos	Aplicable a periodos y tasa metabólica constante		En situaciones donde el control activo del clima no está presente o es limitado.		
Desventajas	No tienen en cuenta variaciones de T° durante el día		Depende del comportamiento del usuario, lo que introduce mayor variabilidad.		
	Problemas de aplicabilidad en edificios ventilados		Puede no ser efectivo en climas extremos, la adaptación conductual no es suficiente.		
Climatización edificios	<b>Activa:</b> Ventilación mecánica		<b>Pasiva:</b> Ventilación natural		<b>Mixta (activa y pasiva)</b>
Estándares internacionales	RITE ISO 7730 (2005)		ASHRAE 55 (2004) UNE-EN 15251		

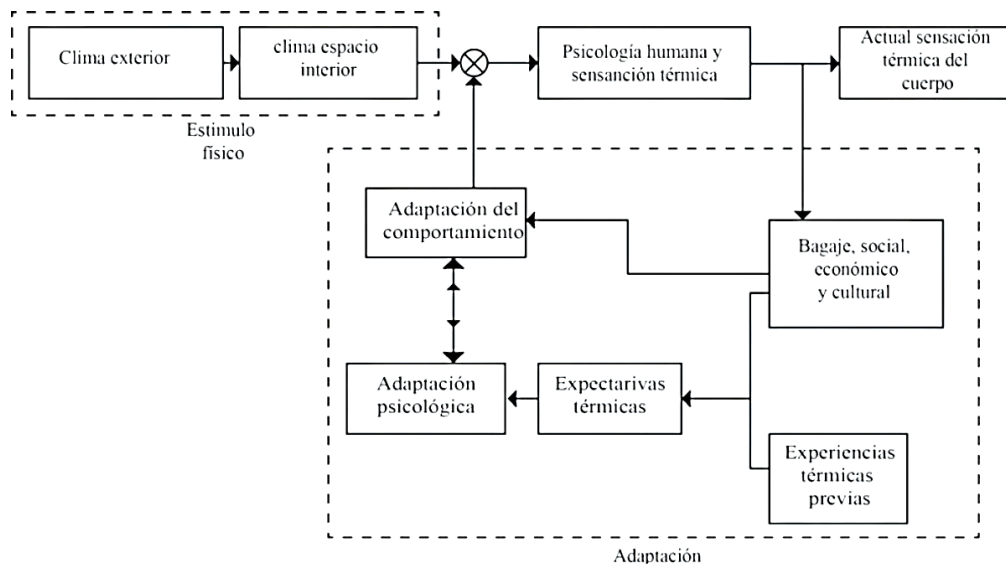
Nota. Elaboración propia, empleando Microsoft Excel, 2025.

Pero, ¿Cómo funciona el proceso de adaptación en ambientes interiores en la edificación?

El proceso de adaptación en ambientes interiores dentro de la edificación se produce como una interacción entre factores físicos, psicológicos, sociales y culturales. Según Djongyang et al. (2010), el clima exterior influye en el clima del espacio interior, lo que actúa como estímulo físico para la percepción térmica humana. Esta percepción está mediada por la psicología y la sensación térmica, que, a su vez, determinan la sensación térmica actual del cuerpo. Dicho proceso está modulado por el bagaje social, económico y cultural del individuo, así como por sus experiencias térmicas previas. La adaptación se manifiesta a través de ajustes en el comportamiento (Ver Figura 24), la adaptación psicológica y las expectativas térmicas, conformando un ciclo de retroalimentación que permite mantener el confort térmico en diversas condiciones ambientales.

**Figura 24**

*Proceso de adaptación térmica en ambientes interiores*



*Nota.* (Djongyang et al., 2010)

El modelo adaptativo, tal como se establece en el estándar ASHRAE 55 y en la norma europea EN UNE 15251, plantea que la temperatura de confort ( $T_{comf}$ ) puede estimarse mediante la expresión lineal:

$$T_{comf} = 0,31 \times T_{a,out} + 17,8 \quad (9)$$

Donde:

$T_{a,out}$  Temperatura exterior media

Este modelo define límites de confort térmico para distintos niveles de aceptabilidad: para una aceptabilidad del 80%, el grupo de sensación térmica media (PMV) debe situarse entre  $-0,85$  y  $+0,85$ , con un porcentaje de personas insatisfechas (PPD) del 20% y un rango de temperatura operativa entre  $-7$  °C y  $+7$  °C respecto a la temperatura de confort; mientras que para una aceptabilidad del 90% (Ver Tabla 7), el PMV se reduce al rango de  $-0,5$  a  $+0,5$ , con un PPD del 10% y un rango operativo más estrecho, de  $-5$  °C a  $+5$  °C.

Estos criterios permiten evaluar y diseñar condiciones interiores que promuevan el bienestar térmico de los ocupantes en función de la temperatura exterior y la adaptabilidad de las personas (ASHRAE, 2017; EN UNE, 2007).

**Tabla 7**

*Límites de confort para una aceptabilidad del 90% y 80%*

Grupo de sensación térmica media (PMV)	PPD	T° Operativa modelo adaptativo
Entre $-0.85$ y $+0.85$	20%	Entre $-7$ y $+7$ °C
Entre $-0.5$ y $+0.5$	10%	Entre $-5$ y $+5$ °C

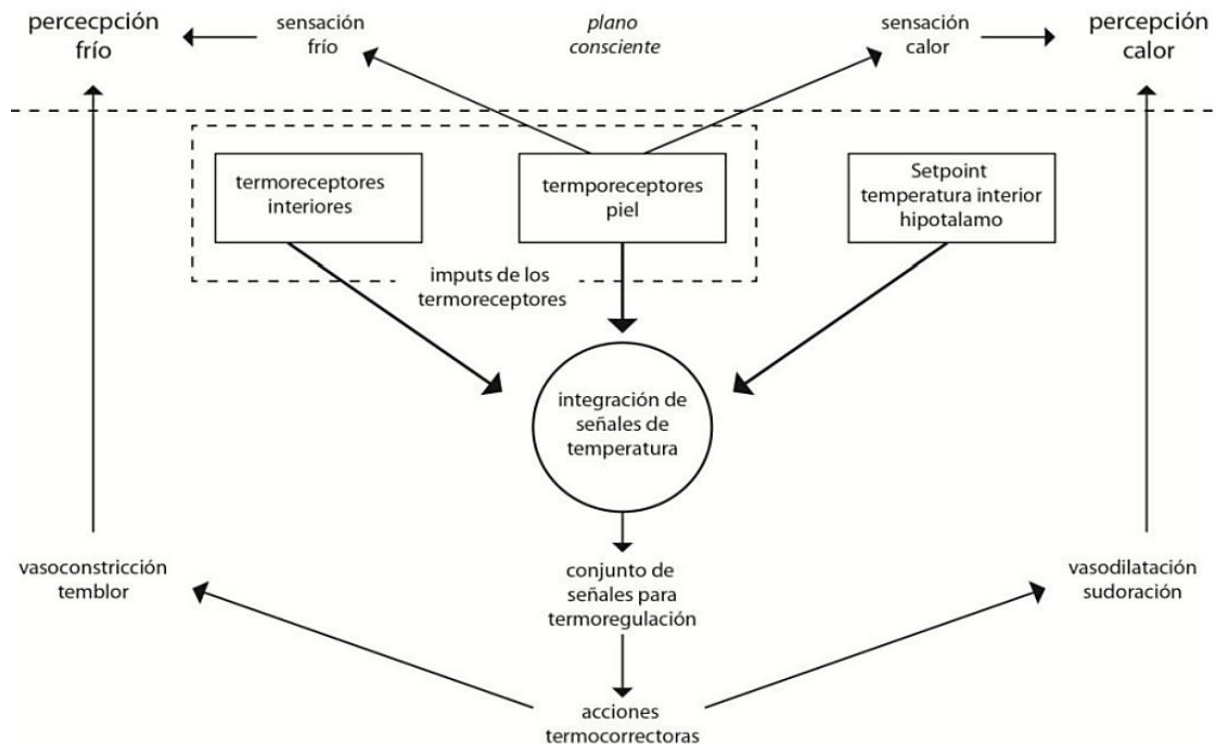
*Nota.* (ASHRAE, 2017; EN UNE, 2007)

La experiencia térmica humana va más allá de la mera neutralidad térmica; implica una dimensión subjetiva y placentera conocida como aliestesia. Este concepto se refiere a la sensación de agrado o desagrado térmico que depende del estado interno del cuerpo y su interacción con estímulos externos (de Dear, 2011).

El proceso de percepción térmica se basa en una compleja integración de señales provenientes de los termorreceptores de la piel y los receptores térmicos internos, los cuales envían información al hipotálamo, que actúa como un regulador del setpoint de temperatura corporal (Ver Figura 25).

**Figura 25**

*Esquema del proceso de sensación y percepción térmica*



*Nota.* (Richard de Dear, 2011)

A partir de esta información, el sistema nervioso genera una respuesta integrada que puede incluir sensaciones conscientes de frío o calor, así como acciones fisiológicas de termoregulación como la vasoconstricción, el temblor, la vasodilatación o la sudoración. La percepción final de confort térmico es, por tanto, el resultado de una evaluación central que compara el estado interno del cuerpo con los estímulos externos, generando placer o discomfort térmico en función de esa interacción (de Dear & Brager, 2011).

El principal propósito de los sistemas HVAC (Heating Ventilating and Air Conditioning, por sus siglas en inglés) en espacios interiores es hacer sentir al ocupante confortable. Sin la determinación del confort térmico humano en tiempo real, no es factible para este tipo de sistemas tener condiciones controladas del aire para el bienestar humano todo el tiempo. Es por ello que se han propuesto índices de confort térmico en tiempo real vía computacional tales como el PMV basado en lógica difusa y en redes neuronales. Ambos índices toman como base el índice PMV de Fanger (Marchante González & González Santos, 2020).

El confort visual y térmico de los ocupantes depende, en gran medida, de las condiciones climáticas ambientales exteriores, las cuales están en constante cambio. En particular, optimizar el confort visual y térmico simultáneamente es un tema complejo debido a los conflictos mutuos entre ellos. La fachada es una interfaz entre el interior y el exterior de los edificios que funciona como un elemento protector y/o regulador frente a las fluctuaciones severas del clima exterior (Hosseini et al., 2019).

Con el objetivo de optimizar el diseño arquitectónico en el ámbito ambiental y energéticamente, existen herramientas computacionales que facilitan el proceso (Ver Tabla 8). Pueden aplicarse en diversas fases del proyecto, aunque resulta más beneficioso iniciar incluyendo este tipo de análisis. Además, sirven como complemento a varios programas de modelado, ya sea BIM o CAD.

Tabla 8

*Tipos de herramientas computacionales para lograr diseños energéticamente eficientes en arquitectura*

Nombre	Ladybug Tools	Sefaira	Insight
<b>Creador</b>	Mostapha Sadeghipour Roudsari y Chris Mackey	Hugh McEvoy y Mads Jensen	Autodesk
<b>Año</b>	2013	2014	2016
<b>Software</b>	Rhinoceros / Grasshopper	SketchUp	Formit / Revit
<b>Función</b>	<p>Incluye 4 plug-ins gratuitos:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li><b>Ladybug:</b> Analiza datos climáticos usando archivos EPW para opciones de diseño con gráficos 2D y 3D.</li> <li><b>Honeybee:</b> Se enfoca en iluminación natural y termodinámica, a través de EnergyPlus/OpenStudio y Radiance para estudios de iluminación diurna y modelado energético.</li> <li><b>Butterfly:</b> Crea simulaciones computacionales de dinámica de fluidos y modelos de turbulencia. Permite modelar patrones de viento urbano, de confort térmico en interiores y estudiar la ventilación.</li> <li><b>Dragonfly:</b> Analiza a nivel urbano y estima fenómenos climáticos.</li> </ol>	<p>Realizar simulaciones anuales de los modelos de SketchUp, para crear diseños energéticamente eficientes.</p> <p>Agiliza la creación y el análisis de opciones, debido a la facilidad y rapidez de modelado.</p> <p>Permite el análisis de:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Uso de energía y emisiones de carbono.</li> <li>Confort térmico.</li> <li>Luz natural.</li> <li>Climatización.</li> </ol>	<p>Los resultados de los análisis hechos en Insight son bastante gráficos e interactivos. Se puede hacer:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Análisis Energético.</li> <li>Simulación Térmica.</li> <li>Evaluación de la cantidad y calidad de la luz natural en el interior del edificio.</li> <li>Análisis de la exposición solar del edificio.</li> <li>Evaluación de cómo las sombras afectan al edificio durante diferentes momentos del día y del año.</li> <li>Análisis de costos y ciclo de vida.</li> </ol>
<b>Desventajas</b>	<p><b>Curva de Aprendizaje:</b> Puede llevar tiempo para usuarios no familiarizados con la programación paramétrica.</p> <p><b>Requisitos de Hardware:</b> Las simulaciones climáticas y de iluminación pueden ser intensivas en términos de recursos computacionales.</p>	<p>No se basa en modelado paramétrico como en Rhino/Grasshopper. Herramienta paga.</p> <p>Dependencia de datos de entrada. Limitaciones en funcionalidades avanzadas. Integración con otros softwares. Disponibilidad de datos climáticos.</p>	<p>Complejidad, la curva de aprendizaje puede ser empinada.</p> <p>La precisión de los resultados está directamente relacionada con la calidad de los datos de entrada.</p> <p>Si el modelo de Revit no está bien definido o los datos son inexactos, los resultados pueden ser menos confiables.</p> <p>Requerimientos de Hardware..</p>

*Nota.* Elaboración propia, empleando Microsoft Excel, 2024.

Por otra parte, en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, se encuentra la información nacional sobre el estado y las dinámicas de los recursos naturales y del ambiente. Estos indicadores ambientales buscan apoyar la generación de conocimiento al servir como herramienta en la toma de decisiones y se clasifican de acuerdo con las siguientes temáticas:

**Agua:** Informan sobre el estado y evolución de la oferta, demanda y calidad del agua en el país.

**Aire:** Relacionados con la contaminación atmosférica.

**Cambio climático:** Guardan relación con las emisiones de GEI en el país.

**Clima:** Información relacionada con la atmósfera, el tiempo y el clima del país, aquí se podrán consultar las características climatológicas de las diferentes regiones del territorio nacional.

**Ecosistemas:** Incluyen los recursos forestales, la dinámica de las coberturas de la tierra, el monitoreo y seguimiento del estado de la calidad de los suelos, las tierras y la dinámica de los glaciares.

**Suelos y tierras:** Monitoreo y seguimiento del estado de la calidad de los suelos.

La normatividad nacional vigente relacionada directamente con estos indicadores ambientales es la siguiente:

- **Resolución 667 de 2016:** Establece los indicadores mínimos de que trata el artículo 2.2.8.6.5.3., del Decreto 1086 de 2015 y adopta otras disposiciones.
- **Decreto 1076 de 2015:** Por medio del cual se expide el decreto único reglamentario del sector ambiental y desarrollo sostenible.
- **Resolución 0643 de 2004:** Por la cual se establece los indicadores mínimos de que trata el artículo 11 del Decreto 1200 de 2004, hoy artículo 2.2.8.6.5.3 del Decreto 1076 de 2015.

- **Decreto 1200 de 2004:** Por el cual se determinan los Instrumentos de Planificación Ambiental y se adoptan otras disposiciones.
- **Decreto 1743 de 2016:** Por el cual se reglamenta el artículo 160 de la ley 1753 de 2016 y el Sistema Estadístico Nacional SEN.

Adicionalmente, algunas iniciativas internacionales de indicadores ambientales son: la Iniciativa Latinoamericana y Caribeña para el Desarrollo Sostenible (ILAC), que busca establecer modelos de producción y de vida sostenibles; Instrumentos de divulgación de información ambiental de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe – CEPAL; la Convención de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación; y la Convención de las Naciones Unidas contra la Desertificación.

### 3.4. Ecoturismo

El ecoturismo es una modalidad turística especializada y sostenible, enfocada a crear conciencia sobre el valor de las áreas naturales, a través de actividades de esparcimiento tales como: la contemplación, el estudio de ecosistemas, el deporte y la cultura (Ver Figura 26). Contribuyendo al cumplimiento de sus objetivos de conservación, a la generación de oportunidades socioeconómicas a las poblaciones locales y regionales (Resolución 531/20136).

La recreación es uno de los usos públicos amparados por el Decreto 622 de 1977 y la constitución colombiana, convirtiendo en una obligación del Estado fomentarla en el marco de la función social que le corresponde a Parques Nacionales. El ecoturismo debe ser entendido no solo como una actividad permitida sino una estrategia de conservación para las áreas protegidas con vocación ecoturística del Sistema de Parques Nacionales Naturales (Cubillos Ortiz et al., 2018).

El uso de carácter público de las áreas protegidas consiste en disfrutar de la oferta de bienes y servicios ecosistémicos (Ver Figura 26), a través de las oportunidades recreativas que ofrecen al visitante (Ver Figura 27). Los servicios ecosistémicos o también llamados servicios ambientales, son recursos o procesos naturales de los ecosistemas que favorecen a los seres vivos. Con el artículo de Westman publicado a finales de los setenta se acuñó en el campo de la investigación la idea de los servicios ambientales (Gomez-Baggethun ´ et al., 2010; Westman, 1977). Aunque el concepto se introdujo de manera integral en la literatura por Ehrlich y Mooney a principios de los ochenta (Costanza et al., 2017; Ehrlich y Mooney, 1983), esta noción no ganó popularidad hasta finales de los noventa, cuando los servicios de los ecosistemas se midieron globalmente por Costanza et al. (1997) (Torres et al., 2021).

En el campo del turismo sostenible resalta el concepto de ecoeficiencia, el cual fue introducido por primera vez por Gössling et al. (2005). A medida que los problemas ambientales causados por el turismo se vuelven cada vez más preocupantes, la industria turística se ha enfrentado al desafío de lograr un equilibrio entre el crecimiento del turismo y la protección ambiental, es decir, el llamado desafío del turismo sostenible (Bella, 2018; Hall, 2013). Para abordar el problema mencionado anteriormente, se ha empleado el concepto de "eficiencia ecológica" en el campo del turismo para proporcionar una guía cuantitativa para su crecimiento (Zha et al., 2020).

**Figura 26**

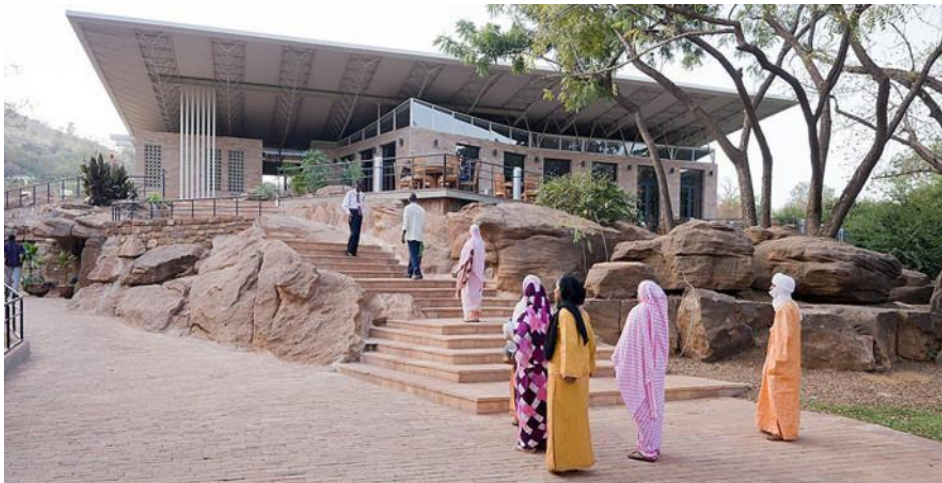
*Ejemplo nacional de arquitectura ecoturística. Ecohabs, PNN Tayrona*



*Nota.* <https://www.ecohabsantamarta.com/es/parque-tayrona/>

**Figura 27**

*Ejemplo internacional de arquitectura ecoturística. Parque Nacional de Malí, Kere Architecture*



*Nota.* Iwan Baan. <https://www.archdaily.pe/pe/626274/parque-nacional-de-mali-kere-architecture>

Dentro de las áreas protegidas del territorio nacional, se encuentra el subpáramo (Ver Figura 28), conocido también como páramo bajo y considerado como una zona de transición entre el límite superior del bosque altoandino y el páramo propiamente dicho. Es difícil precisar dónde se inicia el subpáramo o hasta dónde asciende el límite superior del bosque altoandino, porque los

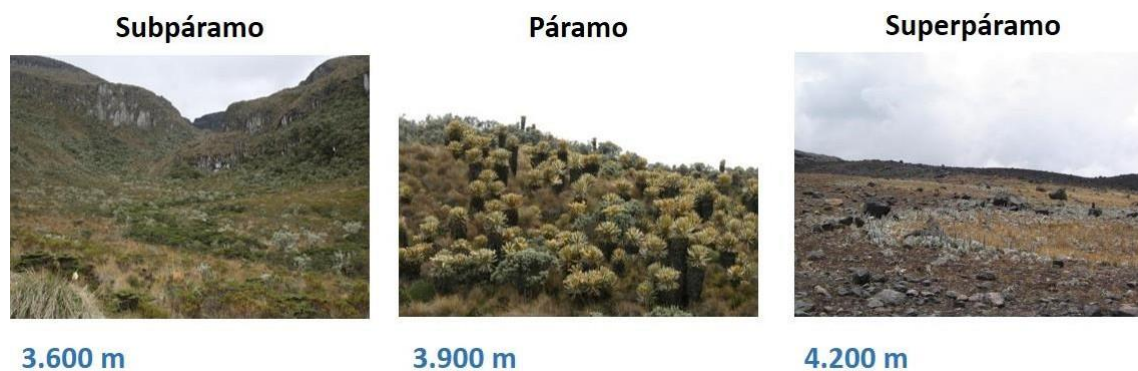
factores que determinan estos límites son muy variables. No siempre se presenta el contacto del páramo bajo con selvas altoandinas densas; esta transición puede ocurrir abruptamente entre espesas formaciones arbustivas con los pajonales–frailejonales, o en un gradiente suave en extensas laderas de vertientes húmedas; el mayor contraste se da en la región extremadamente seca del cañón del Chicamocha, donde algunas cactáceas de zonas áridas se entremezclan con la vegetación paramuna.

La franja de subpáramo tiene una temperatura media mensual de 10,2°C, con una máxima de 17,3°C y una mínima de 3,1°C. La humedad relativa promedio es de 85% y la evaporación mensual de 82 mm; su precipitación promedio anual es de 1.716 mm, con una distribución unimodal o biestacional, cuyo período lluvioso va de abril a noviembre y el mes más húmedo es julio, con 192 mm; el período seco se presenta entre diciembre y marzo; enero es el mes más seco, con 57,7 mm (Rivera, 2001). Debido al disturbio antrópico y a otros factores como fuertes pendientes y suelos superficiales, en la cordillera Oriental es frecuente observar zonas paramizadas a 2.800 msnm; sin embargo, es común en esta cordillera que el límite inferior del subpáramo se ubique entre los 3.000 y los 3.200 msnm y el superior a 3.500 msnm, lugar donde ya hay evidencia, desde el punto de vista vegetacional y climático, de la existencia del páramo propiamente dicho; allí los arbustos son mucho más escasos y la vegetación está dominada por el pajonal– frailejónal. En las cordilleras Central y Occidental, por factores topográficos y de humedad, el subpáramo se inicia a mayor altitud, aproximadamente entre los 3.700 y los 3.900 msnm y llega hasta cerca de los 4.000 msnm, por lo cual conforma una franja mucho más estrecha.

Se presentan cerca de 112 comunidades vegetales, como resultado de una gran heterogeneidad de condiciones ambientales y fisiográficas, en muchos casos determinadas por factores locales de temperatura, humedad, suelos, precipitación y contacto con el bosque altoandino; entre ellas se destacan algunos árboles propios de los bosques enanos, densos matorrales compuestos principalmente por ericáceas, varios tipos de chuscales y algunos frailejones.

### Figura 28

#### *Ecosistemas de alta montaña*



Nota. <https://catalogofloraaltamontana.eia.edu.co/project>

El presente trabajo se enmarca en la etapa de diseño arquitectónico esquemático de un proyecto de carácter ecoturístico localizado en un ecosistema de subpáramo colombiano, entendido el ecoturismo como un marco contextual del proyecto que incluye, pero no se limita a, criterios de integración con el entorno natural, bajo impacto ambiental y relación directa con el paisaje. No obstante, el estudio **no aborda el diseño de actividades ecoturísticas, senderos interpretativos, estrategias de manejo ambiental ni decisiones de ordenamiento territorial**, los cuales se consideran previamente definidos conforme a lineamientos de conservación y normatividad ambiental vigente. El alcance del trabajo se restringe al **análisis arquitectónico y ambiental de la envolvente edificada**, sin extenderse a la planificación integral del ecoturismo.

El ecoturismo no se incorpora en este trabajo como un eje adicional que complejice el análisis, sino como un marco conceptual operativo que permite delimitar de manera precisa las variables ambientales y espaciales que inciden directamente en el desempeño del proyecto arquitectónico. De acuerdo con The International Ecotourism Society (TIES), el ecoturismo se define como un turismo responsable en áreas naturales que conserva el medio ambiente y mejora el bienestar de las comunidades locales, lo cual coincide con los objetivos de sostenibilidad ambiental y confort del hábitat abordados en esta investigación (TIES, 2015). En este sentido, el trabajo no aborda la totalidad de las dimensiones sociales, económicas y culturales del ecoturismo, sino que acota su aplicación a aquellas variables pertinentes al estudio —como la relación con el entorno natural, la minimización del impacto ambiental y el desempeño pasivo de la edificación—, tal como lo plantean Weaver (2001) y la Organización Mundial del Turismo (OMT, 2018). Esta delimitación, permite que el ecoturismo funcione como un **criterio de contextualización**, y no como un objetivo paralelo al alcance central del trabajo. Además, de acuerdo a lo señalado por Weaver (2001) y Buckley (2009), el ecoturismo integra dimensiones ambientales, sociales, culturales y de gestión, muchas de las cuales son difíciles de traducir directamente a funciones objetivo cuantificables dentro de modelos de optimización computacional tempranos.

#### 4. Metodología y ejemplos de validación con sus resultados

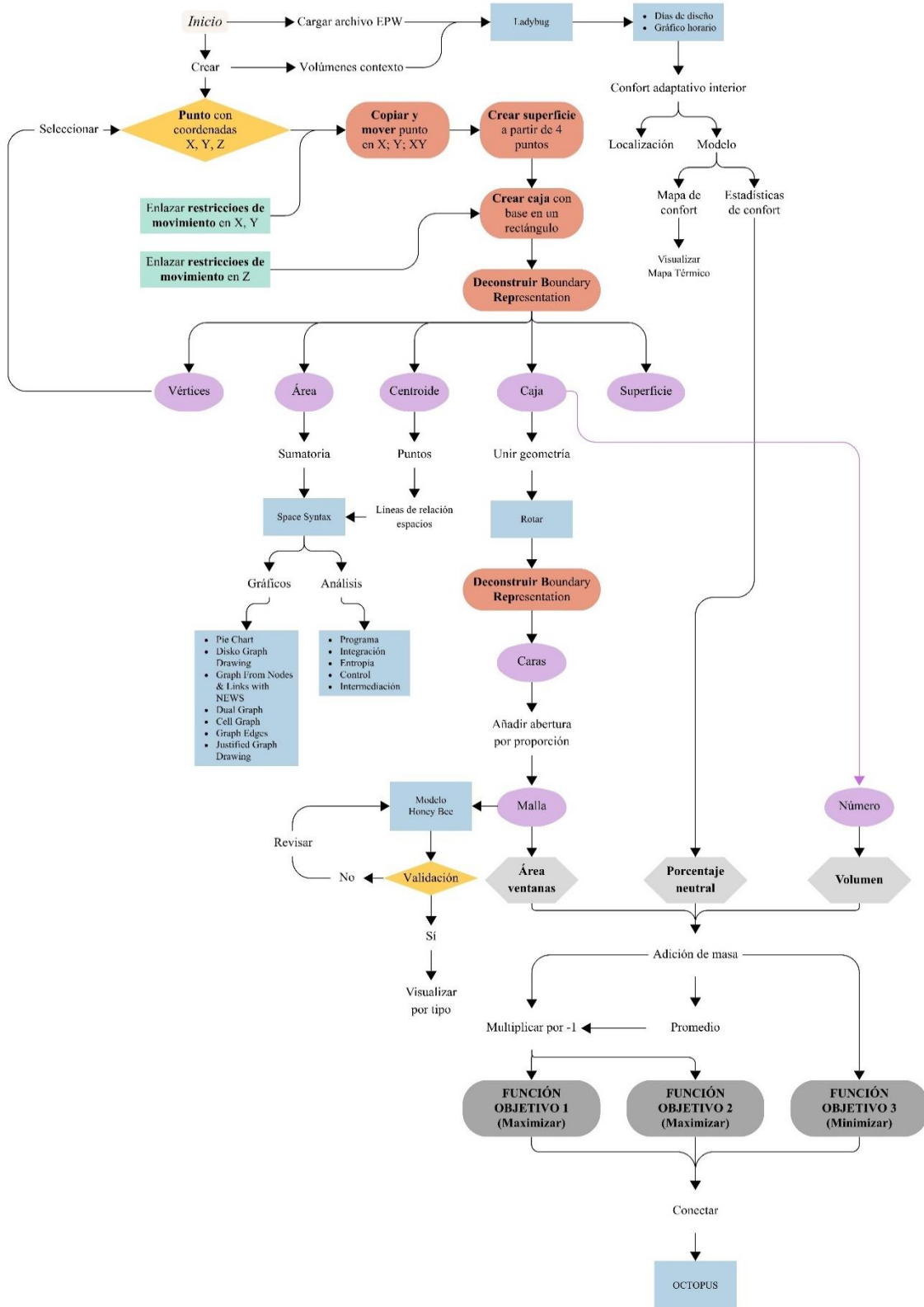
La presente investigación propuso la implementación de un método de optimización multiobjetivo para apoyar la toma de decisiones en el diseño arquitectónico de un proyecto ecoturístico, particularmente en la etapa inicial o esquemática. El procedimiento (Ver Figura 29) se organizó

en fases secuenciales, cada una orientada al cumplimiento de los objetivos específicos planteados (Ver Apéndice B).

**Figura 29**

*Metodología planteada para el diseño conceptual usando optimización multiobjetivo*

Metodología de diseño conceptual implementando optimización multiobjetivo en Grasshopper - Rhinoceros



Nota. Elaboración propia en Canva, 2025.

#### 4.1. Fase I: Formulación del problema de optimización

**Objetivo general asociado:** Implementar un método de optimización multiobjetivo para el diseño arquitectónico de un proyecto ecoturístico.

En esta fase se realizó la comparación y selección de métodos de optimización multiobjetivo adecuados para el caso de estudio. Posteriormente, se definieron las funciones objetivo, las variables de decisión, las restricciones y el espacio de búsqueda. El planteamiento inicial del problema consideró como metas principales la maximización del confort térmico interior (mayor exposición solar de fachadas y aumento de temperatura interna) y la maximización de visuales a través de la configuración de aberturas en las fachadas.

Además de los resultados planteados en el alcance inicial, en este trabajo se desarrolló una extensión metodológica que incorporó un tercer objetivo de optimización, adicional a los dos previamente definidos. Consistente en minimizar los nueve volúmenes que conforman los cubos de la unidad habitacional. Esta exploración excede los límites propuestos al inicio de la investigación, pero constituye un aporte significativo al demostrar el potencial de la herramienta generada para abordar escenarios de mayor complejidad. Los resultados obtenidos en este ejercicio complementario no solo refuerzan la validez de la metodología aplicada, sino que también evidencian su capacidad de ampliarse hacia nuevos problemas de diseño arquitectónico que requieran la evaluación simultánea de múltiples variables.

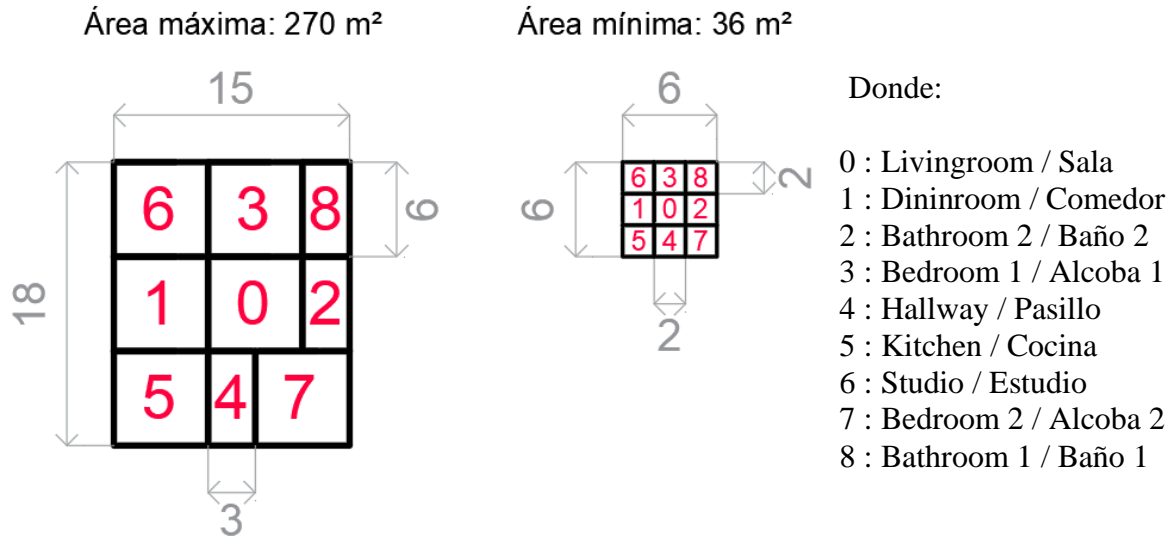
La elección de Octopus como herramienta de optimización multiobjetivo, para este estudio, se fundamentó en su integración directa con Grasshopper, lo cual facilitó la vinculación entre el modelo paramétrico arquitectónico y los algoritmos evolutivos necesarios para explorar soluciones de diseño.

Octopus permitió manejar simultáneamente múltiples funciones objetivo, variables de decisión y restricciones, generando un conjunto de soluciones no dominadas que conformaron el frente de Pareto. Además, su implementación de algoritmos reconocidos (Ver Apéndice C) como SPEA-II (Zitzler et al., 2001) y HypE (Bader & Zitzler, 2011) garantizó la robustez en la búsqueda de alternativas y la diversidad en los resultados. Esta capacidad lo convirtió en un método idóneo para el presente estudio, ya que permitió comparar de manera sistemática distintas configuraciones de emplazamiento, orientación y diseño de fachadas, priorizando tanto el confort térmico interior como las condiciones de visuales exteriores, objetivos centrales del proyecto ecoturístico.

Teniendo en cuenta la magnitud del proyecto ecoturístico, el trabajo de grado contempló únicamente el diseño esquemático de una de las unidades habitacionales. Para la formulación del problema, los diseños de espacio estuvieron restringidos a la asignación de dimensiones establecidas de relación tipológica funcional para dicha unidad, las cuales fueron: de una sola planta, con un área máxima total de 270 m<sup>2</sup> (Ver Figura 30) y con una altura variable entre: 2,5 m – 5 m (Ver Figura 31).

### **Figura 30**

*Diagrama visto en planta del rango de áreas del diseño conceptual*



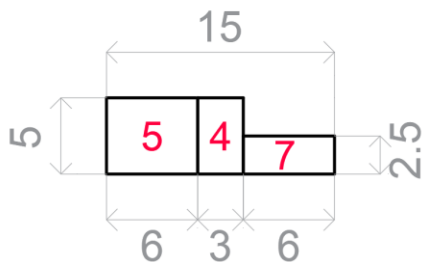
Nota. Elaboración propia en AutoCAD versión 2022, 2025.

**Figura 31**

Diagrama alzado del rango de alturas del diseño conceptual

Altura mínima: 2,5 m

Altura máxima: 5 m



Nota. Elaboración propia en AutoCAD versión 2022, 2025.

Las variables (Ver Figura 32) fueron evaluadas para un periodo fijo (Ver Figura 33) y localización determinada, con características de zona altitudinal de subpáramo (Ver Apéndice D).

La cantidad total de variables son 40:

1. Dimensión en el eje Y de cada cubo (son 9 habitaciones en total) puede ser desde **2,00 m hasta 6,00 m**

2. Dimensión en el **eje X** de cada cubo (**9** en total) puede ser desde **2,00 m** hasta **6,00 m** para las habitaciones **6, 3, 1, 0, 5, 7** y desde **2,00 m** hasta **3,00 m** para las habitaciones **8, 2 y 4**.
3. Dimensión en el **eje Z** (altura) de cada cubo (son **9** habitaciones en total) puede ser desde **2,50 m** hasta **5,00 m**
4. **Rotación** de la planta (**plano XY**) desde el mismo eje central de **0°** hasta **359°**.
5. **Factor de proporción** (modelo usando Honeybee) de ventanas en las **12 fachadas exteriores**, correspondientes a las habitaciones **6, 3, 8, 1, 2, 5, 4 y 7**. Puede variar de **0,00** a **0,95** en todas las habitaciones (8), pero nunca ser 0,00 en todas, ya que invalidaría el modelo a analizar.

Restricciones:

1. Dimensiones en **eje Y** (9 habitaciones): (10)

$$2,00 \leq y_i \leq 6,00 \quad \forall_i \in \{0,1,2,3,4,5,6,7,8\}$$

2. Dimensiones en **eje X** (9 habitaciones): (11)

$$\begin{aligned} 2,00 \leq x_i \leq 6,00 & \quad \forall_i \in \{0,1,3,5,6,7\} \\ 2,00 \leq x_i \leq 3,00 & \quad \forall_i \in \{2,4,8\} \end{aligned}$$

3. Dimensiones en **eje Z** (9 habitaciones): (12)

$$2,50 \leq z_i \leq 5,00 \quad \forall_i \in \{0,1,2,3,4,5,6,7,8\}$$

4. Rotación global de la planta: (13)

$$0^\circ \leq \theta \leq 359^\circ$$

5. Factor de proporción de ventanas (*Window-to-Wall Ratio* en fachadas exteriores):

$$WWR = \frac{\text{Área ventana}}{\text{Área fachada}} \quad (14)$$

Definición del conjunto de fachadas exteriores: (15)

$$\mathcal{F} = \{(6, N), (6, W), (8, N), (8, E), (5, S), (5, W), (7, S), (7, E), (3, N), (1, W), (2, E), (4, S)\}$$

Donde:

1, ..., 8      Espacio interior de la unidad habitacional (identificador del cubo)

*N*            North/Norte

*W*            West/Occidente

*E*            East/Oriente

*S*            South/Sur

Cotas por fachada: (16)

$$0,00 \leq WWR_{r,s} \leq 0,95 \quad \forall (r, s) \in \mathcal{F}$$

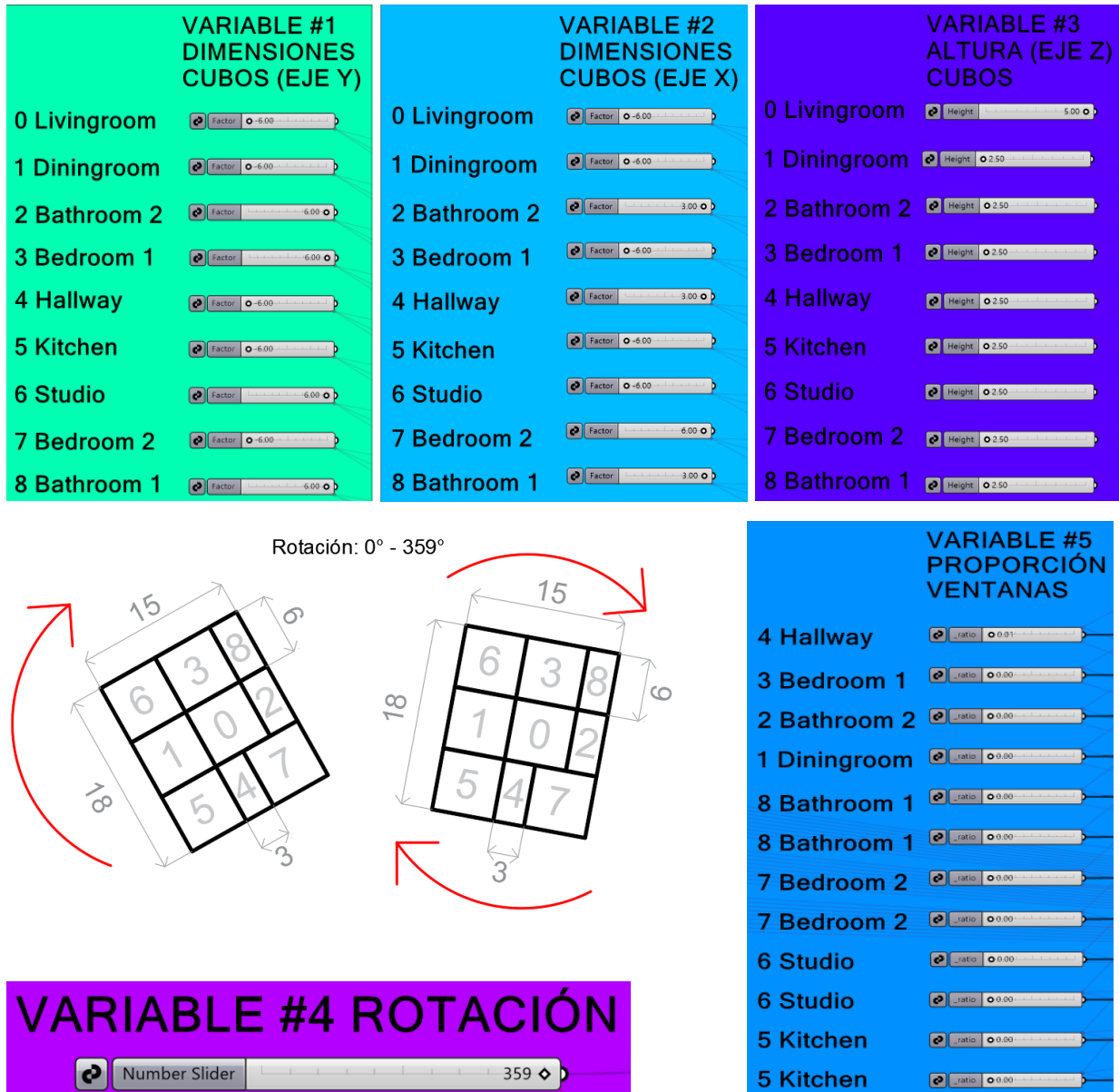
Condición de validez (no todas cero): (17)

$$\sum_{(r,s) \in \mathcal{F}} WWR_{r,s} \geq \mathcal{E}$$

donde  $\mathcal{E}$  es un valor pequeño positivo (ej.: 0,01).

Figura 32

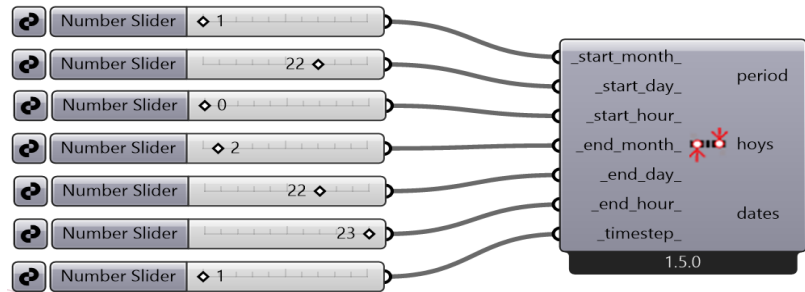
Variables del problema de optimización multiobjetivo planteado



Nota. Elaboración propia en AutoCAD versión 2022, 2025.

Figura 33

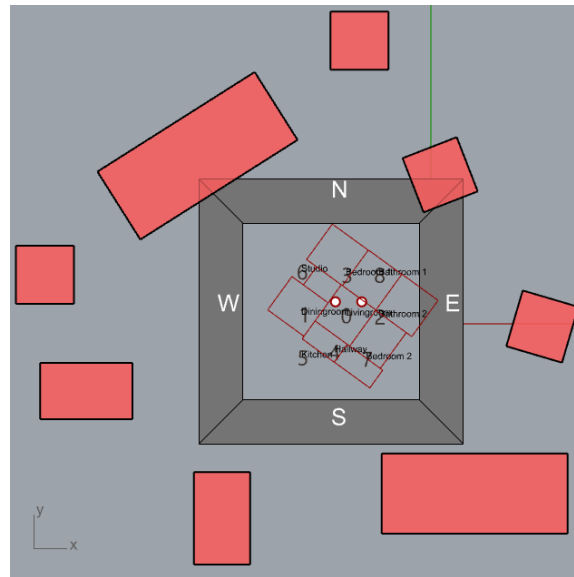
*Periodo de análisis del modelo*



*Nota.* Elaboración propia en Rhinoceros 7, 2024.

#### 4.1.1. Límites de los rangos posibles

Para establecer los criterios de evaluación dentro del proceso de optimización multiobjetivo, se definieron los **rangos máximos y mínimos posibles** para cada una de las tres funciones objetivo consideradas. El modelo base está compuesto por **nueve cubos unidos** (Ver Figura 34), cuyas dimensiones y proporciones de ventanas son variables. Los límites expuestos a continuación permiten comprender el rango de desempeño alcanzable por las soluciones generadas en el proceso de optimización.

**Figura 34***Definición volúmenes y contexto*

*Nota.* Elaboración propia en Rhinoceros, usando Grasshopper, 2023.

#### ***4.1.1.1. Maximizar el área de las ventanas***

La primera función objetivo busca **maximizar el área total de las ventanas en fachada**, la cual se calcula a partir de la **suma del área de cada ventana** más el **factor de proporción** (**WWR**: Window-to-Wall Ratio en inglés) asignado a cada una.

- El valor máximo del WWR considerado es **0.95 por ventana**, lo que corresponde a **11.4** en total, ya que el modelo posee **12 fachadas con ventanas**.
- El valor mínimo posible del WWR es **0.01**, es decir, solo una ventana en una fachada en total.

- El **área máxima total de ventanas** es de **313.5 m<sup>2</sup>**, por lo que al sumarle el máximo WWR se obtiene un valor total máximo de **324.9** para esta función objetivo.
- El **valor mínimo** se aproxima a cero, en casos donde las dimensiones de ventana son reducidas al mínimo permitido y el WWR toma su valor más bajo.

El fin del diseño fue controlar las necesidades térmicas a partir de su morfología. Lo anterior, se realizó empleando las siguientes funciones objetivo: **1. Maximizar el área total de ventanas ( $f_1$ )**.

El área de ventanas en fachada  $j$  será: (18)

$$A_j = W_j \cdot A_{fachada_j}$$

Donde:

$A_{fachada}$  depende de las dimensiones  $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$  de la habitación correspondiente.

Entonces: (19)

$$f_1 = \sum_{j=1}^{12} A_j$$

#### ***4.1.1.2. Maximizar el porcentaje neutral***

La segunda función objetivo se enfoca en **maximizar el porcentaje de horas en confort térmico neutral**, calculado con base en el **modelo de confort adaptativo ASHRAE 55** y el archivo climático **EPW de Bridgeport.sonora.Junction**.

- Al analizar el archivo climático sin considerar ningún modelo ni contexto urbano, se obtuvo un **14 % de horas en confort neutral** durante los **Winter Design Days (Ann Htg**

**99 %)** y **13 % de horas en confort neutral** durante los **Summer Design Days (Ann Clg 2 % Conds DP⇒ MDB).**

- Al incorporar el **contexto urbano circundante**, las edificaciones rojas que rodean el modelo (Ver Figura 34), el valor aumentó ligeramente a **15 % en invierno y a 14% en verano.**
- Con el **modelo de los 9 cubos** y tras una optimización inicial basada en la rotación, el mejor valor alcanzado fue de **42.04 %**, correspondiente a un rango de **167° a 172° de rotación**, utilizando un **área mínima de ventanas en fachada.**

Función objetivo: **2. Maximizar el porcentaje de horas en rango de confort térmico adaptativo neutro ( $f_2$ ).**

Usando Honeybee + EnergyPlus, se obtuvo el porcentaje de horas en el rango neutro según ASHRAE 55 adaptativo: (20)

$$f_2 = \frac{H_{neutral}}{H_{total}} \times 100$$

Donde:

$H_{neutral}$  = número de horas en rango de confort térmico adaptativo neutro

$H_{total}$  = total de horas analizadas en el periodo fijo

Formulación general: (21)

$$\text{Maximizar } f_1(X_i, Y_i, Z_i, \theta, W_j), \quad f_2(X_i, Y_i, Z_i, \theta, W_j)$$

Sujeto a: (22)

$$2,00 \leq Y_i \leq 6,00 \quad (i = 1, \dots, 9)$$

$$2,00 \leq X_i \leq 6,00 \quad (i \in \{6,3,1,0,5,7\})$$

$$2,00 \leq X_i \leq 3,00 \quad (i \in \{8,2,4\})$$

$$2,50 \leq Z_i \leq 5,00 \quad (i = 1, \dots, 9)$$

$$0^\circ \leq \theta \leq 359^\circ$$

$$0,00 \leq W_j \leq 0,95 \quad (j = 1, \dots, 12)$$

$$\sum_{j=1}^{12} W_j > 0$$

En Octopus, los inputs fueron las 40 variables, y los outputs:

$f_1 \rightarrow$  área total de ventanas.

$f_2 \rightarrow$  % de horas en confort neutro.

Variables de decisión:

$Y_i =$  dimensión en eje  $Y$  de la habitación  $i$ , con  $i=1, \dots, 9$ .

$$2,00 \leq Y_i \leq 6,00$$

$X_i =$  dimensión en eje  $X$  de la habitación  $i$ .

Para  $i = \{6,3,1,0,5,7\}$ :

$$2,00 \leq X_i \leq 6,00$$

Para  $i = \{8,2,4\}$ :

$$2,00 \leq X_i \leq 3,00$$

$Z_i =$  altura de la habitación  $i$ , con  $i=1, \dots, 9$ .

$$2,50 \leq Z_i \leq 5,00$$

$\theta =$  ángulo de rotación de la planta.

$$0^\circ \leq \theta \leq 359^\circ$$

$W_j =$  factor de proporción de ventana en la fachada  $j$ , con  $j=1, \dots, 12$ .

$$0,00 \leq W_j \leq 0,95$$

Restricción adicional (evita que todas las ventanas den 0):

$$\sum_{j=1}^{12} W_j > 0$$

#### 4.1.1.3. Minimizar el volumen del modelo

La tercera función objetivo corresponde a **minimizar el volumen total del conjunto** conformado por los nueve cubos.

- El **volumen mínimo posible** es de **90 m<sup>3</sup>**, calculado para cubos de **2 m × 2 m × 2.5 m**, es decir:  $2 \times 2 \times 2.5 \times 9 = 90 \text{ m}^3$
- El **volumen máximo posible** es de **1.350 m<sup>3</sup>**, correspondiente a una combinación de seis cubos grandes de **6 m × 6 m × 5 m** y tres cubos medianos de **3 m × 3 m × 5 m**, calculado así:  $6 \times 6 \times 6 \times 5 + 6 \times 3 \times 3 \times 5 = 1.350 \text{ m}^3$
- Para esta función, el componente vinculado en **Octopus** fue el resultado del **Bounding Box** de cada volumen.
  - El valor mínimo del Bounding Box fue de **28 unidades por cubo**, es decir **252 en total** ( $28 \times 9$ ).
  - En el escenario máximo, el Bounding Box alcanzó **192 por cada cubo de 6 m × 6 m** y **126 por cada cubo de 3 m × 6 m**, lo que da un total de **1.530 unidades** ( $192 \times 6 + 126 \times 3$ ).

Por tanto, la formulación de esta función objetivo es: **3. Minimizar el volumen ( $f_3$ )**. (23)

$$\text{Minimizar } f_3 = \sum_{i=1}^9 V_i$$

donde:

$$V_i = X_i \times Y_i \times Z_i$$

$X_i, Y_i, Z_i$  corresponden a las dimensiones en ejes X, Y y Z de cada módulo habitacional  $i$ .

#### 4.2. Fase II: Definición de la distribución interna

**Objetivo específico asociado:** Definir la distribución de los usos internos en planta de una unidad habitacional basado en la sintaxis del espacio.

En esta etapa se desarrolló la configuración espacial de la unidad habitacional. Se definieron los espacios que conformaron el programa: 0. Sala (Livingroom), 1. Comedor (Diningroom), 2. Baño 2, 3. Alcoba 1, 4. Pasillo (Hallway), 5. Cocina, 6. Estudio (Studio), 7. Alcoba 2 y 8. Baño 1.

La organización en planta se guió por criterios de habitabilidad y funcionalidad y se evaluó mediante la metodología de sintaxis espacial (Space Syntax), que cuantificó relaciones espaciales clave —**integración, control/intermediación y profundidad**— para transformar criterios cualitativos (sociabilidad, privacidad, jerarquía de circulación) en métricas operativas.

Concretamente, los indicadores de Space Syntax se aplicaron así: se buscó alta integración para los espacios sociales (sala, comedor y estudio) para favorecer la accesibilidad y las visuales hacia el paisaje; se requirió mayor control / menor integración en las alcobas (3 y 7) para garantizar privacidad; y se limitó la profundidad del pasillo (4) para optimizar ventilación y reducción de recorridos internos. Todo ello se ejecutó bajo las restricciones tipológicas del proyecto: una sola planta, área máxima total de 270 m<sup>2</sup> y altura variable entre 2.5 m y 5 m.

De este modo, la sintaxis espacial permitió orientar la configuración arquitectónica hacia distribuciones que no solo consideraron el confort térmico y las visuales, sino que también integraron criterios de funcionalidad y habitabilidad propios del contexto ecoturístico.

#### **4.3. Fase III: Optimización de aberturas en fachada**

**Objetivo específico asociado:** Hallar soluciones no dominadas para el confort térmico interior y la configuración de las aberturas en las fachadas de una unidad habitacional según las funciones objetivo.

Una vez se definió la distribución interna, se delimitaron las dimensiones del volumen arquitectónico y se modelaron las aberturas exteriores (ventanas) como variables de decisión dentro del proceso de optimización. Para la evaluación del desempeño ambiental se emplearon los complementos Ladybug y Honeybee en Grasshopper. Ladybug se utilizó para importar y procesar datos climáticos locales (archivos EPW) y estableció condiciones de radiación e iluminación natural, lo que permitió evaluar el desempeño en términos de confort térmico interior adaptativo.

Por su parte, Honeybee permitió diferenciar los elementos constructivos del modelo — techos, muros y ventanas— y generar aberturas a partir de un ratio o factor de proporción respecto a la superficie de la fachada. Este procedimiento garantizó la coherencia geométrica y paramétrica de las alternativas, facilitó la evaluación de la relación entre la proporción de aperturas y el confort térmico interior.

El análisis de confort térmico se realizó mediante el modelo LB Adaptive Comfort, que evaluó la aceptabilidad de las condiciones térmicas en función de la temperatura operativa y los rangos adaptativos definidos por ASHRAE 55.

Finalmente, con esta configuración se implementó un algoritmo evolutivo en Octopus (Ver Sección 6), que identificó configuraciones no dominadas que equilibraron la apertura de fachadas con el desempeño térmico. De esta manera, se generó un conjunto de soluciones de compromiso para el diseño esquemático de la unidad habitacional.

#### **4.4. Fase IV: Determinación del emplazamiento y orientación**

**Objetivo específico asociado:** Determinar el emplazamiento de una unidad habitacional en términos de orientación medida en grados de rotación en el plano XY.

En esta fase se abordó el emplazamiento de la unidad habitacional. Para ello, se establecieron los parámetros de orientación en el plano XY, se definió el rango de grados de rotación a evaluar. A través del proceso de optimización, se determinaron las posiciones y orientaciones más adecuadas del volumen, con el fin de mejorar el desempeño térmico, la captación solar y la relación visual del espacio con su entorno.

#### **4.5. Fase V: Integración y validación**

**Objetivo específico asociado:** Configurar una herramienta interactiva automatizada que permita presentar opciones de diseño esquemático.

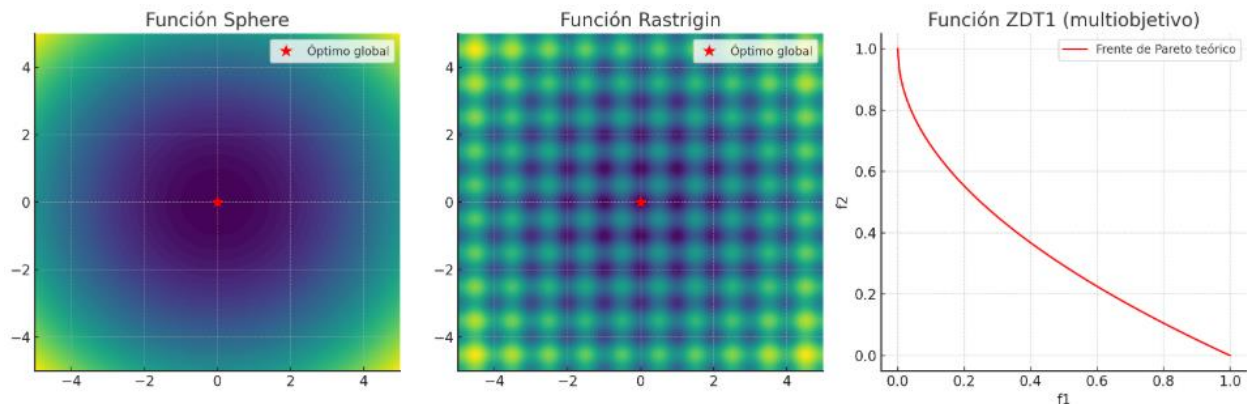
Finalmente, los resultados de las fases anteriores se procesaron y analizaron. Se realizó una segunda optimización multiobjetivo a partir del Frente de Pareto inicial, con el fin de descartar las alternativas que no cumplan con los criterios mínimos de confort establecidos. Posteriormente, se integraron todas las herramientas y algoritmos aplicados en un flujo de trabajo consolidado, obteniendo así un nuevo Frente de Pareto. Este frente representó un conjunto de opciones morfológicas para el diseño conceptual de la unidad habitacional y facilitó la toma de decisiones en el marco del proyecto ecoturístico.

#### 4.5.1. Validación optimización con Octopus

Para validar el correcto funcionamiento del algoritmo de optimización implementado en Octopus, se recurrió al uso de funciones matemáticas de prueba ampliamente empleadas en la literatura para evaluar la eficacia de algoritmos evolutivos. Estas funciones cuentan con soluciones teóricas conocidas (Ver Figura 35), lo que permite verificar si los resultados obtenidos coinciden con lo esperado.

### Figura 35

*Funciones para validación de resultados en Octopus*



*Nota.* Hansen y Ostermeier, 2001; Deb et al., 2002; Zhang & Li, 2007.

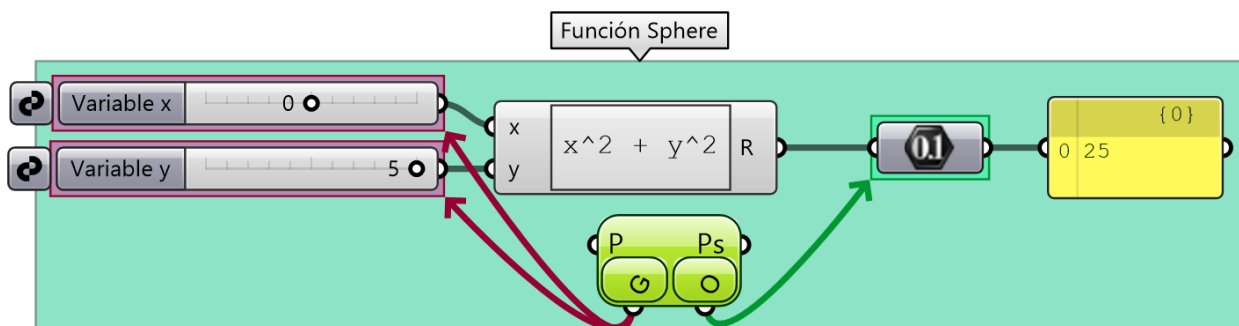
La **función Sphere** se define como: (24)

$$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$$

cuyo mínimo global está en (0,0,...,0) con un valor de  $f(x)=0$ . Al implementarla en Grasshopper (Ver Figura 36) y ejecutar la optimización con Octopus, los resultados convergieron correctamente hacia dicho mínimo, confirmando que el algoritmo reproduce con precisión la solución teórica esperada. Esto valida su desempeño en problemas unimodales convexos y sencillos, en línea con lo reportado por Hansen y Ostermeier (2001).

**Figura 36**

*Configuración de la optimización en Octopus de la Función Sphere*



*Nota.* Elaboración propia, 2022.

La **función Rastrigin** se expresa como:

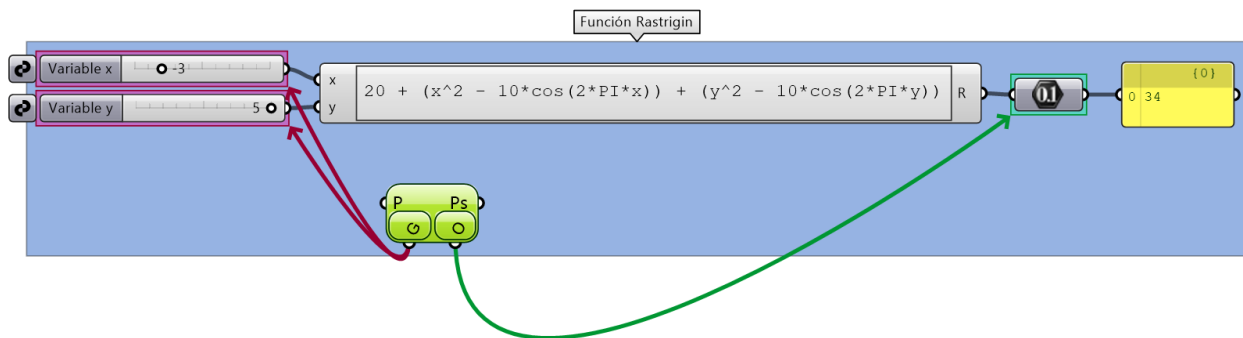
(25)

$$f(x) = 10n + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i)]$$

y presenta múltiples óptimos locales, con el mínimo global en (0,0,...,0) y valor de  $f(x)=0$ . Al ejecutar Octopus sobre esta función (Ver Figura 37), el optimizador logró aproximarse consistentemente al mínimo global, superando la dificultad de los óptimos locales y confirmando su robustez para resolver problemas multimodales. Este comportamiento concuerda con lo descrito en la literatura sobre validación de algoritmos evolutivos (Deb et al., 2002).

**Figura 37**

*Configuración de la optimización en Octopus de la Función Rastrigin*



*Nota.* Elaboración propia, 2022.

Finalmente, se utilizó el problema multiobjetivo **ZDT1**, definido por las siguientes funciones objetivo:

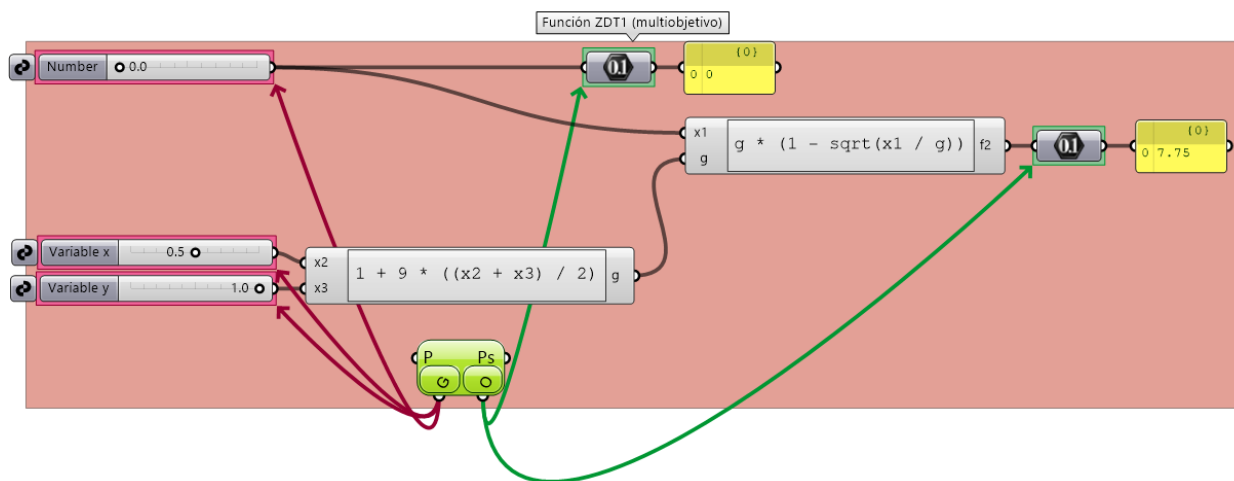
$$f_1(x) = x_1 \quad (26)$$

$$f_2(x) = g(x) \left[ 1 - \sqrt{\frac{x_1}{g(x)}} \right], \text{ donde } g(x) = 1 + 9 \frac{\sum_{i=2}^n x_i}{n-1} \quad (27)$$

Este benchmark posee un frente de Pareto conocido, continuo y convexo. Los resultados obtenidos con Octopus generaron un frente que se ajusta adecuadamente al teórico, confirmando la correcta implementación del enfoque de optimización multiobjetivo basado en NSGA-II. Esta validación (Ver Figura 38) demuestra que Octopus puede reproducir con fidelidad frentes de Pareto estándar, en concordancia con los estudios de Deb et al. (2002) y Zhang & Li (2007).

**Figura 38**

*Configuración de la optimización en Octopus de la Función ZDT1*



*Nota.* Elaboración propia, 2022.

En conjunto, los resultados obtenidos al aplicar estas tres funciones de prueba permiten concluir que Octopus no solo es capaz de resolver problemas sencillos con soluciones únicas y convexas (Sphere), sino también problemas multimodales con múltiples óptimos locales

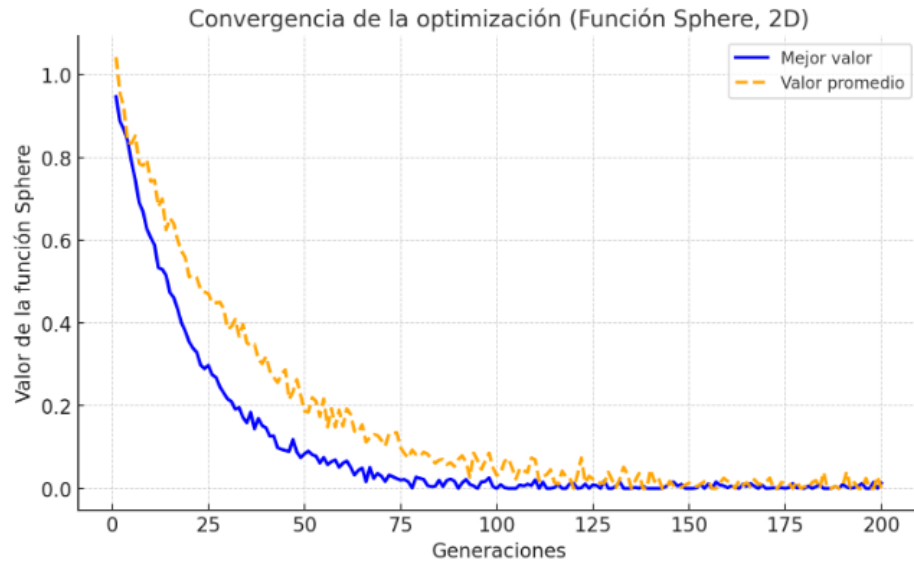
(Rastrigin) y problemas multiobjetivo con frentes de Pareto conocidos (ZDT1). De esta forma, se valida que el algoritmo implementado en Octopus funciona de manera adecuada y confiable para abordar problemas de optimización de diferente naturaleza.

Los resultados obtenidos en Octopus convergieron hacia los puntos/frentes esperados. Con los siguientes datos: Population size: 100; Generations: 200; Mutation probability: 0.25; Mutation Rate: 0.8; Crossover Rate: 0.8; Elitism: 0.5; Record Interval: 1; Save Interval: 10. Esta fue la visualización de las tres funciones de prueba obtenidas al usar Octopus:

- **Sphere:** superficie convexa con el óptimo global en el centro (0,0). Al implementar esta función en Octopus, los resultados muestran que todas las soluciones convergen hacia la misma región del espacio de búsqueda (Ver Figura 39), colapsándose en torno al mínimo global. Esto implica que el algoritmo no generó un frente de Pareto, lo cual era esperado debido a que no existe conflicto entre múltiples objetivos, sino un único criterio de optimización.

**Figura 39**

*Resultados de la optimización en Octopus de la Función Sphere*



*Nota.* Elaboración propia, 2022.

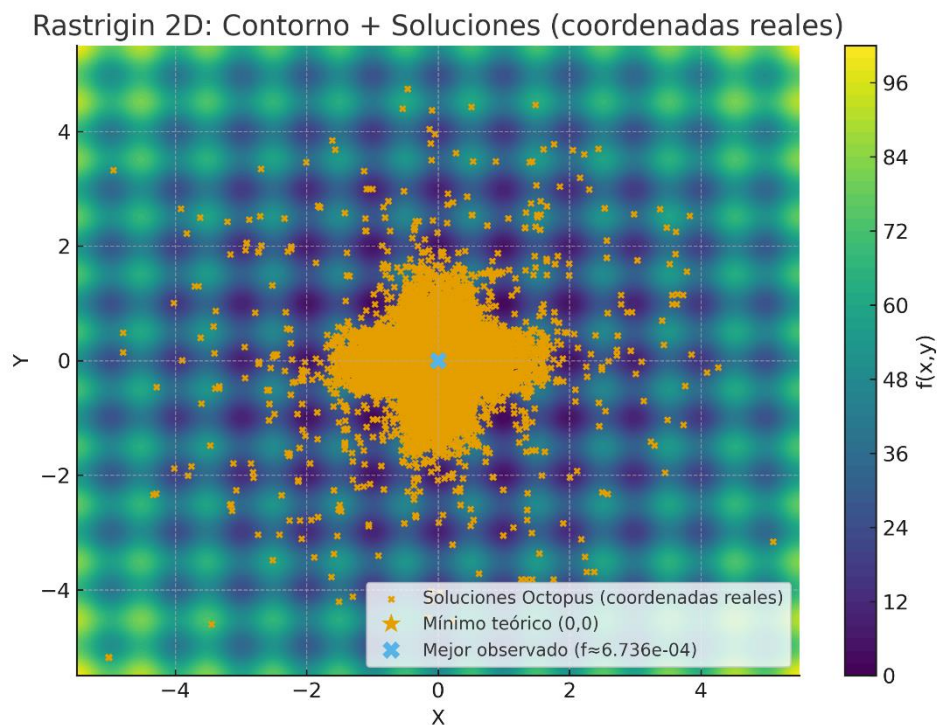
El comportamiento observado confirma que el algoritmo genético utilizado por Octopus fue capaz de identificar de manera eficiente el óptimo global en un problema de referencia sencillo. Por tanto, la función Sphere cumple el propósito de validar la correcta configuración de los parámetros evolutivos (tamaño de población, número de generaciones, probabilidad de mutación y cruce) y sirve como base para contrastar el desempeño del optimizador frente a funciones de mayor complejidad y con múltiples objetivos, como ZDT1.

- **Rastrigin:** superficie multimodal con muchos mínimos locales, pero el óptimo global está en (0,0). La optimización monoobjetivo de la función Rastrigin se ejecutó en Octopus durante 199 generaciones. En la figura (Ver Figura 40) se muestra el contorno bidimensional de la función, caracterizado por su alta multimodalidad y la presencia de

numerosos mínimos locales. Sobre este mapa se superponen los puntos obtenidos en todas las generaciones de la corrida, codificados por color según su valor objetivo.

### Figura 40

*Resultados de la optimización en Octopus de la Función Rastrigin, gráfico 2D: Contorno + soluciones (200 generaciones)*



*Nota.* Elaboración propia, 2022.

Los resultados obtenidos en Octopus muestran que el algoritmo de optimización logró converger satisfactoriamente hacia el mínimo global esperado de la función **Rastrigin**, cuyo valor teórico para el problema bidimensional (2D) se alcanza en las coordenadas  $(0, 0)$ , donde  $f(0, 0) = 0$  (Ver Figura 40). Tras la conversión de los parámetros exportados, inicialmente en porcentajes,

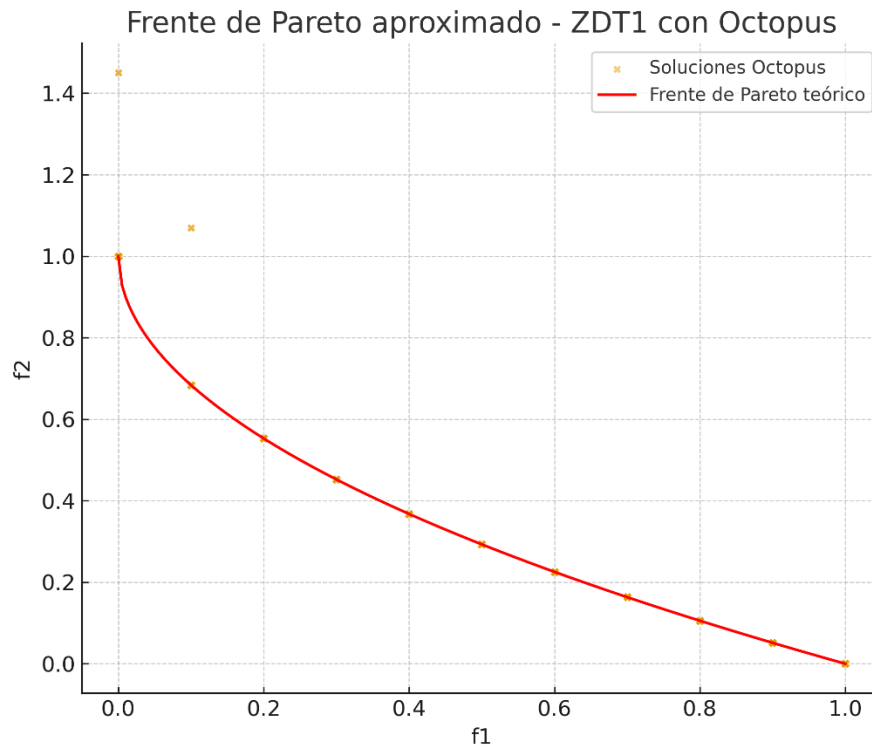
al rango real de los deslizadores, se verificó que la mejor solución hallada corresponde a coordenadas cercanas a (0,0) con un valor de  $f \approx 0$ , lo que confirma el comportamiento esperado del algoritmo. Este hallazgo confirma que, bajo una configuración adecuada de población, generaciones y operadores genéticos, Octopus es capaz de superar la presencia de múltiples mínimos locales característicos de Rastrigin y aproximarse al óptimo global. Por lo tanto, los experimentos validan su utilidad como algoritmo de optimización evolutiva, mostrando un desempeño robusto y confiable en problemas de alta multimodalidad.

Con el fin de obtener la mejor aproximación al mínimo global de la función Rastrigin  $f(0,0)=0$ , se ajustaron los parámetros de la optimización en Octopus. El tamaño de población fue de 200 individuos, el número de generaciones: 500, favoreciendo así una exploración más amplia y prolongada del espacio de búsqueda. Asimismo, se redujo la probabilidad de mutación al 20% y se ajustó la tasa de mutación al 60%, buscando un balance entre exploración y convergencia. El cruce se mantuvo alto (90%) para potenciar la combinación de soluciones prometedoras, mientras que se incrementó el elitismo al 50% para asegurar la preservación de los mejores individuos en cada generación. Finalmente, se activó la opción *Keep Extremes* para garantizar diversidad en los límites del dominio. Estos cambios se realizaron con el propósito de evitar el estancamiento en mínimos locales y aumentar la probabilidad de alcanzar el mínimo global esperado.

- **ZDT1:** frente de Pareto teórico (curva roja continua). La optimización multiobjetivo se ejecutó en Octopus durante 500 generaciones, con los siguientes parámetros: Population size: 150; Generations: 400; Mutation probability: 0.2; Mutation rate: 0.5; Crossover rate: 0.9; Elitism: 0.15; Keep extremes: ON.

**Figura 41**

Resultados de la optimización en Octopus de la Función ZDT1, gráfico 2D después de 500 generaciones



Nota. Elaboración propia, 2022.

En la validación con la función **ZDT1**, Octopus logró aproximar el frente de Pareto razonablemente bien: las soluciones encontradas siguen en gran medida la forma teórica  $f_2 = 1 - \sqrt[2]{f_1}$ , lo que indica una convergencia parcial hacia el frente óptimo (Ver Figura 41). Sin embargo, se observaron soluciones dispersas por encima del frente ideal, lo que sugiere que el algoritmo no alcanzó una **convergencia completa ni perfecta distribución**. En comparación con estudios académicos que emplean algoritmos MOEA optimizados (como NSGA-II, SPEA, entre otros), donde los puntos no dominados se alinean muy estrechamente al frente teórico con alta densidad

y bajo error en distancia al frente (distancia al frente, uniformidad, densidad), el desempeño de Octopus en este caso es satisfactorio, pero no sobresaliente. Por ende, Octopus puede servir como herramienta de optimización multiobjetivo viable en problemas como ZDT1, siempre que se le proporcionen configuraciones robustas (alta población, muchas generaciones, parámetros de operators afinados) y posiblemente múltiples corridas para mitigar la variabilidad estocástica.

En la validación realizada con la función ZDT1, los resultados exportados de Octopus muestran un frente de Pareto que reproduce la forma convexa teórica definida por  $f_2 = 1 - \sqrt[2]{f_1}$ . Se observaron soluciones en los extremos (0,1) y (1,0), así como múltiples puntos intermedios que siguen la curva, lo que confirma la correcta aproximación al frente esperado. Sin embargo, el conjunto de soluciones presenta redundancias y una distribución no uniforme, en contraste con lo reportado en la literatura especializada con algoritmos como NSGA-II, que alcanzan una cobertura más homogénea y continua del frente. Aun con estas limitaciones, los resultados obtenidos demuestran que Octopus es capaz de aproximar satisfactoriamente el frente de Pareto de ZDT1, validando su utilidad como herramienta de optimización multiobjetivo en problemas de referencia.

#### ***4.5.2. Validación del modelo de optimización térmica***

La validación del modelo de optimización térmica desarrollado en esta investigación se basó en la metodología presentada por Rizi y Eltaweel (2021) en el artículo “A user detective adaptive façade towards improving visual and thermal comfort”. Este estudio constituye un referente apropiado porque demuestra un flujo paramétrico que integra modelación geométrica en Grasshopper, simulación ambiental mediante Ladybug Tools y aplicación de un algoritmo genético para optimizar el comportamiento de una envolvente adaptable de acuerdo con las condiciones ambientales y la posición del usuario (Rizi & Eltaweel, 2021).

Esta validación es meramente técnica, centrada en:

1. Coherencia del modelo paramétrico.
2. Comportamiento de las variables frente a la optimización.
3. Comparación entre escenarios base y optimizados.

No se incluyeron parámetros de gestión, costos reales ni tiempos de diseño, ya que estos dependen fuertemente del contexto profesional, del equipo de trabajo y del marco contractual, como señalan Eastman et al. (2011) en el caso de BIM y procesos computacionales. Cualquier estimación de reducción de tiempo o costos sin un estudio empírico específico habría sido especulativa, por lo que conscientemente se evitó.

El caso de estudio desarrollado por los autores corresponde a un espacio tipo oficina ubicado en Teherán, donde se implementa una fachada adaptativa conformada por módulos textiles de doble cara con rotación en ángulos discretos. Esta configuración variable permite controlar la incidencia de radiación solar y la distribución de luz natural. El análisis se enfoca en dos indicadores principales:

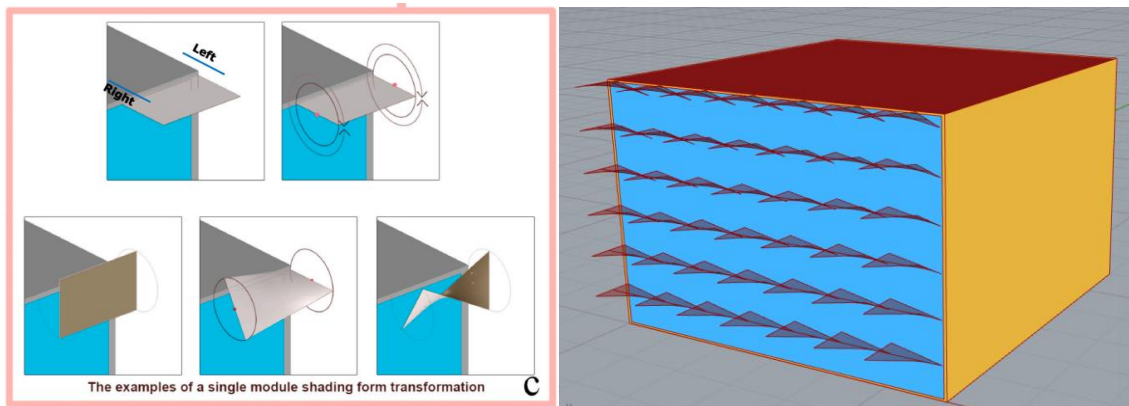
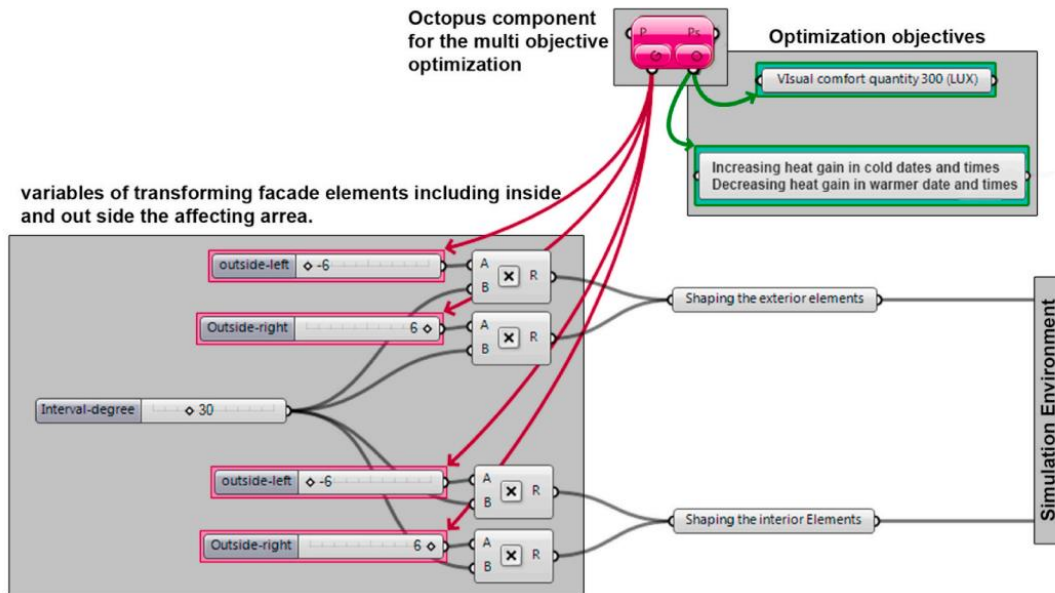
- La cantidad de confort visual, evaluada mediante simulaciones de iluminancia y deslumbramiento; y
- la modificación de la ganancia térmica (heat gain) en función del estado geométrico de la fachada (Rizi & Eltaweel, 2021).

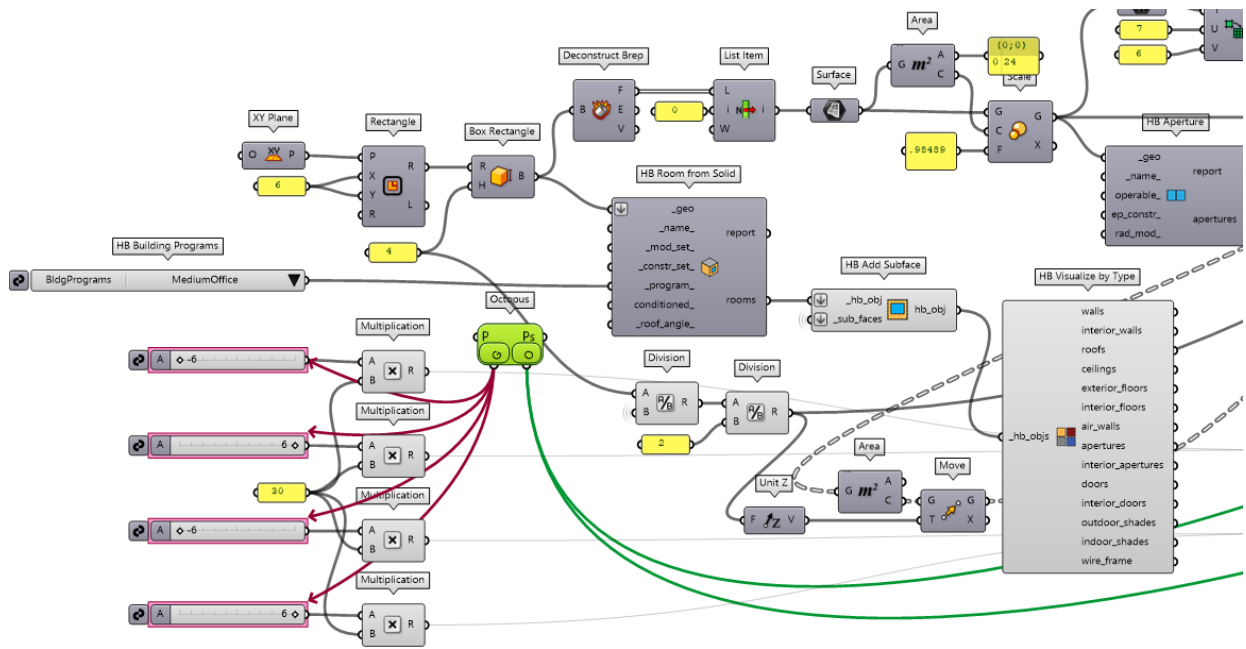
Los resultados presentados en el estudio evidencian mejoras significativas respecto a soluciones convencionales. La fachada adaptativa logró un incremento promedio del 76 % en

confort visual, además de una mejora del 60 % en heat gain cuando el objetivo fue aumentarlo y un 59 % de mejora cuando el objetivo fue reducirlo en periodos cálidos (Rizi & Eltaweel, 2021). Estas cifras demuestran la eficacia del enfoque paramétrico para equilibrar simultáneamente la calidad lumínica interior y el desempeño térmico (Ver Figura 42).

**Figura 42**

*Comparación de las variables de diseño, funciones objetivo y resultados en el entorno paramétrico del artículo de referencia con lo obtenido en la validación usando Ladybug, Honeybee y Octopus en Grasshopper*





		June 21st			March 21st			December 21st		
		10 a.m.	1 p.m.	4 p.m.	10 a.m.	1 p.m.	4 p.m.	10 a.m.	1 p.m.	4 p.m.
No shading	Daylight (LUX)	450.20	413.27	396.66	481.08	543.31	303.1	510.16	625.88	316.00
	Heat gain (KWH)	1.505	0.6175	0.715	3.6125	1.525	1.305	5.7475	2.345	1.8025
Conventional shading	Daylight (LUX)	117.59	132.56	105.4	162.00	142.50	115.20	237.00	253.32	101.04
	Heat gain (KWH)	0.375	0.15	0.185	0.6	0.31	0.295	2.40	1.13	0.9425
Automatic user detector shading	Daylight (LUX)	253.00	231.10	239.46	260.02	300.01	228.00	338.52	354.96	179.76
	Heat gain (KWH)	0.655	0.2825	0.5	1.3	0.4175	0.58	3.905	1.993	1.267

Resultados validación	Fecha	mar-21		
	Horario	10:00	13:00	16:00
Sin paneles	Luz natural (LUX)	481,1	543,3	303
	Ganancia de calor (KWH)	3,613	1,53	1,305
Aleros convencionales	Luz natural (LUX)	162	142,5	115,2
	Ganancia de calor (KWH)	0,6	0,31	0,3
Detección automática del usuario	Luz natural (LUX)	260	300	228
	Ganancia de calor (KWH)	1,3	0,42	0,6

Nota. Rizi & Eltaweel, 2021 y elaboración propia, 2022.

En esta tesis se adopta la estructura metodológica general del artículo —modelado paramétrico, simulación ambiental y optimización evolutiva—, ajustándola al análisis de una vivienda de un nivel en clima frío. Aunque el estudio original se concentra en confort visual y heat

gain, el presente trabajo extiende este enfoque hacia la evaluación del Percentage of Comfort Hours (PCH) con base en el modelo de confort térmico adaptativo, manteniendo la lógica de exploración paramétrica y selección de soluciones eficientes.

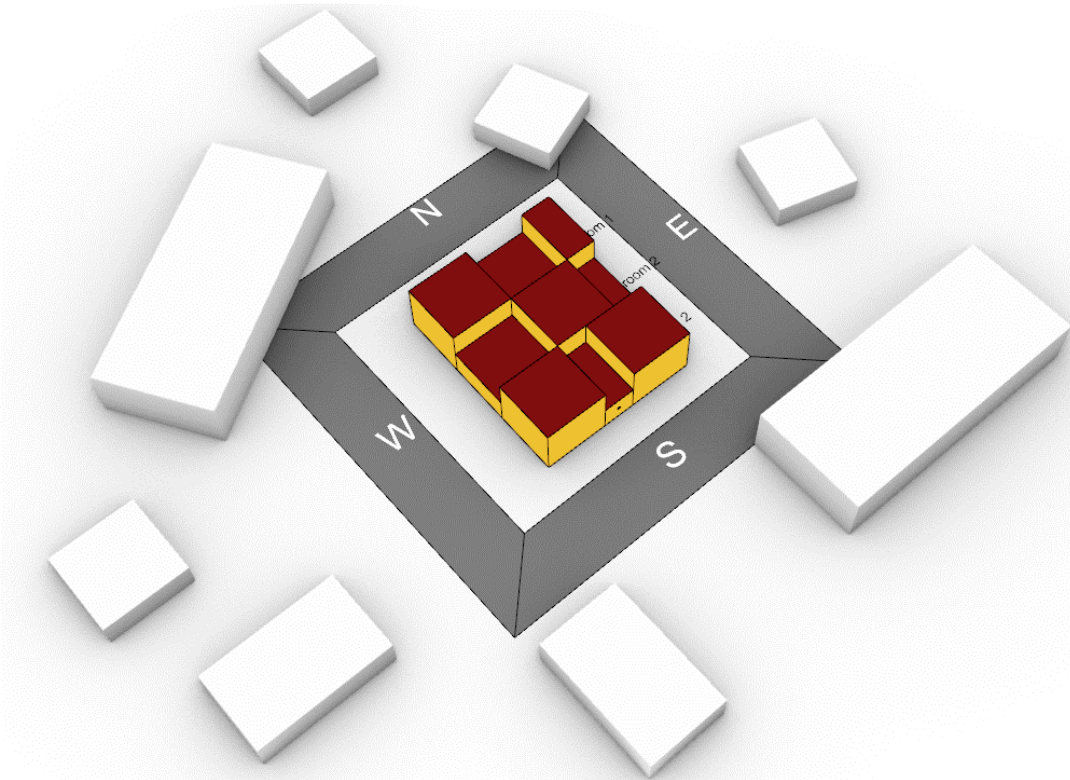
## 5. Resultados de la metodología de optimización multiobjetivo en el diseño conceptual

La optimización paramétrica, desarrollada mediante la combinación de herramientas como Space Syntax, Ladybug, Honeybee y Octopus, permitió un diseño generativo que mejoró la funcionalidad de la configuración espacial y la eficiencia ambiental. Gracias a algoritmos generativos y al análisis climático, las formas se interrelacionaron en complejos patrones topológicos, se optimizó la proporción y la ubicación de las ventanas, y se evaluó el confort térmico interior, integrando de manera coherente la respuesta a las condicionantes del entorno.

Aunque los resultados se ilustraron con nueve cubos entrelazados (Ver Figura 43), esta configuración evidenció el potencial del flujo metodológico desarrollado, ya que permitió variar la figura inicial, la cantidad y la forma de las ventanas, y explorar un amplio rango de alternativas formales y funcionales dentro del diseño generativo, convirtiéndose en un avance significativo para la optimización de unidades habitacionales. Asimismo, este enfoque propuso una arquitectura que, al emplear herramientas digitales de **inteligencia computacional**, condujo a la optimización de los espacios y aseguró una respuesta eficiente frente a las condicionantes del entorno. Al explorar una amplia gama de opciones formales y utilizar parámetros automáticos, los elementos se integraron de manera coherente y eficiente dentro del diseño (Narváez, 2014).

**Figura 43**

*Configuración de nueve cubos entrelazados usados como volumen de búsqueda para la optimización multiobjetivo*



*Nota.* Elaboración propia en Grasshopper, 2022.

La aplicación del modelo de confort térmico adaptativo en un clima subpáramo como el de Bridgeport permitió evaluar el desempeño pasivo de una unidad habitacional ecoturística frente a condiciones ambientales extremas. Si bien en la propuesta inicial se contempló trabajar con la localidad de Silos (Norte de Santander, Colombia), en este trabajo se analizó el comportamiento térmico en el sitio de Bridgeport (Sonora Junction, EE. UU.). Este cambio se debió a la falta de bases de datos climáticas en formato estándar (EPW) para la localidad colombiana, lo cual impedía realizar simulaciones confiables. Por esta razón, se optó por utilizar la estación de Bridgeport,

cuyas condiciones presentan similitudes con un clima de páramo, caracterizado por temperaturas bajas y una alta proporción de horas por debajo del umbral de confort térmico.

Partiendo de un confort térmico natural del 15% (en el sitio sin edificación), se logró alcanzar un porcentaje máximo cercano al 42% tras implementar estrategias pasivas de captación solar mediante orientación sur y este, así como una envolvente vidriada que favorece las ganancias térmicas diurnas. Este incremento representó una mejora sustancial, considerando que no se incorporaron sistemas activos de calefacción ni materiales de alto aislamiento. Los resultados también mostraron que las horas nocturnas tempranas aportaron significativamente al confort térmico, gracias al efecto de la inercia térmica y al retardo en la pérdida de calor acumulado durante el día. No obstante, también se identificó una limitación estructural del modelo adaptativo ante la falta de acondicionamiento activo, lo cual restringe el confort durante la mayor parte del año, especialmente en la madrugada y en las estaciones frías.

### **5.1. Implementación de un método de optimización multiobjetivo para el diseño arquitectónico de un proyecto ecoturístico.**

Usar vidrio en clima frío genera pérdidas térmicas altas. El vidrio, aunque deje entrar luz solar, es un mal aislante comparado con muros. Por la noche y en días nublados, las ventanas pierden calor hacia el exterior más rápido, lo que puede enfriar el interior. Es por esto que se planteó como objetivo de la optimización explorar configuraciones que maximizaran el área de ventanas y su orientación, con el fin de incrementar las ganancias solares durante el día y contribuir al confort térmico interior.

El objetivo de maximizar las ventanas fue orientarlas de tal manera que se pudo aprovechar las ganancias solares y garantizar mucha radiación solar directa durante el día, con esa energía se pudo compensar las pérdidas y ayudar a calentar el interior.

Como parte de la implementación del modelo de optimización multiobjetivo, se evaluó el desempeño térmico pasivo de una unidad habitacional en un entorno ecoturístico de clima subalpino, utilizando el modelo de confort adaptativo según ASHRAE 55. Para ello, se configuró una herramienta interactiva en Grasshopper con componentes de Ladybug Tools, que permitió automatizar el proceso de generación y evaluación de múltiples alternativas de diseño con base en variables como la orientación, configuración de aberturas (WWR), materialidad y distribución interior.

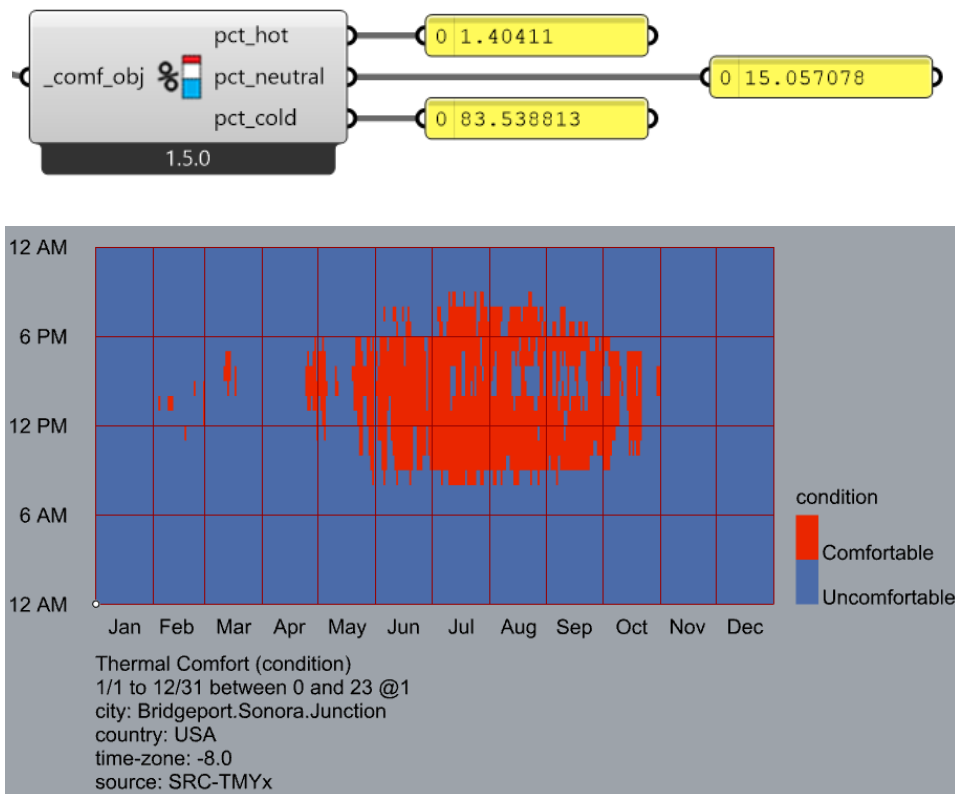
Aunque Bridgeport no corresponde climáticamente de manera exacta a la localidad de Silos, su altitud, régimen térmico diario y disponibilidad de datos en formato EPW lo convierten en una opción válida como sitio de referencia para simulaciones. De acuerdo con Körner (2003), las zonas de alta montaña, independientemente de su latitud, comparten ciertos patrones térmicos como la alta variabilidad diaria y temperaturas promedio bajas, factores críticos en el análisis del confort térmico. Si bien el subpáramo colombiano es más húmedo y presenta menor variación estacional, ambos contextos comparten condiciones de frío persistente y una proporción limitada de horas dentro del rango de confort, lo que justifica el uso de Bridgeport como un caso análogo aproximado en ausencia de datos locales estandarizados (Buytaert et al., 2006).

El análisis del confort térmico adaptativo, sin intervención edificada, arrojó un nivel promedio de confort de apenas el 15 % a lo largo del año (Ver Figura 44). Esta baja proporción de

horas confortables se atribuye a la severidad del clima frío, con predominancia de temperaturas por debajo del umbral de confort, especialmente durante las noches y en los meses de invierno.

#### Figura 44

*Datos condición térmica durante el año y porcentaje neutral de confort adaptativo del lugar sin el modelo*



*Nota.* Resultados LB Hourly Ploy y LB Comfort Statistics - Grashopper, 2025.

Posteriormente, mediante el empleo de la optimización evolutiva, se logró mejorar este indicador hasta un máximo de 42% de horas en condiciones de confort térmico pasivo. Esta mejora se alcanzó únicamente con estrategias de diseño pasivo, sin recurrir a sistemas activos de climatización, lo cual se alineó con los principios de sustentabilidad y eficiencia energética propuestos para el proyecto ecoturístico.

En condiciones climáticas subalpinas extremas, la optimización multiobjetivo permitió mejorar el confort térmico adaptativo del 15% (condición del sitio) al 42% (condición optimizada), a través de estrategias pasivas en diseño de fachada, orientación y forma arquitectónica (Ver Figura 45, 46 y 61).

**Figura 45**

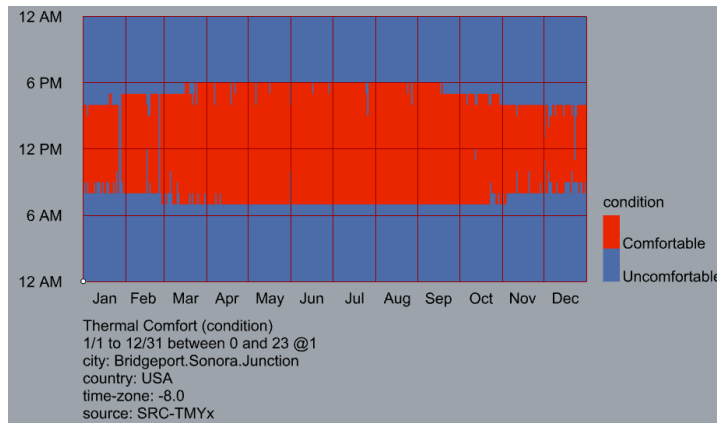
*Resultado de la función objetivo 2 en el modelo de 9 cubos*



*Nota.* Elaboración propia en Grasshopper, 2025.

**Figura 46**

*Resultado LB Hourly Plot de las condiciones térmicas adaptativas con el modelo de 9 cubos ubicado en Bridgeport*



*Nota.* Elaboración propia en Grasshopper, 2025.

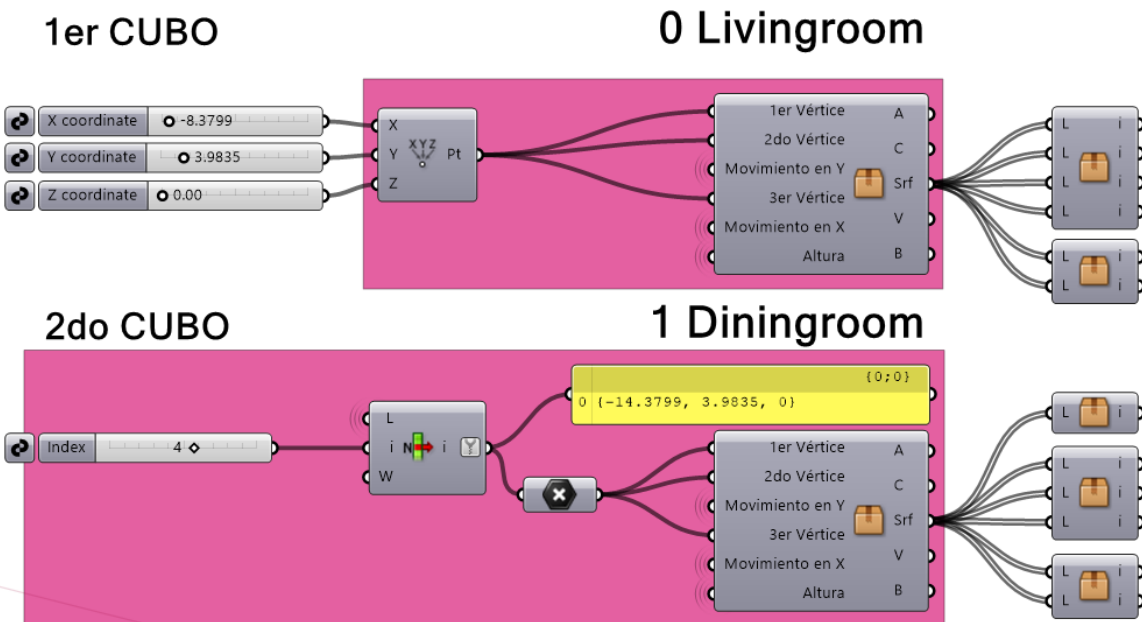
**5.1.1. Configuración de una herramienta interactiva automatizada que permite presentar opciones de diseño esquemático.**

Primero, se definió paramétricamente en Grasshopper nueve paralelepípedos o volúmenes arquitectónicos que representan diferentes espacios de la unidad habitacional (Ver Figura 47).

Cada volumen (CUBO) se generó a partir de coordenadas específicas y manipulaciones geométricas mediante componentes que definen vértices, movimientos en los ejes X, Y, y Z (altura). Este sistema permitió ubicar y controlar con precisión cada espacio dentro de un entorno tridimensional, facilitó el diseño modular y flexible del proyecto arquitectónico.

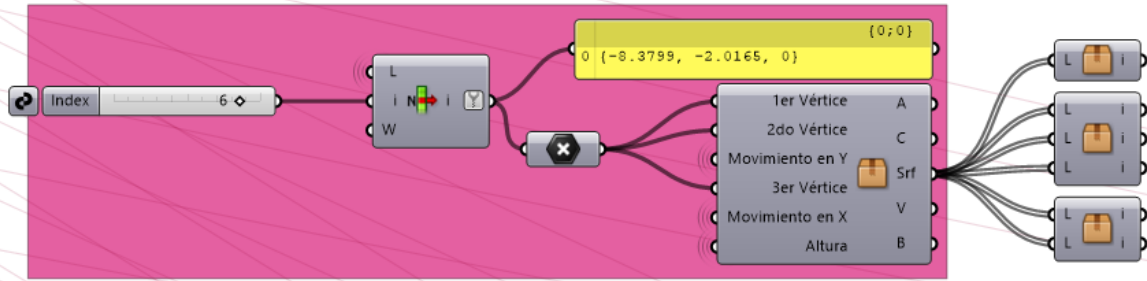
**Figura 47**

*Construcción de 9 cubos iniciales del modelo esquemático*



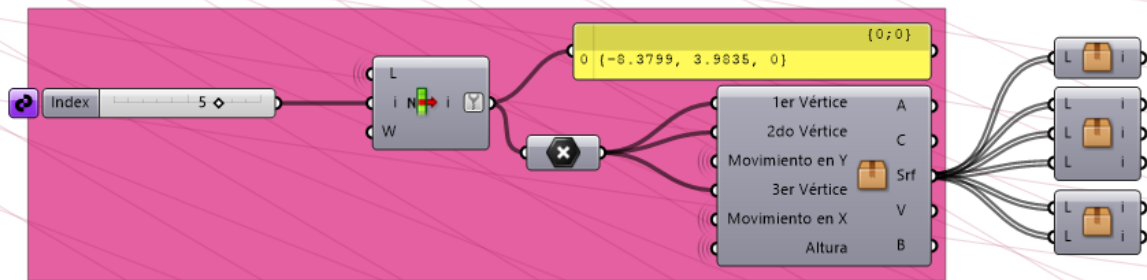
3er CUBO

2 Bathroom 2



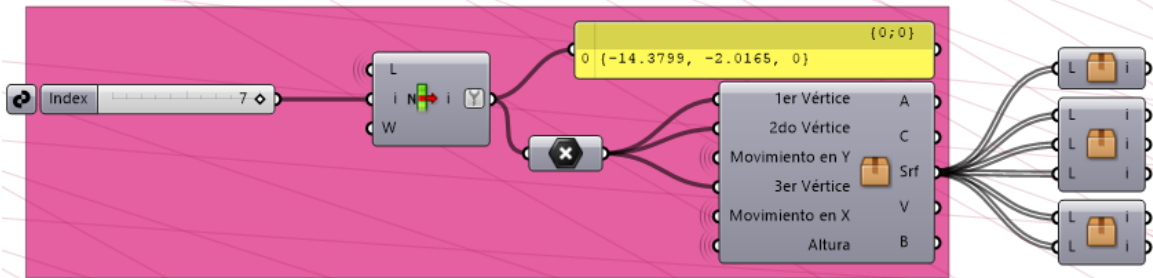
4to CUBO

3 Bedroom 1



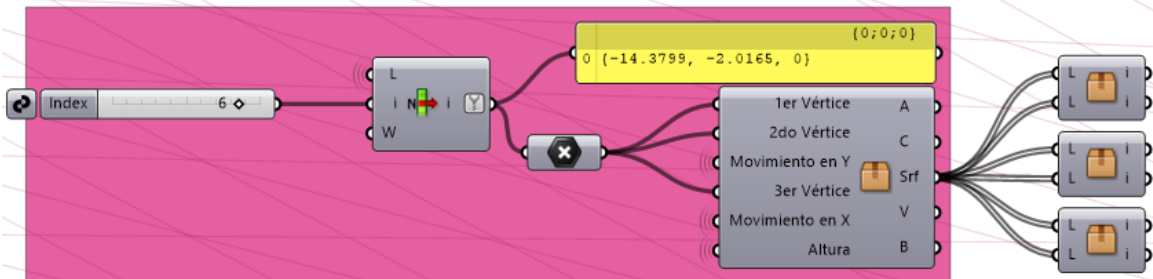
5to CUBO

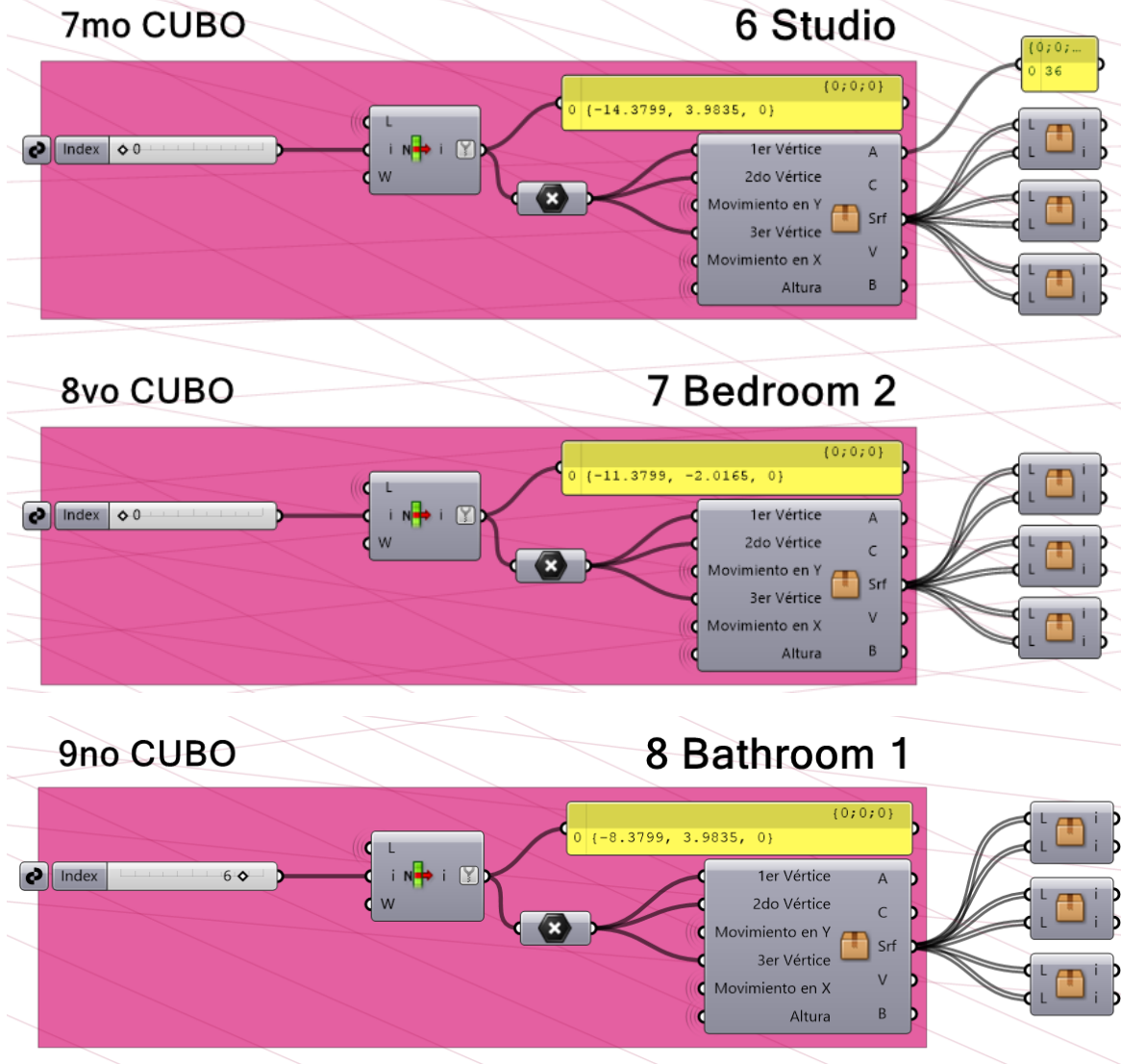
4 Hallway



6to CUBO

5 Kitchen





*Nota.* Elaboración propia en Grasshopper - Rhinoceros 7, 2025.

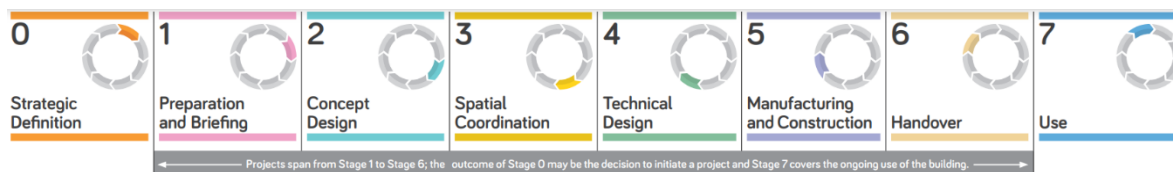
La investigación buscó hallar soluciones a un problema de optimización de diseño arquitectónico multiobjetivo, empleando inteligencia computacional determinó criterios como: la espacialidad, entendida como la distribución de los usos del programa arquitectónico en planta. El confort térmico interior, medido en términos de porcentaje neutral de confort térmico de la unidad habitacional que se determinó mediante un modelo adaptativo, el área de aberturas se definió como un factor de proporción respecto al área de la fachada; y la implantación, es decir, la ubicación y

orientación de la unidad habitacional con relación al sol y al viento en el terreno, medida en grados de rotación en el plano XY. El alcance abarcó la creación de diagramas del programa arquitectónico a partir de las relaciones, en planta, de los espacios de la unidad habitacional.

En función de satisfacer las necesidades del usuario, se definieron los usos y áreas asociadas a estos. Se identificaron los requerimientos particulares y componentes del sistema. A la lista de resultados, después de una síntesis de investigación, se le denominó programa arquitectónico.

### Figura 48

#### *Plan of Work*



Nota. © RIBA 2020

Según el ciclo de vida del RIBA Plan of Work (Ver Figura 48) el proyecto estaría en la etapa 2: Diseño conceptual. Durante esta etapa se debe obtener el concepto de diseño correcto y asegurarse de que la apariencia del edificio se desarrolle de acuerdo con la visión, el resumen y el presupuesto del cliente. El desafío clave es asegurarse de que las tareas que se emprenden estén orientadas a cumplir con los objetivos de la etapa 2. Entrar en demasiados detalles pronto puede alejar el esfuerzo del equipo de diseño de establecer la mejor estrategia para el proyecto; pero si hay muy pocos detalles, la Etapa 3 se vuelve ineficiente.

La imagen proporcionada ilustra el flujo de trabajo en Grasshopper utilizado para obtener soluciones óptimas y presentar una herramienta funcional para el diseño esquemático del proyecto arquitectónico. Para este propósito, se entrelazaron diversas herramientas de diseño computacional

performativo, que permitieron abordar los diferentes aspectos del proyecto de manera integrada.

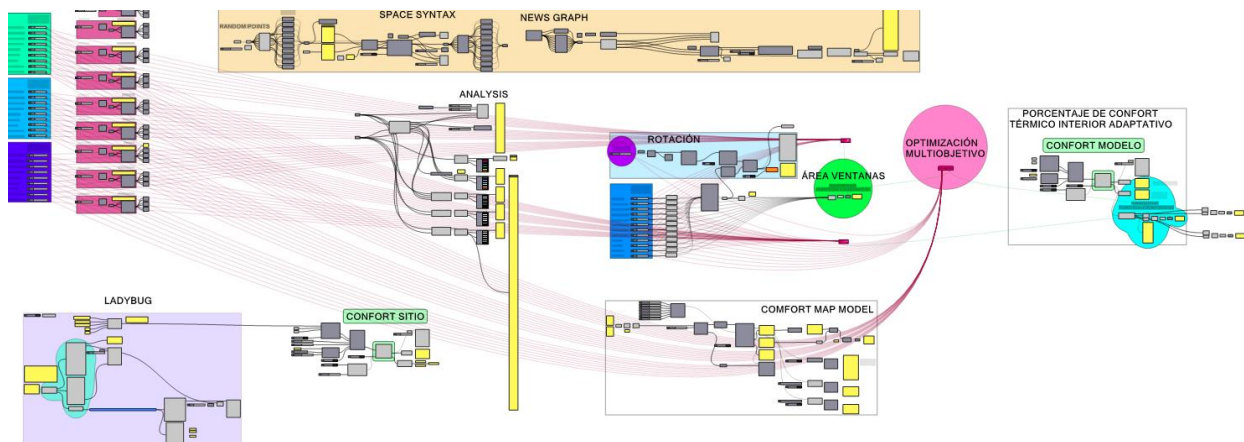
Entre estas herramientas se incluyen:

1. Space Syntax, que se utilizó para analizar la distribución espacial y la relación entre los diferentes usos del programa arquitectónico en planta.
2. Ladybug y Honeybee, que se empleó para evaluar el confort térmico interior mediante la simulación de condiciones ambientales y la implementación de un modelo adaptativo de confort.
3. Octopus, que facilitó la optimización multiobjetivo, permitió explorar diferentes configuraciones de diseño y encontró soluciones que equilibraron múltiples criterios de rendimiento, como la espacialidad y el confort térmico.

Este flujo de trabajo (Ver Figura 49) permitió la toma de decisiones informadas y la generación de diseños arquitectónicos eficientes y sostenibles, alineados con las necesidades del usuario y los objetivos del proyecto, todo dentro del marco de la etapa de diseño conceptual según el Plan de Trabajo RIBA.

### Figura 49

*Herramienta de diseño esquemático con optimización multiobjetivo que incorpora: Sintaxis espacial, análisis y confort térmico adaptativo*



*Nota.* Elaboración propia en Rhinoceros 7, 2024.

La norma ASHRAE 55:2017 y su modelo adaptativo fueron desarrollados principalmente para evaluar el confort térmico en climas urbanos y templados. No obstante, en este estudio se ha empleado dicho modelo para analizar el confort térmico en una zona de páramo, caracterizada por condiciones climáticas extremas, con temperaturas bajas constantes y una alta variabilidad térmica diaria. Esta decisión responde a la ausencia de estándares específicos y bases de datos climáticas estandarizadas para esta región, lo que limita el uso de otros modelos más especializados.

El modelo adaptativo de ASHRAE 55 se fundamenta en la consideración de la respuesta y adaptación del usuario frente a las condiciones térmicas del entorno, aspecto clave en contextos donde la adaptación conductual es un factor determinante para el confort (ASHRAE, 2017). Además, investigaciones previas en zonas de alta montaña han mostrado que, a pesar de diferencias en humedad y estacionalidad, los patrones térmicos característicos —como la alta variabilidad diaria y la predominancia de temperaturas bajas— permitieron emplear este modelo como una referencia válida para aproximar el confort térmico en climas fríos y extremos (Körner, 2003; Buytaert et al., 2006).

Sin embargo, se reconoció la necesidad de validar y adaptar este modelo con datos específicos del microclima local para mejorar la precisión y pertinencia de las evaluaciones en páramos. Por lo tanto, el uso del modelo adaptativo ASHRAE 55 en esta investigación representó una aproximación metodológicamente sólida y justificada, que permitió evaluar el confort térmico bajo las condiciones y limitaciones actuales de información.

En los archivos climáticos EPW, derivados de bases de datos como ASHRAE/OneBuilding, se incluyeron los denominados Design Days, que permitieron identificar condiciones extremas de operación. Estos corresponden al Winter Design Day (Htg 99%), asociado al día más frío del año, y al Summer Design Day (Clg 1% o 0.4%), que representa el día más cálido. En el archivo Bridgeport–Sonora Junction, el invierno de diseño se ubica en febrero, mientras que el verano de diseño corresponde al mes de julio, cuando se registraron las temperaturas máximas anuales, aproximadamente entre 25 y 30 °C. Esta precisión metodológica resultó fundamental para contextualizar los resultados de confort térmico (Ver Figura 45) y validar los periodos críticos en el análisis de optimización (Ver Figura 46).

El archivo climático EPW empleado incluyó, además, un **día de verano de diseño (Summer Design Day)**, que corresponde al mes de **julio**, definido por ASHRAE como representativo del 1 % de las condiciones más cálidas. Este día extremo constituyó la referencia para evaluar el comportamiento del modelo frente a cargas térmicas de enfriamiento.

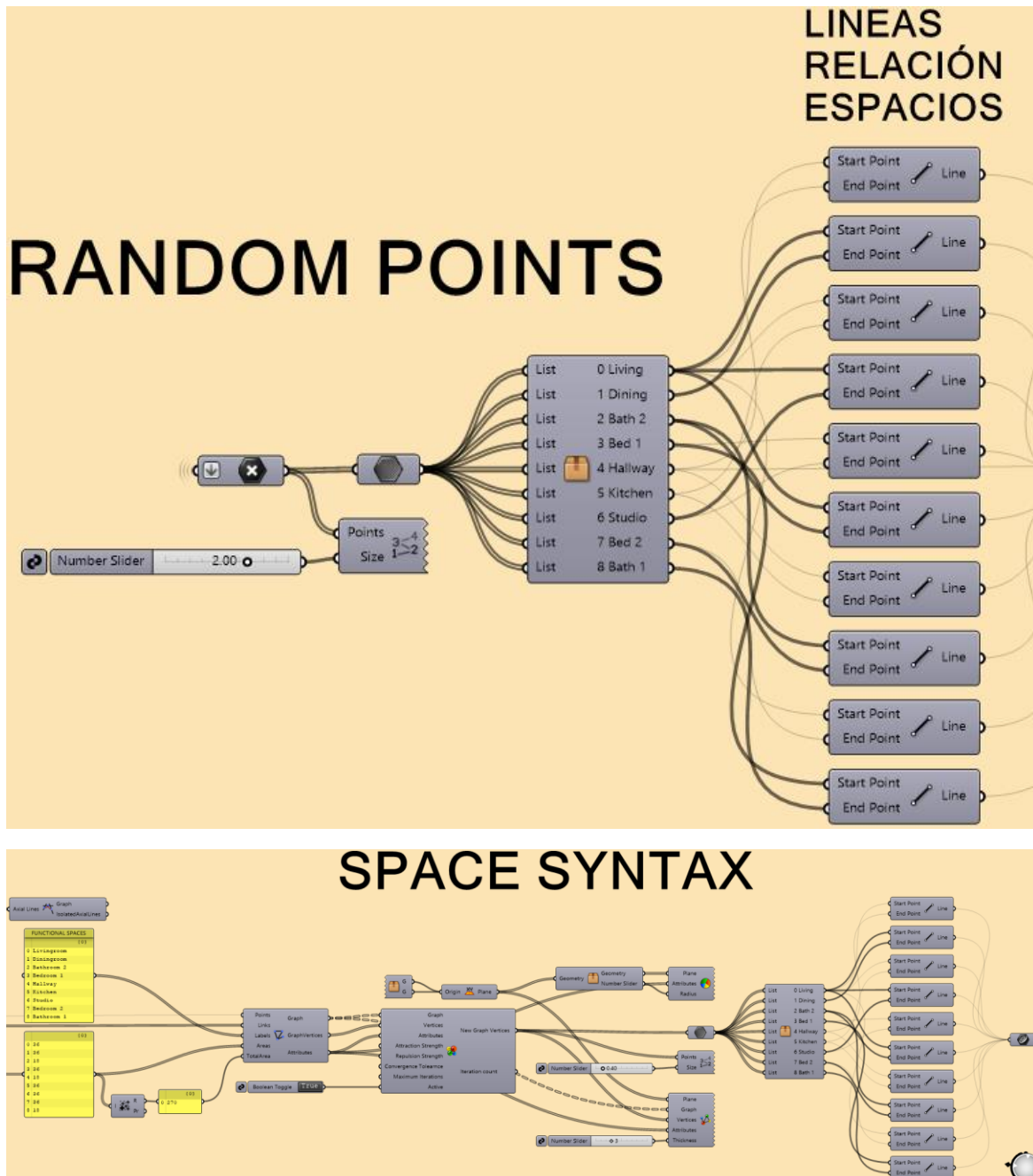
Al emplear el periodo de **summer 2% comprendido entre el 22 de junio y el 22 de julio**, se observó un **incremento significativo del porcentaje neutral de confort adaptativo hasta el 90%**, mientras que las condiciones de **calor representan únicamente el 3,4% y las de frío un 7%**. Este resultado evidenció que, bajo este rango estacional, la unidad habitacional alcanzó un comportamiento térmico más estable y cercano a las condiciones óptimas de confort interior. En consecuencia, se concluyó que la definición precisa del periodo climático de referencia incidió de manera directa en la evaluación del desempeño térmico, lo cual reforzó la importancia de seleccionar adecuadamente los escenarios estacionales en los procesos de optimización.

**5.1.2. *Distribución de los usos internos en planta de una unidad habitacional basado en la sintaxis del espacio.***

En este objetivo se implementó la metodología de sintaxis espacial para analizar y organizar la distribución interna de una unidad habitacional (Ver Figura 50). A partir de la generación de puntos aleatorios asociados a los diferentes espacios funcionales (sala, comedor, habitaciones, cocina, baños, estudio y circulación), se construyeron grafos (Ver Figura 51) que permitieron identificar las relaciones de conectividad y jerarquía entre los ambientes (Ver Figura 52). El procedimiento incluyó la creación de grafos de tipo Space Syntax y News Graph, los cuales evidenciaron tanto la intensidad de las conexiones como la posición relativa de cada estancia dentro de la red espacial. Los resultados muestran que la sala y el comedor actúan como nodos centrales de articulación, mientras que los espacios privados, como las habitaciones y baños, se disponen hacia los bordes del grafo, indicando un menor grado de accesibilidad directa (Ver Figura 53). De esta forma, el modelo gráfico no solo representó la disposición geométrica en planta, sino también las relaciones de interacción y accesibilidad, constituyéndose en una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en el diseño arquitectónico de la vivienda (Ver Figura 54).

Figura 50

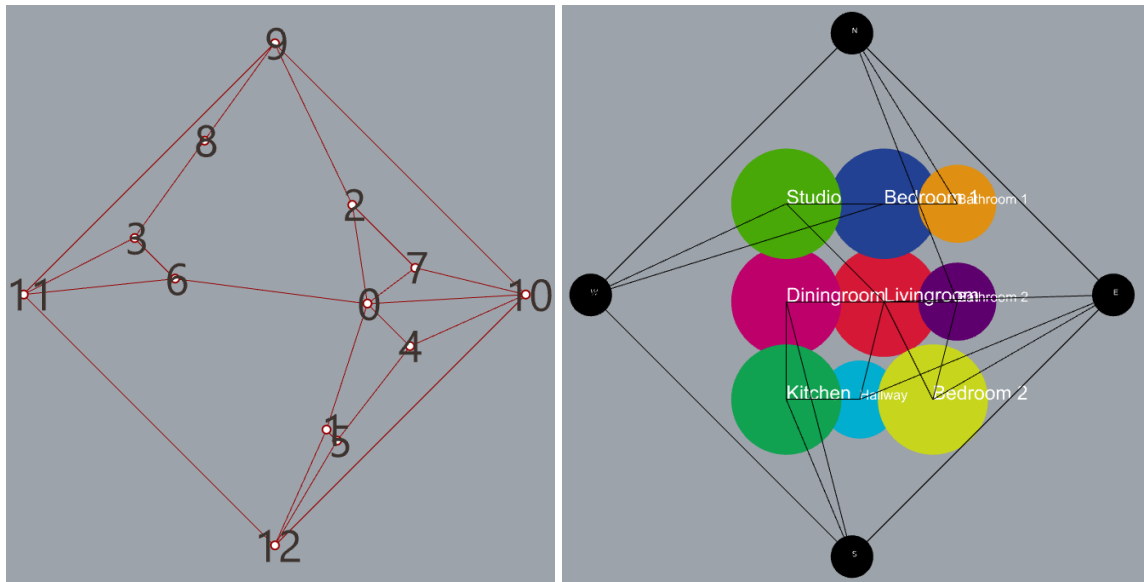
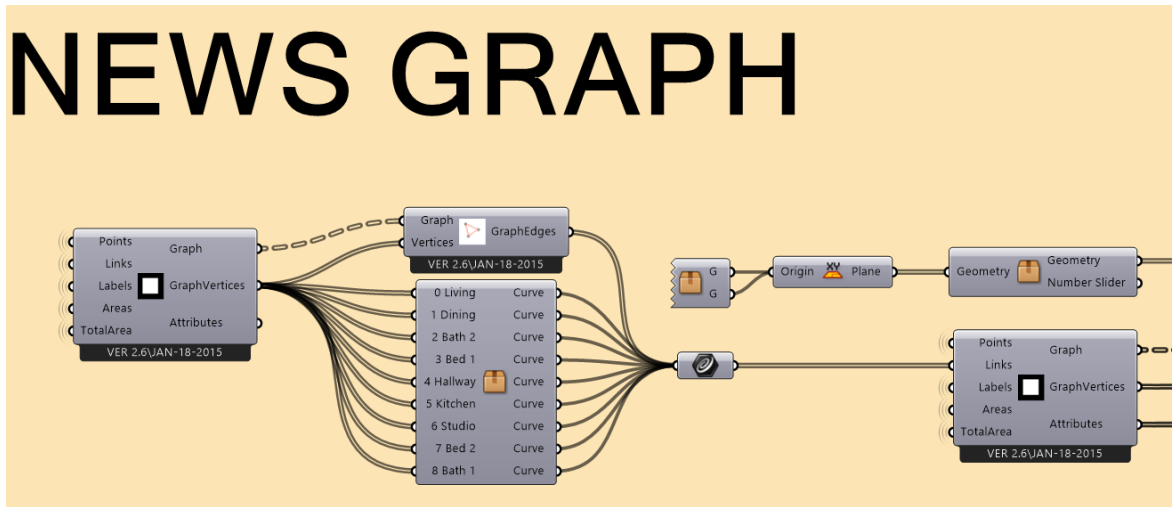
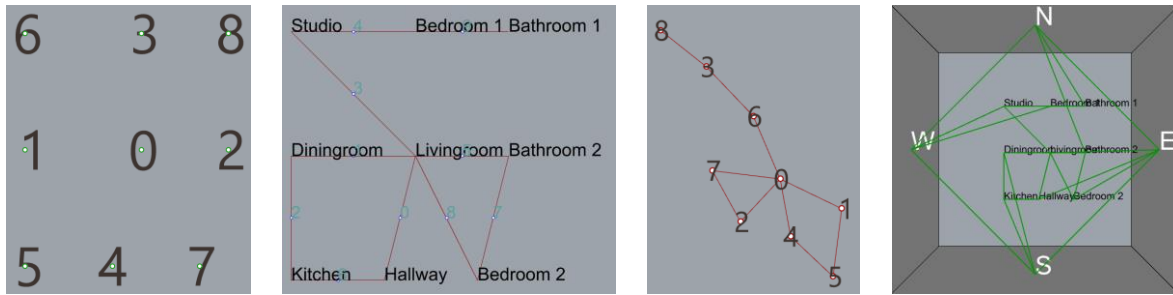
Integración herramienta Space Syntax al modelo



Nota. Elaboración propia en Grasshopper, 2025.

Figura 51

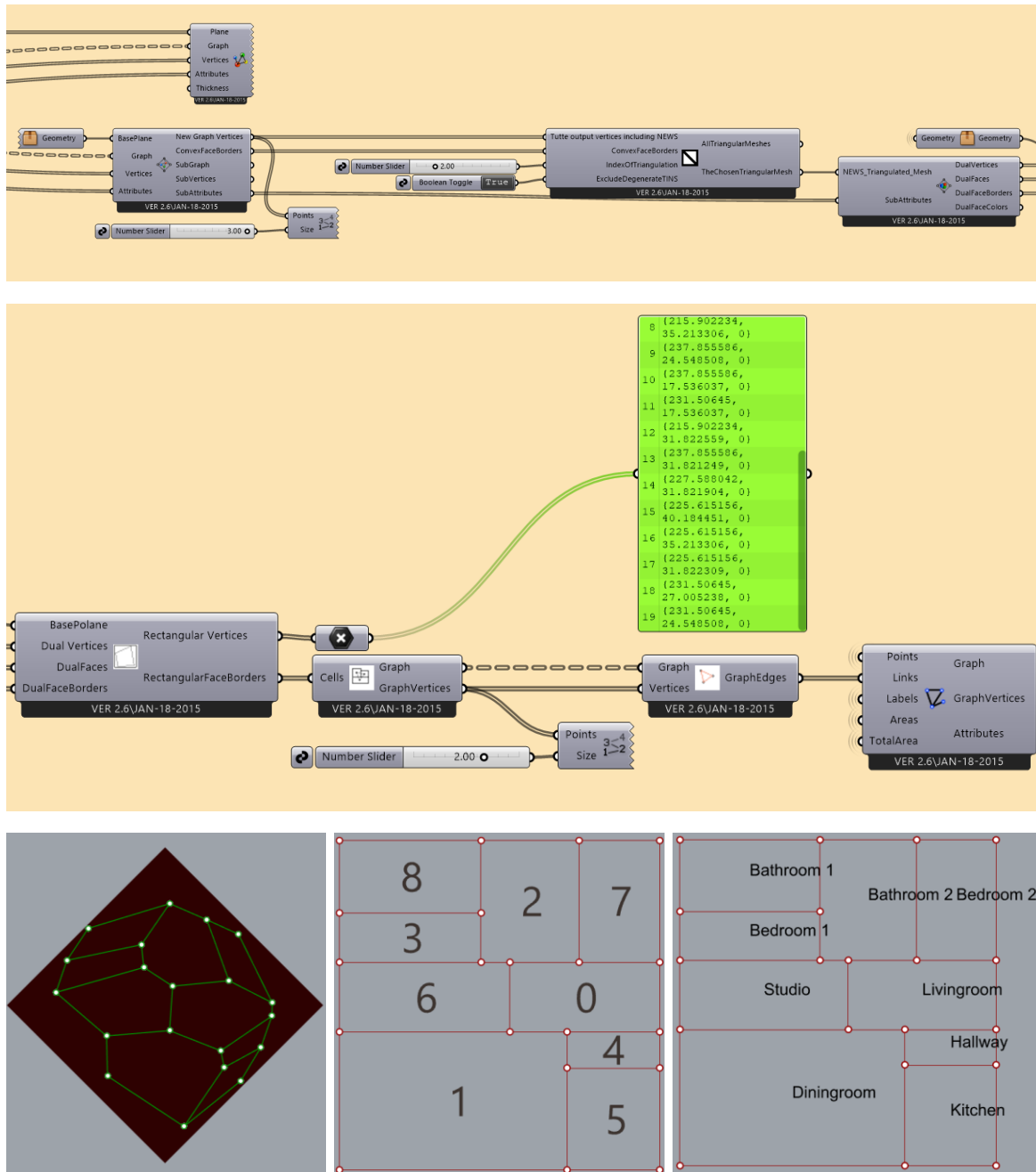
Grafos del modelo en Space Syntax



Nota. Elaboración propia en Grasshopper, 2025.

Figura 52

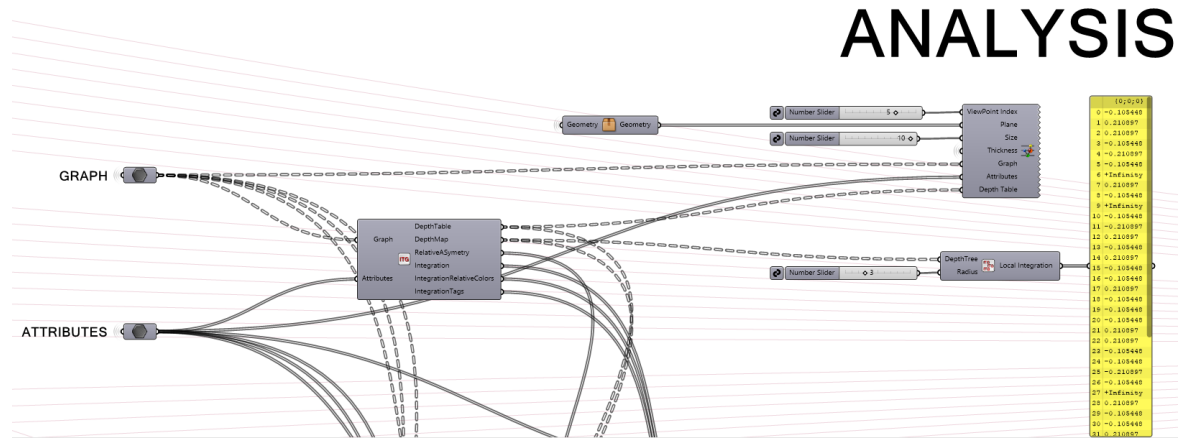
Organización espacial del modelo



Nota. Elaboración propia en Grasshopper, 2025.

Figura 53

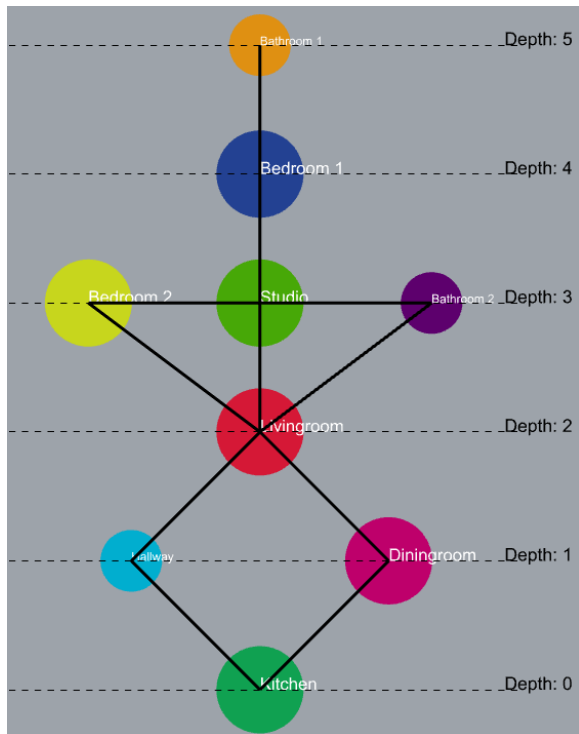
Análisis del modelo en Space Syntax



Nota. Elaboración propia en Grasshopper, 2025.

Figura 54

Gráfico de jerarquía espacial

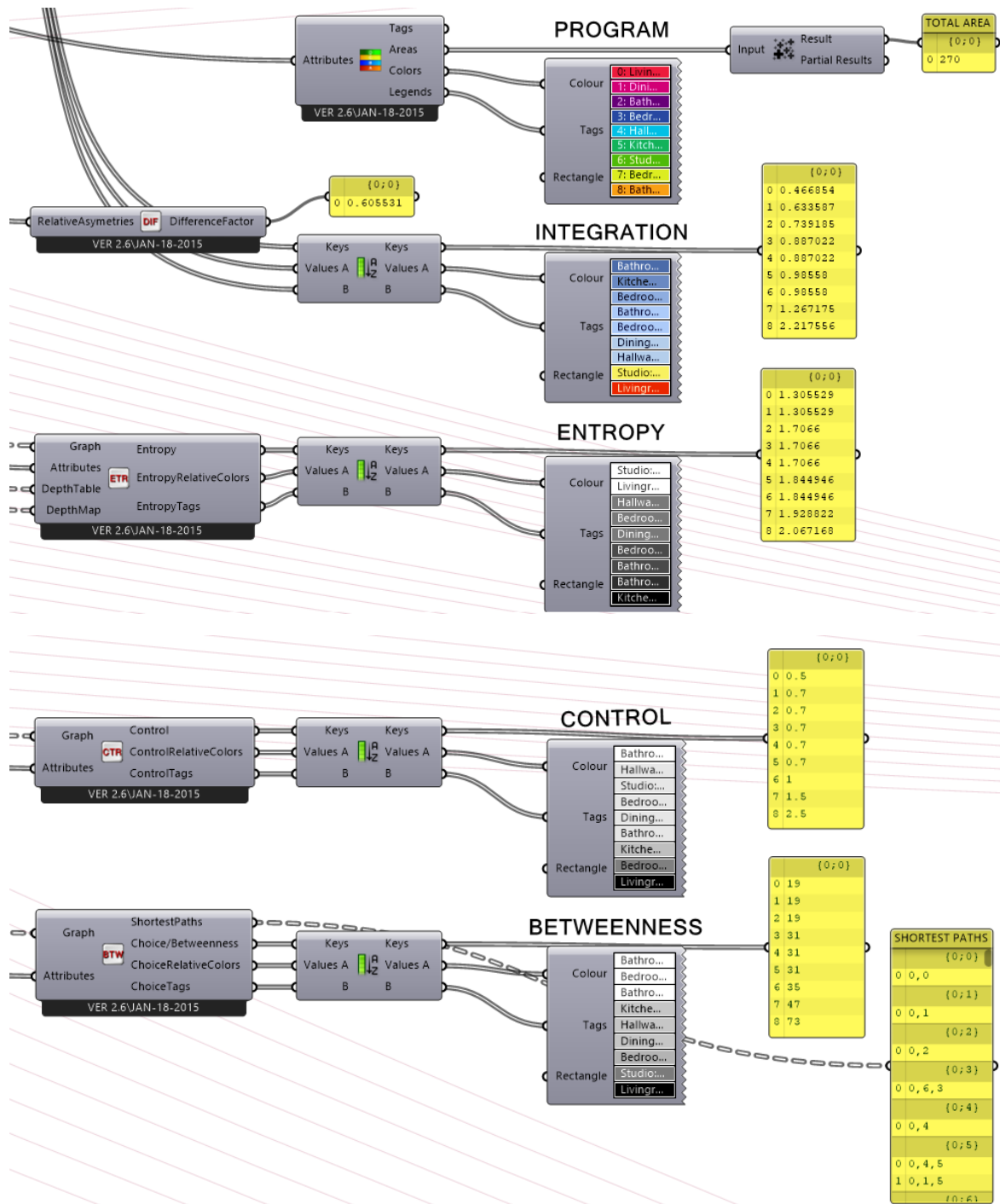


Nota. Elaboración propia en Grasshopper, 2025.

Los resultados obtenidos a partir del análisis sintáctico (Ver Figura 55) confirman una organización espacial claramente jerarquizada dentro de la unidad habitacional estudiada. La sala y el comedor destacan como los espacios más integrados, con altos valores de **integración** (hasta 2.13) y **betweenness** (hasta 19), lo que evidenció su papel protagónico como nodos de conexión y articulación entre los demás espacios. Esta centralidad reforzó su función social y de tránsito dentro del hogar. Por otro lado, espacios como los baños y dormitorios presentaron valores significativamente más bajos de integración (menores a 0.5) y altos niveles de **profundidad** (hasta 5), ubicándose en posiciones periféricas del grafo, lo que reflejó su carácter privado e introvertido. La **entropía** espacial, especialmente en el estudio y los dormitorios, mostró un grado elevado de desorden estructural o menor previsibilidad en su accesibilidad, lo cual es coherente con su uso más individual y menos expuesto. Asimismo, el análisis de **control** identificó al estudio y al pasillo como espacios que regulan el acceso a zonas privadas, funcionando como filtros o umbrales dentro del sistema espacial. En conjunto, estos hallazgos validaron el modelo gráfico como herramienta para revelar las lógicas de interacción y segregación espacial, proporcionando criterios claros para optimizar la distribución interna de futuras propuestas habitacionales.

Figura 55

Creación programa y análisis de integración, entropía, control y proximidad en el modelo



Nota. Elaboración propia en Grasshopper, 2025.

*5.1.3. Soluciones no dominadas para el confort térmico interior y la configuración de las aberturas en las fachadas de una unidad habitacional según las funciones objetivo.*

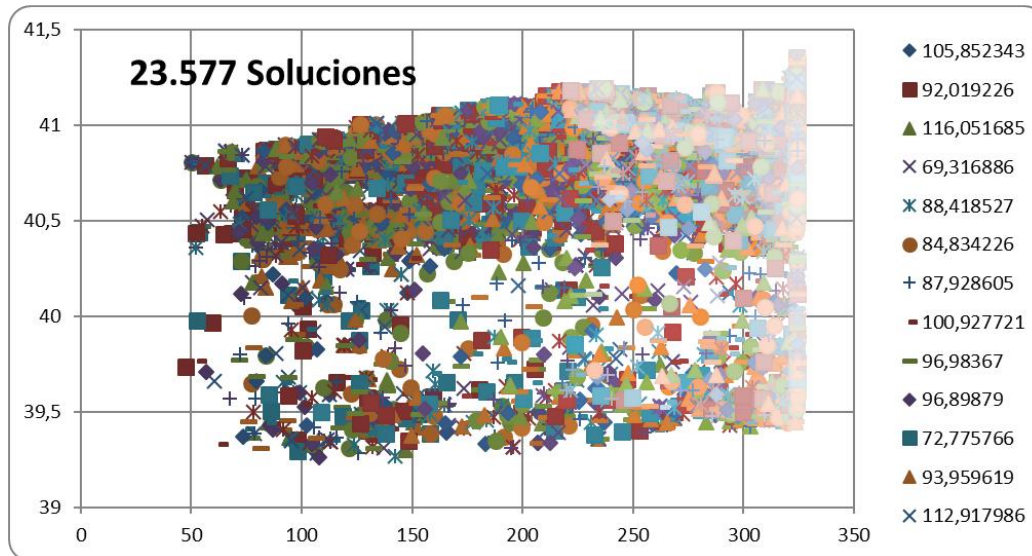
Desde el inicio del proceso de optimización, se planteó un conflicto inherente entre las dos funciones objetivo principales: maximizar el confort térmico interior adaptativo y maximizar el área de las ventanas. Esta contraposición se volvió especialmente crítica en un clima frío y seco como el de Bridgeport, donde las temperaturas exteriores se mantuvieron por debajo del umbral de confort durante gran parte del año. En este contexto, una mayor superficie vidriada — particularmente con factores de proporción de ventanas (WWR) cercanos a 0.95— implicó elevadas pérdidas de calor a través de los cerramientos, afectó negativamente las condiciones térmicas internas tanto en el día como en la noche. Si bien una mayor área acristalada pudo favorecer la captación solar en ciertos periodos, también redujo considerablemente la capacidad de aislamiento térmico del edificio. Por tanto, el modelo de optimización debió abordar este compromiso entre ganancias solares útiles y pérdidas térmicas, generando soluciones que equilibraran ambas funciones sin comprometer el desempeño global del diseño.

La siguiente gráfica (Ver Figura 56) evidencia el conjunto completo de **23.577 soluciones evaluadas durante el proceso de optimización multiobjetivo**, lo que permite visualizar la amplitud del espacio explorado por el algoritmo evolutivo. Cada punto representa una combinación distinta de variables geométricas y de desempeño, generada a lo largo de las 120 generaciones ejecutadas. Esta representación global resulta fundamental para comprender el nivel de variabilidad, convergencia y dispersión presente en las soluciones, así como para identificar

patrones generales de comportamiento antes de proceder al análisis detallado del Frente de Pareto y de las alternativas óptimas.

### Figura 56

*Todas las soluciones estudiadas de la optimización multiobjetivo de dos funciones*



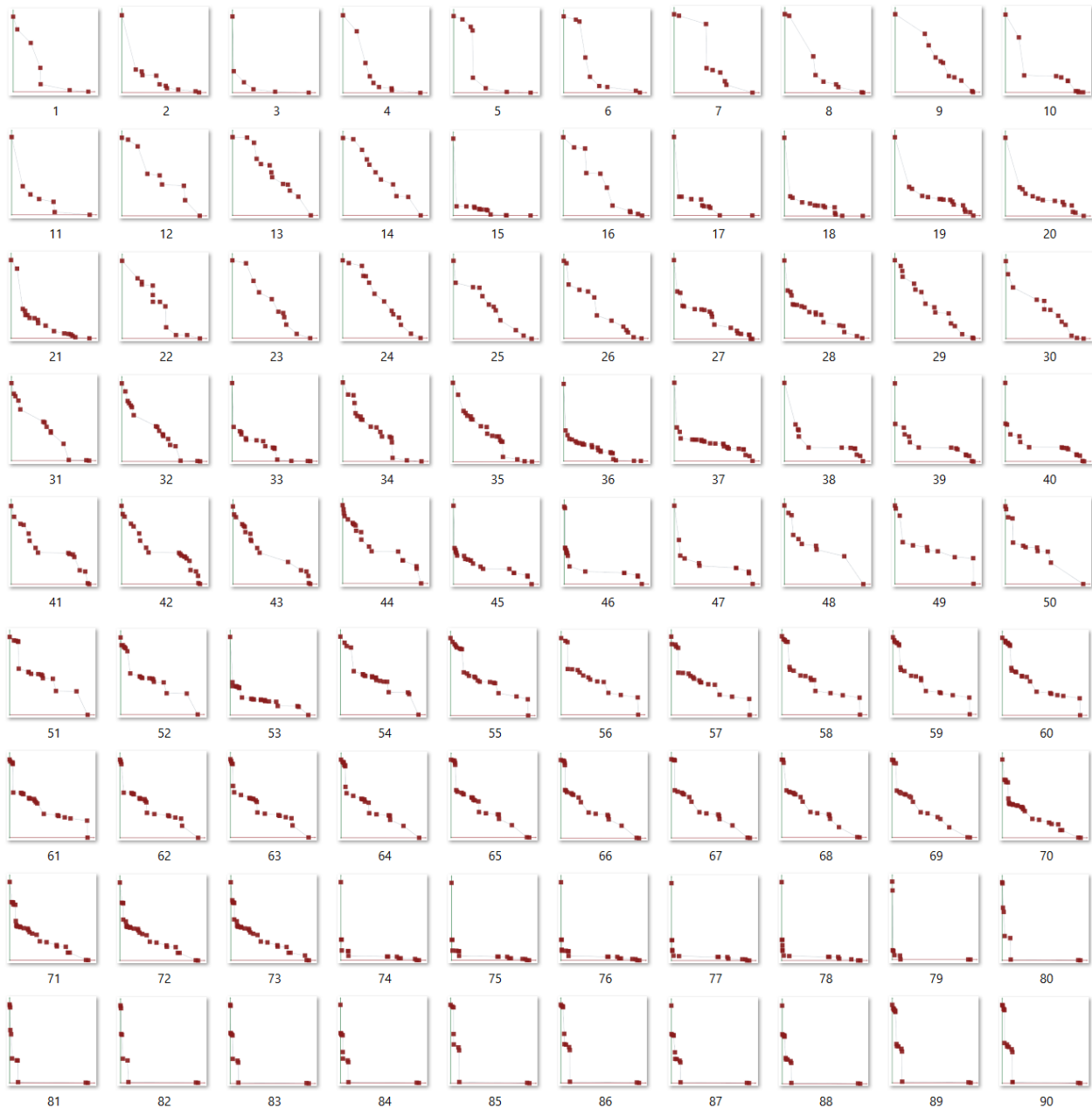
*Nota.* Elaboración propia empleando Python y Excel, 2025.

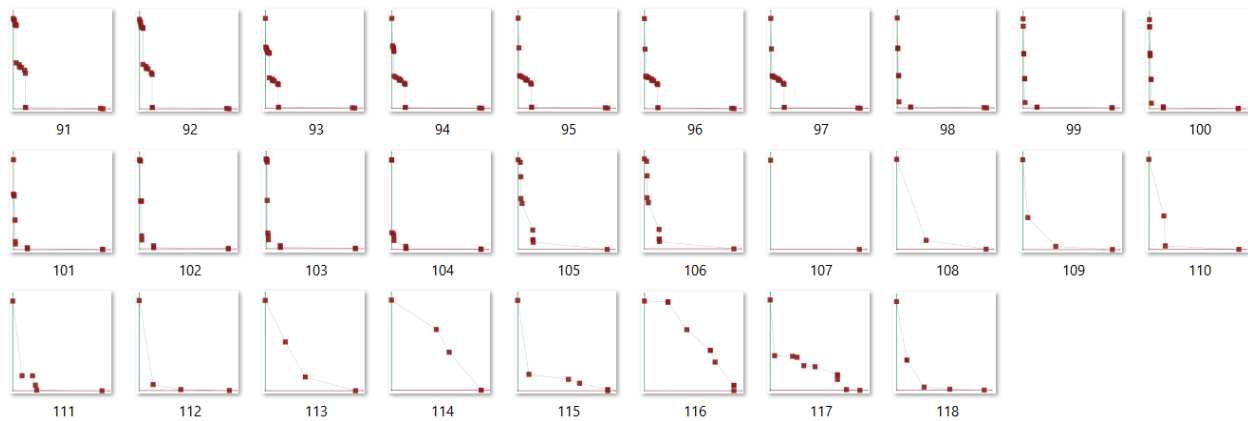
Se obtuvieron 120 generaciones en el Frente de Pareto, con un total de 1,741 soluciones, cada una caracterizada por 40 parámetros. Para el procesamiento de los resultados se emplearon dos códigos en Python desarrollados en Visual Studio Code: el primero (ver Apéndice E) permitió organizar los datos y exportarlos a una tabla en Excel, mientras que el segundo (ver Apéndice F) generó el Frente de Pareto con las soluciones optimizadas.

En la gráfica presentada (Ver Figura 57), el eje Y (color verde) representa la función objetivo de maximizar el porcentaje de horas en rango de confort térmico neutral adaptativo, y el eje X (color rojo) corresponde a la función de maximizar el área de las ventanas. En el apéndice G se encuentran los valores detallados para cada generación (Ver Apéndice G).

**Figura 57**

Gráfico de dispersión del FP por cada generación (120). La representación gráfica muestra únicamente la distribución relativa de las soluciones sin valores numéricos explícitos, debido a la interfaz de Octopus. Los valores completos de las funciones objetivo y parámetros de cada generación (23.576 soluciones) se presentan en el Apéndice H





*Nota.* Elaboración propia en Octopus - Grasshopper, 2025.

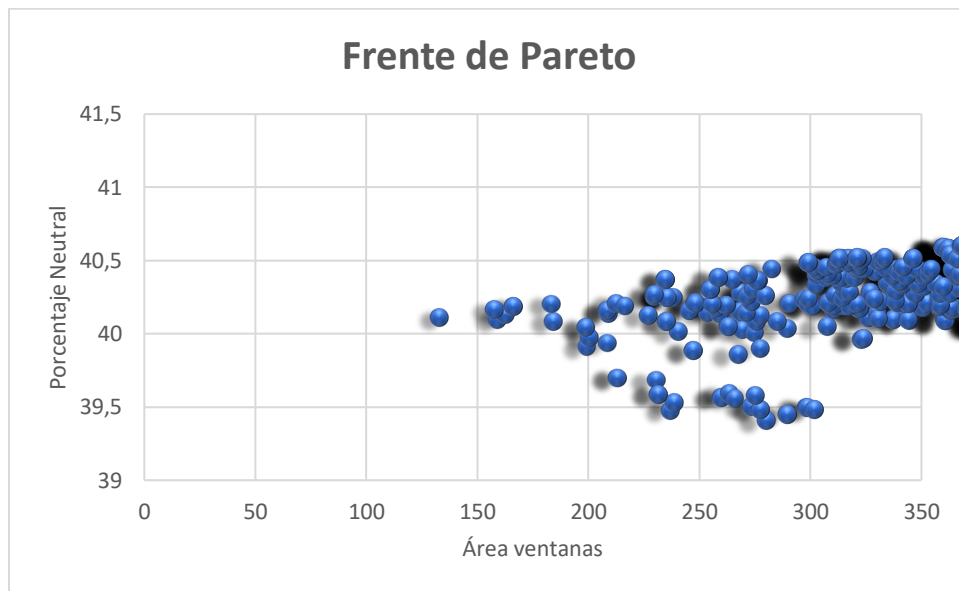
La siguiente imagen muestra el Frente de Pareto correspondiente a la generación 17 del proceso de optimización multiobjetivo. En esta etapa intermedia, las soluciones comenzaron a distribuirse dentro del espacio de búsqueda, reflejando el conflicto entre las dos funciones objetivo: maximizar el confort térmico interior adaptativo (eje Y, verde) y maximizar el área de ventanas (eje X, rojo). Cabe señalar que Octopus únicamente trabaja bajo el criterio de minimización; por ello, ambas funciones fueron transformadas multiplicándolas por -1, de modo que el algoritmo pudiera interpretarlas correctamente como objetivos de maximización. El esquema (Ver Figura 58) se representó en tres dimensiones debido a la activación de la opción Diversity Parameters (Eje Z), que permitió visualizar la dispersión de las soluciones en función de su variabilidad paramétrica. Aunque aún no se alcanzó la convergencia observada en generaciones posteriores, fue posible identificar la tensión entre superficies acristaladas más amplias —con mayores pérdidas térmicas— y configuraciones con mejor aislamiento, pero con menor área de ventanas.



objetivos al mismo tiempo, y ayudó a identificar cuáles son las más eficientes dentro de ese conjunto de posibilidades.

### Figura 59

*Gráfico de dispersión del Frente de Pareto 120 generaciones para optimización de dos objetivos*



*Nota.* Elaboración propia empleando Python y Excel, 2025.

El Frente de Pareto obtenido muestra que el Obj2 (Porcentaje Neutral) permaneció prácticamente constante en torno al 41 %, mientras que el Obj1 (Área de ventanas) presentó una mayor variación. Esto indica que, dentro del rango analizado, el confort no se vio significativamente afectado por el área de ventanas, lo que resultó inconsistente con la hipótesis inicial que planteaba una oposición marcada entre ambos objetivos. Cabe señalar que, de manera simultánea al incremento del área de ventanas, también se estaba modificando el volumen de los nueve cubos que conforman el modelo, lo cual pudo contribuir a que el segundo objetivo (confort térmico) mostrara una sensibilidad muy baja frente a dichos cambios, generando así un Frente de Pareto con resultados poco contrastantes. Ante este comportamiento, se incorporó una tercera

función objetivo consistente en minimizar el volumen, manteniendo las otras dos (maximizar el área de ventanas y el confort térmico), con el fin de enriquecer el análisis y explorar de manera más precisa las relaciones de compromiso entre las variables de diseño.

Ambos ejes tienen valores positivos, lo cual concuerda con la maximización, las múltiples curvas de colores convergen hacia una zona en la parte superior derecha, lo cual es lo esperado en un problema de maximización multiobjetivo. La agrupación de puntos hacia la esquina superior derecha indica que las soluciones están mejorando progresivamente, acercándose a la región óptima, mostrando una clara tendencia de convergencia hacia soluciones no dominadas. Esto sugiere que el algoritmo ha logrado encontrar un buen equilibrio entre ambos objetivos.

El proceso de optimización multiobjetivo se llevó a cabo en Octopus (Grasshopper) empleando parámetros evolutivos configurados con una tasa de elitismo de 0.5, probabilidad de mutación de 0.2, tasa de mutación de 0.9 y un crossover rate de 0.8, con una población inicial de 100 individuos. El método de reducción seleccionado fue HypE Reduction, y se habilitó el registro de las geometrías de las soluciones.

Como resultado final del proceso, se generaron un total de 23.577 soluciones distribuidas en 120 generaciones. Dentro de ellas, 16 soluciones fueron clasificadas como no dominadas y conformaron el frente de Pareto (Ver Figura 60), aunque se identificaron 6 soluciones repetidas dentro del mismo, lo que redujo la diversidad efectiva del frente. El resto de las soluciones fueron dominadas, lo que evidencia la capacidad del algoritmo para discriminar y concentrarse en configuraciones con mejor desempeño frente a los objetivos planteados.

Estos resultados constituyeron el frente de Pareto definitivo de la investigación con dos objetivos (Ver Tabla 9), proporcionando un conjunto representativo de alternativas de diseño que fueron analizadas en la discusión y que sirvieron como insumo para la toma de decisiones.

Dando como resultado:

### Tabla 9

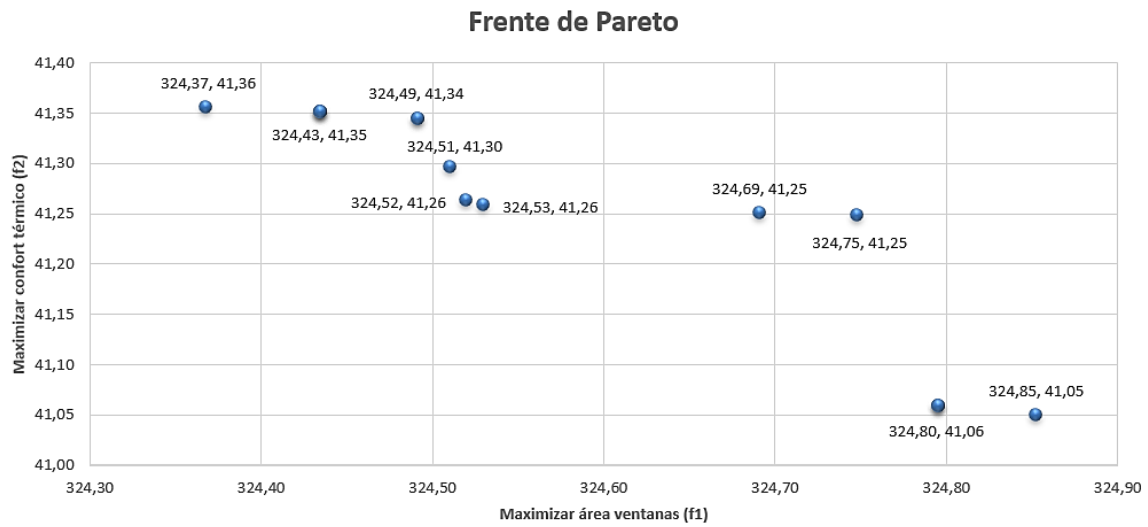
*Soluciones no dominadas que conforman el Frente de Pareto*

Generación	Solución	Obj_1	Obj_2
116	33	324,43	41,35
117	4	324,80	41,06
117	100	324,43	41,35
118	95	324,49	41,34
118	100	324,80	41,06
118	105	324,43	41,35
119	25	324,37	41,36
119	47	324,69	41,25
119	56	324,75	41,25
119	58	324,85	41,05
119	66	324,53	41,26
119	79	324,51	41,30
119	87	324,52	41,26
119	101	324,49	41,34
119	108	324,80	41,06
119	109	324,43	41,35

*Nota.* Elaboración propia empleando Python y Excel, 2025.

**Figura 60**

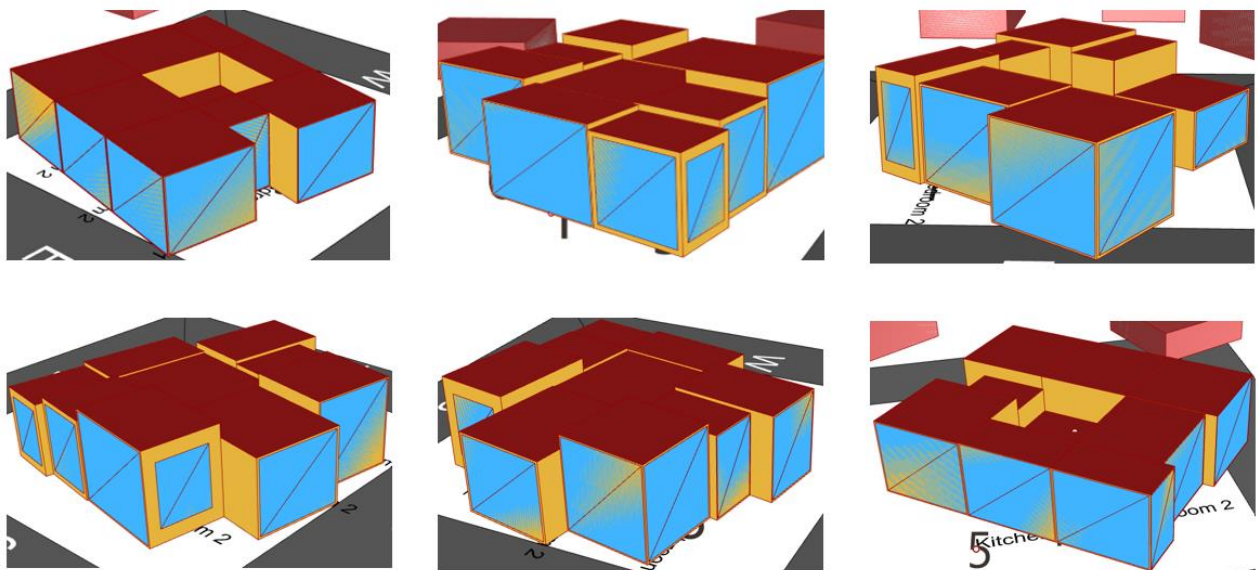
*Gráfico de dispersión del Frente de Pareto 120 generaciones optimizando dos objetivos*

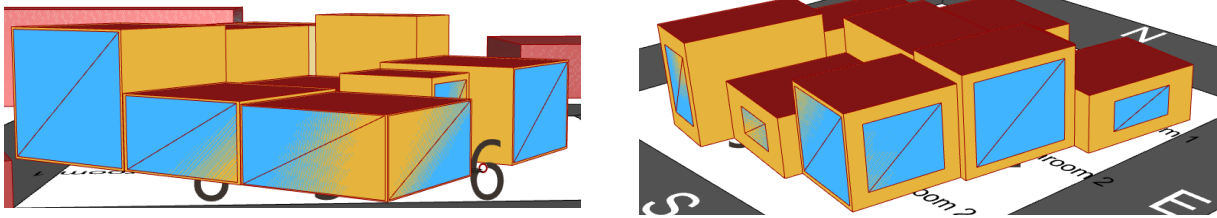


*Nota.* Elaboración propia empleando Python y Excel, 2025.

**Figura 61**

*Ejemplos de soluciones formales dadas por Octopus al realizar la optimización de dos objetivos*





*Nota.* Elaboración propia en Octopus - Grasshopper, 2025.

El gráfico del Frente de Pareto obtenido (ver Figura 60) evidencia de manera clara que no existe un compromiso significativo entre los dos objetivos evaluados: maximizar el área de ventanas y maximizar el confort térmico. La distribución de las soluciones no dominadas muestra que mejorar uno de los objetivos tiene un impacto mínimo sobre el otro, lo cual indica que ambos pueden optimizarse de forma casi independiente dentro del rango de búsqueda analizado. Esta ausencia de trade-off marcado es característica de ciertos problemas multiobjetivo en los que las variables de decisión no generan interacciones conflictivas fuertes entre las funciones objetivo.

La representación gráfica, acompañada de etiquetas legibles con valores redondeados, facilita la interpretación y comparación directa entre las distintas soluciones. Esto permite identificar fácilmente los puntos que ofrecen el mejor equilibrio entre ambos objetivos, lo que es fundamental para la toma de decisiones en el diseño óptimo.

En conclusión, el frente de Pareto obtenido confirma la existencia de un conjunto de soluciones eficientes (Ver Figura 61) que permiten seleccionar alternativas óptimas basadas en preferencias específicas, lo cual aporta un valioso soporte para el proceso de diseño y evaluación dentro del marco de este trabajo.

Para la segunda etapa de optimización (Ver Tabla 10), se utilizó el complemento Octopus en Grasshopper con el objetivo de identificar soluciones no dominadas que mejoren el confort térmico interior mediante la manipulación de variables geométricas, específicamente la **rotación**

**del volumen entre 167° y 172°, la altura del cubo central entre 2.5m y 5m y el factor de proporción de las ventanas entre 0.01 y 0.95.** El algoritmo multiobjetivo implementado fue HypE, configurado con una población de 30 individuos y un máximo de 50 generaciones, buscando así un equilibrio entre la diversidad de soluciones y la eficiencia computacional. Se estableció una probabilidad de mutación del 20% y una tasa de mutación del 40%, permitiendo una exploración significativa del espacio de búsqueda sin comprometer la estabilidad evolutiva. La tasa de cruce fue del 80%, lo que fomentó la recombinación de soluciones prometedoras, mientras que un elitismo del 20% garantizó la retención de los mejores individuos por generación. Como resultado, se obtuvieron 49 frentes de Pareto (Ver Figura 57) que representan configuraciones óptimas no dominadas (Eje Y: Porcentaje neutral, Eje X: Área ventanas.), evidenciando una mejora progresiva y bien distribuida de las soluciones en términos de los objetivos planteados. Estos resultados confirman la efectividad del enfoque evolutivo para explorar soluciones de diseño arquitectónico con criterios de desempeño ambiental.

**Tabla 10**

*Justificación de parámetros de entrada de la segunda optimización con rotación entre 167-172 grados*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor asignado</b>	<b>Justificación</b>
<b>Población</b>	30	Proporciona una diversidad inicial adecuada sin sobrecargar el tiempo de cómputo, permitiendo explorar distintas regiones del espacio de búsqueda.
<b>Generaciones máximas</b>	50	Permite un equilibrio entre tiempo de ejecución y calidad de soluciones, facilitando la convergencia hacia un frente de Pareto estable.
<b>Probabilidad de mutación</b>	0.20 (20%)	Introduce variación en las soluciones para evitar el estancamiento en óptimos locales y mantener la exploración del espacio de búsqueda.
<b>Tasa de mutación</b>	0.40 (40%)	Controla la magnitud de los cambios aplicados a las variables de decisión, favoreciendo una exploración más amplia del espacio de búsqueda.
<b>Tasa de cruce (crossover)</b>	0.80 (80%)	Favorece la combinación de soluciones prometedoras, acelerando la convergencia hacia soluciones de alta calidad.
<b>Elitismo</b>	0.20	Conserva un porcentaje de las mejores soluciones en cada generación, asegurando que no se pierdan soluciones de alta calidad.
<b>Algoritmo de reducción</b>	HypE Reduction	Utiliza la métrica de hipervolumen para priorizar soluciones bien distribuidas y de alta calidad en contextos multiobjetivo.
<b>Método de mutación</b>	HypE Mutation	Mejora la exploración del espacio de búsqueda mediante una mutación eficiente, contribuyendo a mantener un frente de Pareto robusto y diverso.

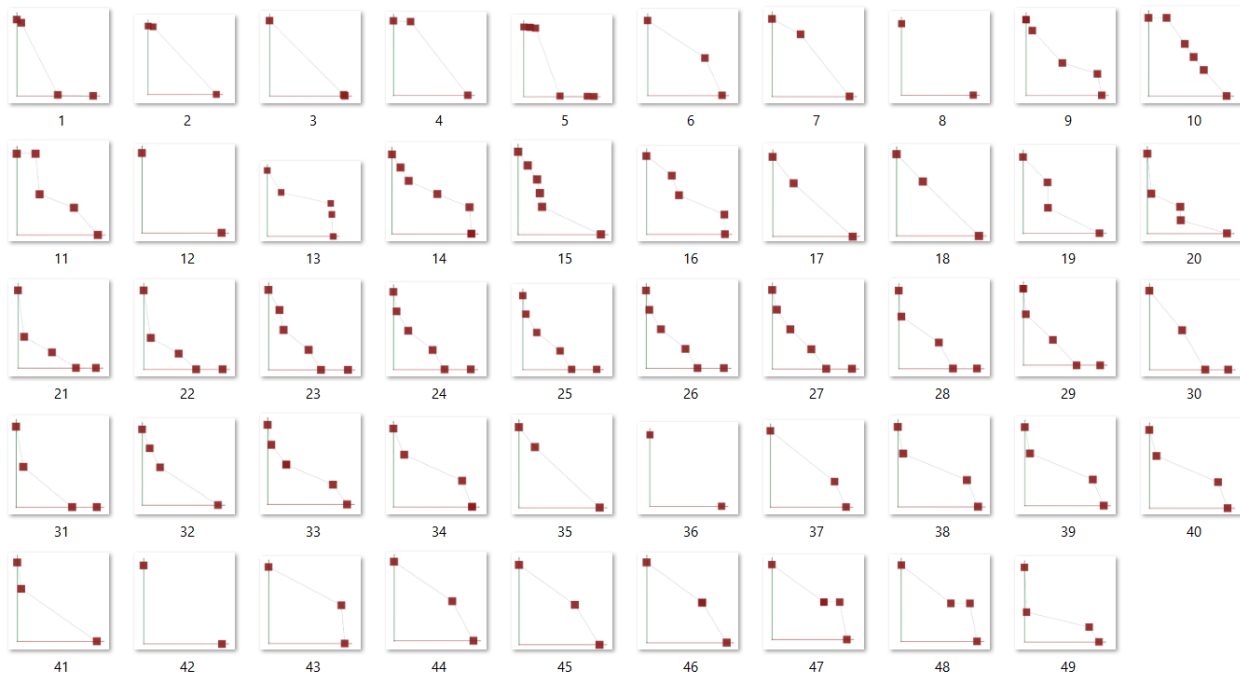
*Nota.* Elaboración propia, 2025.

La siguiente imagen presenta el Frente de Pareto correspondiente a cada una de las 49 generaciones obtenidas en el proceso de optimización multiobjetivo. En este caso, el modelo se evaluó bajo la restricción de un rango de rotación comprendido entre 167° y 172° de la unidad en el plano XY, con ocho volúmenes de altura fija de 5 m y un volumen central cuya altura varió entre 2.5 m y 5 m. El eje Y (en verde) representa la función objetivo de maximizar el confort térmico interior

adaptativo, mientras que el eje X (en rojo) corresponde a la función de maximizar el área de ventanas.

### Figura 62

*Frente de Pareto por generación de la segunda optimización con rotación entre 167-172 grados, variando la altura del cubo central y el factor de proporción de las ventanas para dos funciones objetivo*



*Nota.* Resultados obtenido en Octopus - Grasshopper, 2025.

El análisis de las 49 generaciones, con una población de 30 individuos, evidenció una evolución consistente en la calidad y la distribución de las soluciones (Ver Figura 62). A medida que avanzaron las iteraciones, se observó una mayor concentración de resultados en zonas clave del espacio objetivo, lo que indica una convergencia progresiva hacia configuraciones con mejor desempeño térmico interior y distribución de aberturas. En las generaciones iniciales predominaba una mayor dispersión y soluciones de menor calidad, mientras que en las últimas iteraciones el

Frente de Pareto adquirió una forma más definida y continua, representando un equilibrio más claro entre los objetivos en conflicto. Este comportamiento demuestra que el algoritmo fue capaz de explorar eficazmente el espacio de búsqueda y refinar las soluciones a través de los mecanismos de selección, cruce y mutación, lo cual se valida en la estabilidad alcanzada en las generaciones finales. En consecuencia, se confirma que la estrategia de optimización utilizada fue pertinente para abordar un problema de diseño arquitectónico multiobjetivo, generando un conjunto diverso de alternativas viables que cumplen simultáneamente con los criterios de desempeño establecidos.

A continuación, se presenta el Frente de Pareto con las mejores soluciones obtenidas en el proceso de optimización (Ver Figura 63). En este caso, se identifican tres configuraciones no dominadas que, aunque representan las alternativas óptimas del conjunto total, no evidencian un compromiso marcado entre los dos objetivos evaluados: maximizar el área de ventanas y maximizar el porcentaje neutral de confort térmico.

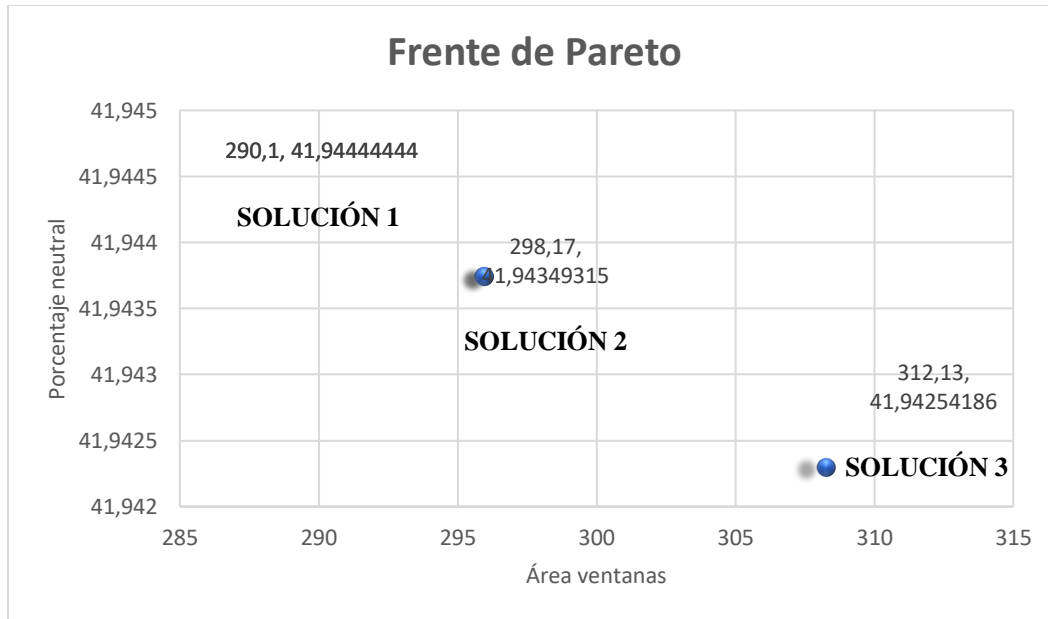
Los resultados muestran que, a pesar de que el área de ventanas varía entre 290,1 m<sup>2</sup>, 298,17 m<sup>2</sup> y 312,13 m<sup>2</sup>, el porcentaje neutral apenas fluctúa dentro de un rango extremadamente estrecho, entre 41,944 % y 41,942 %. Esta diferencia mínima indica que incrementar el área de ventanas no afecta de forma negativa ni significativa el confort térmico, lo cual sugiere que ambos objetivos pueden optimizarse casi de manera independiente.

Las tres configuraciones se ubican en la frontera eficiente únicamente porque no son superadas simultáneamente en ambos objetivos, pero el comportamiento del frente confirma que

mejorar uno de los objetivos prácticamente no empeora el otro, reflejando una ausencia de conflicto relevante entre ellos en este caso de estudio.

**Figura 63**

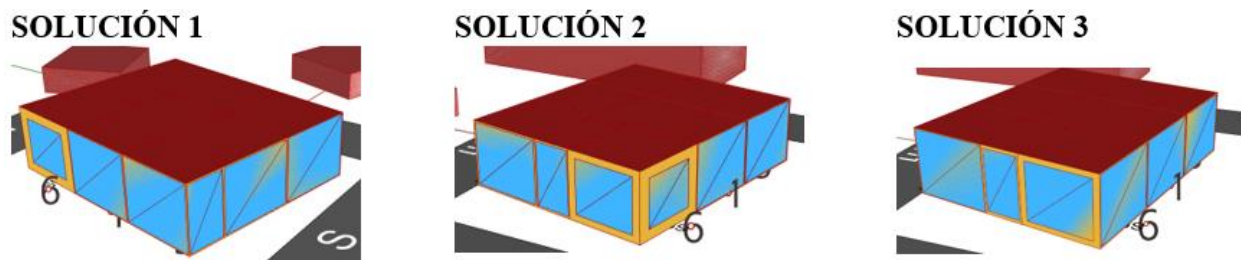
*Gráfico de dispersión del Frente de Pareto optimización con restricción en grados de rotación, entre 167-172 para dos funciones objetivo*



*Nota.* Elaboración propia empleando Python y Excel, 2025

**Figura 64**

*Soluciones formales del Frente de Pareto de la segunda optimización con rotación entre 167-172 grados para dos funciones objetivo*



*Nota.* Resultados obtenido en Octopus - Grasshopper, 2025.

A partir de la segunda optimización, fue posible identificar un conjunto representativo de soluciones no dominadas que evidencian el comportamiento del modelo frente a la variación de la rotación del volumen, la altura del cubo central y el factor de proporción de las ventanas. El análisis del frente de Pareto final permitió seleccionar tres configuraciones clave (Ver Figura 64), cada una con diferentes grados de compromiso entre el porcentaje de confort térmico en condiciones neutras y el área total de ventanas. La Solución 1 presenta la menor superficie acristalada, lo que podría traducirse en menores cargas térmicas y costos constructivos, sin comprometer el nivel de confort alcanzado. La Solución 2 representa un punto de equilibrio intermedio, mientras que la Solución 3 ofrece una apertura mayor, manteniendo resultados similares en términos de confort. Estos resultados reflejan la eficacia del enfoque evolutivo utilizado, ya que permitieron obtener alternativas de diseño con fundamento cuantitativo, adecuadas para la toma de decisiones informadas en etapas tempranas del proceso proyectual.

El análisis de las tres soluciones finales seleccionadas (Ver Figura 63 y 64) evidencia que, a pesar de las variaciones en el área de ventanas —con incrementos de hasta 22 m<sup>2</sup> entre la Solución 1 y la Solución 3—, el porcentaje de neutralidad adaptativa permanece prácticamente constante en torno al 41.94 %. Esta baja sensibilidad indica que, dentro del rango de rotaciones y volúmenes considerados en la optimización, el confort térmico interior no se ve significativamente afectado por el aumento del área vidriada. La razón de este comportamiento es que, en este caso, el área de ventanas no varía de manera independiente respecto a la envolvente, ya que se define mediante un factor de proporcionalidad (WWR). En consecuencia, como el área de fachada se mantiene constante para los diseños evaluados, las variaciones en el área acristalada resultan directamente proporcionales y no generan cambios sustanciales en las condiciones térmicas internas. Dicho resultado no implica un error, sino que revela que, bajo este esquema de restricciones, la variable

“área de ventanas” no tiene un peso determinante en el confort térmico adaptativo, lo cual sugiere la necesidad de ampliar el rango de variación de las variables o introducir nuevas condiciones de simulación para capturar interacciones más críticas entre la neutralidad y la superficie acristalada.

*5.1.4. Emplazamiento de una unidad habitacional, en términos de orientación medida en grados de rotación en el plano XY.*

El archivo climático (EPW) utilizado corresponde a la localidad de Bridgeport, California, ubicada en el condado de Mono a una altitud de 2067 metros sobre el nivel del mar. Esta zona se clasifica dentro de la categoría ASHRAE 6B, caracterizada por un clima frío y seco, compatible con condiciones subpáramo o subalpinas. El análisis del confort térmico en el sitio, sin la presencia de edificación, muestra que las condiciones de confort natural únicamente se presentan entre los meses de mayo y septiembre, mientras que durante el resto del año el nivel de confort cae prácticamente a cero. Este comportamiento se explica a través del modelo de confort adaptativo, el cual define un rango de temperatura exterior aceptable —aproximadamente entre 10 °C y 33.5 °C— dentro del cual los ocupantes pueden adaptarse pasivamente a las condiciones ambientales. Dado que las temperaturas promedio anuales de Bridgeport se encuentran por debajo de este umbral durante la mayor parte del año, el modelo concluye que fuera del periodo estival no es posible alcanzar condiciones de confort sin medidas activas o estrategias pasivas de diseño específicas.

En el **Apéndice I y J** está la información detallada sobre los resultados obtenidos al evaluar la influencia de los grados de rotación y la variación en los resultados obtenidos de las funciones objetivo.

La primera aproximación al emplazamiento se realizó mediante un modelo inicial de un solo cubo, al cual se le incorporaron cuatro ventanas distribuidas en las fachadas. Para la evaluación se consideraron las cuatro fechas más representativas del año: el equinoccio de otoño, el equinoccio de primavera, el solsticio de invierno y el solsticio de verano (Ver Figura 65). Sobre este esquema se aplicaron cinco variantes en el factor de proporción de ventanas (0%, 25%, 50%, 75% y 100%), con el fin de analizar de manera preliminar el impacto de la apertura en fachada sobre las condiciones de confort térmico adaptativo (Ver Figura 66).

**Figura 65**

*Parámetros establecidos para evaluar relaciones causales entre las variables en ejercicio de prueba (1 cubo) cambiando el periodo*

Equinoccio	FECHAS	Solsticio	FECHAS
Otoño	20 de marzo	Invierno	20 de junio
Primavera	22 de septiembre	Verano	21 de diciembre

FACTOR DE PROPORCIÓN			
0,95	100		0% VENTANAS
0,7125	75		100% VENTANAS
0,475	50		0° ORIENTACIÓN
0,2375	25		90° ORIENTACIÓN
0	0		

Diferente factor de proporción igual en 3 fachada y nulo en occidente (0.95, 0.64, 0.32).	Factor de P.
	0,94666667
	0,64
	0,32

INFLUYE LA ORIENTACIÓN
------------------------

*Nota.* Resultados obtenido en Octopus - Grasshopper, 2025.

Figura 66

Comparación relaciones causales de variables en ejercicio de prueba (1 cubo) cambiando el periodo

RESULTADOS GRILLA DE 6 PUNTOS TAMAÑO 1.1					
20 de marzo		20 de marzo		20 de marzo	
° ORIENTACIÓN	% COMFORT	° ORIENTACIÓN	% COMFORT	m² VENTANAS	% COMFORT
0	100	0	9,72	0.95 (100%) = 39.9	9,72
45	100	45	11,80333333	0.71 (75%) = 29.82	54,166667
90	100	90	11,109	<b>0.71 (75%) = 28.5</b>	55,55444467
135	100	135	11,109	0.48 (50%) = 20.16	57,63888917
180	100	180	9,72	<b>0.48 (50%) = 19.2</b>	61,805
225	100	225	10,4145	0.24 (25%) = 10.08	62,50000017
270	100	270	11,109	<b>0.24 (25%) = 9.6</b>	69,44433333
315	100	315	11,109	0.00 (0%) = 0	100
20 de junio		20 de junio		20 de junio	
° ORIENTACIÓN	% COMFORT	° ORIENTACIÓN	% COMFORT	m² VENTANAS	% COMFORT
0	100	0	8,33	0.95 (100%) = 39.9	8,33
45	100	45	9,025	0.71 (75%) = 29.82	20,139
90	100	90	9,72	<b>0.71 (75%) = 28.5</b>	29,16666683
135	100	135	9,72	0.48 (50%) = 20.16	56,9444445
180	100	180	9,025	<b>0.48 (50%) = 19.2</b>	68,05555567
225	100	225	9,025	0.24 (25%) = 10.08	83,33333333
270	100	270	9,72	<b>0.24 (25%) = 9.6</b>	87,5
315	100	315	9,72	0.00 (0%) = 0	100
22 de septiembre		22 de septiembre		22 de septiembre	
° ORIENTACIÓN	% COMFORT	° ORIENTACIÓN	% COMFORT	m² VENTANAS	% COMFORT
0	100	0	25,6944445	0.95 (100%) = 39.9	25
45	100	45	23,611	0.71 (75%) = 29.82	31,25000017
90	100	90	25	<b>0.71 (75%) = 31.35</b>	32,63888867
135	100	135	25	0.48 (50%) = 20.16	45,83333333
180	100	180	25,6944445	<b>0.48 (50%) = 21.12</b>	46,5277775
225	100	225	22,9165	0.24 (25%) = 10.08	77,08333333
270	100	270	25	<b>0.24 (25%) = 10.56</b>	79,16666667
315	100	315	25	0.00 (0%) = 0	100
21 de diciembre		21 de diciembre		21 de diciembre	
° ORIENTACIÓN	% COMFORT	° ORIENTACIÓN	% COMFORT	m² VENTANAS	% COMFORT
0	100	0	24,3055	0.95 (100%) = 39.9	25
45	100	45	22,222	0.71 (75%) = 29.82	36,1111111
90	100	90	25	<b>0.71 (75%) = 31.35</b>	38,888889
135	100	135	29,166667	0.48 (50%) = 20.16	70,8333335
180	100	180	24,3055	<b>0.48 (50%) = 21.12</b>	72,2222233
225	100	225	22,916665	0.24 (25%) = 10.08	84,02777783
270	100	270	25	<b>0.24 (25%) = 10.56</b>	76,388889
315	100	315	29,166667	0.00 (0%) = 0	100

Nota. Resultados obtenido en Octopus - Grasshopper, 2025.

Al implementar el modelo compuesto por nueve cubos, se evaluaron los resultados de las funciones objetivo considerando los valores mínimos (Ver Apéndice H) y máximos (Ver Apéndice I) posibles para las primeras cuatro variables: distancia en X, distancia en Y, altura y factor de proporción de ventanas. Los resultados mostraron que el porcentaje neutral de confort térmico

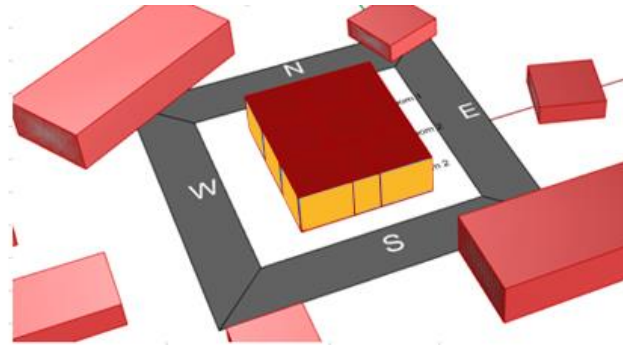
adaptativo fue superior en los valores mínimos, particularmente entre los  $167^\circ$  y  $172^\circ$  de rotación, rango que posteriormente se seleccionó para la optimización. En esta fase, se alcanzó un valor de 42,044647 (Ver Figura 67), y al ajustar las variables a factor de proporción en todas las fachadas = 0,95, área de ventanas =  $114 \text{ m}^2$  y altura máxima de techo = 5 m, manteniendo el rango de rotación, el porcentaje neutral se incrementó hasta 42,23998.

En contraste, los peores resultados se localizaron entre los  $119^\circ$ – $140^\circ$  y  $287^\circ$ – $295^\circ$ , con un valor mínimo de 40,361492 y un promedio general de 41,2782. Para los valores máximos (Ver Figura 55), el promedio del porcentaje neutral fue de 41,1974, alcanzando un mejor desempeño en los  $168^\circ$ ,  $171^\circ$  y  $172^\circ$  con 41,941591, mientras que el peor se obtuvo en los  $121^\circ$ , con 40,307268, llegando incluso a descender hasta 40,096081 al modificar las variables de la siguiente manera: área de ventanas =  $0,075 \text{ m}^2$ , factor de proporción = 0,01 en la primera fachada y 0 en las demás, con alturas de 2,5 m en el perímetro y 5 m en el centro (Ver Figura 68).

Finalmente, al realizar pruebas sin el contexto y manteniendo constantes todas las variables, se observó una disminución promedio de 0,4 puntos porcentuales en el confort térmico adaptativo neutral, lo que evidencia la relevancia de las condiciones contextuales en el desempeño térmico del modelo.

**Figura 67**

*Resultado dos funciones objetivo con los valores mínimos posibles en las variables de distancia en X, Y, Z y factor de proporción ventanas*

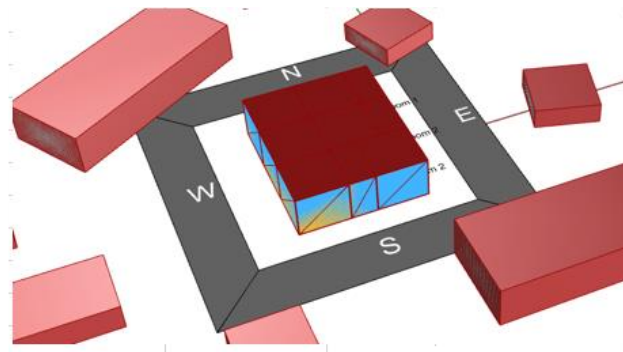


TEÓRICAMENTE		
Área ventana y WWR	Mínimo	0,06
% Neutral	Máximo	42,044647

*Nota.* Resultados obtenido en Octopus - Grashopper, 2024.

**Figura 68**

*Resultado dos funciones objetivo con los valores máximos posibles en las variables de distancia en X, Y, Z y factor de proporción ventanas*



TEORICAMENTE		
Área ventana y WWR	Máximo	324,9
% Neutral	Mínimo	40,308219

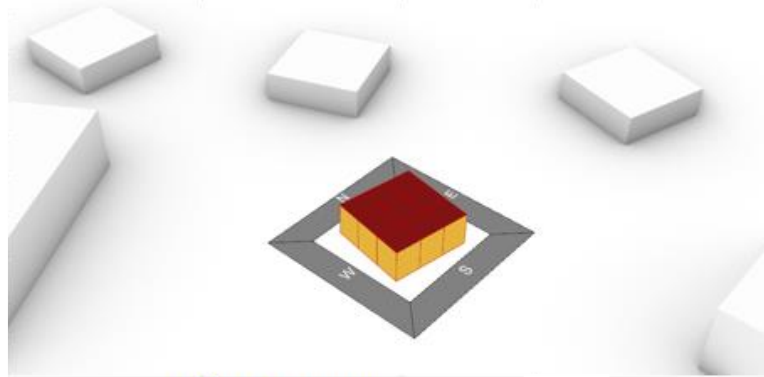
*Nota.* Resultados obtenido en Octopus - Grashopper, 2024.

Posteriormente, se evaluaron los valores mínimos y máximos posibles para las variables de distancia en los ejes X, Y y Z, así como para el factor de proporción de ventanas (WWR), con el fin de establecer un punto de partida confiable para la optimización multiobjetivo (ver Figuras 69 y 70). En el escenario de mínima apertura y configuración geométrica más compacta, el área total de ventanas + WWR alcanzó un valor de **0,06**, mientras que el porcentaje neutral de confort térmico obtuvo su valor **máximo**, llegando a **91,05 %**, acompañado del **volumen mínimo**, equivalente a **252 m<sup>3</sup>**. En contraste, bajo la configuración que permitió la mayor apertura posible, el área de ventanas y el WWR alcanzaron su **valor máximo de 324,9**, lo que redujo el porcentaje neutral a **90,86 %** y generó un **volumen máximo de 1.530 m<sup>3</sup>**.

Estos resultados definen el rango teórico dentro del cual se comportan las funciones objetivo y muestran que, incluso en los extremos geométricos y de apertura, las variaciones en el confort térmico permanecen relativamente reducidas. Esta evaluación preliminar proporciona así una referencia esencial para comprender los límites geométricos y de desempeño del modelo antes de ejecutar el algoritmo evolutivo.

### **Figura 69**

*Resultado 170° de rotación en el plano XY datos tres funciones objetivo con los valores mínimos posibles en las variables de distancia en X, Y, Z y factor de proporción ventanas*



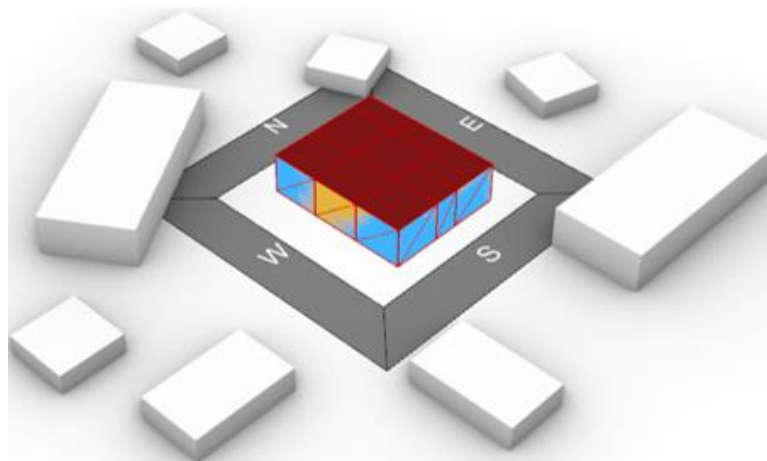
**TEÓRICAMENTE**

Área ventana y WWR	Mínimo	0,06
% Neutral	Máximo	91,052765
Volumen	Mínimo	252

*Nota.* Resultados obtenido en Octopus - Grashopper, 2025.

**Figura 70**

*Resultado 0° de rotación en el plano XY datos tres funciones objetivo con los valores máximos posibles en las variables de distancia en X, Y, Z y factor de proporción ventanas*



**TEÓRICAMENTE**

Área ventana y WWR	Máximo	324,9
% Neutral	Mínimo	90,85997
Volumen	Máximo	1.530

*Nota.* Resultados obtenido en Octopus - Grashopper, 2025.

## 6. Análisis

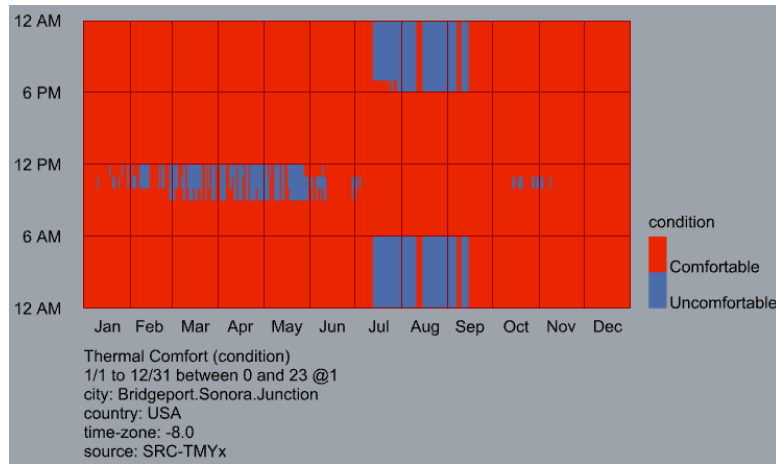
Una vez finalizada la optimización en Octopus, los valores obtenidos se exportan automáticamente a carpetas, donde se almacenan los resultados de cada corrida en formato numérico. Los parámetros corresponden a los porcentajes definidos en las sliders de Grasshopper, que representan las variables de entrada en el modelo, y su orden en los archivos de salida sigue exactamente el orden en que fueron conectados al genoma en Octopus.

Posteriormente, estos datos se procesan mediante un script en Python, ejecutado desde Visual Studio Code, lo que permite organizar la información, depurarla y representarla gráficamente. De este modo, es posible analizar el Frente de Pareto resultante y comparar las soluciones óptimas en función de los objetivos planteados, facilitando la interpretación de los compromisos entre variables de diseño. Las gráficas fueron obtenidas por medio del código (Ver Apéndice J).

En la optimización de **tres funciones objetivo simultáneas**, se logró alcanzar un valor cercano al **90 % de confort neutral** durante los **Summer Design Days (Ann Clg 2 % Conds DP ⇒ MDB)**, lo que evidencia el impacto significativo de la forma, orientación y proporción de ventanas en el desempeño térmico del conjunto (Ver Figura 71).

**Figura 71**

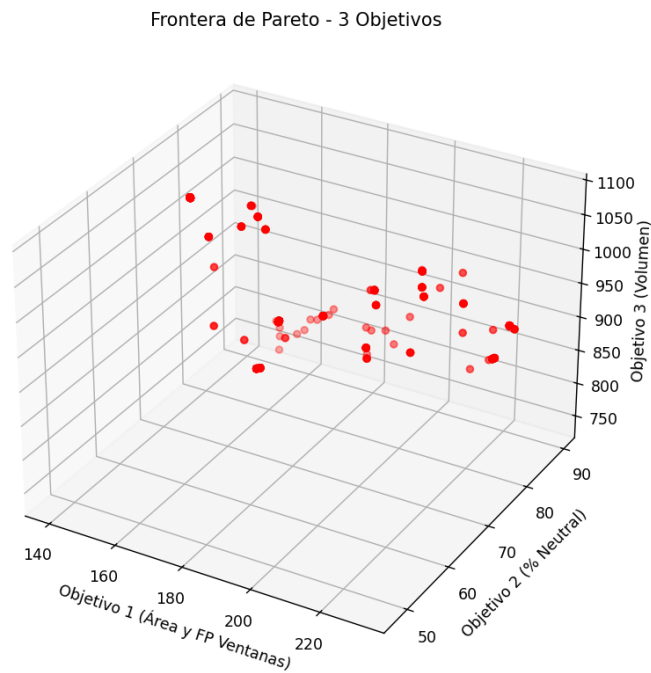
*Resultados de la Función objetivo 2: Maximizar el confort térmico adaptativo*



*Nota.* Resultados obtenido en Octopus - Grashopper, 2024.

**Figura 72**

*Frente de Pareto optimización de tres funciones objetivo con 460 soluciones*



*Nota.* Resultados obtenido en Octopus - Grashopper, 2024.

Durante la optimización se registraron 460 soluciones, de las cuales solo 59 resultaron únicas en el espacio objetivo (Ver Figura 72). Esto representa un comportamiento esperado en algoritmos evolutivos, donde la presión selectiva y el elitismo favorecen la preservación de individuos de alta calidad, provocando repeticiones en distintas generaciones. En consecuencia, el frente de Pareto final es más reducido, reflejando la convergencia del algoritmo hacia un conjunto limitado de soluciones no dominadas.

En los resultados obtenidos mediante la optimización multiobjetivo con **Octopus**, no se evidenció la conformación de un frente de Pareto definido (línea o superficie continua). En su lugar, las soluciones no dominadas se distribuyen como una nube dispersa de puntos, sin una tendencia clara. Este comportamiento puede explicarse por varias razones:

### **6.1. Falta de conflicto real entre los objetivos.**

El objetivo asociado al porcentaje de confort térmico (% Neutral) no mostró variaciones significativas entre las diferentes soluciones. Esto implica que la optimización no encontró presión evolutiva suficiente para mejorar dicho indicador, priorizando en cambio los objetivos relacionados con el área/WWR y el volumen. Como consecuencia, el % Neutral se mantuvo prácticamente constante a lo largo del proceso.

### **6.2. Diferencias de escala entre los objetivos.**

Mientras que los valores de área y volumen se ubicaron en rangos elevados (aproximadamente 150–250 y 800–1100, respectivamente), el % Neutral se concentró en un rango más reducido (50–90). Esta disparidad de magnitudes puede haber generado un sesgo en el algoritmo, el cual otorgó mayor relevancia a los objetivos de mayor escala. En este sentido, la

normalización de los objetivos (por ejemplo, llevándolos a un rango común de 0–1) se presenta como una estrategia necesaria para balancear su influencia en la optimización.

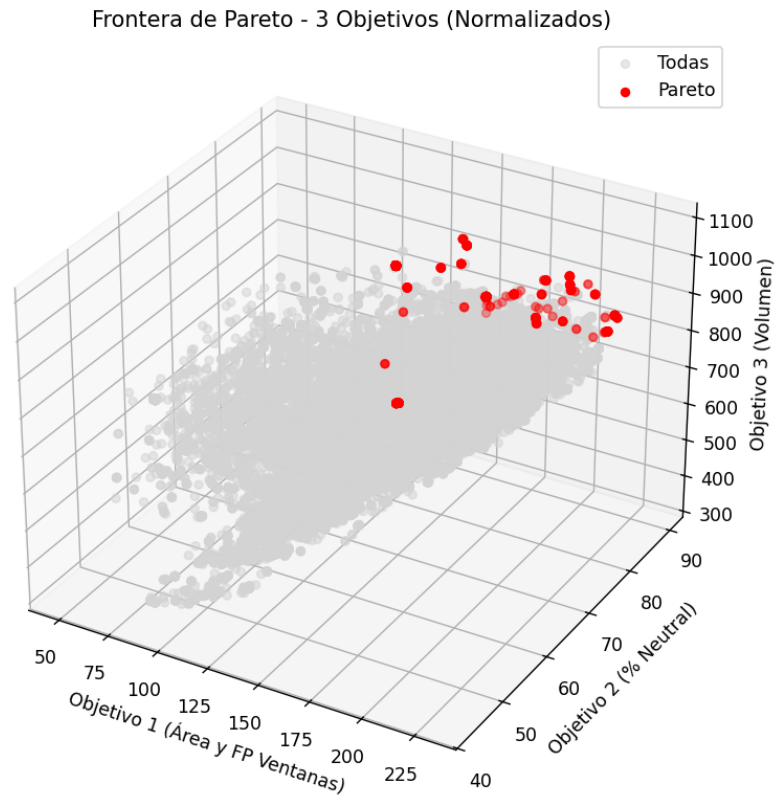
### **6.3. Posible insensibilidad del modelo de confort.**

El modelo de confort térmico empleado (por ejemplo, basado en ASHRAE adaptativo) podría ser poco sensible a las variables que se modificaron en el proceso de optimización. Si los cambios en el diseño de ventanas o áreas no repercuten de manera significativa en el cálculo de % Neutral, es esperable que dicho objetivo se mantenga invariable. Esto se refleja gráficamente en la ausencia de apertura en el eje correspondiente a este objetivo dentro de la nube de soluciones.

En conjunto, los resultados muestran que los tres objetivos sí participaron en el proceso evolutivo; sin embargo, la interacción entre ellos no generó un compromiso fuertemente definido, sino un Frente de Pareto disperso y de baja pendiente (Ver Figura 73). Esto se debe principalmente a la reducida sensibilidad del porcentaje neutral frente a las variables de diseño, lo que limitó su influencia dentro del algoritmo. Para futuros ajustes, se recomienda normalizar los objetivos y revisar el modelo de confort con el fin de asegurar una participación equilibrada de cada función objetivo en la optimización.

**Figura 73**

*Frente de Pareto optimización de tres funciones objetivo normalizadas*



*Nota.* Resultados obtenidos en Octopus - Grasshopper, 2024.

El análisis de los resultados obtenidos evidencia que, si bien el algoritmo generó una gran cantidad de soluciones (representadas en gris), únicamente un conjunto reducido, compuesto por 460 soluciones (Ver Apéndice K) conforma la frontera de Pareto (en rojo). Dicho conjunto corresponde a las alternativas que presentan el mejor compromiso entre los tres objetivos planteados (Ver Figura 73).

En relación con el área y el factor de ventanas (Objetivo 1), las soluciones óptimas tienden a ubicarse en valores intermedios-altos. Respecto al porcentaje de confort neutral (Objetivo 2), se

observa que las configuraciones más favorables se concentran en rangos superiores al 60 %, lo que indica un desempeño aceptable en términos de confort térmico. Finalmente, en cuanto al volumen (Objetivo 3), las propuestas más eficientes se agrupan en valores elevados, cercanos a los 800–1000.

En conjunto, estos resultados sugieren que las alternativas de diseño que logran un mejor equilibrio corresponden a aquellas que priorizan espacios amplios, con una adecuada relación de aberturas y un nivel de confort térmico consistente. Este hallazgo confirma que la optimización multiobjetivo no conduce a una solución única, sino a un abanico de configuraciones viables, dentro de las cuales el proyectista puede seleccionar la más conveniente según los criterios de diseño específicos.

En el gráfico (Ver Figura 73) se aprecia que la mayoría de las soluciones que están en la frontera de Pareto (en rojo) se concentran en **volúmenes altos (800–1000)**, y al mismo tiempo presentan **porcentajes de neutralidad superiores al 60 %**. Esto permite concluir que, **para el lugar analizado, un mayor volumen se relaciona con mejores condiciones de confort térmico adaptativo** (mayor % neutral).

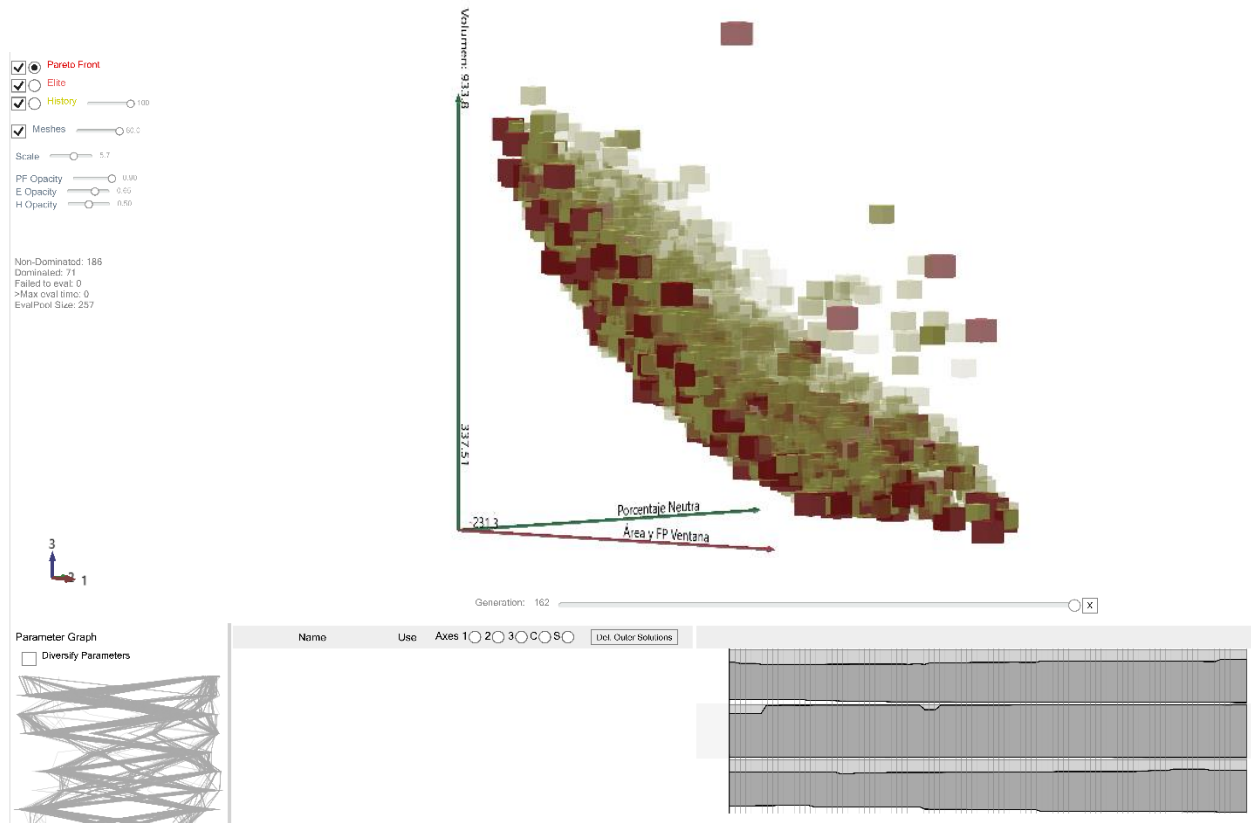
Los resultados indican que, en el contexto climático y constructivo analizado, las soluciones con mayor volumen tienden a favorecer el logro de un mayor porcentaje de neutralidad térmica, consolidándose como configuraciones con mejor desempeño en términos de confort (Ver Tabla 11).

La siguiente figura (Ver Figura 74) muestra la nube de soluciones obtenida a lo largo del proceso de optimización, donde se visualiza claramente el Frente de Pareto (en rojo) en relación

con los tres objetivos: área de ventanas, porcentaje de neutralidad y volumen. Cada punto representa una solución evaluada dentro del espacio de diseño, mientras que la distribución evidencia el compromiso entre maximizar el área acristalada y mantener un equilibrio entre volumen y desempeño energético. El proceso evolutivo se ejecutó con una **tasa de cruce de 0.8**, que favorece la recombinación de soluciones, y una **probabilidad de mutación de 0.25**, que asegura diversidad dentro de la población y evita la convergencia prematura. Asimismo, se empleó el operador de reducción **SPEA-2**, el cual garantiza la preservación de soluciones no dominadas en cada generación. La **población inicial fue de 100 individuos**, con un máximo de **162 generaciones**, lo que permitió explorar un espacio de diseño suficientemente amplio. El resultado es un frente de soluciones robusto, donde las configuraciones “élite” representan los mejores compromisos encontrados por el algoritmo (Ver Figura 75).

Figura 74

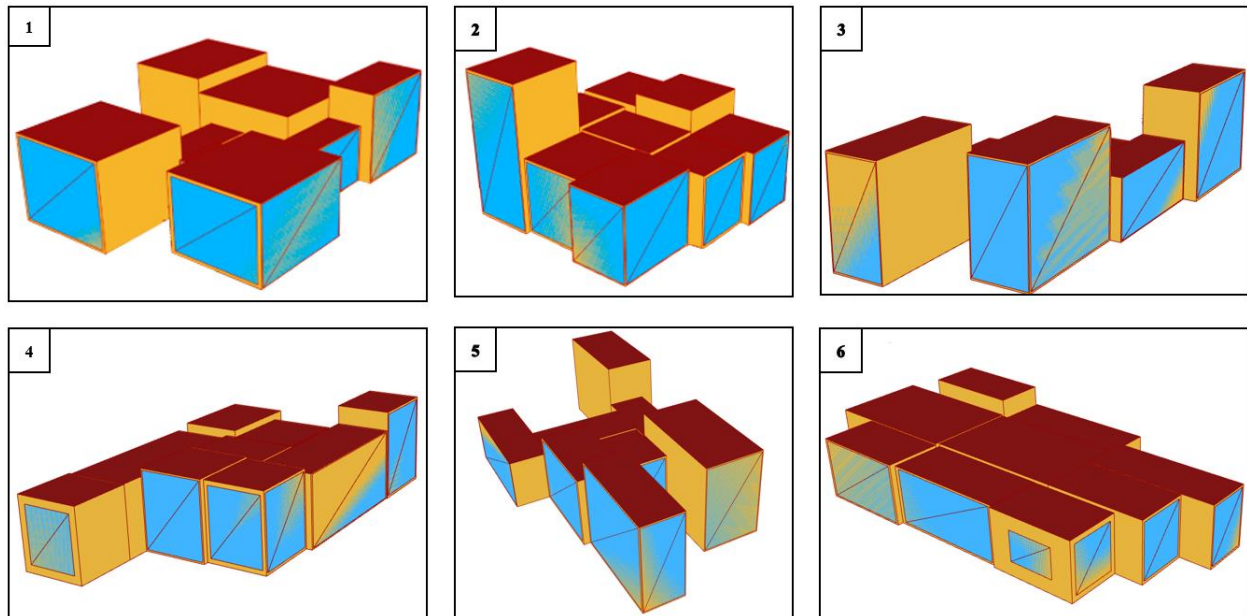
Resultado obtenido en la interfaz de Octopus al evaluar tres funciones objetivo



Nota. Resultados obtenido en Octopus - Grasshopper, 2024.

**Figura 75**

*Muestra formal de seis soluciones de la optimización de tres funciones objetivo en Octopus*



*Nota.* Resultados obtenido en Octopus - Grasshopper, 2024.

**Tabla 11**

*Comparación de seis soluciones de la optimización de tres funciones objetivo en Octopus*

<b>Solución</b>	<b>Ángulo Rotación</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Confort térmico (%)</b>
<b>1</b>	<b>56</b>	<b>933.8</b>	<b>231.3</b>	<b>81.5</b>
<b>2</b>	<b>65</b>	<b>349.1</b>	<b>88.7</b>	<b>43.9</b>
<b>3</b>	<b>114</b>	<b>597.3</b>	<b>167.6</b>	<b>79.5</b>
<b>4</b>	<b>21</b>	<b>385.7</b>	<b>92.5</b>	<b>70.7</b>
<b>5</b>	<b>111</b>	<b>663.4</b>	<b>185.6</b>	<b>72.3</b>
<b>6</b>	<b>65</b>	<b>591.9</b>	<b>109.2</b>	<b>89.9</b>

*Nota.* Elaboración propia, 2024.

En la parte inferior izquierda se muestra el Parameter Graph (Ver Figura 74), donde se representan las conexiones entre los parámetros de entrada a lo largo del proceso de optimización. Cada línea corresponde a la trayectoria de un parámetro en el espacio de soluciones, permitiendo observar la diversidad y la forma en que las variables fueron exploradas por el algoritmo. La densidad de líneas en ciertos rangos evidencia qué combinaciones de valores resultaron más recurrentes en las soluciones no dominadas, mientras que los trazos más dispersos reflejan la variabilidad introducida por la mutación y el cruce.

En la parte inferior derecha se observa la evolución de la población a lo largo de las generaciones. Este gráfico evidencia cómo, con el paso de las iteraciones, las soluciones van convergiendo hacia regiones más estables del espacio de diseño. Las variaciones iniciales son amplias, producto de la exploración aleatoria, pero progresivamente se reducen conforme el algoritmo concentra los esfuerzos en las configuraciones más prometedoras. Esta estabilización indica que el proceso alcanzó un punto de madurez, donde el Frente de Pareto refleja un equilibrio sólido entre los tres objetivos planteados: área de ventanas, porcentaje de neutralidad y volumen.

#### **6.4. Análisis del Frente de Pareto en 3D**

Al analizar los resultados exportados desde Octopus se observa que los parámetros del Frente de Pareto aparecen representados mediante valores decimales (Ver Apéndice K). Esto ocurre porque el algoritmo de optimización evolutiva trabaja en un espacio normalizado, donde cada variable es evaluada como un valor continuo entre 0 y 1. Posteriormente, estos valores se escalan al rango real definido en Grasshopper.

Por ejemplo, si el parámetro corresponde a la rotación del modelo, cuyo rango está definido entre  $0^\circ$  y  $359^\circ$ , en la tabla de resultados puede aparecer un valor como 0.23456. Este valor debe interpretarse como:

$$\text{Rotación real} = 0.23456 \times 359 \approx 84.2^\circ$$

En consecuencia, los valores decimales no representan inconsistencias, sino una forma de almacenar los resultados dentro del marco de la optimización.

En el caso particular de este proyecto, los parámetros se estructuran de la siguiente forma:

- Parámetros 1 al 9: dimensiones en el eje Y de los 9 cubos que conforman el modelo.
- Parámetros 10 al 18: dimensiones en el eje X de los 9 cubos.
- Parámetros 19 al 27: dimensiones en el eje Z (altura) de los 9 cubos.
- Parámetro 28: grados de rotación del modelo en el plano XY.
- Parámetros 29 al 40: factores de proporción de las ventanas en fachada.

Con respecto a la interpretación de los parámetros en relación con los tres objetivos definidos —área de ventanas (Obj\_1), porcentaje de neutralidad (Obj\_2) y volumen (Obj\_3)— se identifican tres conclusiones específicas:

#### ***6.4.1. Relación entre ventanas y desempeño energético***

Se observa un compromiso directo entre el área de ventanas y el porcentaje de neutralidad. A medida que aumenta el área acristalada, el valor de neutralidad disminuye, lo que confirma la tensión entre transparencia y eficiencia energética. En este sentido, los parámetros 29 al 40,

correspondientes a los factores de proporción de las ventanas en fachada, resultan determinantes en el balance entre estos dos objetivos.

#### **6.4.2. *Interacción entre volumen y eficiencia***

Las soluciones que maximizan el volumen no necesariamente corresponden a las de mejor desempeño energético. El incremento en las dimensiones en el eje Z (parámetros 19 al 27) tiende a desplazar el equilibrio hacia valores más bajos de neutralidad, salvo en los casos donde las proporciones de ventanas se ajustan adecuadamente. Esto sugiere que el control volumétrico debe estar acompañado de un diseño estratégico de fachada para mantener un desempeño balanceado.

#### **6.4.3. *Impacto de la orientación (rotación en XY)***

El parámetro 28, correspondiente a la rotación del modelo, tiene un efecto significativo sobre el porcentaje de neutralidad, mientras que no modifica de manera sustancial el volumen. Este resultado evidencia que la orientación es un factor de optimización pasiva fundamental en el proyecto, capaz de mejorar el desempeño energético sin necesidad de alterar drásticamente la forma general del conjunto.

En síntesis, el análisis del Frente de Pareto muestra que no existe una solución única y óptima, sino un conjunto de alternativas que responden a diferentes prioridades de diseño. Si se privilegia el volumen, se sacrifica desempeño energético a menos que se controlen las proporciones de ventana. Si se privilegia el área de ventanas, se reduce la neutralidad. La rotación del modelo, en cambio, se presenta como una variable estratégica capaz de mejorar el equilibrio entre los objetivos sin afectar la escala ni la espacialidad general de la propuesta.

### 6.5. Análisis del Frente de Pareto 3D – Comparativa por Rango del Factor de Proporción de Ventanas

En la primera corrida de la optimización (factor de proporción de ventanas entre **0.00** y **0.95**), se observó que la mayoría de las soluciones tendían a concentrarse hacia los valores extremos del rango. Según la observación del director, este comportamiento es común en los procesos de optimización multiobjetivo, ya que los algoritmos tienden a explorar las fronteras del espacio de diseño, donde suelen encontrarse los máximos o mínimos de las funciones objetivo. Como resultado, el frente de Pareto se distribuyó en una región amplia pero con soluciones poco realistas desde el punto de vista arquitectónico, especialmente en casos con proporciones de ventana cercanas al 95 %.

Para corregir esta tendencia y **enfocar la búsqueda en soluciones más plausibles y equilibradas**, el rango del factor de proporción se **restringió entre 0.30 y 0.70**. Este rango corresponde a proporciones más representativas para edificaciones reales en climas templados, evitando configuraciones extremas que pueden comprometer el confort térmico o el desempeño energético.

La comparación entre ambas gráficas refleja claramente el efecto de esta decisión:

- En el caso **0.00–0.95** (Gráfico 1), el frente de Pareto muestra una dispersión más amplia, con valores elevados en el **Objetivo 1** (Área y WWR), lo que refleja configuraciones con grandes superficies acristaladas. Sin embargo, estas soluciones tienden a ser dominadas cuando se considera simultáneamente el confort térmico y el volumen.

- En el caso **0.30–0.70** (Gráfico 2), la nube de soluciones se concentra en un rango más acotado y realista. Aunque el número total de soluciones evaluadas es similar, el **número de soluciones únicas en el frente de Pareto** es menor (30), indicando una reducción en la variabilidad extrema pero un **mayor enfoque en configuraciones balanceadas** entre área de ventana, porcentaje neutral de confort térmico y volumen. Esto facilita el análisis y selección de alternativas de diseño.

En términos generales, esta restricción permite **obtener un frente de Pareto más representativo del compromiso real entre las variables de diseño**, mejorando la calidad y aplicabilidad de las soluciones obtenidas.

#### **6.6. Frente de Pareto 3D – Factor de proporción de ventanas entre 0.3 y 0.7**

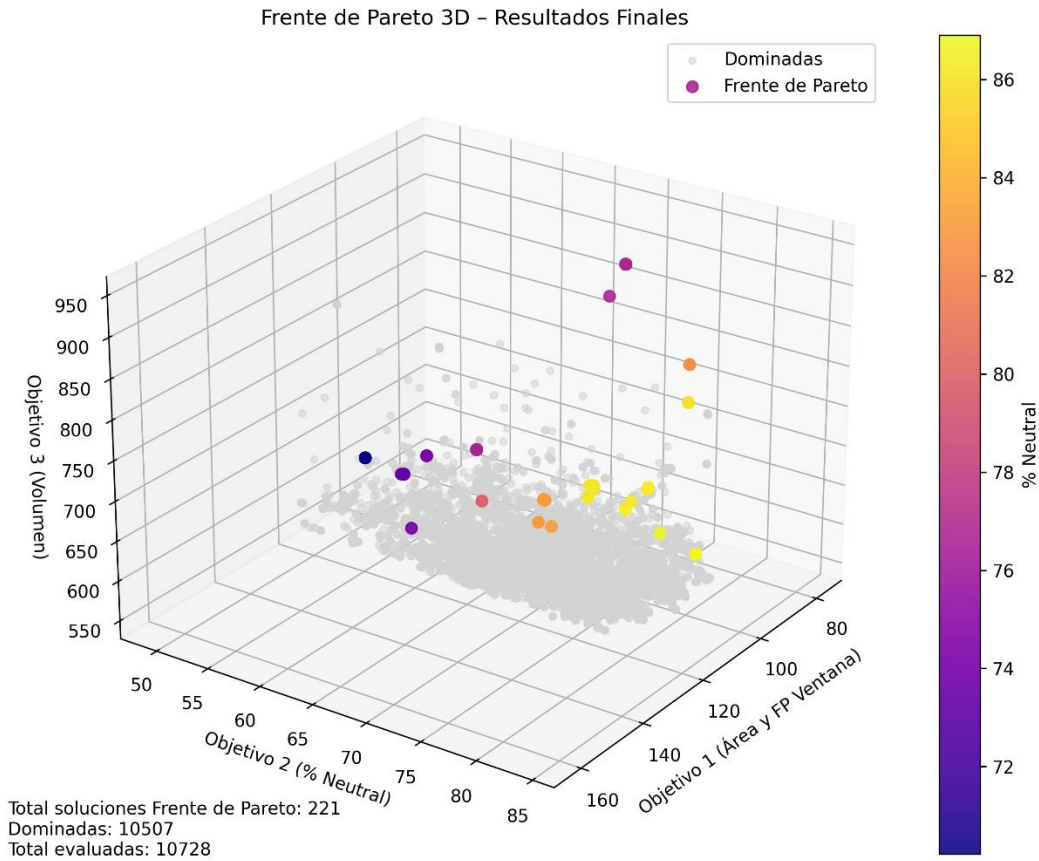
La siguiente figura (Ver Figura 76) muestra el frente de Pareto obtenido tras ejecutar el algoritmo evolutivo con una población de 50 individuos y 100 generaciones, considerando tres funciones objetivo:

- **F1:** Maximizar el área y el factor de proporción de ventanas,
- **F2:** Maximizar el porcentaje de confort térmico neutral,
- **F3:** Minimizar el volumen total del modelo.

En total, se evaluaron **10 728 soluciones**, de las cuales **10 507** fueron dominadas y **221** se identificaron como pertenecientes al frente de Pareto. Sin embargo, al filtrar las soluciones **duplicadas**, se obtuvo un conjunto final de **30 soluciones únicas no dominadas** que conforman el frente de Pareto tridimensional mostrado.

**Figura 76**

*Frente de Pareto al optimizar tres funciones objetivo con restricción de WWR*



*Nota.* Resultados obtenido en Octopus - Grashopper, 2025.

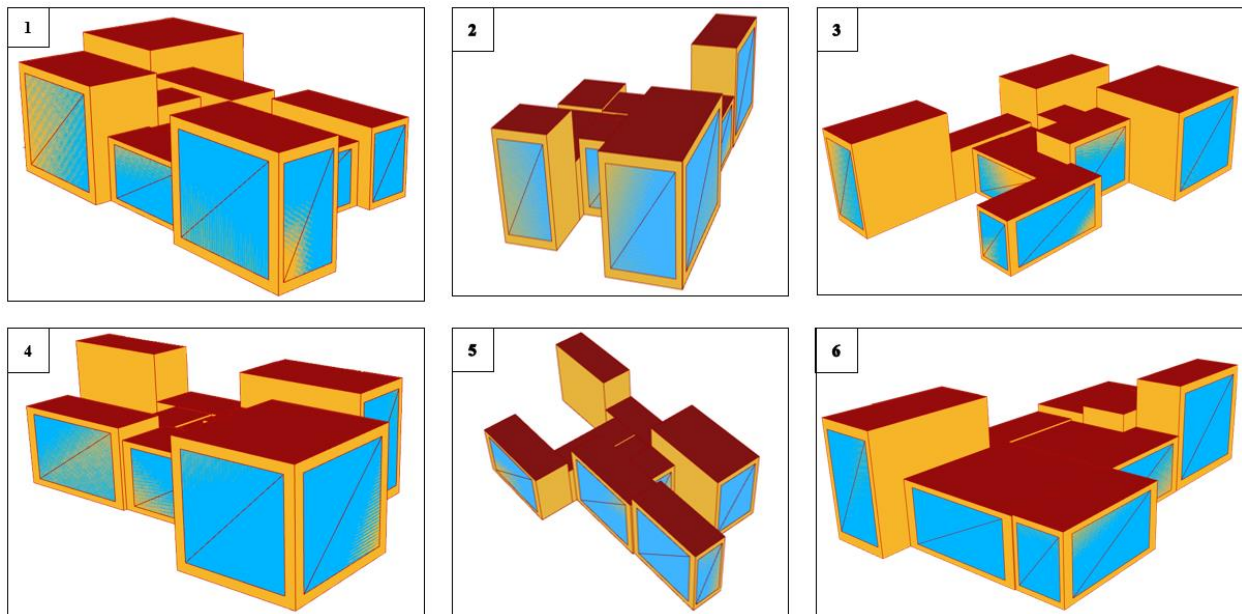
Este resultado se debe a que, durante la optimización, Octopus genera múltiples soluciones que pueden presentar exactamente los mismos valores objetivos, especialmente cuando varios individuos convergen hacia un mismo óptimo local o global. Estas soluciones (Ver Tabla 12) se contabilizan individualmente en el algoritmo, pero al construir el gráfico del frente de Pareto 3D se eliminan las repeticiones, conservando únicamente las combinaciones únicas de F1, F2 y F3.

Por eso, aunque el frente reporta 221 individuos, solo 30 puntos aparecen representados en el espacio tridimensional.

La distribución de los puntos revela un patrón claro: las soluciones del frente tienden a **maximizar simultáneamente F1 y F2**, ubicándose hacia los extremos superiores de las escalas de confort y proporción de ventanas, mientras que presentan valores moderados a bajos en F3 (volumen), lo cual sugiere que las configuraciones óptimas no necesariamente corresponden a volúmenes máximos, sino a soluciones más equilibradas entre los tres objetivos (Ver Figura 77).

### Figura 77

*Muestra formal de seis soluciones de la optimización de tres funciones objetivo en Octopus con restricción de WWR*



*Nota.* Resultados obtenido en Octopus - Grasshopper, 2025.

**Tabla 12**

*Comparación de seis soluciones de la optimización de tres funciones objetivo en Octopus con restricción de WWR*

<b>Solución</b>	<b>Ángulo Rotación</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Confort térmico (%)</b>
<b>1</b>	<b>89</b>	<b>835.94</b>	<b>167.51</b>	<b>82.94</b>
<b>2</b>	<b>104</b>	<b>535.03</b>	<b>115.79</b>	<b>76.28</b>
<b>3</b>	<b>88</b>	<b>737.04</b>	<b>155.95</b>	<b>62.67</b>
<b>4</b>	<b>111</b>	<b>712.98</b>	<b>151.56</b>	<b>79.44</b>
<b>5</b>	<b>114</b>	<b>679.95</b>	<b>149.11</b>	<b>77.66</b>
<b>6</b>	<b>82</b>	<b>733.26</b>	<b>131.84</b>	<b>86.82</b>

*Nota.* Elaboración propia, 2025.

## **7. Discusión**

El análisis de confort térmico se realizó utilizando datos climáticos del archivo Bridgeport–Sonora Junction, que corresponden a un contexto urbano en Bridgeport, USA. En este archivo, los datos representan las condiciones extremas de temperatura para dos períodos críticos del año: el invierno de diseño, que corresponde al día más frío del año (febrero), y el verano de diseño, que se da en julio, con temperaturas máximas entre 25 y 30°C.

Es importante destacar que este análisis se realizó en función de condiciones típicas de climas urbanos templados, donde durante el invierno las temperaturas pueden bajar

considerablemente durante todo el día y la noche. Este escenario es muy diferente al de un clima de páramo como el de Santurbán, donde las temperaturas son bajas, pero no suelen alcanzar las extremas y constantes bajas de las que se habla en los datos de Bridgeport. En el páramo, aunque existe una alta variabilidad térmica diaria, las temperaturas no son tan extremas ni constantes como en zonas urbanas frías, lo que puede afectar la validez y la adaptabilidad del modelo ASHRAE 55:2017 en este tipo de contexto climático.

Por esta razón, si bien el modelo ASHRAE 55 es útil como referencia para analizar el confort térmico en ambientes fríos, se debe tener en cuenta que la adaptación de este modelo a las condiciones específicas del páramo de Santurbán debe ser cuidadosamente evaluada. La diferencia entre ambos climas implica que se podría requerir una validación más detallada con datos específicos del microclima local, para optimizar la precisión de las predicciones de confort térmico en este entorno particular.

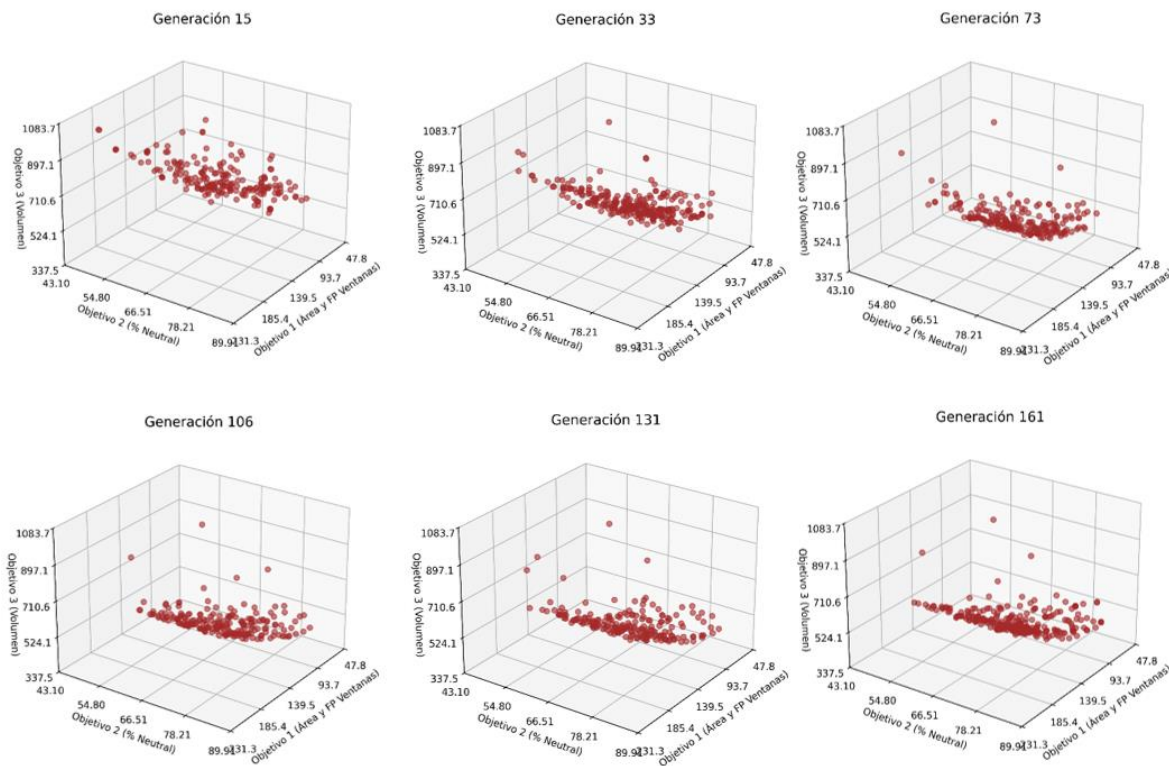
En total se generaron 162 gráficos (Ver Apéndice L), correspondientes a cada generación del proceso de optimización multiobjetivo. Cada gráfico muestra la distribución de las soluciones evaluadas en los tres objetivos planteados: área y factor de proporción de ventanas en fachada, porcentaje neutro y volumen. Dado que se trata de un barrido generacional, la visualización completa resulta redundante y poco legible, por lo que para efectos de la tesis se seleccionan y presentan únicamente seis gráficos representativos, que permiten observar la evolución de la nube de soluciones a lo largo de las generaciones (Ver Figura 78).

El costo computacional de la optimización resultó significativo. Cada solución requirió en promedio 20 segundos de cálculo en las primeras generaciones, tiempo que aumentó progresivamente hasta alcanzar cerca de 60 segundos en etapas avanzadas. Como consecuencia, la evaluación de una población de 50 individuos a lo largo de 100 generaciones demandó

aproximadamente 48 horas de procesamiento continuo. Este resultado evidencia que la complejidad del modelo y el número de evaluaciones influyen directamente en los tiempos de simulación, por lo que es fundamental considerar estrategias de optimización de recursos y balancear la precisión requerida con la viabilidad computacional del proceso.

**Figura 78**

*Resultados muestras por generación (15, 33, 73, 106, 131 y 161) de la optimización de tres objetivos*



*Nota.* Resultados obtenidos en Octopus - Grasshopper, 2025.

Los hallazgos son significativos en tanto demuestran que:

- La optimización multiobjetivo permite explorar trade-offs de diseño de forma sistemática.
- El diseño conceptual puede entenderse como un proceso gestionable, apoyado por herramientas computacionales, en línea con lo propuesto por Oxman (2006) y Kolarevic

(2003).

- No se afirma que el método reemplace procesos de gestión, sino que los informa y estructura, especialmente en etapas tempranas.

## 8. Conclusiones

**8.1. Objetivo general:** *Implementar un método de optimización multiobjetivo para el diseño arquitectónico de un proyecto ecoturístico.* (Ver Sección 6.1.)

El proyecto logró implementar satisfactoriamente una **metodología de optimización multiobjetivo** aplicada al diseño arquitectónico, abordando de forma simultánea aspectos de **configuración espacial, orientación, proporciones de aberturas y confort térmico interior**. Se desarrolló una **herramienta interactiva y automatizada** que permite generar múltiples alternativas de diseño esquemático de forma ágil, mediante ajustes sencillos en un conjunto de parámetros, lo cual facilita su integración en las etapas iniciales del proceso proyectual.

Este enfoque representa un cambio sustancial frente a la práctica convencional —basada en la intuición y la evaluación manual de pocas propuestas— al permitir **explorar sistemáticamente un amplio espacio de soluciones no dominadas**, brindando criterios objetivos para la toma de decisiones arquitectónicas. Además, la metodología se posiciona como una alternativa flexible frente a herramientas comerciales como **Spacemaker (Autodesk)**, **TestFit** o **Archistar**, las cuales suelen estar limitadas por parámetros predefinidos y orientadas a contextos urbanos estandarizados, mientras que el presente modelo se adapta a contextos no urbanos como el ecoturístico.

**8.2. Objetivo 1:** *Configurar una herramienta interactiva automatizada que permita presentar opciones de diseño esquemático. (Ver Sección 6.1.1.)*

Se logró configurar satisfactoriamente una herramienta basada en **Grasshopper y Octopus** que integra parámetros geométricos y ambientales, generando **diseños esquemáticos optimizados** a través de algoritmos evolutivos. Su uso no requiere programación avanzada y permite **modificar fácilmente las funciones objetivo**, lo que la hace versátil y adaptable a otros proyectos. Esta herramienta permite visualizar en tiempo real el impacto de cada decisión de diseño y comparar configuraciones bajo distintos criterios de desempeño.

**8.3. Objetivo 2:** *Definir la distribución de los usos internos en planta de una unidad habitacional basado en la sintaxis del espacio. (Ver Sección 6.1.2.)*

La distribución interna de los espacios fue estructurada a partir de criterios de **sintaxis espacial**, garantizando jerarquías claras entre zonas públicas y privadas, y facilitando la integración entre la **configuración funcional interna** y las **condiciones ambientales externas**. Esta definición fue clave para establecer restricciones geométricas realistas en el proceso de optimización, evitando soluciones formales desvinculadas de la habitabilidad.

**8.4. Objetivo 3:** *Hallar soluciones no dominadas para el confort térmico interior y la configuración de las aberturas en las fachadas de una unidad habitacional según las funciones objetivo. (Ver Sección 6.1.3.)*

La metodología permitió encontrar soluciones no dominadas que equilibran **dos objetivos contrapuestos**: maximizar el confort térmico interior y maximizar el área de ventanas para favorecer la relación con el entorno. En la primera fase, con dos funciones objetivo, se observó que las variaciones en el porcentaje de confort térmico eran reducidas, indicando una **influencia limitada de las proporciones de ventanas bajo las restricciones climáticas** establecidas. Sin embargo, al incorporar una tercera función (minimizar el volumen), se alcanzaron valores de confort de hasta **90 % en condiciones de verano**, evidenciando la **sinergia entre múltiples criterios de diseño**. Este resultado representa un incremento cercano al **180 % respecto al valor base**, confirmando la efectividad de la metodología para generar configuraciones arquitectónicas de mayor desempeño.

**8.5. Objetivo 4:** *Determinar el emplazamiento de una unidad habitacional en términos de orientación medida en grados de rotación en el plano XY. (Ver Sección 6.1.4.)*

El análisis mostró que, aunque no se identificó un patrón claro de correlación entre la rotación general y el confort térmico en el modelo compuesto por nueve cubos, en modelos simplificados sí se observó una **influencia significativa de la orientación** en fechas clave (por ejemplo, 22 de septiembre y 21 de diciembre), cuando la incidencia solar directa varía considerablemente. Estos hallazgos sugieren que la **orientación solar sigue siendo un factor determinante**, pero su efecto puede verse atenuado por la **morfología compleja del conjunto volumétrico**, resaltando la importancia de evaluar cada parámetro bajo contextos específicos de simulación.

**8.6. Consideraciones adicionales y limitaciones**

Este trabajo describió los problemas de diseño en la arquitectura y propuso una nueva aproximación metodológica de configuración morfológica tridimensional basada en la optimización del desempeño térmico (confort interior) y visuales, tomadas como funciones objetivo. A pesar de los avances alcanzados con la herramienta desarrollada y la metodología propuesta, el proyecto presenta varias **limitaciones técnicas y contextuales** que es importante destacar para futuras mejoras e interpretaciones adecuadas de los resultados.

No se garantiza la implicación de todas las variables del ecoturismo. Esto se reconoce explícitamente como una limitación del estudio. En este caso, la validación se realizó sobre un caso de estudio genérico, seleccionado por su control geométrico y climático, y no por su pertenencia a un entorno ecoturístico real.

#### ***8.6.1. Definición de materiales:***

En el modelo no se incorporaron materiales constructivos en la simulación. Esta decisión simplificó el proceso computacional, pero implica una limitación importante, ya que las propiedades térmicas de los materiales influyen directamente en el comportamiento térmico interior y, por ende, en los resultados de la función objetivo relacionada con el confort térmico.

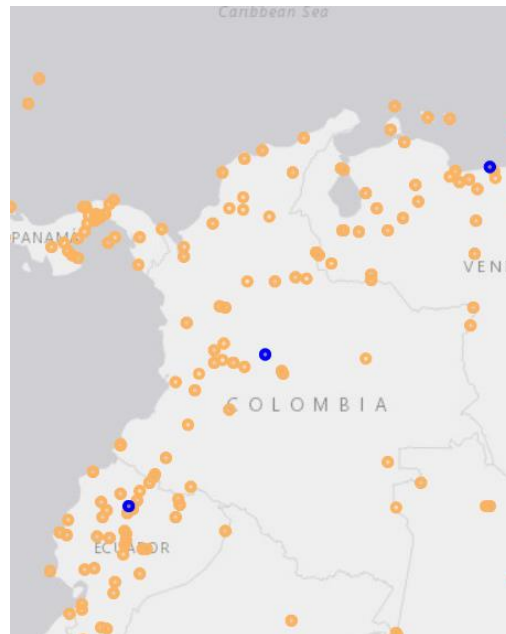
#### ***8.6.2. Información climática limitada:***

El análisis estuvo condicionado por la **escasez de archivos climáticos EPW disponibles para Colombia**. Como se observa en la imagen (Ver Figura 79), la mayor concentración de archivos se encuentra en la **zona Caribe**, mientras que regiones como **Amazonas, Santander, Vaupés, Guainía, Vichada o Guaviare** no cuentan con datos climáticos disponibles. Esto

restringe el análisis a pocas ubicaciones representativas, limitando la extrapolación de los resultados a otros contextos climáticos del país.

### Figura 79

*Disponibilidad de archivos EPW*



*Nota.* Resultados obtenidos de: <https://www.ladybug.tools/epwmap/> - Grashopper, 2022.

#### 8.6.3. Ausencia de análisis energético en Honeybee:

La herramienta desarrollada no incluye el estudio de energía disponible mediante **Honeybee**, a pesar de que esta funcionalidad podría integrarse fácilmente en futuras versiones. Su inclusión permitiría evaluar la demanda energética y la contribución pasiva de las estrategias arquitectónicas al confort interior.

#### ***8.6.4. Errores en la geometría inicial:***

En la fase inicial, la generación aleatoria de puntos en el espacio para ubicar los cubos generaba “gaps” o espacios no conectados entre volúmenes, produciendo geometrías no continuas y errores en el análisis térmico. Para evitar estos problemas, se optó por una **cuadrícula de nueve cubos adyacentes**, garantizando continuidad geométrica y estabilidad en las simulaciones.

#### ***8.6.5. Problemas por exceso de información en memoria:***

Durante el desarrollo, se presentó un error crítico cuando el programa se cerró inesperadamente al **guardar múltiples “meshes” generadas en cada iteración**, lo cual saturó la memoria de trabajo. Este evento evidenció la necesidad de optimizar la gestión de datos intermedios y almacenamiento de resultados para procesos de larga duración.

#### ***8.6.6. Tiempo de cómputo:***

Si bien el tiempo requerido para completar las simulaciones aumenta de forma considerable a medida que crece la complejidad de la optimización y el número de generaciones, especialmente cuando se incorpora el análisis de confort térmico adaptativo, este esfuerzo computacional resulta significativamente menor en comparación con el tiempo que un arquitecto necesitaría para explorar manualmente un número equivalente de alternativas.

En un proceso tradicional, durante las etapas iniciales de diseño (equivalentes a RIBA 1–2 en la Figura 48 o DE–DD en la Figura 13), un arquitecto suele generar entre **2 y 3 propuestas formales por semana**, dependiendo del nivel de detalle requerido. En esta investigación, la

optimización de **tres funciones objetivo** produjo **30 soluciones únicas y óptimas en 48 horas de cómputo continuo**, cantidad que, bajo un enfoque convencional, requeriría entre **10 y 15 semanas de trabajo** (aproximadamente **2,5 a 3,5 meses**) para desarrollarse manualmente.

En cambio, el modelo empleado permitió evaluar todas estas alternativas de manera automatizada, asegurando consistencia en los criterios de análisis y reduciendo la intervención humana repetitiva en etapas tempranas del proyecto. Aunque la optimización demanda tiempo de procesamiento, **no requiere hardware especializado ni licencias costosas**, y la relación entre tiempo invertido y cantidad de soluciones generadas evidencia una **ventaja sustancial frente al método manual**, ampliando el espacio de exploración arquitectónica a escalas que serían impracticables mediante procesos tradicionales.

#### **8.6.7. Requerimientos computacionales accesibles:**

Una ventaja destacable del proyecto es que **no requiere inversiones elevadas en hardware o licencias comerciales**. Las simulaciones fueron realizadas en un **computador portátil de escritorio** con las siguientes especificaciones:

- **Procesador:** Intel Core i7-12650H (12<sup>a</sup> generación)
- **Tarjeta gráfica:** NVIDIA GeForce RTX 3060 Laptop GPU (6 GB GDDR6)
- **RAM:** 16 GB
- **Almacenamiento:** SSD de 453 GB
- Temperatura promedio durante los cálculos: 79 °C en CPU y 60 °C en GPU.

Este equipo representa una configuración de gama media-alta disponible comercialmente, suficiente para realizar procesos de optimización multiobjetivo con tiempos razonables. Además, **no es necesario adquirir licencias costosas**, ya que **Grasshopper y sus plugins** (Space Syntax, Ladybug, Honeybee, Octopus, entre otros) son gratuitos, y **Python** es un lenguaje de código abierto. Esto hace que la metodología sea **económicamente viable y replicable** para arquitectos, estudiantes o investigadores sin acceso a plataformas comerciales de alto costo.

## 9. Recomendaciones

Se recomienda desactivar la opción Record Solution Meshes en Octopus para optimizaciones largas con alto uso de memoria, ya que almacenar todas las geometrías generadas durante el proceso de optimización incrementa de manera significativa el consumo de memoria y puede ocasionar el cierre inesperado de Rhinoceros al finalizar la corrida, impidiendo el guardado de resultados. Adicionalmente, es conveniente reducir el tamaño de la población o el número máximo de generaciones, activar intervalos de guardado automático (Save Interval) y minimizar las vistas en Rhino durante la ejecución, con el fin de disminuir la carga computacional. Asimismo, se aconseja desactivar las previsualizaciones innecesarias en Grasshopper y separar el cálculo de valores numéricos de la representación geométrica, de modo que la optimización se enfoque en los datos esenciales y se garantice la estabilidad del software. Sin embargo, es importante advertir que al desactivar Record Solution Meshes no se conservarán todas las geometrías intermedias, aunque Octopus sí mantendrá los parámetros numéricos, lo que permite reconstruir posteriormente las formas correspondientes a las soluciones seleccionadas sin comprometer la visualización de los resultados finales.

Para futuras iteraciones del modelo o estudios complementarios, se sugiere incorporar elementos de estrategia pasiva avanzada, como masa térmica interna, muros trombe o doble piel, que permitan extender el periodo de confort térmico sin necesidad de sistemas activos (Ver Apéndice M).

Asimismo, se recomienda reducir el factor de proporción de ventanas (WWR) a un rango entre 0.4 y 0.6 en orientaciones no favorables, para minimizar pérdidas térmicas nocturnas, manteniendo la captación solar principalmente en fachadas sur y este. Otra línea de experimentación recomendable es la incorporación del parámetro de calefacción parcial en el modelo adaptativo, activando la opción **conditioning** para simular escenarios con apoyo térmico limitado. Esta aproximación permitiría evaluar el impacto de intervenciones mínimas en términos de energía, dentro de un enfoque de sustentabilidad coherente con los principios de la arquitectura ecoturística.

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda continuar con análisis más detallados de las variables geométricas, especialmente aquellas que mostraron correlaciones directas con el confort térmico, como la altura del volumen y el desplazamiento espacial en los ejes cartesianos. Estas dimensiones podrían ser optimizadas con mayor precisión mediante simulaciones adicionales que incorporen materiales con alta capacidad térmica, permitiendo aprovechar mejor las ganancias solares. Asimismo, se sugiere realizar estudios específicos de orientación solar no solo en el modelo completo, sino también en componentes individuales, como módulos habitacionales independientes, para evaluar con mayor claridad el impacto de la rotación en distintas épocas del año. Finalmente, integrar herramientas más robustas de simulación energética, como Honeybee Energy, permitiría capturar con mayor fidelidad las pérdidas y ganancias térmicas

reales del modelo, mejorando así la precisión del análisis y la toma de decisiones en el diseño arquitectónico pasivo.

**Space Syntax:** Se recomienda tener en cuenta que Space Syntax no está diseñado para generar plantas arquitectónicas finales, sino que su principal utilidad radica en analizar y comprender las relaciones y la conectividad entre los espacios. Por lo tanto, su aplicación resulta especialmente valiosa en las etapas iniciales de diseño conceptual y esquemático, donde es necesario explorar patrones de circulación y organización espacial, pero no para la producción de planos constructivos definitivos. Cabe resaltar que al estar definidas las relaciones iniciales, en el modelo final, por medio de los conectores (líneas que van desde cada centroide de los nuevos cubos) los gráficos y análisis mostrados por Space Syntax no variaron como en las primeras aproximaciones, que los puntos iniciales eran completamente aleatorios.

**Confort térmico:** Se recomienda considerar que el confort térmico adaptativo, evaluado mediante Ladybug en Grasshopper siguiendo el estándar ASHRAE 55, depende de múltiples variables y, por lo tanto, es difícil obtener un único resultado representativo. Aunque teóricamente sería posible alcanzar un 100% de condiciones neutras de confort interior, en la práctica esto requiere que se alineen de manera óptima varios factores: condiciones climáticas ideales, un diseño pasivo altamente eficiente con ventilación natural, aislamiento y protección solar, horarios de ocupación adecuados y cargas internas moderadas. En el caso de este proyecto, las pruebas realizadas alcanzaron un máximo de 42% de confort neutro, lo que sugiere la presencia de algún factor limitante dentro del modelo o de las condiciones simuladas. Por ello, se recomienda interpretar los resultados de confort adaptativo como un indicador relativo más que como un valor absoluto, y complementar este análisis con estrategias de diseño pasivo y evaluaciones de

simulación adicionales para mejorar la precisión y utilidad práctica de las recomendaciones de diseño.

A pesar de escoger el modelo según la evaluación de climatización presente en el edificio, el resultado obtenido indica que el diseño pasivo actual no es suficiente para alcanzar el confort la mayor parte del tiempo. Dicha evaluación identificó una limitación real del diseño, lo que te permite justificar mejoras basadas en evidencia térmica. ¿Cuál es el siguiente paso? Aunque se tuvo en cuenta aumentar la ganancia solar pasiva mediante los grados de orientación en el proyecto y el aumento del área en las ventanas, es considerable integrar nuevas estrategias pasivas de confort térmico:

1. Aumentar ganancia solar pasiva (incluyendo claraboyas).
2. Contemplar el uso de materiales con inercia térmica.
3. Minimizar pérdidas de calor (aislamiento, estanqueidad).
4. Evaluar si es viable añadir un sistema de calefacción mínima eficiente (estrategia híbrida).
5. Revisar el periodo evaluado en Grasshopper. ¿Es invierno completo? ¿Todo el año?

Es posible obtener más insight si se compara por estaciones.

Se reconoce que el modelo empleado es válido, pero su resultado muestra limitaciones del confort pasivo en clima subalpino. Es sugerible, como trabajo futuro el uso del modelo PMV/PPD para evaluar confort en condiciones donde la adaptabilidad es insuficiente (por ejemplo, en invierno o en espacios con ocupación prolongada).

El modelo adaptativo fue correctamente aplicado en este proyecto, ya que responde a la naturaleza pasiva del sistema de ventilación y cumple con los lineamientos de ASHRAE 55 para edificios sin climatización activa. No obstante, el bajo porcentaje de horas con confort neutro

(40 %) evidencia que, en climas subalpinos, la adaptabilidad del usuario no siempre basta para garantizar el bienestar térmico. Este resultado no invalida el modelo, sino que resalta la necesidad de reforzar las estrategias pasivas o complementarlas con soluciones de bajo impacto energético. En futuras etapas, se recomienda incorporar el modelo PMV/PPD para evaluar más detalladamente el comportamiento térmico en condiciones extremas y orientar decisiones de diseño más precisas.

Disminuir la cantidad de parámetros, concretizarlos para poder establecer más fácilmente las relaciones causales y su repercusión en los objetivos, para la toma de decisiones en cuanto a la forma del modelo.

Tiempo de computo

## 10. Trabajos futuros

Si bien el modelo desarrollado demuestra la eficacia de la optimización multiobjetivo como herramienta de apoyo en el diseño arquitectónico, presenta algunas **limitaciones** que abren espacio para **trabajos futuros**. En esta etapa no se incorporaron variables relacionadas con **materiales**, **sombras proyectadas ni comportamiento energético**, aspectos que pueden integrarse fácilmente en el entorno de **Grasshopper** mediante componentes adicionales. Su inclusión permitiría obtener análisis más completos sobre el desempeño térmico y ambiental del modelo. Asimismo, la estructura flexible del sistema permite que, con **modificaciones mínimas**, se puedan **añadir nuevas funciones objetivo o ajustar las existentes**, ampliando las posibilidades de exploración hacia criterios como iluminación natural, costos, impacto ambiental o desempeño estructural. De esta manera, el modelo tiene el potencial de evolucionar hacia una herramienta integral de apoyo a la toma de decisiones en diferentes fases y escalas de diseño.

Durante el desarrollo del modelo se halló una diferencia conceptual importante entre la geometría resultante (*Box*) y el volumen calculado mediante el componente *Volume* de Grasshopper; sin embargo, también se identificó una **correlación consistente entre ambos valores**. La salida del componente *Box* representa los dominios geométricos en los ejes X, Y y Z, sin unidades físicas, mientras que el componente *Volume* entrega un valor escalar en metros cúbicos ( $m^3$ ), correspondiente al volumen real. Al comparar ambos, se observó que cuando el volumen total era de **90  $m^3$**  (equivalente a 10  $m^3$  por cubo), el valor total obtenido a partir del *Bounding Box* era de **252** (28 por cubo). El valor máximo posible para este objetivo, donde el volumen alcanzó **1.350  $m^3$** , el equivalente del *Bounding Box* fue de **192 por cubo** para aquellos de  $6 \times 6$  m y **126 por cubo** para los de  $3 \times 6$  m, dando un total de **1.530** ( $192 \times 6 + 126 \times 3$ ). Esto evidencia que, si bien el *Bounding Box* no mide directamente el volumen, su valor puede correlacionarse de manera proporcional con este, reflejando los cambios dimensionales de la geometría a lo largo de la optimización. Este hallazgo permite considerar el *Bounding Box* como un indicador complementario, aunque no sustituto, de métricas volumétricas reales en procesos de optimización paramétrica.

**Referencias**

- Ahmad, T., Zhang, D., AlGhamdi, A. S., Ullah, F., & Alshamrani, S. S. (2022). *Design parametric analysis of low-energy residential buildings on the way to a defined cost-optimal capacity point*. Alexandria Engineering Journal, 61(10), 8297–8313.  
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.061>
- Aish, R., Jabi, W., Lannon, S., Wardhana, N., & Chatzivasileiadi, A. (2018). *Topologic: Tools to explore architectural topology*. Disponible en: *Topologic: tools to explore architectural topology* -ORCA (cardiff.ac.uk) Acceso 29/10/2021
- Aksin F.N., Selçuk S.A. Use of Simulation Techniques and Optimization Tools for Daylight, Energy and Thermal Performance: The case of office module(s) in different climates (2021) Proceedings of the International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2, pp. 409 - 418
- Albunni, L. Lamia Albunni. (2022). *Generative Design: An Exploration of The Multi-Objective Optimization* [Video]. YouTube.  
<https://www.youtube.com/watch?v=vHDGYLX7YVE&list=PLZjWoPIOVOTOGp0j4qNX11GY9PD0v-qVJ&index=8>
- Alcaldía Municipal de Santo Domingo de Silos. (2019). *PLAN DE DESARROLLO SANTO DOMINGO DE SILOS. 5*.
- Alvarado, C., Herazo, I., Ardila, C., & Donoso, Y. (2005). *Aplicación de NSGA-II y SPEA-II para la optimización multiobjetivo de redes multicast*. Ingeniería y Desarrollo, (17), 28-53.
- Ambriz, A. (2008). *El proceso de composición arquitectónica*. In Vida Urbana (p. 3).  
<http://alfambriz.tripod.com/comparq.pdf>

- American Society Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineering. (2017). *ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS* Atlanta (USA) SI ed. Atlanta: W. Stephen Comstock; ASHRAE.
- American Society Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineering. (2021). ANSI/ASHRAE Addendum a to ANSI/ASHRAE Standard 55-2020. [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org)
- Anderson, T., & Shattuck, J. (2012). *Design-based research: A decade of progress in education research?* *Educational Researcher*, 41(1), 16–25. <https://doi.org/10.3102/0013189X11428813>
- Andi, Adiel Abednego, I., & Br. Gultom, B. J. (2021). *A Space Syntax Guide to Optimize Shopping Mall: A Systematic Review*. *International Journal of Environment, Architecture, and Societies*, 1(01), 19–30. <https://doi.org/10.26418/ijeas.2021.1.01.19-30>
- Arteta, J. (2017). *BREVE HISTORIA DE LA ARQUITECTURA DIGITAL*. Repaso histórico y reflexiones sobre la relación entre la Arquitectura y la tecnología. *Academia*, 3, 1–15.
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2015). *Design of the building envelope: A novel multi-objective approach for the optimization of energy performance and thermal comfort*. *Sustainability*, 7(8), 10809–10836. <https://doi.org/10.3390/su70810809>
- ASHRAE. (2020). ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: *Thermal environmental conditions for human occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

- ASHRAE. (2017). ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Asl, M. R., Stoupine, A., Zarrinmehr, S., & Yan, W. (2011). *Optimo: A BIM-based Multi-Objective Optimization Tool Utilizing Visual Programming for High Performance*. 1, 673–682.
- Auliciems, A., & de Dear, R. (1998). *Thermal Adaptation and Variable Indoor Climate Control*. In A. Auliciems (Ed.), *Human Bioclimatology* (pp. 61–86). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-80419-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-80419-9_3)
- Bader, J. & Zitzler, E. (2011). *HypE: An Algorithm for Fast Hypervolume-Based Many-Objective Optimization*. *Evolutionary Computation*, 19(1):45-76, ETH Zurich.
- Bansal, N. K., Hauser, G., & Minke, G. (1994). *Passive building design: A handbook of natural climatic control*. Elsevier.
- Beghini, L. L., Beghini, A., Katz, N., Baker, W. F., & Paulino, G. H. (2014). *Connecting architecture and engineering through structural topology optimization*. *Engineering Structures*, 59, 716–726. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.10.032>
- Blessing, L., & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology* (Vol. 148). Springer.
- Buckley, R. (2009). *Ecotourism: Principles and Practices*. CABI.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Hofstede, R., Cisneros, F., Wyseure, G., ... & Deckers, J. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>

- Cash, P. J. (2018). *Developing theory-driven design research*. *Design Studies*, 56, 84–119.  
<https://doi.org/10.1016/j.destud.2018.03.002>
- Castilla Nieto, M. del M., Rodriguez, F., Alvarez, J. D., Berenguel Soria, M., & Bordons, C. (2016). *Formulación del problema de la optimización multiobjetivo del confort en edificación sostenible*. *Jornadas de Automática 2016*, 505–512.  
[http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/4928/Castilla et al %282016%29\\_JA\\_vpublicada.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/4928/Castilla_et_al_%282016%29_JA_vpublicada.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Castro Pena, M. L., Carballal, A., Rodríguez-Fernández, N., Santos, I., & Romero, J. (2021). *Artificial intelligence applied to conceptual design. A review of its use in architecture*. *Automation in Construction*, 124 (March 2020).  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103550>
- Centre for Science and Technology Studies. (2023). VOSviewer (Versión 1.6.20) [Software]. Leiden University, The Netherlands. Recuperado de VOSviewer:  
<https://www.vosviewer.com/>.
- Charleson, A. (2007). *La ESTRUCTURA como arquitectura*. Editorial Reverté.
- Chirag Deb RA. *The significance of Physiological Equivalent Temperature (PET) in outdoor thermal comfort studies*. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2010;2(7): 2825-2828.
- Christensen, B. T., & Ball, L. J. (2019). *Building a discipline: Indicators of expansion, integration and consolidation in design research across four decades*. *Design Studies*, 65, 18–34.  
<https://doi.org/10.1016/j.destud.2019.10.001>

- de Dear, R., & Brager, G. (2011). *Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55*. *Building Research & Information*, 35(6), 614–628. <https://doi.org/10.1080/09613210701703787>
- Deb, K. (2001). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. John Wiley & Sons.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197.
- Djongyang, N., Tchinda, R., & Njomo, D. (2010). *Thermal comfort: A review paper*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2626–2640. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.040>
- Duan, Y., Zhang, T., Yang, Y., Li, P., Mo, W., Jiao, Z., & Gao, W. (2024). *A multi-objective approach to optimizing the geometry and envelope of rural dwellings for energy demand, thermal comfort, and daylight in cold regions of China*. *Energy Conversion and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119128>
- Dursun, P. (1978). *Space Syntax in Architectural Design*. *The Journal of Chemical Physics*, 69(3), 1207–1212.
- EN UNE. (2007). *UNE-EN 15251: Criterios para el diseño de los ambientes interiores y la evaluación de la eficiencia energética de los edificios*. Asociación Española de Normalización.
- Elsevier. (2023). Scopus [Software] Recuperado de Elsevier: <https://www.elsevier.com/es-es/products/scopus>.

- Evins, R. (2013). A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 230–245. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.004>
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- Frankel, L., & Racine, M. (2010). *The Complex Field of Research: for Design, through Design, and about Design*. International Conference of the Design Research Society, 1–12. <http://www.designresearchsociety.org/docs-procs/DRS2010/PDF/043.pdf>
- Froese, T. (2003). *Future directions for IFC-based interoperability*, *Journal of Information Technology in Construction ITcon* 8: 231-246. Recuperado de <http://www.itcon.org/2003/17>.
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. John Wiley & Sons.
- Godoy Muñoz, A. (2012). *El confort térmico adaptativo*.
- Goharian, A. (2023). *A novel design-based optimization method for building by sensitivity analysis*. *Journal of Solar Energy Research*, 8(2), 1446–1458. DOI:10.22059/jser.2023.352184.1269
- Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2016). *Textbook of medical physiology* (13th ed.). Elsevier.
- Hansen, N., & Ostermeier, A. (2001). Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies. *Evolutionary Computation*, 9(2), 159–195.
- Havenith, G. (2001). *Temperature regulation and technology*. *Applied Ergonomics*, 32(6), 617-634. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(01\)00044-2](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(01)00044-2)

Heschong, L. (2002). *Daylighting and human performance*. ASHRAE Journal.

Hosseini, S. M., Mohammadi, M., Rosemann, A., Schröder, T., & Lichtenberg, J. (2019). *A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort: Review*. *Building and Environment*, 153(February 2019), 186–204. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.040>

Iris D. Tommelein (2020) *Design science research in construction management: multi-disciplinary collaboration on the SightPlan system*, *Construction Management and Economics*, 38:4, 340-354, DOI: 10.1080/01446193.2020.1718723

ISO. (2005). ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment — *Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/39155.html>

Javanroodi, K., Nik, V. M., & Mahdavejad, M. (2019). *A novel design-based optimization framework for enhancing the energy efficiency of high-rise office buildings in urban areas*. *Sustainable Cities and Society*, 49, 101597. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101597>

Jencks, C., & Kropf, K. (2006). *Theories and manifestoes of contemporary architecture*. In ACADEMY EDITIONS (Vol. 53, Issue 9).

Kiviniemi, A. (2005). *Requirements Management Interface to Building Product Models*, CIFE Technical Report #161, Stanford University.

Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Taylor & Francis.

- Körner, C. (2003). *Alpine plant life: Functional plant ecology of high mountain ecosystems* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-18970-8>
- Kumar, S., Singh, M. K., Loftness, V., Mathur, J., & Mathur, S. (2017). *Thermal Comfort Assessment and Characteristics of Occupant's Behavior in Naturally Ventilated Buildings in Composite Climate of India*. <http://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>
- Ma, W., Wang, X., Wang, J., Xiang, X., & Sun, J. (2021). *Generative Design in Building Information Modelling (BIM): Approaches and Requirements*. *Sensors*, 21(5439), 1–26. <https://doi.org/doi.org/10.3390/s21165439>
- Macpherson, R. K. (1962). *The assessment of the thermal environment: A review*. *British Journal of Industrial Medicine*, 19(3), 151–164. <https://doi.org/10.1136/oem.19.3.151>
- Manzoor, B., Othman, I., Gardezi, S. S. S., Altan, H., & Abdalla, S. B. (2021). *Bim-based research framework for sustainable building projects: A strategy for mitigating bim implementation barriers*. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/app11125397>
- Marchante González, G., & González Santos, A. I. (2020). *Evaluación del confort y disconfort térmico*. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 41(3), 21–40.
- Marínez Villarroya, D. (2019). *Arquitectura fractal: optimización topológica* [Universidad Politécnica de Madrid]. [http://oa.upm.es/55874/1/TFG\\_Martinez\\_Villarroya\\_Daniel.pdf](http://oa.upm.es/55874/1/TFG_Martinez_Villarroya_Daniel.pdf)
- Méndez, M., Galván, B., Greiner, D., & Winter, G. (n.d.). *Algoritmos Evolutivos y Punto de Funcionamiento Aplicados a un Problema Real de Optimización Multiobjetivo en Diseño de Sistemas de Seguridad*.

- Moreno López, D., & Klempau, J. P. (2010). *Morfogénesis en el Diseño de la Arquitectura Contemporánea mediante Herramientas Paramétricas* [Universidad de Concepción]. [http://152.74.17.92/bitstream/11594/7650/1/Tesis Morfogénesis en el diseño de la arquitectura contemporánea.pdf](http://152.74.17.92/bitstream/11594/7650/1/Tesis_Morfogénesis_en_el_diseño_de_la_arquitectura_contemporánea.pdf)
- Narvaez, M. F. (2014). *El nuevo paradigma contemporáneo. Del diseño paramétrico a la morfogénesis digital*. In ACADEMIA. [http://152.74.17.92/bitstream/11594/7650/1/Tesis Morfogénesis en el diseño de la arquitectura contemporánea.pdf](http://152.74.17.92/bitstream/11594/7650/1/Tesis_Morfogénesis_en_el_diseño_de_la_arquitectura_contemporánea.pdf)
- Navarrete, S. (2014). *Diseño paramétrico. El gran desafío del siglo XXI*. Centro de Estudios En Diseño y Comunicación, 49, 63–72. <https://doi.org/10.18682/cdc.v49i49.1706>
- Nicol, F., Humphreys, M. A. (Michael A., & Roaf, Susan. (2017). *Adaptive thermal comfort : principles and practice*. Routledge.
- Niño Alvarez, L., Guevara Corzo, J., & Begambre Carrillo, O. (2020). *Diseño automático de cerchas de gran escala: una comparación entre algoritmos libres de derivadas*. Ingeniería y Ciencia, 16(32), 83–108. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.16.32.4>
- Noorzai E., Bakmohammadi P., Garmaroudi M.A. Optimizing daylight, energy and occupant comfort performance of classrooms with photovoltaic integrated vertical shading devices (2023) Architectural Engineering and Design Management, 19 (4), pp. 394 – 418
- Nourian, P. (2016). *Configraphics: Graph theoretical methods for design and analysis of spatial configurations*. In A+BE Architecture and the Built Environment (Vol. 14). <https://doi.org/10.7480/abe.2016.14>

- Nourian, P. & Rezvani, S. (2015). *SYNTACTIC* (Versión 2.7) [Software] Recuperado de *Genesis Lab: Laboratory of Generative Systems and Sciences in Architecture and Built Environment*: <https://sites.google.com/site/pirouznourian/syntactic-design?authuser=0>.
- Ochoa Sánchez, C. A. (2018). *Optimización Topológica en Estructuras de Tres Dimensiones Usando Elementos Finitos en el Campo Elástico Lineal*. Universidad Nacional de Colombia, 1–198.
- Olgyay, V., Lyndon, D., Reynolds, J., & Yeang, K. (2015). *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism* (New & expanded ed.). Princeton University Press.
- Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27(3), 229–265. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>
- Parra Blanco, R. L. (2013). *Optimización topológica aplicada a problemas de elasticidad bidimensional usando elementos finitos*. In *Optimización topológica aplicada a problemas de elasticidad bidimensional usando elementos finitos* (pp. 1–93). Universidad Nacional. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/50831>
- Penttilä, H. (2007). *Early architectural design and bim*. *Design*, Penttilä 2006, 291–302.
- Petrovici, A. (2019). *GENERACIÓN PARAMÉTRICA DEL ESPACIO*.
- Ramirez, A. (2009). *La construcción sostenible*. *Física y Sociedad*, 30(13), 246–249. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2008.07.044>
- Rizi, R. A., & Eltaweel, A. (2021). A user detective adaptive façade towards improving visual and thermal comfort. *Journal of Building Engineering*, 33, 101554. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101554>

- Ruiz Esteban, N. (2013). *En los límites de la arquitectura: espacio, sistema y disciplina* [Universidad Politécnica de Cataluña]. In Tesis de doctorado. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/94911%0Ahttps://bit.ly/2T95DkL>
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers* (3rd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119287568>
- Sadeghipour Roudsari, M. & Mackey, C. (2023). Ladybug Tools (Versión 1.7.26) [Software] Recuperado de *Food 4 Rhino*: <https://www.food4rhino.com/en/app/ladybug-tools>.
- Shahi, S., Beesley, P. and Haas, C.T. (2021), "*Creating space and time for innovation - a methodology for building adaptation design appraisal using physics-based simulation tools and interactive multi-objective optimization*", *Engineering, Construction and Architectural Management*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2021-0133>
- The International Ecotourism Society. (2015). *What is ecotourism?* <https://ecotourism.org/what-is-ecotourism/>
- Torres, A. V., Tiwari, C., & Atkinson, S. F. (2021). *Progress in ecosystem services research: A guide for scholars and practitioners*. *Ecosystem Services*, 49 (February). <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101267>
- United Nations Environment Programme & World Tourism Organization. (2005). *Making tourism more sustainable: A guide for policy makers*. UNEP & UNWTO. <https://www.unep.org/resources/report/making-tourism-more-sustainable-guide-policy-makers>

- Ureta, J. C. (2016). *Arquitectura... forma y función*. *Arquitectura+*, 1(1), 21–22.  
<https://doi.org/10.5377/arquitectura.v1i1.9177>
- Valle, FJ Cd. (2002). *Zona Variable de Confort Térmico*. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. Disponible en: <https://www.tesisenred.net>.
- Velasco Pérez, R. (2015). *Estudio de la aplicación del diseño generativo al diseño conceptual arquitectónico*. <http://hdl.handle.net/10251/54972>.
- Vierlinger, R. (2018). Octopus (Versión 0.4) [Software] Recuperado de *Food 4 Rhino*:  
<https://www.food4rhino.com/en/app/octopus>.
- Vierlinger, R., & Zimmel, C. (2012). Octopus (Nº de versión 0.4). Windows. University of Applied Arts Vienna: Bollinger+Grohmann Engineers.
- Walker, Ben. [Structured Parametrics]. (2020, 29 de enero). Australia. *Grasshopper vs Dynamo paramétrico Pros y contras para ingenieros*. Revit contra Rhino. ¿Cuál es mejor? [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=oWd1joh7WYg&t=319s>
- Weaver, D. B. (2001). *The encyclopedia of ecotourism*. CABI Publishing.  
<https://doi.org/10.1079/9780851993683.0000>
- Westman, W.E. (1977). *How much are nature's services worth?* *Science* 197 (4307), 960–964.
- World Tourism Organization. (2018). *Tourism and sustainability*. UNWTO.  
<https://www.unwto.org/sustainable-development>
- Wu, S., Chen, X., Fan, Y., & Jin, H. (2023). Automating microclimate evaluation and optimization during urban design: A Rhino–Grasshopper workflow. *Sustainability*, 15(24), 16613.  
<https://doi.org/10.3390/su152416613>

- Yau, Y. H., & Chew, B. T. (2014). *A review on predicted mean vote and adaptive thermal comfort models*. *Building Services Engineering Research and Technology*, 35(1), 23–35. <https://doi.org/10.1177/0143624412465200>
- Zawidzki, M., & Szklarski, J. (2020). *Multi-objective optimization of the floor plan of a single story family house considering position and orientation*. *Advances in Engineering Software*, 141(February 2019), 102766. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2019.102766>
- Zhang, J., Liu, H., Liu, Y., & Xu, X. (2023). *A multi-objective optimization framework for designing urban block forms considering daylight, energy consumption, and photovoltaic energy potential*. *Building and Environment*, 242, 110585. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110585>
- Zhang, Q., & Li, H. (2007). *MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition*. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 11(6), 712–731. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2007.892759>
- Zhao, L., Yu, Z., & Wang, Y. (2023). *Multi-objective optimization of building environmental performance: An integrated parametric design method based on machine learning approaches*. *Energies*, 16(19), 7031. <https://doi.org/10.3390/en16197031>
- Zitzler, E.; Laumanns, M.; Thiele, L. (2001). *“SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm”*. Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK). Department of Electrical Engineering Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich.

## Apéndices

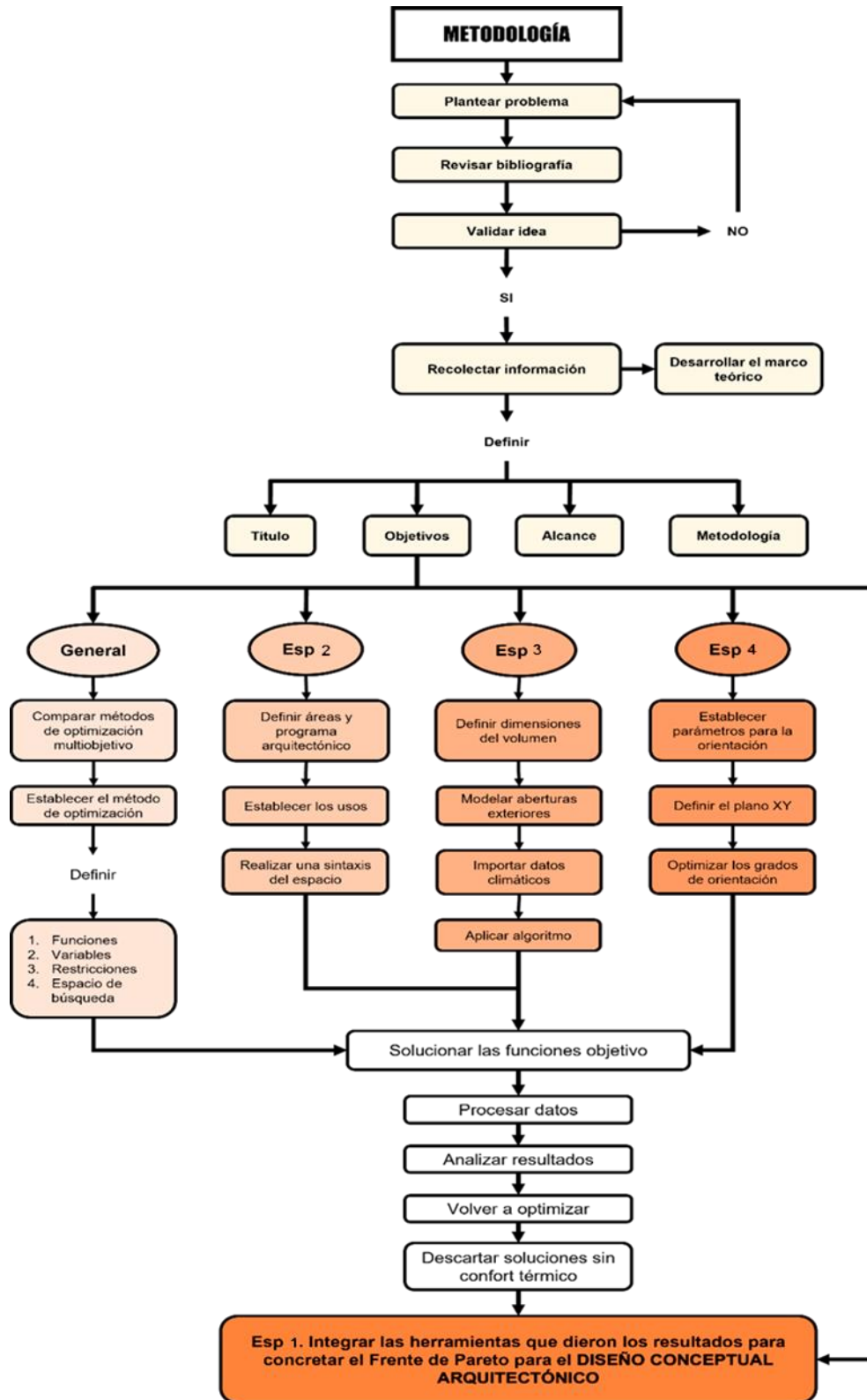
## Apéndice A. Nomenclatura

Nomenclatura	Significado	Unidad de medida
$H$	Producción interna de calor	W/m <sup>2</sup>
$E_d$	Pérdidas de calor por la difusión de vapor de agua por la piel	W/m <sup>2</sup>
$E_{sw}$	Pérdidas de calor debidas a la sudoración	W/m <sup>2</sup>
$E_{re}$	Pérdidas de calor latentes debidas a la sudoración	W/m <sup>2</sup>
$L$	Pérdidas de calor por respiración seca	W/m <sup>2</sup>
$R$	Pérdidas de calor por radiación de la superficie del cuerpo vestido	W/m <sup>2</sup>
$C$	Pérdidas de calor por convección de la superficie del cuerpo vestido	W/m <sup>2</sup>
$M$	Cantidad de energía metabólica producida por el cuerpo humano	W/m <sup>2</sup>
$W$	Cantidad de energía perdida por el trabajo mecánico realizado	W/m <sup>2</sup>
$P_v$	Presión parcial del vapor de agua en el aire	kPa
$T_a$	Temperatura ambiente	°C
$f_{cl}$	Relación entre el aire del cuerpo humano vestido y el aire del cuerpo humano desnudo	-
$t_{cl}$	Temperatura exterior en la superficie de la ropa	°C
$T_r$	Temperatura radiante del medio	°C
$h_c$	Coefficiente de transferencia de calor convectivo entre la superficie de la ropa y el aire	W/(m <sup>2</sup> °C).
$v$	Velocidad del aire	m/s
$I_{cl}$	Aislamiento térmico de la ropa	clo
$R_{cl}$	Coefficiente de aislamiento de la ropa	m <sup>2</sup> K/W
$\alpha$	Constante que normaliza a V entre los valores -3 y 3	$0.303 * e^{-0.036 * M} + 0.028$
$h_r$	Coefficiente de transferencia de calor por radiación lineal	W/m <sup>2</sup> K
$h_{cn}$	Coefficiente de transferencia convectiva natural de calor	W/m <sup>2</sup> K
$\eta$	Eficiencia mecánica del cuerpo humano	-
$\lambda$ (constante)	Calor de vaporización del agua	2.43*10 <sup>3</sup> [kJ/kg]
$m$ (constante)	Coefficiente de permeabilidad del vapor en la piel	4.7*10 <sup>-5</sup>
$P_s$	Presión del vapor de agua saturado en el aire	kPa
$T_s$	Temperatura de la piel	°C
$\gamma$ (constante)	Constante de proporcionalidad que relaciona la presión de vapor con la humedad	5.16*10 <sup>-3</sup>
$\beta$ (constante)	Constante de proporcionalidad que relaciona a M con la razón de ventilación pulmonar	1.379*10 <sup>-3</sup>
$p_{ex}$ (constante)	Presión del vapor de agua en el aire expirado	5.867 Pa
$c_p$ (constante)	Calor específico del aire	2.713*10 <sup>-1</sup> [J/Kg°C]
$T_{ex}$ (constante)	Temperatura del aire expirado	34 °C
$k$	Constante que relaciona el coeficiente de transferencia convectiva forzada de calor con la velocidad del aire	W/m <sup>2</sup> K
$t_{sk}$	Temperatura de la de la piel o cilindro exterior del modelo "2-Node"	°C
$t_{cr}$	Temperatura del núcleo o cilindro interior del modelo "2-Node"	°C
$t_b$	Temperatura media del cuerpo del modelo "2-Node"	°C

Nomenclatura	Significado	Unidad de medida
$a_{sk}$	Fración de la masa corporal total que se considera térmicamente en el compartimiento de la piel.	-
$Q_{bl}$	Flujo principal de sangre	l/h*m <sup>2</sup>
$t_{b,c}$	Límite inferior de temperatura de la zona de regulación evaporativa	°C
$t_{b,h}$	Límite superior de temperatura de la zona de regulación evaporativa	°C
$\eta_{ev}$	Eficiencia evaporativa	-
$w_{rsw}$	Es el requerimiento para evaporar el calor regulado	-
$E_{sk}$	Pérdida de calor evaporado de la piel	W/m <sup>2</sup>
$E_{rsw,req}$	Pérdida de calor evaporativo debido a la regulación del sudor, requerida para el confort	W/m <sup>2</sup>
$E_{max}$	Pérdida de calor evaporado de la piel cuando w=1 (pérdida máxima posible de calor evaporativo)	W/m <sup>2</sup>
$E_{dif}$	Pérdida del calor evaporativo debido a la difusión	W/m <sup>2</sup>
$i_{cl}$	Eficiencia de permeabilidad al vapor de la ropa: relación entre la capacidad real de flujo de calor por evaporación a través de la ropa y la capacidad de flujo de calor sensible en comparación con la relación de Lewis	-
$m_{rsw}$	Tasa a la cual el sudor regulado es generado	kg/(s*m <sup>2</sup> )
$R_{e,cl}$	Resistencia del calor evaporativo transferido por la capa vestida (análogo a $R_{cl}$ )	m <sup>2</sup> *kPa/W
$h_e$	Coefficiente de transferencia del calor evaporativo (análogo a $h_c$ )	W/m <sup>2</sup> *kPa
$t_0$	Temperatura operativa	°C
$p_{ET^*,s}$	Presión del vapor saturado a ET*	kPa
$i_m$	Relación entre la capacidad de evaporación del flujo de calor entre la piel y el ambiente y la capacidad del flujo de calor sensible comparado con la relación de Lewis	-
$\sigma$ (constante)	Constante de Stefan-Boltzmann	$5.67 * 10^{-8}$ W/(m <sup>2</sup> *K <sup>4</sup> )
$A_r$	Área del cuerpo de radiación efectiva	m <sup>2</sup>
$A_r/A_D$	Razón que para personas sentadas es $7.0*10^{-1}$ y $7.3*10^{-1}$ para personas de pie	-
$\varepsilon$	Promedio de emisividad de la ropa o la superficie del cuerpo	-
$R_{a,cl}$	Límite exterior de resistencia térmica (de la piel o de la vestimenta)	m <sup>2</sup> *kPa/W
$i_a$	Relación entre la capacidad actual de evaporación del flujo de calor a través de la capa de aire exterior y la capacidad del flujo de calor sensible comparado con la relación de Lewis	-
$F_{cs}$	Calor que fluye desde el núcleo del cuerpo hasta la superficie de la piel	-
$F_{sc}$	Calor que fluye desde la superficie de la piel a través de la capa de la ropa hasta la superficie de la ropa	-
$v_b$	Flujo sanguíneo desde el núcleo del cuerpo hasta la piel (dependiendo del nivel de temperatura del núcleo y de la piel)	l/(s*m <sup>2</sup> )
$\rho_b$	Densidad de sangre	kg/l
$c_b$ (constante)	Capacidad específica de calor del cuerpo	3490 (W*s)/(K*kg)
$T_u$	Intensidad de la turbulencia	%
$V_{sd}$	Desviación estándar de la velocidad medida	-
$T_n$	Temperatura neutral	°C
$T_m$	Temperatura media exterior	°C

Nomenclatura	Significado	Unidad de medida
$T_{mmo}$	Temperatura media mensual exterior	°C
$T_c$	Temperatura de confort	°C
$T_g$	Temperatura de globo	°C
$V_{st}$	Voto de sensación térmica	-
$a$	Razón de cambio de la sensación térmica con la temperatura de la habitación	-
$T_{rm}$	Temperatura media radiante exterior	°C
$T_{rm-1}$	Temperatura media radiante del día anterior	°C
$\alpha$ (constante)	Constante que define la velocidad a la cual la $T_{rm}$ cambia con relación a la temperatura del aire exterior	Entre 0 y 1
$S$	Tasa de sudoración requerida	Kcal/h
$f$	Eficiencia de enfriamiento por sudoración.	-
$T_{mrt}$	Temperatura media radiante	°C
$Hr$	Humedad relativa	%
$v$	Velocidad del aire	m/s
$T_{wb}$	Temperatura de bulbo húmedo	°C
$w$	Proporciones de humedad en $T_a$	-
$w_s$	Proporciones de humedad en $T_{wb}$	-
$P_{s\_wb}$	Presión del vapor saturado	kPa

Apéndice B. Diagrama de flujo de la metodología propuesta



Apéndice C. Pseudocódigo del SPEA-II (Alvarado et al, 2005)

Algoritmo SPEA-II ( $G(N,E), s, T$ )

Inicio

Para (cada  $t \in T$ ) haga

Mientras Que (exista un ruta del nodo  $s$  a nodo  $t$ ) haga

Rutas  $\leftarrow$  Ruta desde  $s$  hasta  $t$

Fin Mientras Que

Fin Para

Generar aleatoriamente  $P_0$

Hacer  $P_E \leftarrow \emptyset$

Hacer  $t \leftarrow 0$

Mientras Que  $t < g_{max}$  y  $Cont\_Convergencia < g_{conv}$

Calcular el número de saltos y el retardo de los miembros de  $P^t$  y  $P_E^t$

Calcular el *fitness* de cada uno de los individuos en  $P^t$  y  $P_E^t$

Realizar un proceso de selección ambiental para conformar la nueva población externa  $P_E^{t+1}$

Aplicar el operador de selección por torneo binario con reemplazo sobre  $P_E^{t+1}$ .

Aplicar los operadores de cruce y mutación sobre la población seleccionada.

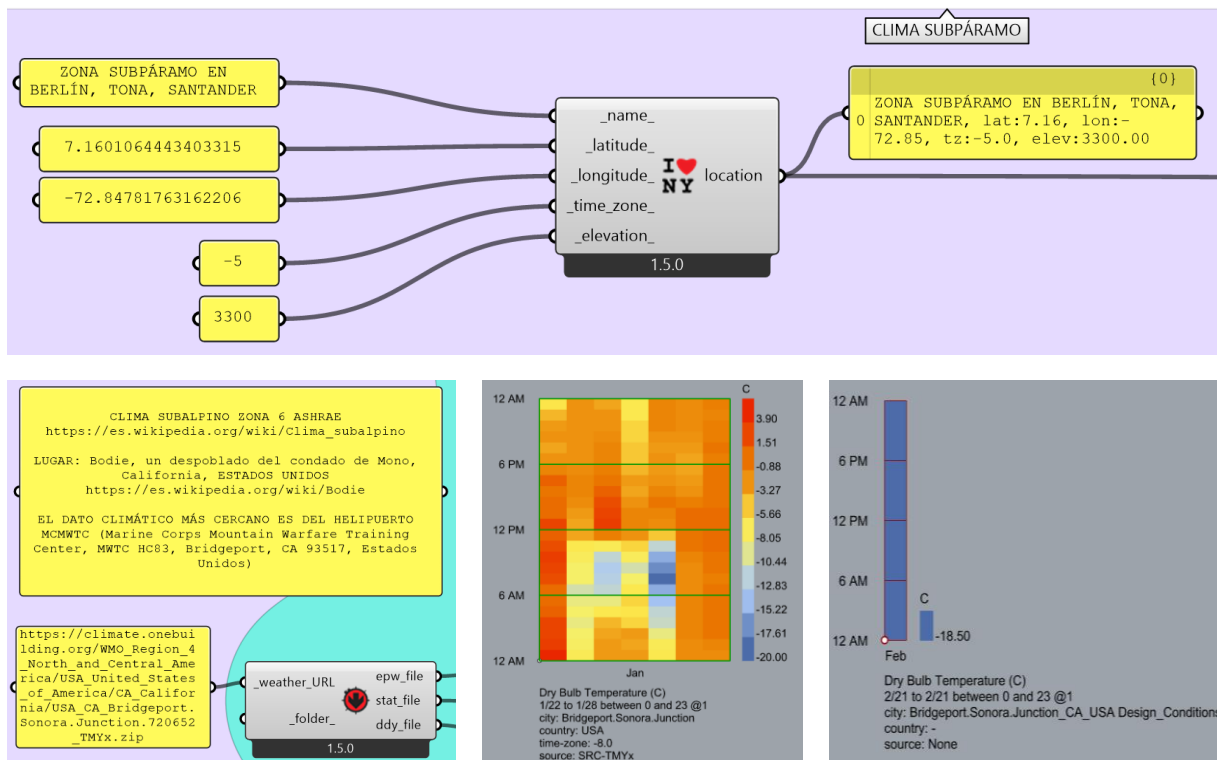
Asignar la nueva generación a  $P^{t+1}$ .

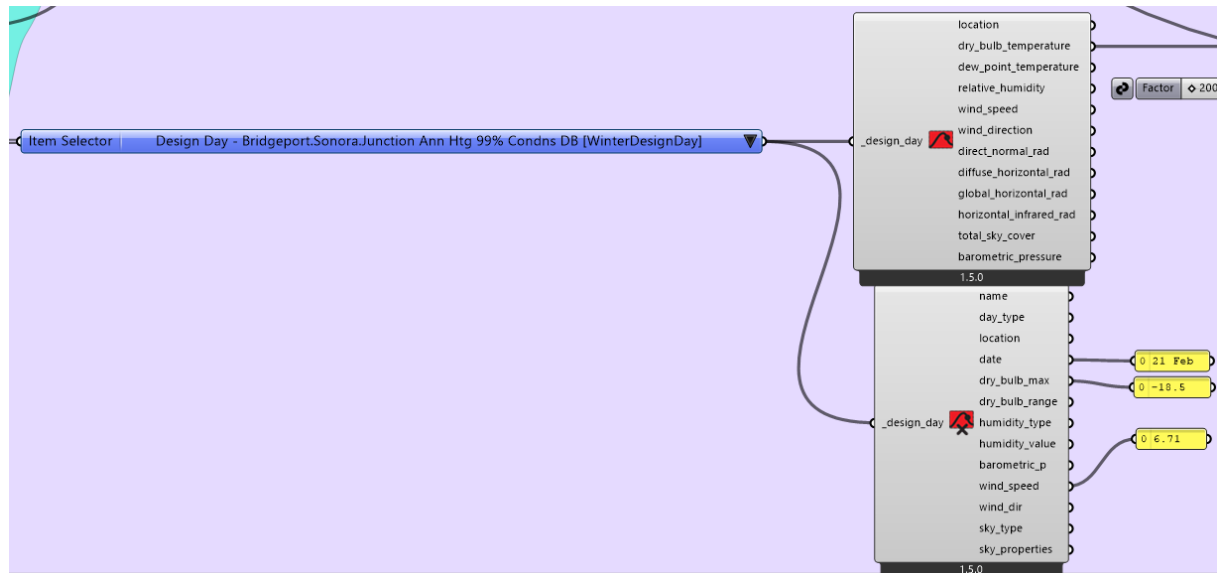
Hacer  $t \leftarrow t + 1$

Fin Mientras Que

Fin

Apéndice D. Localización del modelo analizado





### Apéndice E. Código en Python para organizar en Excel los resultados del proceso de optimización multiobjetivo arrojados por Octopus

```
import os
import pandas as pd
import numpy as np

# 📁 Ajusta estas rutas a donde tengas tus carpetas descomprimidas
param_dir = r"C:\Users\ASUS TUF\Desktop\TRABAJO DE GRADO\2025\Octopus_PARAMETROS
FP_2025420"
obj_dir = r"C:\Users\ASUS TUF\Desktop\TRABAJO DE GRADO\2025\Octopus_FRENTE DE
PARETO OBJETIVOS 0 A 120 GENETACIONES_2025420"

# Función para leer parámetros (40 valores por solución)
def read_parameters(file_path, n_params=40):
    with open(file_path, "r") as f:
        lines = f.readlines()
    values = []
    for line in lines:
        try:
            values.append(float(line.strip()))
        except ValueError:
            continue

    # Agrupar en bloques de 40
    solutions = [values[i:i+n_params] for i in range(0, len(values), n_params)]
    return solutions
```

```
# Función para leer objetivos (2 valores por solución)
def read_objectives(filepath):
    with open(filepath, "r") as f:
        lines = [line.strip() for line in f if line.strip()]
        if lines[0].startswith("Generation"):
            lines = lines[1:]
        values = [float(x) for x in lines]
        solutions = np.array(values).reshape(-1, 2) # 2 objetivos por solución
        return solutions

# Crear lista maestra de filas
data_rows = []

# Iterar sobre generaciones 0-120
for gen in range(120):
    param_file = os.path.join(param_dir, f"generation_{gen}_parameters.txt")
    obj_file = os.path.join(obj_dir, f"generation_{gen}_objectives.txt")

    if not os.path.exists(param_file) or not os.path.exists(obj_file):
        print(f"⚠ Archivos faltantes en generación {gen}")
        continue

    param_solutions = read_parameters(param_file)
    obj_solutions = read_objectives(obj_file)

    # Combinar parámetros y objetivos
    for sol_idx in range(len(param_solutions)):
        row = {"Generation": gen, "Solution": sol_idx}
        for j, val in enumerate(param_solutions[sol_idx]):
            row[f"Param_{j+1}"] = val
        for k, val in enumerate(obj_solutions[sol_idx]):
            row[f"Obj_{k+1}"] = val
        data_rows.append(row)

# Crear DataFrame
df_all = pd.DataFrame(data_rows)

# Guardar en Excel
output_file = "Resultados_Optimizacion.xlsx"
df_all.to_excel(output_file, index=False)

print(f"✅ Archivo Excel generado: {output_file}")

from openpyxl import load_workbook
from openpyxl.chart import ScatterChart, Series, Reference
```

```

# Reabrir el archivo Excel generado
wb = load_workbook("Resultados_Optimizacion.xlsx")
ws = wb.active # primera hoja

# Suponiendo que los últimos 2 valores en cada fila son los OBJETIVOS
# Ajusta si no es así: aquí asumo que hay 40 parámetros + 2 objetivos = 42
columnas
col_x = 43 # objetivo 1 (columna 41 → columna AO en Excel)
col_y = 44 # objetivo 2 (columna 42 → columna AP en Excel)

# Crear gráfico de dispersión
chart = ScatterChart()
chart.title = "Frontera de Pareto"
chart.x_axis.title = f"Objetivo 1 (Col {col_x})"
chart.y_axis.title = f"Objetivo 2 (Col {col_y})"

xvalues = Reference(ws, min_col=col_x, min_row=2, max_row=ws.max_row)
yvalues = Reference(ws, min_col=col_y, min_row=2, max_row=ws.max_row)

series = Series(yvalues, xvalues, title="Soluciones")
chart.series.append(series)

# Insertar gráfico en la hoja
ws.add_chart(chart, "D5") # posición dentro de la hoja

# Guardar cambios
wb.save("Resultados_Optimizacion.xlsx")
print("📊 Gráfico agregado al Excel: Resultados_Optimizacion.xlsx")

```

## Apéndice F. Script Frente de Pareto soluciones de Octopus

```

import os
import pandas as pd
import numpy as np
from openpyxl import load_workbook
from openpyxl.chart import ScatterChart, Series, Reference
from openpyxl.chart.marker import Marker
from openpyxl.drawing.line import LineProperties

# 📁 Ajusta estas rutas a donde tengas tus carpetas descomprimidas
param_dir = r"C:\Users\ASUS TUF\Desktop\TRABAJO DE GRADO\2025\TODO PARAMETROS"
obj_dir = r"C:\Users\ASUS TUF\Desktop\TRABAJO DE GRADO\2025\TODO OBJETIVOS"

```

```
# Función para leer parámetros (40 valores por solución)
def read_parameters(file_path, n_params=40):
    with open(file_path, "r") as f:
        lines = f.readlines()
    values = []
    for line in lines:
        try:
            values.append(float(line.strip()))
        except ValueError:
            continue

    # Agrupar en bloques de 40
    solutions = [values[i:i+n_params] for i in range(0, len(values), n_params)]
    return solutions

# Función para leer objetivos (2 valores por solución)
def read_objectives(filepath):
    with open(filepath, "r") as f:
        lines = [line.strip() for line in f if line.strip()]
    if lines[0].startswith("Generation"):
        lines = lines[1:]
    values = [float(x) for x in lines]
    solutions = np.array(values).reshape(-1, 2) # 2 objetivos por solución
    return solutions

# Crear lista maestra de filas
data_rows = []

# Iterar sobre generaciones 0-120
for gen in range(121):
    param_file = os.path.join(param_dir, f"generation_{gen}_parameters.txt")
    obj_file = os.path.join(obj_dir, f"generation_{gen}_objectives.txt")

    if not os.path.exists(param_file) or not os.path.exists(obj_file):
        print(f"⚠ Archivos faltantes en generación {gen}")
        continue

    param_solutions = read_parameters(param_file)
    obj_solutions = read_objectives(obj_file)

    # 📦 Convertir los objetivos para reflejar maximización (multiplicarlos por
    -1)
    obj_solutions = obj_solutions * -1
```

```
# Combinar parámetros y objetivos
for sol_idx in range(len(param_solutions)):
    row = {"Generation": gen, "Solution": sol_idx}
    for j, val in enumerate(param_solutions[sol_idx]):
        row[f"Param_{j+1}"] = val
    for k, val in enumerate(obj_solutions[sol_idx]):
        row[f"Obj_{k+1}"] = val
    data_rows.append(row)

# Crear DataFrame
df_all = pd.DataFrame(data_rows)

def get_non_dominated_indices(objs):
    n = objs.shape[0]
    dominated = np.zeros(n, dtype=bool)
    for i in range(n):
        for j in range(n):
            if i != j:
                # Dominación: j domina i si j es mejor o igual en todos y mejor
                # en al menos uno
                if all(objs[j] >= objs[i]) and any(objs[j] > objs[i]):
                    dominated[i] = True
                    break
    return np.where(~dominated)[0]

# Extraer columnas de los objetivos
objs = df_all[['Obj_1', 'Obj_2']].to_numpy()

# Obtener índices de soluciones no dominadas
nd_indices = get_non_dominated_indices(objs)

# Filtrar DataFrame solo con no dominadas
df_nd = df_all.iloc[nd_indices].reset_index(drop=True)

# Guardar solo las no dominadas
output_file_nd = "Resultados_NoDominadas.xlsx"
df_nd.to_excel(output_file_nd, index=False)
print(f"☑ Archivo Excel con no dominadas generado: {output_file_nd}")

# Graficar las no dominadas
wb = load_workbook(output_file_nd)
ws = wb.active
```

```
# Como aquí tenemos los mismos nombres de columnas, ajustamos las columnas de
objetivos:
col_x_nd = df_nd.columns.get_loc('Obj_1') + 1
col_y_nd = df_nd.columns.get_loc('Obj_2') + 1

chart = ScatterChart()
chart.title = "Frontera de Pareto (No Dominadas)"
chart.x_axis.title = "Objetivo 1"
chart.y_axis.title = "Objetivo 2"

xvalues = Reference(ws, min_col=col_x_nd, min_row=2, max_row=ws.max_row)
yvalues = Reference(ws, min_col=col_y_nd, min_row=2, max_row=ws.max_row)

series = Series(yvalues, xvalues, title="No Dominadas")
chart.series.append(series)

ws.add_chart(chart, "D5")
wb.save(output_file_nd)
print("📊 Gráfico agregado al archivo de no dominadas.")
```

### **Apéndice G. Resultados parámetros y funciones objetivo de la optimización de dos objetivos con 120 generaciones y 23,576 soluciones**

El detalle completo de las 23,576 soluciones generadas en el proceso de optimización se encuentra en el archivo Excel adjunto [Apéndice H – Resultados Optimizacion ALL.xlsx](#), debido a que su extensión excede el formato impreso de este documento.

### **Apéndice H. Análisis de la influencia de la orientación (grados de rotación en el plano XY) en los resultados de la optimización, contemplando el área mínima de ventana en fachadas (factor de proporción: 0,01)**

A continuación, se presenta un análisis de la influencia de la orientación (en grados de rotación en el plano XY) sobre los resultados de la optimización del diseño arquitectónico, específicamente en relación con el confort térmico interior. Este análisis se basa en datos

climáticos del archivo Bridgeport–Sonora Junction, que provienen de un clima urbano templado similar en latitud al de la región del páramo de Santurbán. Debido a la falta de archivos climáticos específicos para el subpáramo de Santurbán, se optó por utilizar estos datos de Bridgeport como referencia, aunque se reconoce que las condiciones climáticas no son idénticas. Mientras que en Bridgeport se presentan inviernos con temperaturas extremadamente bajas durante todo el día y la noche, el clima del páramo de Santurbán, aunque frío, presenta una mayor variabilidad térmica diaria, sin llegar a las temperaturas constantes y extremas de Bridgeport. La tabla muestra los datos correspondientes al periodo del 22 de enero al 22 de febrero, reflejando las variaciones del porcentaje de confort térmico en relación con diferentes orientaciones y áreas de ventana.

PERIODO: 22 enero al 22 de febrero								
ROTACIÓN	DIST X	DIST Y	ALTURA	FACTOR DE PROPORCIÓN	ÁREA VENTANAS	F.OBJ #1	% NEUTRAL	CANT.
0	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,703450	5
1	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,705987	2
2	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,709792	1
3	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,747844	1
4	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,778285	1
5	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,844242	1
6	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,912735	2
7	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	42,004059	2
8	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	42,004059	2
9	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,972349	1
10	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,915271	1
11	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,835363	1
12	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,721208	16
13	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,721208	16
14	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,721208	16
15	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,721208	16
16	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,721208	16
17	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,721208	16
18	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,721208	16
19	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,744039	1
20	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,780822	1
21	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,741502	1
22	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,661593	1

23	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,638762	4
24	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,604515	1
25	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,536022	2
26	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,444698	1
27	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,364789	1
28	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,273465	1
29	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,193557	1
30	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,079401	1
31	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,974125	1
32	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,731862	1
33	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,535261	1
34	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,412227	1
35	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,400812	3
36	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,400812	3
37	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,397007	1
38	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,388128	1
39	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,380518	1
40	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,379249	2
41	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,374176	1
42	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,37037	1
43	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,366565	1
44	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,418569	3
45	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,555556	2
46	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,669711	1
47	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,735667	1
48	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,849822	1
49	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,963978	1
50	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,11238	1
51	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,249366	1
52	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,395231	1
53	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,466261	1
54	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,548706	1
55	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,594368	2
56	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,662861	2
57	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,708524	1
58	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,765601	1
59	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,811263	1
60	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,868341	1
61	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,906393	1
62	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,954592	1
63	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,967275	1
64	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,964739	1
65	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,953323	1

66	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,910198	<b>1</b>
67	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,842973	<b>1</b>
68	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,761796	<b>2</b>
69	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,698376	<b>2</b>
70	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,70345	<b>5</b>
71	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,705987	<b>2</b>
72	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,71106	<b>9</b>
73	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,713597	<b>1</b>
74	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,719939	<b>2</b>
75	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,721208	<b>16</b>
76	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,721208	<b>16</b>
77	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,721208	<b>16</b>
78	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,716134	<b>1</b>
79	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,71106	<b>9</b>
80	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,71106	<b>9</b>
81	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,71106	<b>9</b>
82	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,71106	<b>9</b>
83	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,71106	<b>9</b>
84	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,71106	<b>9</b>
85	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,71106	<b>9</b>
86	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,756722	<b>1</b>
87	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,777017	<b>1</b>
88	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,84551	<b>2</b>
89	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,594368	<b>2</b>
90	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,525875	<b>1</b>
91	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,41172	<b>1</b>
92	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,302638	<b>1</b>
93	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,227803	<b>1</b>
94	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,147894	<b>1</b>
95	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,059107	<b>1</b>
96	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,996956	<b>1</b>
97	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,917047	<b>1</b>
98	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,851091	<b>1</b>
99	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,809234	<b>1</b>
100	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,783866	<b>1</b>
101	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,772451	<b>1</b>
102	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,740741	<b>1</b>
103	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,729325	<b>2</b>
104	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,729325	<b>2</b>
105	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,72552	<b>1</b>
106	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,716641	<b>1</b>
107	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,709031	<b>1</b>
108	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,707763	<b>1</b>

109	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,702689	1
110	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,698884	1
111	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,695079	1
112	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,690005	6
113	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,690005	6
114	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,644343	1
115	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,624049	1
116	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,555556	2
117	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,487062	1
118	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,384323	2
119	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
120	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
121	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
122	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
123	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
124	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
125	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
126	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
127	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
128	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
129	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
130	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
131	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
132	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
133	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
134	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
135	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
136	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
137	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
138	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
139	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
140	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
141	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
142	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,726788	1
143	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,898021	1
144	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,012177	1
145	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,117453	1
146	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,20624	1
147	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,286149	1
148	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,363521	1
149	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,437088	1
150	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,505581	2
151	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,575342	1

152	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,613394	2
153	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,638762	4
154	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,647641	2
155	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,673009	4
156	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,681887	5
157	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,681887	5
158	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,688229	2
159	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,69584	3
160	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,70345	5
161	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,70345	5
162	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,721208	16
163	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,761796	2
164	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,80619	1
165	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,861999	1
166	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,941908	1
167	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	42,044647	6
168	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	42,044647	6
169	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	42,044647	6
170	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	42,044647	6
171	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	42,044647	6
172	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	42,044647	6
173	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,839168	1
174	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,770675	1
175	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,736428	1
176	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,69584	3
177	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,673009	4
178	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,641299	1
179	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,646372	2
180	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,643836	1
181	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,653983	1
182	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,608321	1
183	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,599442	1
184	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,55378	1
185	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,425672	1
186	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,360984	1
187	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,391426	1
188	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,434551	1
189	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,478945	1
190	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,52207	1
191	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,577879	1
192	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,612126	1
193	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,646372	2
194	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,670472	1

195	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,686961	1
196	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,689498	1
197	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,692035	1
198	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,694571	2
199	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,704718	1
200	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,707255	3
201	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,71106	9
202	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,717402	1
203	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,755454	1
204	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,707255	3
205	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,684424	2
206	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,684424	2
207	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,718671	1
208	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,69584	3
209	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,638762	4
210	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,581684	1
211	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,536022	2
212	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,492897	1
213	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,473871	1
214	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,471334	1
215	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,494165	1
216	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,485287	1
217	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,496702	1
218	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,519533	1
219	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,527144	1
220	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,541096	1
221	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,544901	1
222	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,566464	1
223	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,589295	1
224	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,598174	1
225	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,629883	1
226	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,662861	2
227	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,707255	3
228	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,728818	1
229	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,784627	1
230	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,827752	1
231	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,870878	1
232	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,912735	2
233	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,945713	1
234	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,983765	1
235	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,997717	1
236	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	42,001522	3
237	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	42,001522	3

238	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	42,018011	<b>1</b>
239	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	42,037037	<b>1</b>
240	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	42,039574	<b>2</b>
241	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	42,039574	<b>2</b>
242	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	42,023085	<b>1</b>
243	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	42,001522	<b>3</b>
244	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,949518	<b>1</b>
245	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,881025	<b>1</b>
246	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,801116	<b>1</b>
247	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,721208	<b>16</b>
248	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,721208	<b>16</b>
249	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,721208	<b>16</b>
250	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,721208	<b>16</b>
251	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,721208	<b>16</b>
252	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,618468	<b>1</b>
253	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,310249	<b>2</b>
254	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,161847	<b>2</b>
255	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,047692	<b>2</b>
256	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,944952	<b>1</b>
257	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,853628	<b>1</b>
258	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,785134	<b>1</b>
259	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,705226	<b>1</b>
260	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,634196	<b>1</b>
261	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,565703	<b>1</b>
262	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,50482	<b>1</b>
263	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,468037	<b>1</b>
264	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,443937	<b>1</b>
265	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,435058	<b>1</b>
266	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,409691	<b>2</b>
267	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,400812	<b>3</b>
268	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,399543	<b>1</b>
269	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,394470	<b>1</b>
270	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,384323	<b>2</b>
271	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,379249	<b>2</b>
272	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,376712	<b>1</b>
273	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,418569	<b>3</b>
274	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,446474	<b>1</b>
275	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,497210	<b>1</b>
276	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,575850	<b>1</b>
277	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,678590	<b>1</b>
278	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,690005	<b>6</b>
279	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,690005	<b>6</b>
280	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,690005	<b>6</b>

281	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,690005	6
282	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,655758	1
283	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,630391	1
284	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,578387	1
285	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,509893	1
286	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,418569	3
287	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
288	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
289	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
290	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
291	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
292	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
293	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
294	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
295	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,361492	32
296	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,372907	1
297	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,409691	2
298	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,461695	1
299	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,518772	1
300	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,610096	1
301	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	40,918316	1
302	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,146626	1
303	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,272197	1
304	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,397768	1
305	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,489092	1
306	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,569001	1
307	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,648909	1
308	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,719939	2
309	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,788432	1
310	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,845510	2
311	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,869609	1
312	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,854389	1
313	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,798579	1
314	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,738965	1
315	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,673009	4
316	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,681887	5
317	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,683156	1
318	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,694571	2
319	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,702182	1
320	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,703450	5
321	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,537291	1
322	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,459919	2
323	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,396499	1

324	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,354642	1
325	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,310249	2
326	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,264587	1
327	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,218924	1
328	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,184678	1
329	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,161847	2
330	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,137747	1
331	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,099696	1
332	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,074328	1
333	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,076865	1
334	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,051497	1
335	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,042618	1
336	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,054033	1
337	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,047692	2
338	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,048960	1
339	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,043886	1
340	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,064181	1
341	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,060375	1
342	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,170726	1
343	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,245561	1
344	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,311517	1
345	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,368595	1
346	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,414257	1
347	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,459919	2
348	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,505581	2
349	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,551243	1
350	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,585490	1
351	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,609589	1
352	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,613394	2
353	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,638762	4
354	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,647641	2
355	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,673009	4
356	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,681887	5
357	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,681887	5
358	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,688229	2
359	18	18	2,5	0,01	0,05	0,06	41,698376	2

**Apéndice I. Análisis de la influencia de la orientación (grados de rotación en el plano XY) en los resultados de la optimización, contemplando el área máxima de ventanas en fachadas (factor de proporción: 0,95)**

En el siguiente análisis se evalúa la influencia de la orientación (en grados de rotación en el plano XY) sobre los resultados de la optimización del diseño arquitectónico, considerando el impacto del área máxima de ventanas en las fachadas (con un factor de proporción de 0,95). El periodo de análisis abarca del 22 de enero al 22 de febrero, y se busca entender cómo la distribución y orientación de las ventanas afectan el confort térmico interior en diferentes configuraciones.

PERIODO: 22 enero al 22 de febrero								
ROTACIÓN	DIST X	DIST Y	ALTURA	FACTOR DE PROPORCIÓN	ÁREA VENTANAS	F.OBJ #1	% NEUTRAL	CANT.
0	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,616248	4
1	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,616248	4
2	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,616248	4
3	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,650495	1
4	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,675228	2
5	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,737062	1
6	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,806507	2
7	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,89688	1
8	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,897831	1
9	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,865487	1
10	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,810312	1
11	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,730403	1
12	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,615297	15
13	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,616248	4
14	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,614346	7
15	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,615297	15
16	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,614346	7
17	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,615297	15
18	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,615297	15
19	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,638128	1
20	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,674277	1
21	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,634323	1
22	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,554414	1
23	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,531583	1
24	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,497336	1
25	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,431697	3
26	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,339422	1
27	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,260464	1
28	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,16914	1
29	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,089231	1
30	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,978881	1

31	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,879947	<b>1</b>
32	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,640221	<b>1</b>
33	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,447108	<b>1</b>
34	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,325342	<b>2</b>
35	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,313927	<b>4</b>
36	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,313927	<b>4</b>
37	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,313927	<b>4</b>
38	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,310122	<b>2</b>
39	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
40	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
41	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
42	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
43	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
44	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,365297	<b>2</b>
45	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,502283	<b>2</b>
46	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,616438	<b>1</b>
47	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,681126	<b>1</b>
48	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,795282	<b>1</b>
49	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,909437	<b>1</b>
50	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,057839	<b>1</b>
51	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,193874	<b>1</b>
52	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,342275	<b>1</b>
53	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,410769	<b>1</b>
54	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,490677	<b>3</b>
55	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,533486	<b>2</b>
56	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,601027	<b>1</b>
57	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,647641	<b>1</b>
58	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,704718	<b>1</b>
59	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,750381	<b>1</b>
60	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,806507	<b>2</b>
61	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,8379	<b>3</b>
62	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,883562	<b>2</b>
63	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,894977	<b>2</b>
64	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,890221	<b>1</b>
65	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,878805	<b>1</b>
66	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,8379	<b>3</b>
67	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,769406	<b>1</b>
68	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,680936	<b>1</b>
69	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,613394	<b>6</b>
70	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,615297	<b>15</b>
71	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,613394	<b>6</b>
72	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,613394	<b>6</b>
73	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,615297	<b>15</b>

74	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,614346	7
75	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,615297	15
76	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,614346	7
77	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,615297	15
78	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,609589	7
79	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,609589	7
80	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,61054	4
81	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,608638	7
82	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,61054	4
83	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,608638	7
84	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,609589	7
85	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,607686	1
86	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,656202	1
87	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,675228	2
88	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,743721	1
89	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,490677	3
90	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,424087	1
91	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,308029	2
92	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,19863	1
93	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,123478	1
94	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,043569	1
95	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,954148	1
96	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,896119	1
97	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,817161	1
98	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,753425	1
99	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,711568	1
100	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,695396	1
101	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,683029	2
102	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,652588	1
103	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,642123	2
104	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,642123	2
105	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,641172	1
106	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,637367	1
107	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,635464	10
108	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,634513	1
109	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,635464	10
110	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,635464	10
111	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,635464	10
112	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,635464	10
113	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,635464	10
114	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,589802	1
115	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,570776	1
116	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,502283	2

117	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,43379	<b>1</b>
118	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,33105	<b>1</b>
119	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
120	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
121	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,307268	<b>1</b>
122	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
123	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
124	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
125	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
126	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
127	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
128	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
129	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
130	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
131	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
132	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
133	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
134	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
135	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
136	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
137	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
138	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
139	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
140	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
141	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
142	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,673516	<b>1</b>
143	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,843798	<b>1</b>
144	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,957953	<b>1</b>
145	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,061644	<b>1</b>
146	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,149163	<b>1</b>
147	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,230023	<b>1</b>
148	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,30898	<b>2</b>
149	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,377473	<b>1</b>
150	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,445967	<b>1</b>
151	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,509703	<b>1</b>
152	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,54395	<b>1</b>
153	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,566781	<b>2</b>
154	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,574391	<b>1</b>
155	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,598174	<b>4</b>
156	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,608638	<b>7</b>
157	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,608638	<b>7</b>
158	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,61054	<b>4</b>
159	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,613394	<b>6</b>

160	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,614346	7
161	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,611492	1
162	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,626712	1
163	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,655251	1
164	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,701865	1
165	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,75704	1
166	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,8379	3
167	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,939688	2
168	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,941591	3
169	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,939688	2
170	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,938737	1
171	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,941591	3
172	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,941591	3
173	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,738014	1
174	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,669521	1
175	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,636225	1
176	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,591514	3
177	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,56583	1
178	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,541096	1
179	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,550609	2
180	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,550609	2
181	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,562024	1
182	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,516362	1
183	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,508752	1
184	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,460236	1
185	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,337519	1
186	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,273782	1
187	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,308029	2
188	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,349886	1
189	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,395548	1
190	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,44121	1
191	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,498288	1
192	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,533486	2
193	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,566781	2
194	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,586758	1
195	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,598174	4
196	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,598174	4
197	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,596271	1
198	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,598174	4
199	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,609589	7
200	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,61054	4
201	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,608638	7
202	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,613394	6

203	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,649543	1
204	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,600076	1
205	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,577245	2
206	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,577245	2
207	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,614346	7
208	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,591514	3
209	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,534437	1
210	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,477359	1
211	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,431697	3
212	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,390791	1
213	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,378425	2
214	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,378425	2
215	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,401256	1
216	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,393645	1
217	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,405061	1
218	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,427892	1
219	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,439307	1
220	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,458333	1
221	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,467846	1
222	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,490677	3
223	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,513508	1
224	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,524924	1
225	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,55917	1
226	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,593417	1
227	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,639079	1
228	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,659056	2
229	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,716134	1
230	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,761796	1
231	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,807458	1
232	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,849315	1
233	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,883562	2
234	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,914003	1
235	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,925419	1
236	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,92637	2
237	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,92637	2
238	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,937785	4
239	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,937785	4
240	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,937785	4
241	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,937785	4
242	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,917808	1
243	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,894977	2
244	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,843607	1
245	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,775114	1

246	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,695205	<b>1</b>
247	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,615297	<b>15</b>
248	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,615297	<b>15</b>
249	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,615297	<b>15</b>
250	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,615297	<b>15</b>
251	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,615297	<b>15</b>
252	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,512557	<b>1</b>
253	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,204338	<b>1</b>
254	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,055936	<b>1</b>
255	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,941781	<b>1</b>
256	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,841895	<b>1</b>
257	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,750571	<b>1</b>
258	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,683029	<b>2</b>
259	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,604072	<b>1</b>
260	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,534627	<b>1</b>
261	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,467085	<b>1</b>
262	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,413813	<b>1</b>
263	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,379566	<b>1</b>
264	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,356735	<b>1</b>
265	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,349125	<b>1</b>
266	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,325342	<b>2</b>
267	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,314878	<b>2</b>
268	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,314878	<b>2</b>
269	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,313927	<b>4</b>
270	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,310122	<b>2</b>
271	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
272	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
273	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,353881	<b>1</b>
274	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,384323	<b>1</b>
275	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,4414	<b>1</b>
276	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,521309	<b>1</b>
277	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,624049	<b>1</b>
278	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,635464	<b>10</b>
279	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,635464	<b>10</b>
280	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,635464	<b>10</b>
281	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,635464	<b>10</b>
282	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,601218	<b>1</b>
283	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,576484	<b>1</b>
284	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,525114	<b>1</b>
285	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,456621	<b>1</b>
286	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,365297	<b>2</b>
287	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
288	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>

289	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
290	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
291	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
292	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
293	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
294	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
295	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,308219	<b>38</b>
296	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,319635	<b>1</b>
297	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,355784	<b>1</b>
298	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,407154	<b>1</b>
299	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,464231	<b>1</b>
300	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,555556	<b>1</b>
301	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,863775	<b>1</b>
302	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,092085	<b>1</b>
303	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,217656	<b>1</b>
304	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,343227	<b>1</b>
305	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,431697	<b>3</b>
306	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,511606	<b>1</b>
307	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,591514	<b>3</b>
308	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,659056	<b>2</b>
309	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,727549	<b>2</b>
310	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,783676	<b>1</b>
311	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,80175	<b>1</b>
312	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,784627	<b>1</b>
313	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,727549	<b>2</b>
314	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,666667	<b>1</b>
315	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,599125	<b>1</b>
316	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,609589	<b>7</b>
317	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,609589	<b>7</b>
318	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,613394	<b>6</b>
319	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,615297	<b>15</b>
320	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,615297	<b>15</b>
321	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,444064	<b>2</b>
322	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,364155	<b>1</b>
323	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,295662	<b>1</b>
324	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,252854	<b>1</b>
325	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,207192	<b>1</b>
326	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,16153	<b>1</b>
327	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,115868	<b>1</b>
328	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,081621	<b>1</b>
329	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,05879	<b>1</b>
330	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,039764	<b>1</b>
331	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,005518	<b>1</b>

332	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,982686	1
333	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,986492	1
334	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,962709	2
335	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,952245	1
336	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,963661	1
337	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,962709	2
338	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,971271	1
339	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,969368	1
340	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,992199	2
341	45	54	5	11,4	313,5	324,9	40,992199	2
342	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,106355	1
343	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,186263	1
344	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,254756	1
345	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,30898	2
346	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,354642	1
347	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,400304	1
348	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,444064	2
349	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,491629	1
350	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,525875	1
351	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,542998	1
352	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,544901	1
353	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,567732	1
354	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,575342	1
355	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,597222	1
356	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,608638	7
357	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,608638	7
358	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,609589	7
359	45	54	5	11,4	313,5	324,9	41,614346	7

**Apéndice J. Código en Python para organizar en Excel y graficar en 3D los resultados del proceso de optimización multiobjetivo arrojados por Octopus**

```
import os
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

# 📁 Ajusta estas rutas
param_dir = r"C:\Users\ASUS TUF\Desktop\TRABAJO DE GRADO\2025\ALL PARAM_min area
max ratio y max comf.gh_2025917__9_22_3"
```

```
obj_dir = r"C:\Users\ASUS TUF\Desktop\TRABAJO DE GRADO\2025\ALL OBJETIVOS_min
area max ratio y max comfy.gh_2025917__9_23_58"

# Leer parámetros
def read_parameters(file_path, n_params=40):
    with open(file_path, "r") as f:
        lines = f.readlines()
    values = []
    for line in lines:
        try:
            values.append(float(line.strip()))
        except ValueError:
            continue
    solutions = [values[i:i+n_params] for i in range(0, len(values), n_params)]
    return solutions

# Leer objetivos (3 por solución)
def read_objectives(filepath):
    with open(filepath, "r") as f:
        lines = [line.strip() for line in f if line.strip()]
    if lines[0].startswith("Generation"):
        lines = lines[1:]
    values = [float(x) for x in lines]
    solutions = np.array(values).reshape(-1, 3)
    return solutions

# Construir dataframe
data_rows = []
for gen in range(162):
    param_file = os.path.join(param_dir, f"generation_{gen}_parameters.txt")
    obj_file = os.path.join(obj_dir, f"generation_{gen}_objectives.txt")

    if not os.path.exists(param_file) or not os.path.exists(obj_file):
        continue

    param_solutions = read_parameters(param_file)
    obj_solutions = read_objectives(obj_file)

    # Ajustar según criterio: 1 y 2 a maximizar (→ *-1), 3 a minimizar (queda
    igual)
    obj_solutions[:, 0] *= -1
    obj_solutions[:, 1] *= -1

    for sol_idx in range(len(param_solutions)):
        row = {"Generation": gen, "Solution": sol_idx}
```

```

    for j, val in enumerate(param_solutions[sol_idx]):
        row[f"Param_{j+1}"] = val
    for k, val in enumerate(obj_solutions[sol_idx]):
        row[f"Obj_{k+1}"] = val
    data_rows.append(row)


df_all = pd.DataFrame(data_rows)

#  Normalizar los objetivos
objs = df_all[['Obj_1', 'Obj_2', 'Obj_3']].to_numpy()
objs_norm = (objs - objs.min(axis=0)) / (objs.max(axis=0) - objs.min(axis=0))

def get_non_dominated_indices(objs):
    n = objs.shape[0]
    dominated = np.zeros(n, dtype=bool)
    for i in range(n):
        for j in range(n):
            if i != j:
                if all(objs[j] >= objs[i]) and any(objs[j] > objs[i]):
                    dominated[i] = True
                    break
    return np.where(~dominated)[0]

# Índices Pareto con normalización
nd_indices = get_non_dominated_indices(objs_norm)

# DataFrames
df_nd = df_all.iloc[nd_indices].reset_index(drop=True)

#  Gráfico 3D: todas (gris) y Pareto (rojo)
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

# Todas en gris
ax.scatter(df_all['Obj_1'], df_all['Obj_2'], df_all['Obj_3'],
          c='lightgray', marker='o', alpha=0.5, label="Todas")

# No dominadas en rojo
ax.scatter(df_nd['Obj_1'], df_nd['Obj_2'], df_nd['Obj_3'],
          c='red', marker='o', label="Pareto")

ax.set_xlabel("Objetivo 1 (Área y WWR)")
ax.set_ylabel("Objetivo 2 (% Neutral)")
ax.set_zlabel("Objetivo 3 (Volumen)")
ax.set_title("Frontera de Pareto - 3 Objetivos (Normalizados)")

```

```

ax.legend()

plt.show()

# 📊 Contar cuántas soluciones están en Pareto
print("Número de soluciones en el Frente de Pareto:", len(df_nd))

# 📁 Exportar tabla solo con generación, solución y objetivos
df_export = df_nd[['Generation', 'Solution', 'Obj_1', 'Obj_2', 'Obj_3']]
df_export.to_excel("Frente_Pareto.xlsx", index=False)

print("✅ Archivo 'Frente_Pareto.xlsx' creado con la información del frente de Pareto")

# 📁 Exportar tabla con ruta absoluta
output_path = os.path.join(os.getcwd(), "Frente_Pareto.xlsx")
df_export.to_excel(output_path, index=False)

print("✅ Archivo creado en:", output_path)

```

### Apéndice K. Resultados parámetros y funciones objetivo de las 460 soluciones que componen el Frente de Pareto de la optimización de tres objetivos con 161 generaciones

El detalle completo de las soluciones generadas en el proceso de optimización se encuentra en el archivo Excel adjunto [Apéndice K – Resultados 161 GEN NoDominadas.xlsx](#), debido a que su extensión excede el formato impreso de este documento.

### Apéndice L. Código en Python para graficar las 161 generaciones del proceso de optimización de 3 objetivos

```

import os
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# 📁 Ajusta estas rutas
param_dir = r"C:\Users\ASUS TUF\Desktop\TRABAJO DE GRADO\2025\ALL PARAM_min area max ratio y max comf.gh_2025917__9_22_3"
obj_dir = r"C:\Users\ASUS TUF\Desktop\TRABAJO DE GRADO\2025\ALL OBJETIVOS_min area max ratio y max comf.gh_2025917__9_23_58"

```

```
# 📁 Carpeta de salida
output_folder = "graficas_generaciones_con_pareto"
os.makedirs(output_folder, exist_ok=True)

# Leer parámetros
def read_parameters(file_path, n_params=40):
    with open(file_path, "r") as f:
        lines = f.readlines()
    values = []
    for line in lines:
        try:
            values.append(float(line.strip()))
        except ValueError:
            continue
    solutions = [values[i:i+n_params] for i in range(0, len(values), n_params)]
    return solutions

# Leer objetivos (3 por solución)
def read_objectives(filepath):
    with open(filepath, "r") as f:
        lines = [line.strip() for line in f if line.strip()]
    if lines[0].startswith("Generation"):
        lines = lines[1:]
    values = [float(x) for x in lines]
    solutions = np.array(values).reshape(-1, 3)
    return solutions

# Calcular no dominadas
def get_non_dominated_indices(objs):
    n = objs.shape[0]
    dominated = np.zeros(n, dtype=bool)
    for i in range(n):
        for j in range(n):
            if i != j:
                if all(objs[j] >= objs[i]) and any(objs[j] > objs[i]):
                    dominated[i] = True
                    break
    return np.where(~dominated)[0]

# ===== PRIMER PASO: obtener rangos globales =====
all_objs = []
for gen in range(162):
    obj_file = os.path.join(obj_dir, f"generation_{gen}_objectives.txt")
    param_file = os.path.join(param_dir, f"generation_{gen}_parameters.txt")
```

```
if not os.path.exists(obj_file) or not os.path.exists(param_file):
    continue

obj_solutions = read_objectives(obj_file)
obj_solutions[:, 0] *= -1 # invertir max
obj_solutions[:, 1] *= -1 # invertir max
all_objs.append(obj_solutions)

all_objs = np.vstack(all_objs)
obj_mins = all_objs.min(axis=0)
obj_maxs = all_objs.max(axis=0)

print("Rangos globales:")
print("Obj1:", obj_mins[0], "→", obj_maxs[0])
print("Obj2:", obj_mins[1], "→", obj_maxs[1])
print("Obj3:", obj_mins[2], "→", obj_maxs[2])

# ===== SEGUNDO PASO: generar gráficas por generación =====
for gen in range(162):
    obj_file = os.path.join(obj_dir, f"generation_{gen}_objectives.txt")
    param_file = os.path.join(param_dir, f"generation_{gen}_parameters.txt")

    if not os.path.exists(obj_file) or not os.path.exists(param_file):
        continue

    obj_solutions = read_objectives(obj_file)
    obj_solutions[:, 0] *= -1
    obj_solutions[:, 1] *= -1

    df_gen = pd.DataFrame(obj_solutions, columns=["Obj_1", "Obj_2", "Obj_3"])
    df_gen["Solution"] = range(len(df_gen))
    df_gen["Generation"] = gen

    # Pareto vs dominadas
    nd_indices = get_non_dominated_indices(df_gen[["Obj_1", "Obj_2",
"Obj_3"]].to_numpy())
    df_nd = df_gen.iloc[nd_indices]
    df_dom = df_gen.drop(nd_indices)

    # 📊 Gráfico 3D
    fig = plt.figure(figsize=(8,6))
    ax = fig.add_subplot(111, projection="3d")

    # Dominadas en gris
```

```
ax.scatter(df_dom["Obj_1"], df_dom["Obj_2"], df_dom["Obj_3"],
           c="lightgray", alpha=0.3, s=20, label="Dominadas")

# Pareto en rojo
ax.scatter(df_nd["Obj_1"], df_nd["Obj_2"], df_nd["Obj_3"],
           c="red", alpha=0.9, s=40, label="Pareto")

# Etiquetas de ejes
ax.set_xlabel("Objetivo 1 (Área y WWR)")
ax.set_ylabel("Objetivo 2 (% Neutral)")
ax.set_zlabel("Objetivo 3 (Volumen)")

# Rango global fijo
ax.set_xlim(obj_mins[0], obj_maxs[0])
ax.set_ylim(obj_mins[1], obj_maxs[1])
ax.set_zlim(obj_mins[2], obj_maxs[2])

# Ticks de referencia
ax.set_xticks(np.linspace(obj_mins[0], obj_maxs[0], 5))
ax.set_yticks(np.linspace(obj_mins[1], obj_maxs[1], 5))
ax.set_zticks(np.linspace(obj_mins[2], obj_maxs[2], 5))

# Mantener mismo ángulo
ax.view_init(elev=25, azim=35)

# Título
ax.set_title(f"Generación {gen}", fontsize=14)

# Guardar imagen
output_path = os.path.join(output_folder, f"gen_{gen:03d}.png")
plt.savefig(output_path, dpi=300)
plt.close(fig)

print("☑ Gráficas con rangos globales, ticks y frente de Pareto generadas en:",
      output_folder)
```

## Apéndice M. Bibliografía consultada como material de apoyo

- A. Ramírez-Arias, F. Rodríguez, J.L. Guzmán y M. Berenguel. *Multiobjective hierarchical control architecture for greenhouse crop growth*. *Automatica*, 48:490–498, 2012.

- Achtziger, Wolfgang; Bendsøe, M; Ben-Tal, Aharon; Zowe, Jochem. (1992). *Equivalent displacement based formulations for maximum strength truss topology design*. En: *IMPACT of Computing in Science and Engineering* 4, Nr. 4, p. 315–345
- Ahn, KU, Kim, YJ, Park, CS, Kim, I and Lee, K. (2014). '*BIM in-interface for full vs. semi-automated building energysimulation*', *Energy and Buildings*, 68, pp. 671-678
- Alexander, C., (1964). *Notes On The Synthesis Of Form*, Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Alfonso Pineda, P. J., & Caicedo Ramírez, J. D. (2020). *Arquitectura de soporte para el ecoturismo*. Pajarito, Boyacá. Universidad de La Salle.
- Arnheim, R. (1977). *The Dynamics of Architectural Form*. California: University of California Press. California: University of California Press.
- Begambre, O., & Laier, J. E. (2009). *A hybrid Particle Swarm Optimization - Simplex algorithm (PSOS) for structural damage identification*. *Advances in Engineering Software*, 40(9), 883–891. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.01.004>
- Bends, Martin P. (1991). *New displacement-based methods for optimal truss topology design*
- Bendsøe, Martin P., Soares, Carlos A M. (2012). *Topology design of structures*. Vol. 227. Springer Science & Business Media
- Bendsoe, Martin P.; Sigmund, Ole. (2013). *Topology optimization: theory, methods, and applications*. Springer Science & Business Media
- Blanco Longa, I., & De Prada, M. (2016). *Topología y Arquitectura Verdades Aparentes y Realidades Estructurales*. Universidad Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior de Arquitectura Topología.

- Blasco Laffón, B., Blasco Laffón, E., Fernández Valdés, J. M., & Viñas Arrebola, C. (2007). *Cálculo de índices de confort térmico en recintos cerrados con transferencia de calor*. I Jornada Nacional De Investigación En Edificación, Mayo 10-11, 1–11.
- Cadena Gonzalez, I. M., Delgado-Rojas, J. A., & Vergel-Ortega, M. (2020). *Optimización estructural y arquitectónica desde lógicas topológicas a soluciones constructivas de arquitectura en tierra en Pelaya Cesar*. *Revista Boletín Redipe*, 9(4), 216–224. <https://doi.org/10.36260/rbr.v9i4.961>
- Carretero neches, L. (n.d.). *Capítulo 4 Optimización topológica. Optimización Topológica De Problemas Elásticos Planos Utilizando El Método De Los Elementos De Contorno*.
- CASTRO RODRÍGUEZ, L. A., & Tinjacá Díaz, X. A. (2018). *Arquitectura de un Ecohotel para un Desarrollo Ecoturístico en la Laguna de Tota*. Universidad Piloto de Colombia.
- Chan, ASL (1960). *The design of Michell optimum structures* / College of Aeronautics Cranfield. – Informe de Investigación
- Chintis, C. (2020, 3 abril). *Architecture Explained: The Phases of Designing & Building a Project*. WC STUDIO Architects. Recuperado 6 de junio de 2022, de <https://wc-studio.com/journal/2019/7/5/working-with-an-architect-understanding-phases-of-design-construction>
- Chong, Y.T., Chen, C.H. & Leong, K.F. (2009). *A heuristic-based approach to conceptual design*, *Research in Engineering Design* 20 (2) 97–116.
- Claro Ponce, J. C. (n.d.). *Modelo para el cálculo simplificado de emisiones de CO2 de las viviendas en europa*.
- Couvelas, A. (2020). *Bioclimatic building design theory and application*. Elsevier.

- Darke, J., 1984, *“The Primary Generator and the Design Process”*, Developments in Design Methodology, Nigel Cross, Open University, John Wiley & Sons, pp.175-188.
- Duarte, C., & Quiroga, J. (2010). *Algoritmo PSO para identificación de parámetros en un motor DC*. Revista Facultad de Ingeniería, 55, 116–124.
- Eastman, C, Teicholz, P, Sacks, R and Liston, K. (2011). *BIMhandbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*, John Wiley & Sons
- Emmerich, MT, Hopfe, C, Marijt, R, Hensen, J, Struck, C and Stoelinga, P 2008 *'Evaluating optimization methodologies for future integration in building performance tools'*, Proceedings of the 8th Int. Conf. on Adaptive Computing in Design and Manufacture (ACDM), p. 7
- Evins, R. (2013). *'A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design'*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 22, pp. 230- 245.
- Farshi, Behrooz; Schmit, Lucien A. (1974). *Minimum weight design of stress limited trusses*. En: Journal of the Structural Division 100, Nr. 1, p. 97–107
- Flager, F, Basbagill, J, Lepech, M and Fischer, M. (2012). *'Multi-objective building envelope optimization for life-cycle cost and global warming potential'*, Proceedings of ECPPM, pp. 193-200
- Fokaides, P. A., Panayidou, A., Hadjichristos, C., & Phocas, M. C. (2017). *Application of non-linear programming to optimize buildings' solar exposure*. Journal of Building Engineering, 11, 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.04.007>

- Fujita, K. (2002). *Product variety optimization under modular architecture*. *CAD Computer Aided Design*, 34(12), 953–965. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(01\)00149-X](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(01)00149-X)
- Garzón, B. (2007). *Arquitectura bioclimática*. (1.a ed.). Nobuko. Buenos Aires. [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=prszEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA31&dq=arquitectura+bioclim%C3%A1tica+garzon&ots=txLvnSKQDq&sig=6BpRZi3vwnjihCeM7ls-LVb5pcM&redir\\_esc=y#v=onepage&q=arquitectura%20bioclim%C3%A1tica%20garzon&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=prszEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA31&dq=arquitectura+bioclim%C3%A1tica+garzon&ots=txLvnSKQDq&sig=6BpRZi3vwnjihCeM7ls-LVb5pcM&redir_esc=y#v=onepage&q=arquitectura%20bioclim%C3%A1tica%20garzon&f=false)
- González G., O. C. (1998). *Metodología para el Cálculo del Confort Climático en Colombia*. Ideam, 47. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/007574/Metodologiaconfort.pdf>
- Han, H., Lee, J. S., Trang, H. L. T., & Kim, W. (2018). *Water conservation and waste reduction management for increasing guest loyalty and green hotel practices*. *International Journal of Hospitality Management*, 75, 58-66.
- He, Y., Cai, K., Zhao, Z. L., & Xie, Y. M. (2020). *Stochastic approaches to generating diverse and competitive structural designs in topology optimization*. *Finite Elements in Analysis and Design*, 173(October 2019), 103399. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2020.103399>
- Herbert A., Simón (1981). *The Sciences of the artificial*, p. 111.
- Hiller, B., Leama, A., Stansall, P., & Bedford, M. (1976). *Space syntax*. *A/Z ITU Journal of the Faculty of Architecture*, 3 (Environment and Planning), 147–185. <https://doi.org/10.1177/0013916502238863>

Hillier, B., Musgrove, J., O'Sullivan, P., 1984, "*Knowledge and Design*", *Developments in Design Methodology*, Nigel Cross, Open University, John Wiley & Sons, pp.245-264.

Hoes, P, Trcka, M, Hensen, J and Bonnema, B 2011 '*Optimizing building designs using a robustness indicator with respect to user behavior*', Building Simulation Proceedings of the 12th Conference of the International Building Performance Simulation Association, pp. 1710-1717

IDEAM. (2018). *Metodología De La Operación Estadística Variables Meteorológicas*. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2(Mayo 16), 113. <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/Documento+metodologico+variables+meteorologicas.pdf/8a71a9b4-7dd7-4af4-b98e-9b1eda3b8744>

IDEAM. (2019). *República de Colombia Promedio de Temperatura Media del Aire* (Issue 96, pp. 1–7). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Johannesson, P., Perjons, E. (2021). *Introduction. In: An Introduction to Design Science*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-78132-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-78132-3_1)

Jones, C. (1969) *The state-of-the-art in design methods*, p. 194.

Kasyanov, N. V. (2016). *The Evolution of Architectural Morphogenesis at the Beginning of XXI Century in the Context of Scientific Advances*. *Procedia Engineering*, 153, 266–270. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.113>

Kennedy, J., & Eberhart, R. (2021). *Particle Swarm Optimization. Studies in Computational Intelligence*, 2, 1942–1948. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61111-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61111-8_2)

Lagunilla Sánchez, R., Arribas Mantelli, D., Vallés Fernández, B., & Alcalá Fazio, E. (n.d.). *Optimización topológica de estructuras reticulares 3D con malla variable*.

Xixcnim.Uji.Es.

<http://www.xixcnim.uji.es/CDActas/Documentos/ComunicacionesOrales/18-23.pdf>

Lawson, B., 2003, *How Designers Think*, Architectural Press.

Lin, SHE & Gerber, DJ. (2014). '*Designing-in performance: A framework for evolutionary energyperformance feedback in early stage design*', *Automation in Construction*, 38, pp. 59-73.

Lin, Z., & Deng, S. (2008). *In A review of thermal comfort*, se menciona que Macpherson (1962) identificó seis factores determinantes de la sensación térmica: temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad del aire, humedad relativa, aislamiento de la vestimenta y nivel de actividad (tasa metabólica).

Liu, G.P., Yang J.B., & Whidborne, J.F. (2003). *Multiobjective optimisation and control*. Recent Studies Press.

Liu, K., & Tovar, A. (2014). *An efficient 3D topology optimization code written in Matlab. Structural and Multidisciplinary Optimization*, 50(6), 1175–1196.  
<https://doi.org/10.1007/s00158-014-1107-x>

Martin, A., & Deierlein, G. G. (2020). *Structural topology optimization of tall buildings for dynamic seismic excitation using modal decomposition*. *Engineering Structures*, 216(March), 110717. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110717>

Mau, B., (1998), *Incomplete Manifest for Growth*. *Bruce Mau Studio*. Recuperado de: <https://brucemaustudio.com/projects/an-incomplete-manifesto-for-growth/>

Mayorga M., R., Hurtado M., G., & Benavides, H. (2011). *Evidencias de cambio climático en colombia con base en información estadística*. Nota Técnica Del IDEAM, IDEAM-METE

(noviembre), 47.

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Evidencias+de+Cambio+Climático+en+Colombia+con+base+en+información+estadística.pdf/1170efb4-65f7-4a12-8903-b3614351423f>

Maxwell, J. C. (1870): I. *On Reciprocal Figures, Frames, and Diagrams of Forces*. En: Transactions of the Royal Society of Edinburgh 26, Nr. 01, p. 1–40

Meintjes, K. (2017). *Generative Design. What's That?* CIMdata, CIMdata. Disponible en línea en: <https://www.cimdata.com/en/news/item/8402-generative-design-what-s-that>

Meza Valencia, C. A. (2012). *OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA EN EL DISEÑO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES MECÁNICOS* (Vol. 66). Universidad Autónoma de Occidente.

Meza Valencia, C., Tamayo, F., & Franco Guzmán, E. (2019). *Optimización topológica aplicada al diseño de componentes estructurales mecánicos de peso reducido*. Instname.

MicheU, AG: M. (1904). *The limits of economy of material in frame structure* [J]. En: Philosophical Magazine 8, Nr. 6, p. 589–597

Mizobuti, V., & Vieira Junior, L. C. M. (2020). *Bioinspired architectural design based on structural topology optimization*. Frontiers of Architectural Research, 9(2), 264–276. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.002>

Moreno-De-Luca, L., & Begambre Carrillo, O. J. (2013). *Multi-objective heuristic computation applied to architectural and structural design: A review*. International Journal of Architectural Computing, 11(4), 363–392. <https://doi.org/10.1260/1478-0771.11.4.363>

- Nagy, D.; Villaggi, L. (2020). *Generative Design for Architectural Space Planning*. Autodesk University. Disponible en línea en: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/article/Generative-Design-Architectural-Space-Planning-2020>
- Owen, John Benjamin B. (1965). *The analysis and design of light structures*. American Elsevier Pub. Co.
- Parra Blanco, R. L. (2013). *Optimización topológica aplicada a problemas de elasticidad bidimensional usando elementos finitos*. In *Optimización topológica aplicada a problemas de elasticidad bidimensional usando elementos finitos* (pp. 1–93). Universidad Nacional. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/50831>
- Parsons, K. (2014). *Human thermal environments: The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance* (3rd ed.). CRC Press.
- Prager, W. (1974). *A note on discretized Michell structures*. En: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 3, Nr. 3, p. 349–355
- Prager, W. (1977). Rozvany, GIN: *Optimal Layout of Grillages*. En: *Journal of Structural Mechanics* 5, Nr. 1, p. 1–18
- Quinto Orozco, J. J. (2018). *ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE MATERIALES ECOLÓGICOS Y MATERIALES CONVENCIONALES CON EL PROPÓSITO DE DETERMINAR EL GRADO DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL PRODUCIDO, POR UNOS Y OTROS, EN LA CONSTRUCCIÓN DE UNA OBRA DE INFRAESTRUCTURA EN LA CIUDAD DE SANTA MARTA*. Universidad Cooperativa de Colombia, 1–68. [http://awsassets.wfnz.panda.org/downloads/earth\\_summit\\_2012\\_v3.pdf%0Ahttp://hdl.handle.net/10239/131%0Ahttps://www.uam.es/gruposinv/meva/publicaciones](http://awsassets.wfnz.panda.org/downloads/earth_summit_2012_v3.pdf%0Ahttp://hdl.handle.net/10239/131%0Ahttps://www.uam.es/gruposinv/meva/publicaciones)

- jesus/capitulos\_espanyol\_jesus/2005\_motivacion para el aprendizaje Perspectiva  
alumnos.pdf%0Ahttps://ww
- Rachman, A. P., Ichwania, C., Atthailah, ., Mangkuto, R. A., & Pradipta, J. (2023). *Passive design multi-objective optimization for high-performance tropical office buildings: Comparison of four different decision-making algorithms*. In *Proceedings of the 18th International Building Performance Simulation Association Conference (Building Simulation 2023)* (pp. 3091–3098). IBPSA. <https://doi.org/10.26868/25222708.2023.1237>
- Ramírez-Arias, A., Rodríguez, F., Guzmán, J.L., & Berenguel, M. (2012). *Multiobjective hierarchical control architecture for greenhouse crop growth*. *Automatica*, 48:490–498.
- Rivera Ospina, D. (2001). *Páramos de Colombia*. iM Editores Ltda.
- Rosales Lozano, R. A. (2018). *ARQUITECTURA Y PAISAJE ORIENTADOS HACIA EL TURISMO ECOLÓGICO EN CONTEXTO RURAL* [Universidad Piloto de Colombia]. In *Gastrointestinal Endoscopy*. <http://dx.doi.org/10.1053/j.gastro.2014.05.023><https://doi.org/10.1016/j.gie.2018.04.013><http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29451164><http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC5838726><http://dx.doi.org/10.1016/j.gie.2013.07.022>
- Rowe, P. G., (1987), *Design thinking*, Estados Unidos, Massachusetts Institute of Technology.
- Singh, V.; Gu, N. (2012). *Towards an integrated generative design framework*. *Des. Stud.* 33, 185–207.

- Sotiropoulos, S., Kazakis, G., & Lagaros, N. D. (2020). *Conceptual design of structural systems based on topology optimization and prefabricated components*. *Computers and Structures*, 226(xxxx), 106136. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2019.106136>
- Soto Dávila, C. A., & Paladino Hernández, J. E. (2016). *ANTEPROYECTO “CENTRO ECOLÓGICO RESERVA NATURAL LAGUNA DE APOYO”, MUNICIPIO DE CATARINA MASAYA*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
- Su, Y., Zhang, J., Ohsaki, M., & Wu, Y. (2020). *Topology optimization and shape design method for large-span tensegrity structures with reciprocal struts*. *International Journal of Solids and Structures*, 206, 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.09.002>
- Suárez Roa, T. (2020). *Yaguará, tierra soberana: propuesta arquitectónica para un complejo turístico y eco hotel (Huila)* [Universidad Antonio Nariño]. <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
- Turner, S. C., Paliaga, G., Lynch, B. M., Arens, E. A., Aynsley, R. M., Brager, G. S., Deringer, J. J., Ferguson, J. M., Filler, J. M., Hogeling, J. J., Int-hout, D., Kwok, A. G., Levy, H. F., Sterling, E. M., Stoops, J. L., Taylor, S. T., Tinsley, R. W., Cooper, K. W., Dean, K. W., ... Peterson, J. C. (1979). *American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers. International Journal of Refrigeration*, 2(1), 56–57. [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(79\)90114-2](https://doi.org/10.1016/0140-7007(79)90114-2)
- Turrin, M., Von Buelow, P. & Stouffs, R. (2011). *Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms*, *Advanced Engineering Informatics*, Volume 25, Issue 4, Pages 656-675.

- Wang, L. (2021). *Workflow for applying optimization-based design exploration to early-stage architectural design—Case study based on EvoMass*. *International Journal of Architectural Computing*, 14780771221082254
- Wang, W., Zmeureanua, R. and Rivard, H. (2005). 'Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization', *Building and Environment*, 40, pp. 1512-1525.
- Wortmann, T., Cichocka, J. & Waibel, C. (2022) *Simulation-based optimization in architecture and building engineering—Results from an international user survey in practice and research*, *Energy and Buildings*, Volume 259, 111863, ISSN 0378-7788
- Yadegaridehkordi, E., Nilashi, M., Nizam Bin Md Nasir, M.H., Momtazi, S., Samad, S., Supriyanto, E. & Ghabban, F. (2021). *Customer's segmentation in eco-friendly hotels using multi-criteria and machine learning techniques*, *Technology in Society*, Volume 65, 101528.
- Yang, D., Di Stefano, D., Turrin, M., Sariyildiz, S., & Sun, Y. (2020). *Dynamic and interactive re-formulation of multi-objective optimization problems for conceptual architectural design exploration*, *Automation in Construction*, Volume 118, 103251, ISSN 0926-5805.
- Yılmaz, S., & Kang, J. (2020). A user-detective adaptive façade towards improving visual and thermal comfort. *Building and Environment*, 177, 106882.  
<https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101554>