

UNIVERSIDAD DON BOSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA



TRABAJO DE GRADUACIÓN:

**RETROFIT DE EDIFICIOS DE OFICINA EN EL SALVADOR CON EL
OBJETIVO DE ALCANZAR UN NIVEL DE DESEMPEÑO NZEB**

PARA OPTAR AL GRADO DE:

MAESTRO(A) EN GESTIÓN ENERGÉTICA Y DISEÑO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

ARIZA RODRÍGUEZ, RENÉ IVÁN

CASTILLO HERNÁNDEZ, JAVIER ANTONIO

MEMBREÑO VELA, SAÚL ALEJANDRO

ASESOR:

Dr. LUIS AARÓN MARTÍNEZ

Antiguo Cuscatlán, La Libertad, El Salvador Centroamérica

Julio de 2024

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| ABREVIATURAS | 1 |
| RESUMEN | 3 |
| CAPÍTULO 1 – GENERALIDADES | 5 |
| 1.1 Introducción | 5 |
| 1.2 Antecedentes | 6 |
| 1.2 Planteamiento del Problema | 9 |
| 1.4 Objetivo General..... | 10 |
| 1.4.1 Objetivos Específicos | 10 |
| 1.5 Justificación de la Investigación..... | 10 |
| 1.6 Hipótesis..... | 11 |
| 1.6.1 Hipótesis general..... | 11 |
| 1.6.2 Hipótesis específicas..... | 11 |
| 1.6.3 Hipótesis nula..... | 11 |
| 1.6.4 Hipótesis estadística..... | 12 |
| CAPÍTULO 2 – MARCO TEÓRICO | 13 |
| 2.1 Definición de desempeño NZEB | 13 |
| 2.2 Definición de Retrofit..... | 13 |
| 2.2.1 Alcance del Retrofit: Retrofit Estándar vs. Retrofit Profundo | 14 |
| 2.3 Metodologías para Evaluar un Retrofit | 15 |
| 2.3.1 LEED | 15 |
| 2.3.2 Estándar ASHRAE 90.1 | 17 |
| 2.4 Sistemas Considerados al Realizar un Retrofit a un Edificio | 21 |
| 2.4.1 Iluminación y HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado): | 21 |
| 2.4.2 Aislamiento y Ventanas:..... | 21 |
| 2.4.3 Tecnología de Edificios Inteligentes: | 22 |

| | | |
|---|---|----|
| 2.4.4 | Módulos Fotovoltaicos: | 22 |
| CAPÍTULO 3 – CASOS DE ESTUDIO | | 24 |
| 3.1 | Caso de Estudio: Retrofit Estándar a Oficinas de HRO, Wells Fargo Center, Denver Colorado..... | 24 |
| 3.2 | Caso de Estudio : Retrofit Profundo (Deep Retrofit) al Empire State, New York | 27 |
| 3.3 | Caso de Estudio: Retrofit Profundo (Deep Retrofit) al Leon County Cooperative Extension, Florida..... | 30 |
| 3.4 | Caso de Estudio: Retrofit Aplicado a Edificio de Oficina Anna Maria Historic Green Village, estado de Florida, Estados Unidos. | 32 |
| 3.5 | Caso de Estudio: Retrofit a Edificio de oficinas en el Estado de Hidalgo, México. ... | 34 |
| 3.5.1 | Estrategia de optimización: Pirámide de Prioridades..... | 35 |
| 3.5.2 | Pasos para Mejorar el Balance Energético..... | 35 |
| 3.5.3 | Resultados Obtenidos..... | 37 |
| 3.5.4 | Conclusiones del Caso de Estudio..... | 41 |
| CAPÍTULO 4 – CARACTERIZACIÓN DE UN MODELO DE EDIFICIO DE TIPO OFICINA REPRESENTATIVO LOCALMENTE | | 42 |
| 4.1 | Metodología..... | 42 |
| 4.1.1 | Objetivos de la Encuesta..... | 45 |
| 4.1.2 | Población Destinataria | 45 |
| 4.1.3 | Procedimiento y Gestión de la Calidad..... | 46 |
| 4.1.4 | Contenido de la Encuesta | 47 |
| 4.2 | Pertinencia del Instrumento..... | 48 |
| 4.2.1 | Adaptación al Entorno Local | 48 |
| 4.2.2 | Bienestar y Productividad de los Usuarios | 49 |
| 4.2.3 | Eficiencia Energética y Sostenibilidad | 49 |
| 4.3 | Datos Empleados para Caracterizar un Edificio de Tipo Oficina Ubicado en el AMSS | 49 |
| 4.3.1 | Caracterización Cualitativa del Edificio Según Encuesta..... | 49 |

| | | |
|---|---|-----|
| 4.3.2 | Caracterización Cuantitativa del Edificio | 55 |
| 4.3.3 | Modelado y Simulación Energética del Caso de Estudio de un Edificio de Oficina Salvadoreño | 59 |
| CAPÍTULO 5 – ANÁLISIS DE UN CASO DE ESTUDIO: RETROFIT ENERGÉTICO APLICADO A UN EDIFICIO DE OFICINA SALVADOREÑO | | 66 |
| 5.1 | Metodología Utilizada para Realizar el Retrofit..... | 66 |
| 5.2 | Aplicación de Estrategias de Retrofit | 68 |
| 5.2.1 | Paso 1: Ventilación natural | 68 |
| 5.2.2 | Paso 2: Estrategias Activas - Eficiencia Energética de los Equipos y Luminarias 69 | |
| 5.2.3 | Paso 3: Simulaciones Paramétricas del Acristalamiento del Edificio..... | 71 |
| 5.2.4 | Paso 4: Estrategias activas – Eficiencia del Aire Acondicionado..... | 75 |
| 5.2.5 | Optimización de la Envolvente y Set Point de Temperatura..... | 76 |
| 5.3 | Proyección de la Generación Fotovoltaica..... | 98 |
| 5.3.1 | Evaluación Inicial para el Diseño del Sistema Fotovoltaico..... | 99 |
| 5.3.4 | Dimensionamiento del Sistema..... | 100 |
| 5.3.5 | Diseño del Sistema..... | 102 |
| 5.3.7 | Instalación y Puesta en Marcha..... | 106 |
| 5.3.8 | Mantenimiento y Monitoreo..... | 106 |
| 5.4 | Balance de Cero Energía | 107 |
| CAPITULO 6.: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | | 109 |
| 6.1 | Conclusiones | 109 |
| 6.2 | Recomendaciones | 110 |
| CAPÍTULO 7. REFERENCIAS | | 111 |
| ANEXO A: ENCUESTA UTILIZADA PARA CARACTERIZAR EDIFICIO DE LINEA BASE | | 117 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Representación Gráfica del Balance Cero Energía Neta (Fuente: Satori, et al, pág. 5, 2010). | 6 |
| Figura 2: Variables Consideradas para Clasificar un Edificio de Cero Energía Neta (Fuente: Patiño-Cambeiro et al, pág 4, 2016) | 8 |
| Figura 3: Wells Fargo Center, edificio que alberga la firma legal HRO en Denver, Colorado. (Fuente: Wikipedia, 2024) | 24 |
| Figura 4: Edificio Empire State, Nueva York. (Fuente: Wikipedia, 2008). | 27 |
| Figura 5: Película aislante instalada en las ventanas del Empire State. (Fuente: Empire State Realty Trust, 2024). | 29 |
| Figura 6: Ilustración del proceso completo de fabricación de las ventanas del Empire State. (Fuente: Refrofitmagazine, 2024). | 29 |
| Figura 7: Edificio Leon County Cooperative Extension. (Fuente: Retrofit Magazine, 2014). | 31 |
| Figura 8: Vista aérea del Anna Maria Historic Green Village. (Fuente: New Buildings Institute, 2012). | 34 |
| Figura 9: Edificio objeto del caso de estudio. (Fuente: plataformaptec.es) | 34 |
| Figura 10: Pirámide de prioridades en el proceso de optimización. (Fuente: construible.es, 2024) | 35 |
| Figura 11: Diagnóstico y Medidas a Implementar para la Mejora del Balance Energético.(Fuente: construible.es, 2024) | 36 |
| Figura 12: Matriz de Variables Afectadas por el Agrado de Transparencia de los Vidrios Fotovoltaicos. (Fuente: construible.es, 2024) | 36 |
| Figura 13: Gráficas de mejora progresiva en el balance energético. (Fuente: construible.es, 2024) | 38 |
| Figura 14: Imagen del edificio con las superficies fotovoltaicas integradas. (Fuente: construible.es, 2024) | 38 |
| Figura 15: Gráficas de consumo y generación de energía y de emisiones a lo largo del proceso de optimización. (Fuente: construible.es, 2024) | 39 |
| Figura 16: Gráficas de consumo energético por usos. (Fuente: construible.es, 2024) | 40 |
| Figura 17: Gráfica de consumo energético en el edificio y en el origen. (Fuente: construible.es, 2024) | 40 |
| Figura 18: Gráfica de emisiones de carbono. (Fuente: construcción.es, 2024) | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 19: Características Físicas y Térmicas de un Edificio (Fuente: Elaboración Propia) | 44 |
| Figura 20: Origen de los Valores Utilizados en el Análisis Energético del Modelo Base (Fuente: Elaboración Propia) | 45 |
| Figura 21: Gráfico de la pregunta R2-1 (Fuente: Elaboración Propia.) | 50 |
| Figura 22: Gráfico de la pregunta R2-2. (Fuente: Elaboración Propia.) | 51 |
| Figura 23: Gráfico de la Pregunta R5. (Fuente: Elaboración Propia.) | 51 |
| Figura 24: Gráfico de la Pregunta R6. (Fuente: Elaboración Propia.) | 52 |
| Figura 25: Modificaciones de Datos Climáticos para el AMSS. (Fuente: Elaboración Propia) | 60 |
| Figura 26: Representación Gráfica del Modelo Obtenido en las Encuestas a Profesionales. (Fuente: Elaboración Propia) | 61 |
| Figura 27: Huella del Edificio Base. (Fuente: Elaboración Propia) | 61 |
| Figura 28: Distribución en Planta del Edificio. (Fuente: Elaboración Propia) | 62 |
| Figura 29: Balance Energético Anual del Edificio Base. (Fuente: Elaboración Propia.) | 63 |
| Figura 30: Balance de Cargas Anual del Edificio Base. (Fuente: Elaboración Propia.) | 63 |
| Figura 31: Porcentaje de Consumos Anuales del Edificio (Fuente: Elaboración Propia) | 64 |
| Figura 32: Discomfort Térmico en Edificio Base. (Fuente: Elaboración Propia.) | 65 |
| Figura 33: Flujo de Trabajo para el Retrofit Energético. (Fuente: Elaboración Propia) | 67 |
| Figura 34: Resultado Final del Edificio Luego del Paso 3 (Fuente: Elaboración Propia) | 74 |
| Figura 35: Esquema de Alero Lateral Utilizado (Fuente: Elaboración Propia) | 74 |
| Figura 36: Esquema de Lamas (Building Shades) Utilizadas (Fuente: Elaboración Propia) | 74 |
| Figura 37: Resumen de los Modelos Considerados en el Análisis de Sensibilidad. (Fuente: Elaboración Propia.) | 80 |
| Figura 38: Resultados Globales del Modelo de Regresión Lineal: Consumo de Energía. (Fuente: Elaboración Propia.) | 82 |
| Figura 39: Diagrama de Cajas y Bigotes para las Variables Independientes del Análisis de Sensibilidad 1. (Fuente: Elaboración Propia.) | 85 |
| Figura 40: Gráfico de Regresión Parcial Entre Consumo Energético Total y el Set Point de Temperatura. (Fuente: Elaboración Propia.) | 86 |
| Figura 41: Influencia de los Niveles de las Variables Categóricas en la Temperatura de Enfriamiento. (Fuente: Elaboración Propia.) | 88 |

| | |
|--|-----|
| Figura 42: Resumen de Variables del Modelo de Sensibilidad No. 2. (Fuente: Elaboración Propia.) | 90 |
| Figura 43: Relación Entre la Temperatura de Enfriamiento y el Discomfort Térmico (Fuente: Elaboración Propia) | 91 |
| Figura 44: Diagrama de Cajas y Bigotes Tomando como Variable Dependiente el Discomfort. (a) Masa Térmica; (b) Aislamiento de la Pared; (c) Aislamiento del Techo. (Fuente: Elaboración Propia) | 93 |
| Figura 45: Gráfico de Pareto de la Optimización del Consumo Energético y Discomfort (Fuente: Elaboración Propia) | 95 |
| Figura 46: Retrofit Energético Realizado a Edificio de Oficina (Fuente: Elaboración Propia) | 96 |
| Figura 47: Comportamiento Energético del Edificio a Través del Retrofit (Fuente: Elaboración Propia) | 97 |
| Figura 48: Porcentaje de Ahorro de Energía en Cada Paso del Retrofit Respecto al Edificio Base (Fuente: Elaboración Propia) | 98 |
| Figura 49: Datos Técnicos del Módulo (Panel) Fotovoltaico Seleccionado (Fuente: Jinko Solar, 2024). | 101 |
| Figura 50: Datos Técnicos del Inversor Seleccionado (Fuente: Huawei, 2024). | 102 |
| Figura 51: Diagrama unifilar del sistema (Fuente: Elaboración Propia). | 103 |
| Figura 52: Pérdidas Utilizadas en la Simulación del Sistema (Fuente: Elaboración Propia). | 104 |
| Figura 53: Distribución de Módulos Fotovoltaicos (Fuente: Elaboración Propia) | 104 |
| Figura 54: Balance de Energía Anual del Edificio (Fuente: Elaboración Propia) | 107 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Resumen de Costos del Proyecto de Retrofit de HRO en el Wells Fargo Center. (Fuente: U.S. Department of Energy, 2011) | 25 |
| Tabla 2: Resumen de ahorros del proyecto de retrofit de HRO en el Wells Fargo Center. (Fuente: U.S. Department of Energy, 2011). | 26 |
| Tabla 3: Resumen de ahorros en concepto de energía del proyecto de retrofit de HRO en el Wells Fargo Center. (Fuente: U.S. Department of Energy, 2011). | 26 |
| Tabla 4: Tabla Resumen de Costos del Proyecto de Retrofit Profundo en el Empire State. (Fuente: U.S. Department of Energy, 2011). | 28 |
| Tabla 5 - Resumen de datos financieros del proyecto de retrofit profundo del Empire State. (Fuente: U.S. Department of Energy, 2011). | 28 |
| Tabla 6 - Tabla resumen de ahorro de energía del proyecto de retrofit profundo en el Empire State. (Fuente: U.S. Department of Energy, 2011). | 29 |
| Tabla 7 - Resumen de datos de proyecto. (Fuente: Retrofit Magazine, 2014). | 31 |
| Tabla 8 - Resumen de datos del proyecto Anna Maria Historic Green Village. (Fuente: New Buildings Institute, 2012) | 33 |
| Tabla 9 - Análisis de variables afectadas por el grado de transparencia de los vidrios fotovoltaicos. (Fuente: construible.es, 2024) | 37 |
| Tabla 10: Resultados de la sección A. (Fuente: Elaboración Propia.) | 53 |
| Tabla 11: Resumen de sección B. (Fuente: Elaboración Propia)..... | 53 |
| Tabla 12: Resultados de la sección D. (Fuente: Elaboración Propia). | 53 |
| Tabla 13: Resultados de Sección E (Fuente: Elaboración Propia)..... | 54 |
| Tabla 14: Conductividad Térmica de la Envolvente del Edificio (Fuente: Elaboración Propia.) | 56 |
| Tabla 15 - Valores térmicos de la fenestración del edificio. (Fuente: elaboración propia.) | 57 |
| Tabla 16 - Caracterización de Iluminación del Edificio Base.(Fuente: Elaboración Propia). | 57 |
| Tabla 17 - Caracterización del Sistema de Climatización del Edificio Base. (Fuente: elaboración propia.)..... | 58 |
| Tabla 18 - Caracterización de la Actividad de los Usuarios del Edificio. (Fuente: Elaboración Propia.) | 59 |
| Tabla 19: Impacto del Uso de la Ventilación Natural en el Consumo Energético. (Fuente: Elaboración Propia.)..... | 69 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 20 - Valores Estandarizados de Consumos Energéticos por Iluminación y Cargas Misceláneas. (Fuente: Elaboración Propia.) | 70 |
| Tabla 21: Reducción del Consumo Energético Entre Paso 1 y Paso 2. (Fuente: Elaboración Propia.) | 71 |
| Tabla 22 - Variables Paramétricas Parciales del Acristalamiento. (Fuente: Elaboración Propia). | 72 |
| Tabla 23 - Simulación paramétrica parcial del acristalamiento. (Fuente: elaboración propia.) | 73 |
| Tabla 24 - Mejora en la eficiencia del sistema de aire acondicionado. (Fuente: elaboración propia.)..... | 76 |
| Tabla 25. Variables Consideradas en el Análisis de Sensibilidad. (Fuente: Elaboración Propia.) | 78 |
| Tabla 26 - Resumen de los Coeficientes de la Regresión. (Fuente: elaboración propia.) . | 82 |
| Tabla 27 - Resumen de Pruebas ANOVA por Niveles para las Variables Categóricas. (Fuente: Elaboración Propia.)..... | 86 |
| Tabla 28. Resultados análisis ANOVA tomando como variable dependiente la Temperatura de enfriamiento. (Fuente: elaboración propia.) | 89 |
| Tabla 29. Coeficientes de la Regresión Múltiple Tomando Como V.D. la Temperatura de Enfriamiento. (Fuente: Elaboración Propia.)..... | 91 |
| Tabla 30. Resumen análisis ANOVA Tomando como Variable de Respuesta el Disconfort. (Fuente: Elaboración Propia)..... | 94 |
| Tabla 31: Combinación Optima de Envoltente y Set point (Fuente: Elaboración Propia) . | 96 |
| Tabla 32: Resumen del Consumo Energético en Cada Fase del Retrofit Energético (Fuente: Elaboración Propia)..... | 96 |
| Tabla 33: Generación Fotovoltaica (Fuente: Elaboración Propia)..... | 100 |
| Tabla 34: Configuración del Sistema Fotovoltaico (Fuente: Elaboración Propia) | 105 |
| Tabla 35: Balance Energético del Edificio Optimizado (Fuente: Elaboración Propia)..... | 108 |

ABREVIATURAS

| | |
|---------------|---|
| IRENA: | International Renewable Energy Agency |
| FV: | Fotovoltaico |
| SFV: | Sistema fotovoltaico |
| DGEHM: | Dirección General de Energía, Hidrocarburos y Minas |
| kWp: | Kilovatio-pico |
| Wp: | Vatios-pico |
| kW: | Kilovatio |
| MPPT: | Maximum Power Point Tracker |
| Voc: | Tensión de circuito abierto |
| Isc: | Corriente de cortocircuito |
| Imp: | Corriente del punto de máxima potencia |
| Vmp: | Tensión del punto de máxima potencia |
| Pmax: | Máxima potencia que entrega el panel |
| Vm: | Tensión máxima |
| Im: | Intensidad máxima |
| FF: | Factor de Forma |
| Hz: | Hercio o Hertz |
| DC: | Corriente directa |
| AC: | Corriente alterna |
| W: | Vatio |
| USD: | Dólar Estadounidense |
| TDR: | Términos de Referencia |
| UE: | Unión Europea |

EE. UU: Estados Unidos de América

W/m²: Vatios por Metro Cuadrado

O&M: Operación y Mantenimiento

RESUMEN

Estamos en un contexto mundial complejo, en el cual los ecosistemas y la naturaleza del mundo están viéndose deteriorados por la actividad humana, la cual nunca tuvo un enfoque sostenible. El uso óptimo de nuestros recursos, como el agua y la energía, es un pilar fundamental de la sostenibilidad, y es una de las opciones que han de mitigar las crecientes consecuencias del cambio climático. Si bien, la mayor parte de la atención está enfocada en las edificaciones nuevas, en donde según el presidente del El Salvador Green Building Council, el Ing. Francisco Sifontes, señala que el 8% de estas edificaciones optan por la sostenibilidad en El Salvador (Diario El Mundo, 2023), se han dejado de lado los edificios existentes, los cuales, desde su concepción hasta su finalización, en su mayoría no han tenido en su enfoque la sostenibilidad. En este estudio se analizan las construcciones existentes y uno de los métodos para lograr (o al menos acercarse) a la sostenibilidad consiste en implementar un retrofit energético. Este enfoque implica la sustitución de sistemas obsoletos, la renovación y mejora de las envolventes, la incorporación de fuentes de energía renovable a pequeña escala en el mismo sitio y la apuesta por estrategias de arquitectura pasiva. Así, se busca reducir considerablemente el consumo de energía y, como resultado, las emisiones de gases de efecto invernadero, hasta alcanzar el desempeño energético deseado.

En el segundo capítulo de este estudio, se exponen los conocimientos teóricos necesarios para comprender en qué consiste un retrofit, y los diversos tipos de retrofit que se pueden aplicar a una edificación. Esto incluye una breve descripción de los sistemas que se deben incluir en un retrofit, según el libro “Guía de retrofit energético avanzado: Maneras prácticas para mejorar el desempeño energético en edificios de oficinas”, del Departamento de Energía de los Estados Unidos de América. Siguiendo las recomendaciones de este libro, se realiza una descripción de las metodologías sugeridas (LEED, ASHRAE), de los requisitos generales que se consideran en el desempeño energético de un edificio, cómo estas metodologías evalúan un retrofit y los requerimientos técnicos para poder hacerlo.

En el tercer capítulo se abordan los casos de estudio más representativos de edificaciones donde se aplicó retrofit energético en distintos climas, destacando las medidas de retrofit adoptadas para cada caso, los sistemas involucrados y los rendimientos energéticos logrados.

En el cuarto capítulo se caracteriza el edificio de oficinas típico del área metropolitana de san salvador, según los datos recolectados. Primero, se expone la metodología utilizada, junto con los resultados del instrumento de recolección de datos utilizado, que en este caso fue una encuesta la cual se basó en una guía de modelado energético de la Administración de Información Energética de los Estados Unidos. Con la recolección de datos realizada, se sintetizó un modelo con las características necesarias para el análisis energético. En este paso, se recolectó la información necesaria para cumplir con los requerimientos de simulación del software. El modelo obtenido de esta manera representa el caso base para los análisis de este estudio.

En el quinto capítulo se discute la metodología propuesta para realizar un retrofit al edificio base que es el edificio que representará el consumo energético y configuraciones iniciales del edificio producto de las encuestas e investigaciones realizadas. En este capítulo se determinan los pasos a seguir para aplicar un retrofit a un edificio de oficina del Área Metropolitana de San Salvador, y el orden en que han de ser aplicados. En las siguientes subsecciones del capítulo, se evalúan los impactos de cada una de estas medidas en la reducción de la energía consumida del edificio con base en simulaciones energéticas en el programa de simulación DesignBuilder v7 que es una interfaz que permite utilizar como motor de simulaciones energéticas EnergyPlus v9.4. Posteriormente, se plantean todos los detalles del sistema de generación fotovoltaico in sitio a implantar, para finalmente evaluar según las simulaciones si es factible alcanzar el desempeño NZEB.

CAPÍTULO 1 – GENERALIDADES

1.1 Introducción

El mundo se encuentra en una etapa crítica en la lucha contra el cambio climático, y los efectos negativos de la emisión masiva de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Una de las actividades humanas que suponen una de las mayores contribuciones a la emisión de gases de efecto invernadero son los edificios, los cuales representan a nivel global, una contribución del 40% en el consumo energético (Comisión Europea, 2020), y en similar proporción a la producción de gases de efecto invernadero. Esto convierte a los edificios en un objetivo urgente y de suma importancia para promover planes de acción para combatir las causas de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Teniendo en cuenta la huella de carbono que representan los edificios, y el potencial de ahorro que supondría tener edificios energéticamente más eficientes, es que países como los Estados Unidos de América por medio del Departamento de Energía (NREL, 2016), se propuso por medio de una orden ejecutiva, que para el año 2020 en adelante, todos los edificios nuevos de naturaleza federal con un área de construcción mayor a 5,000 pies cuadrados debían concebirse para lograr un desempeño Cero Energía Neta (CEN ó NZEB, en inglés), en adelante, NZEB, lo que en otras palabras significa que tengan un alto rendimiento energético, y que a su vez, suplan su baja demanda energética con fuentes renovables instaladas en sitio o cercano, como es el caso para tecnologías solares o eólicas.

Si bien, estos esfuerzos y nuevas políticas están dirigidos a edificios nuevos, se considera que podría existir un gran potencial de ahorro en edificaciones existentes, por medio de la implementación de medidas para lograr mejores desempeños energéticos y operaciones más sostenible, con técnicas como el retrofit de edificios.

El retrofit de edificios, concepto que será definido con mayor detalle en la siguiente sección, consiste básicamente en un acercamiento que debe ser sistemático, con el cual se determinan aquellas modificaciones y acciones a tomar para un edificio existente, tal que estas promuevan un uso más eficiente de la energía y que sean rentables.

El presente trabajo de graduación parte de la necesidad de conocer el potencial ahorro energético, y, por lo tanto, la viabilidad económica de la modificación de las edificaciones existentes al ser llevadas a un desempeño energético que las clasifique como NZEB, para

lo cual es necesario conocer las características constructivas de las edificaciones existentes del país, así como también los desempeños energéticos que estos tienen. Se ha delimitado el alcance a edificios de tipo oficina debido a que los datos de este tipo de edificios suelen ser más accesibles que los demás tipos de edificios. Este estudio es una exploración teórica de los resultados esperados de la aplicación de metodologías existentes para el retrofit de edificios de oficina, orientadas a convertir estos edificios a un tipo NZEB.

1.2 Antecedentes

Se define a un edificio cero energía neta como aquel edificio que independientemente de su naturaleza, es decir, con un uso final comercial, residencial, educativo, institucional, entre otros. Teniendo un desempeño energético muy alto, y una demanda energética muy baja. A su vez, este tipo de edificio deben ser capaces de suplir su baja o casi cero demanda de energía a lo largo de un período de tiempo establecido, en gran parte mediante el uso de energías renovables (REHVA, 2011). En este periodo de tiempo la energía total consumida puede cuantificarse en diferentes unidades para realizar un balance, estas unidades pueden ser kWh, emisiones de toneladas equivalentes de CO₂, \$/kWh, entre otros. Y la energía renovable suministrada al edificio debe de ser igual o mayor a la energía cuantificada en el periodo de tiempo establecido. La siguiente ecuación representa la condición a cumplir para poder asegurar que el comportamiento que tiene es cero energía neta (Torcellini et al, 2006).

$$NZEB = \text{Energía Exportada} - \text{Energía Importada} \geq 0 \quad (\text{Ec. 1})$$

De manera gráfica, los edificios de cero energía pueden representarse de la siguiente manera:

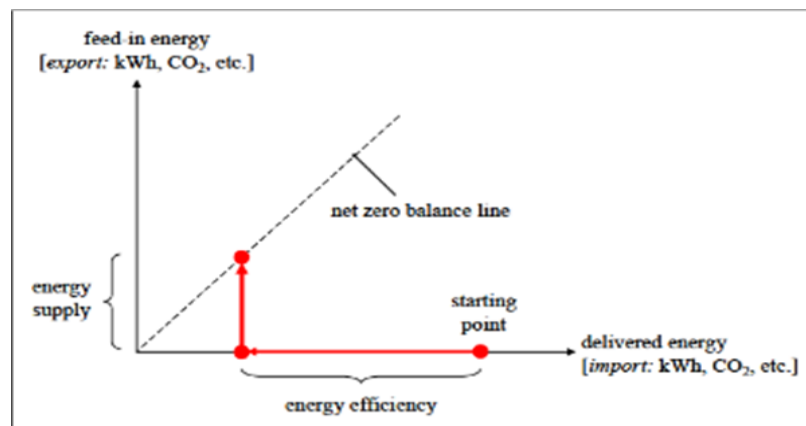


Figura 1: Representación Gráfica del Balance Cero Energía Neta (Fuente: Satori, et al, pág. 5, 2010).

Al analizar un edificio como un sistema termodinámico, éste puede tener diferentes fronteras a través de las cuales se puede cuantificar el balance de energía necesario, no obstante, se pueden utilizar diferentes métricas para cuantificar el balance de energía. Dependiendo de las decisiones tomadas al momento de diseñar el edificio, así como los objetivos que se pretendan alcanzar con este tipo de proyectos, así podrá clasificarse el edificio de cero energía neta.

Paul Torcellini et al (2006, 6), miembro del National Renewable Energy Laboratory, en su artículo Zero Energy Buildings: A Critical Look at The Definition, ha clasificado este tipo de edificios en las siguientes definiciones:

I. Net Zero On Site Energy: En este tipo de edificios, se logra la cero energía neta a lo largo de un periodo de tiempo determinado y según la métrica elegida, con las fuentes de energías renovables integradas adentro de la huella del edificio como en el caso de tener paneles solares sobre el techo o hacer el uso de tecnologías como las BIPV “Building Integrated Photovoltaic” que son paneles solares ubicados en paredes y ventanas del edificio o tener un generador fotovoltaico ubicado en el parqueo del edificio.

II. Net Zero Source Energy: En este tipo de edificios, la energía renovable suministrada a lo largo del periodo de tiempo donde se ha realizado el balance de energía, proviene de fuentes renovables que se encuentran afuera de la frontera del edificio, como podría ser el caso de energía eléctrica suministrada por la distribuidora de energía del edificio proveniente de fuentes renovables. La energía proveniente de fuentes de energía renovables al edificio se debe de calcular como la energía en la fuente, es decir, antes de sufrir pérdidas por las ineficiencias del sistema de distribución antes de ser entregada al edificio.

III. Net Zero Energy Costs: Para esta definición de cero energía neta, la métrica utilizada es el costo de la energía y el balance de cero energía neta alcanzado debe de realizarse entre la cantidad de dinero que la empresa distribuidora paga al propietario del edificio según el contrato que tengan por la venta de la energía exportada del edificio a la red de distribución y la cantidad de dinero que el propietario paga a la empresa distribuidora por la energía comprada de la red de distribución a lo largo de un periodo de tiempo establecido.

IV. Net Zero Energy Emissions: En esta clasificación de cero energía neta, se toma en cuenta la métrica utilizada, en términos de toneladas equivalentes de CO₂, realizando un balance dentro de un periodo de tiempo establecido, entre las emisiones producidas por las

fuentes de energía que abastecen al edificio y las emisiones reducidas por el uso de energías renovables en el abastecimiento de energía del edificio. Otro tipo de emisiones utilizadas en el balance pueden ser los óxidos de nitrógeno y los óxidos de azufre.

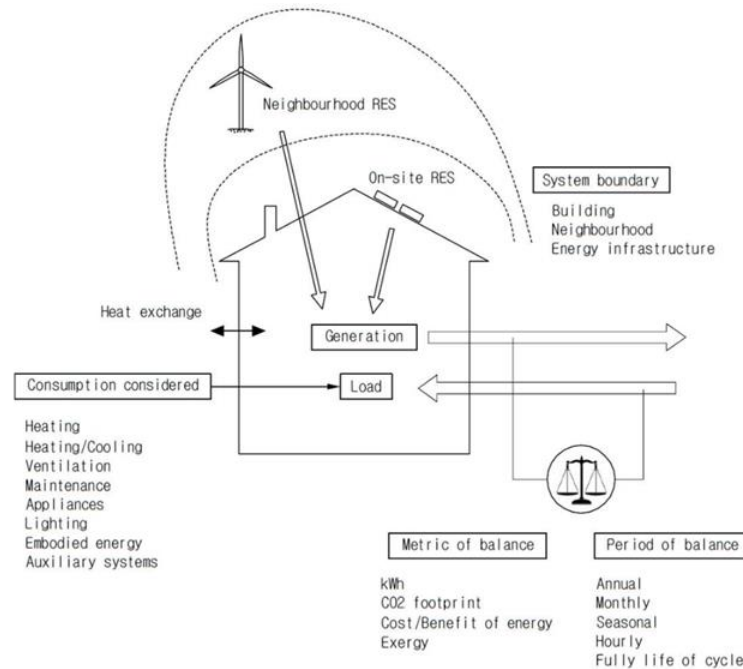


Figura 2: Variables Consideradas para Clasificar un Edificio de Cero Energía Neta (Fuente: Patiño-Cambeiro et al, pág 4, 2016)

Dentro de las variables consideradas en la Figura 2, Patiño-Cambeiro et al (2016) han identificado que cuando un edificio de cero energía es exitoso, se tiene que explorar la posibilidad de expandir las fronteras del balance energético más allá de un solo edificio y considerar un conjunto de edificios o vecindario.

Un edificio de cero energía neta es un proyecto integrativo que dependerá de las características del proyecto para definirlo, a su vez este tipo de edificios por su naturaleza, son edificios sostenibles que pueden certificarse con diferentes metodologías de evaluación como lo son LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), Passive Haus, CASBEE (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency) que son métodos de evaluación internacionales, así como con métodos nacionales como es el caso de la actual normativa de evaluación de la OPAMSS llamada HAUS que es una Guía de Hábitats Urbanos Sostenibles la cual se comenzó a aplicar en el año 2019 a los nuevos proyectos urbanísticos de San Salvador, implementando en las distintas etapas de los proyectos ya sean de diseño, construcción o funcionamiento.

1.2 Planteamiento del Problema

Hasta el año 2021, solamente en 8 países de América Latina se tenía un registro de algún proyecto, ya sea construido o en etapas de desarrollo sobre edificios de cero energía neta, dichos edificios sumaban 25 en total, demostrando que, en América Latina, aún se está en proceso de trabajar en soluciones ante las problemáticas del clima, culturales, sociales, técnicas y económicas propias de cada país y su contexto. (Chen Austin et al, 2021).

La demanda energética de los edificios está influenciada por varios parámetros climáticos, como lo son la temperatura, la radiación solar, la dirección del viento y la humedad relativa del ambiente, donde el edificio actúa como un lugar que modifica el clima en su interior, dependiendo de la zona climática donde se ubique el edificio y el tipo (frío, caliente, húmedo, verano caliente, invierno helado, entre otros.), el consumo de energía puede variar.

Los factores que más influyen en el consumo de energía en un edificio son la climatización interior, características constructivas, sistemas de servicios del edificio, características del uso de los ocupantes, factores asociados al contexto socioeconómico del edificio o el uso eficiente de tecnologías y luminarias en el interior del edificio. (De Silva y Sandanayake, 2012).

Según el reporte “Buildings” de la International Energy Agency, en el año 2021, los edificios en general representaron el 30% del consumo de energía y el 27% de las emisiones de gases de efecto invernadero globales, siendo emisores directos del 8% de las emisiones y de manera indirecta del 19% debido a la electricidad y calor usado en los edificios. Ambos valores, tanto el consumo energético como las emisiones se vieron reducidas en el año 2020 debido a la pandemia ocasionada por el COVID-19, pero en el año 2021 han vuelto a aumentar a valores superiores a los que tenían en el 2019.

A nivel internacional, estándares de eficiencia mínimos, así como códigos energéticos para los edificios están teniendo un auge y en consecuencia se está acelerando la implementación de tecnología más energéticamente eficiente y el uso de las energías renovables para suministrar energía al edificio. El sector de los edificios necesita un cambio para lograr la meta de las emisiones cero de gases de efecto invernadero para el año 2050. Se ha proyectado que para lograr esta meta al menos el 20% de los edificios existentes deben de ser edificios con cero emisiones para el año 2030 (IEA, 2022).

Actualmente, las edificaciones destinadas a oficinas presentan de por sí, un alto consumo energético, debido a que suelen estar fuertemente equipados con sistemas de iluminación,

sistemas de tomacorrientes, ascensores, sistemas de bombeo y sistemas de climatización central, los cuales representan altos consumos energéticos al utilizarse de manera estable a lo largo del día, consumo que a su vez tiene un equivalente en emisiones de gases de efecto invernadero.

En El Salvador, no existe ninguna regulación energética que “restrinja” u obligue a alcanzar niveles de desempeño energético en edificaciones nuevas o existentes. Es en este contexto que se hace necesaria una metodología nacional para abordar el reto energético que conlleva la operación de edificaciones de tipo oficina existentes e ineficientes, y que, además, al estar estructurada de manera clara para su fácil seguimiento, haría del retrofit una técnica mucho más fácil de seguir en la consecución de la sostenibilidad. En este sentido, el país al estar alineado con los objetivos planeados por la IEA en cuanto a la descarbonización del sector energético para el año 2050, se vería beneficiado con la implementación de esta metodología en edificios de oficinas existentes.

1.4 Objetivo General

Identificar, formular y proponer una metodología de rediseño de edificios de oficinas para convertirlo en un edificio de cero energía neta.

1.4.1 Objetivos Específicos

- Utilizar herramientas de simulación computacional para analizar el comportamiento energético de un edificio tipo oficina.
- Integrar diferentes medidas de eficiencia energética en un diseño existente de un edificio de tipo oficina.
- Integrar el uso de fuentes de generación de energías renovables en un edificio de oficina existente para abastecer toda su demanda energética
- Generar y simular un edificio modelo que sirva como línea base general en el estudio a realizar y para la determinación de medidas de conservación energética.

1.5 Justificación de la Investigación.

El Salvador es uno de los países firmantes de los objetivos de desarrollo sostenible, el objetivo número 11 corresponde a ciudades y comunidades sostenibles. La implementación de una metodología de rediseño de edificios del tipo oficina en el país para lograr que alcancen la cero energía neta es una herramienta que ayudará al país a alcanzar este objetivo del desarrollo sostenible porque un edificio de cero energía neta, por definición, es a su vez un edificio sostenible. Este enfoque está muy poco explorado en el país, pues hay

una tendencia a pensar que solo los edificios nuevos son los que pueden cumplir con certificaciones de sostenibilidad. Muchos edificios existentes son sujetos de la implementación de medidas de conservación de la energía, a pesar de ello, se considera que el enfoque podría ser en su mayoría de carácter correctivo, y poco tiene que ver con la consecución de la sostenibilidad, sino más bien en lograr un beneficio económico que representan estas medidas. Por esta razón, se aborda el retrofit energético como un proceso idóneo a aplicar en edificios existentes, que promueve la sostenibilidad, sin dejar de ser rentable. Adicionalmente, este estudio cobra mayor relevancia al utilizar un instrumento de recolección de datos diseñado específicamente para poder caracterizar de manera local a los edificios de oficinas, por lo que las medidas de conservación de la energía exploradas y sus respectivos pesos en el impacto de la reducción del consumo energético serán válidos en para los demás edificios de oficinas.

1.6 Hipótesis.

1.6.1 Hipótesis general.

La metodología para el rediseño de un edificio de oficinas deberá integrar medidas de eficiencia energética con la generación de energía mediante fuentes renovables y herramientas de simulación computacional para alcanzar la cero energía neta con niveles de confort térmico aceptables.

1.6.2 Hipótesis específicas.

- La implementación de una metodología para el rediseño de edificios de oficina existentes y su transición a edificios de cero energía neta reducirá el consumo energético de un edificio existente con un nivel de confort térmico aceptable.
- Haciendo uso de diferentes medidas de eficiencia energética, entre ellas el uso de la arquitectura pasiva se puede obtener la cero energía neta en un edificio existente con los materiales de construcción disponibles en el país.

1.6.3 Hipótesis nula.

- Para alcanzar la cero energía neta y niveles de confort térmico aceptables, la metodología para el rediseño de un edificio de oficinas no deberá de integrar medidas de eficiencia energética con la generación de energía mediante fuentes renovables y herramientas de simulación computacional.

- El consumo energético de un edificio y su confort térmico no se reducirán con la implementación de una metodología para el rediseño de edificios de oficina existentes y su transición a edificios de cero energía neta.
- Un edificio de cero energía neta no se puede obtener con los materiales de construcción disponibles en el país y combinándolos con el uso de arquitectura pasiva en edificios de oficina existentes.

1.6.4 Hipótesis estadística.

- La reducción del consumo energético de un edificio es proporcional al número de medidas de eficiencia energética que se implementen en su funcionamiento.
- El cumplimiento de niveles de confort térmico aceptables de un edificio son proporcionales a las medidas de arquitectura pasivas y estrategias de eficiencia energética activas que se implementen en su funcionamiento.

CAPÍTULO 2 – MARCO TEÓRICO

2.1 Definición de desempeño NZEB

Para una efectiva determinación de las estrategias y medidas a considerar a partir del análisis del modelo de edificación, se debe conocer la definición de NZEB (Net Zero Energy Building, por sus siglas en inglés) ó Edificio de Cero Energía Neta (en español). El sector de la construcción y las edificaciones, como se había revisado anteriormente, es uno de los principales contribuyentes a la emisión de gases de efecto invernadero, y es por esto, que fue en la Unión Europea donde se formuló y acuñó el concepto de NZEB por primera vez, como una manera para minimizar su huella ecológica y asegurar la seguridad energética (J.M. Santos-Herrero, 2021). La Comisión Europea, a través de la Directiva para el Desempeño Energético de las Edificaciones (EPBD), solicitó a cada país miembro de la región a establecer cuantitativamente un rango de niveles de desempeño energético mínimos requeridos a cumplir basados en las condiciones nacionales de cada país, utilizando una metodología en común bajo la consigna siguiente: “que los edificios presenten un consumo de energía óptimo, de 0 kWh/m² provenientes de energías primarias” (Aduvali, 2018). La definición de un edificio NZEB, como descrita por la Directiva para el Desempeño Energético de las Edificaciones es la siguiente:

- Un edificio de casi-cero energía neta es un edificio que tiene un desempeño energético muy alto, y a su vez, una cantidad de energía requerida para operar muy baja o casi cero, la cual debería estar suministrada en su mayoría por fuentes de energías renovables producida en sitio o cerca del edificio (Comisión Europea, 2020).

Para los análisis y estudios de este trabajo, se adopta esta definición de NZEB, pues no se encuentran variaciones del término. Si bien, cada país europeo adoptó la definición de NZEB, fue cada uno de estos quienes cuantificaron el desempeño mínimo necesario para considerar como de cero energía neta a sus edificaciones.

2.2 Definición de Retrofit

De acuerdo con el diccionario de Oxford, el término *retrofit* se origina como una composición de dos vocablos en inglés, los cuales son *retroactively* y *fit*, y el primer uso de la palabra en cuestión data de la década de 1940, donde comúnmente se referían a instalar una nueva parte a una máquina, que en el momento de su fabricación no lo tenía (Oxford English

Dictionary, 2010). Para efectos de este estudio, se acepta esta acepción, no obstante, al ser aplicada a edificaciones se debe ampliar para abarcar las situaciones en las cuáles se necesita modificar lo existente y no solo la adición de elementos estructurales o energéticos. La definición adecuada al tema de estudio, se lee como sigue:

La instalación o modificación de un componente de un edificio existente, que en el momento de su construcción no lo tenía, y que suponga una mejora en su rendimiento.

Habiendo definido el término retrofit, se utilizará generalmente acompañado del tipo de rendimiento que se pretende mejorar, por ejemplo, se utilizará la combinación retrofit energético para referirse a las modificaciones o adiciones de componentes a realizarse a un edificio para mejorar su rendimiento energético.

2.2.1 Alcance del Retrofit: Retrofit Estándar vs. Retrofit Profundo

Para poder catalogar de mejor manera un retrofit, se debe tener en cuenta el alcance y magnitud de este. Mientras que un retrofit estándar se centra en medidas de conservación de energía más “inmediatas” (como lo son todas aquellas medidas en el rubro de la operación y el mantenimiento, y otras medidas estándar), un retrofit profundo va más allá y usualmente bajo un enfoque de diseño integrativo, donde involucren todas las partes del edificio (U.S. Department of Energy, 2011).

Mientras que generalmente un retrofit estándar incluye medidas de conservación de energía más rentables y con un bajo riesgo financiero, un retrofit profundo trae consigo un riesgo implicado mucho mayor y periodos de retorno.

Generalmente, los procesos de retrofit estándar suelen dividirse en varias etapas, y su implementación no se realiza de manera simultánea, sino en serie, debido a que las modificaciones en un sistema tienen incidencia en los demás sistemas, por ejemplo: una modificación como hermetizar una oficina tiene un impacto directo en la carga térmica que percibe el sistema de climatización de la oficina. (U.S. Department of Energy, 2011)

Se debe aclarar que un retrofit estándar y un retrofit profundo no son mutuamente excluyentes, y más bien el criterio para categorizar una medida como una o como la otra, radica en el enfoque en el cual estas se implementan. Esto es, una medida realizada bajo un enfoque por etapas (es decir, evaluando gradualmente el efecto de una medida sobre un sistema como el ejemplo anterior relacionado al sistema de climatización) siempre se puede categorizar individualmente como una medida de retrofit estándar, no obstante, y de manera simultánea, esta medida puede formar parte de un retrofit profundo si es

implementada bajo un enfoque de diseño integrado. Las áreas a intervenir más usuales y con mejor potencial de generar ahora por retrofit son el sistema de iluminación, las cargas “plug and process” (que son cargas que no están relacionadas con iluminación, climatización, ventilación, calentamiento de agua y que típicamente no proveen de confort a los usuarios, estas cargas representan aproximadamente un 33% del consumo energético en edificios comerciales en Estados Unidos (McKenney, 2008)), la envolvente de los edificios, los componentes donde interviene aire y agua dentro de los sistema de climatización, el servicio de agua caliente (no aplicable en nuestro entorno) y la sustitución de transformadores eléctricos por uno de mejor eficiencia (U.S. Department of Energy, 2011).

2.3 Metodologías para Evaluar un Retrofit

Un retrofit tal y como se definió anteriormente, es una modificación o adición de elementos estructurales, aplicaciones con consumos energéticos, entre otros. Cuyo objetivo principal es tener un impacto positivo en el desempeño y en la funcionalidad del edificio como un todo. Actualmente hay una buena cantidad de literatura y guías teóricas para evaluar el impacto de estas medidas, y poder cuantificar los efectos generados.

Por su naturaleza, los retrofit implican la aplicación del conocimiento de varias disciplinas al momento de aplicarlo a un edificio, independientemente sea su naturaleza o fase de desarrollo en la que se encuentre, no obstante, a nivel nacional aunque no existan todavía estándares o reglamentos nacionales que involucren los retrofit, se propone el apoyo en dos estándares internacionales para aplicarle un retrofit a edificios existentes, los cuales son los requerimientos de la certificación LEED y el estándar de eficiencia energética ASHRAE 90.1 que aplica para edificios no residenciales con un máximo de cinco pisos. Se eligieron ambos por la estrecha relación que tiene El Salvador con el país de origen de dicha certificación y estándar, que son los Estados Unidos.

2.3.1 LEED

LEED es una de las certificaciones de edificios más difundidas y ampliamente utilizadas en el campo de las edificaciones sostenibles a nivel mundial. Esta certificación contempla medidas para lograr la sostenibilidad en un amplio rango de áreas del desarrollo humano en el día a día, como el uso eficiente del agua, la conservación de la energía, el lograr un ambiente interior de calidad para propiciar una buena atmósfera en las áreas de trabajo, la movilización y el acceso humano óptimo, entre otras. También se incluyen aspectos más técnicos y que tienen que ver más con la construcción de las infraestructuras, como la

inclusión del diseño y la planificación integrativos, la reducción del uso de materiales nocivos para el medio ambiente y la innovación.

Naturalmente, todos estos aspectos no podrían ser aplicados a todos los proyectos, por lo que existe una diversidad de certificaciones LEED a aplicarse según la naturaleza del diseño, entre las cuales destacan:

- a) Certificación LEED de diseño de edificio y construcción (LEED BD+C)
- b) Certificación LEED de diseño de interiores y construcción (LEED ID+C)
- c) Certificación LEED de operaciones y mantenimiento de edificios (LEED O+M)
- d) Certificación LEED de desarrollo de vecindarios (ND)
- e) Certificación LEED de hogares
- f) Certificación LEED de ciudades

La certificación LEED O+M es la que se aplicaría en el caso de un edificio existente para evaluar su retrofit, dicha certificación indicaría si las medidas del retrofit se han aplicado bien y han impactado el consumo energético del edificio, reduciéndolo según el estándar ASHRAE 90.1. Si bien, existen varios tipos de certificación LEED a aplicarse según la naturaleza del proyecto, los objetivos que persigue esta certificación son comunes entre las diversas certificaciones (U.S. Green Building Council, 2003), entre los cuales se busca no solo incidir en un aspecto de la edificación, sino, en todos aquellos elementos críticos que son importantes para crear el mejor edificio posible que sea capaz de:

- Reducir la contribución de las edificaciones al cambio climático global
- Mejorar la salud humana a nivel individual
- Proteger y restaurar los recursos hídricos
- Proteger y ayudar a salvaguardar la biodiversidad y las funciones de los ecosistemas
- Promover ciclos de materiales sostenibles y regenerativos
- Mejorar la calidad de vida de la comunidad

La certificación LEED es una acreditación que tiene diferentes niveles que dependerán de los puntos que obtenga la edificación a certificar de acuerdo a un sistema de puntos definido, que evalúan los distintos elementos críticos del edificio, como son la energía, la reducción de la huella de carbono, el uso eficiente de la energía y el agua, la disposición correcta y reducida de residuos, el uso de materiales sostenibles, entre otros (U.S. Green Building Council, 2003).

Los proyectos son sometidos a un proceso de verificación y revisión por la GBCI (Green Business Certification Inc.,) la compañía encargada de emitir las acreditaciones LEED), y de acuerdo al cumplimiento de los criterios del sistema de puntos, le son otorgados créditos. Estos créditos son sumados en la etapa final, y se asigna un nivel de certificación, los cuales son según la certificación LEED v4:

- a) Platino: proyectos que obtuvieron 80 puntos o más.
- b) Oro: proyectos que obtuvieron entre 60 y 79 puntos.
- c) Plata: proyectos que obtuvieron entre 50 y 59 puntos.
- d) Certificado: se otorga el simple estado de “Edificación certificada” al obtener al menos 40 puntos.

Uno de los criterios a evaluar en la acreditación LEED de una edificación, en este caso, un edificio de oficinas, es el de “energía y atmósfera” (EA, en inglés). Estos criterios son una base importante sobre la cual analizar el cumplimiento mínimo de eficiencia energética de una edificación. Estos criterios de evaluación son el EAp2 y el EAc1, los cuales evalúan que la edificación cumpla con los requisitos mínimos de eficiencia energética y que este haya logrado un desempeño energético alto, más allá de los prerrequisitos estándar para reducir el impacto medioambiental y económico asociados a un uso extensivo de energía (USGBC, 2009). Un requisito indispensable para obtener un puntaje es realizar una simulación energética del edificio completo basándose en el estándar ASHRAE 90.1, por lo que la obtención de resultados favorables, y a su vez, créditos LEED es una buena metodología para evaluar un retrofit.

2.3.2 Estándar ASHRAE 90.1

Para el caso de la herramienta de software que se utilizará en este estudio, el software de Design Builder v7.0.2.006 permite evaluar para el caso de una certificación LEED, el desempeño energético de los edificios según el apéndice G de dicho estándar en sus versiones 2007, 2010, 2013 y 2016, según seleccione el usuario. Siendo las versiones más actuales más restrictivas que las anteriores , por lo que los criterios que contiene esta norma estarán incorporados en el análisis del software. Este estándar es un punto de referencia o benchmark para diversos códigos de energía en los Estados Unidos (USGBC, 2009). El contenido de este estándar se puede resumir de la siguiente manera, según la ASHRAE: “Este estándar provee los requerimientos mínimos para el diseño de la mayoría de infraestructuras y edificios, exceptuando edificios residenciales de hasta 3 pisos de altura. El estándar ofrece en detalle los requerimientos de eficiencia energética mínimos para el

diseño y construcción de lugares nuevos y existentes, edificios nuevos y existentes y modificaciones realizadas a estos y los sistemas que puedan existir en este conjunto, así como los criterios para determinar el cumplimiento de estos requerimientos mínimos. Es una referencia indispensable para ingenieros y otros profesionales involucrados en el diseño de espacios edificios y sistemas.”

A su vez, el estándar ASHRAE 90.1 incluye entre sus apéndices, el apéndice G: “Método de calificación de desempeño”, el cual es una metodología diseñada específicamente para cuantificar el desempeño energético de edificios, modificaciones y adiciones a estos que excedan los requerimientos energéticos mínimos del estándar 90.1, es en este apéndice que se basa la certificación LEED para evaluar un edificio en su categoría de eficiencia energética.

Este apéndice contiene las siguientes partes:

- **Generalidades:** en esta sección se establece el alcance del apéndice, delimitando de manera conveniente los tipos de infraestructuras sobre los cuáles aplica el apéndice. Además, presenta un listado de todas las secciones del estándar de cumplimiento obligatorio, requisitos que se dan por sentado a estos niveles de eficiencia, pues son los requeridos solo para ser considerados como edificio eficiente. A su vez, contiene la fórmula utilizada por el método propuesto, sus excepciones de uso, un listado de toda la documentación a generar como parte de la metodología y requerimientos para dar por completado el proceso.
- **Requerimientos para Simulación:** en esta sección se establecen las tres condiciones necesarias para considerar la comparación de la simulación entre el desempeño del edificio propuesto vs. el desempeño del edificio de la línea base como válida, siendo estas:
 - a. Utilizar el mismo software de simulación.
 - b. Utilizar los mismos datos de clima.
 - c. Utilizar la misma tarifa energética.

Posteriormente, se incluye un listado sugerido de softwares que contienen las características aceptadas para realizar un análisis de energía consumida en edificios, mencionando que los paquetes de software a utilizar deben contener metodologías de cálculo para los componentes de los edificios a simular.

En el apartado siguiente, el apéndice brinda una lista de parámetros de simulación necesarios a contener en la simulación, entre los cuales están:

- a) Poder simular 8,760 horas por año.
- b) Poder simular variaciones horarias con respecto a la ocupación del espacio, la potencia utilizada en iluminación, la potencia de los equipos misceláneos, el punto de configuración del termostato, el nivel de humedad en el espacio configurado, y la operación del sistema de aire acondicionado, todo esto sientido definido de manera separada de forma diaria para cada día de la semana, incluyendo vacaciones.
- c) Poder simular el efecto de la masa térmica.
- d) Poder simular diez o más zonas térmicas.
- e) Poder simular el desempeño operando en un régimen de carga parcial para equipos mecánicos.
- f) Poder simular las curvas de corrección de capacidad y eficiencia para sistemas mecánicos de calentamiento y enfriamiento de equipos.
- g) Poder simular el economizador de aire con control integrado.
- h) Poder simular las características de la línea base del diseño del edificio especificadas en las secciones G3.

En los dos siguientes apartados, se establece el requerimiento sobre la capacidad de generar reportes del software a utilizar, así como el tipo de reportes y alcance de estos.

En la subsección siguiente, se definen directrices de simulación, como el cumplimiento de las simulaciones con la mayoría de las secciones del estándar ASHRAE 140, la concordancia entre las versiones del software a utilizar para la simulación de la línea base y del modelo optimizado, que el software de simulación pueda realizar simulaciones utilizando valores horarios de datos de clima, incluyendo temperatura, humedad, radiación solar y velocidad del viento, entre otros. Condiciones para la inclusión de los sistemas de generación de energías renovables en sitio, entre otros factores.

Para finalizar, se establece que el costo energético del diseño y de la línea base debe estar determinado por las tarifas actuales o por tarifas publicadas por el departamento de energía de los Estados Unidos (condición que no aplica para el

estudio en cuestión, pues los precios de la energía al nivel de usuario final se establecen de manera independiente con respecto a los precios de Estados Unidos para El Salvador), y también se mencionan los métodos de simulación alternativos cuando alguno de los materiales a simular no se encuentre en la base de datos del modelo del software de simulación a utilizar.

- Cálculos del diseño propuesto y de la línea base de desempeño del edificio:
En esta sección del apéndice, se detallan las secciones del estándar ASHRAE 90.1 que se han de cumplir para realizar las simulaciones de desempeño propuesto y de línea base, así como las secciones necesarias a cumplir para edificios nuevos, adiciones y modificaciones. A su vez, se detallan los requisitos a cumplir para considerarse en la simulación de modificaciones, las cuales son las siguientes:
 - a) Cuando existan modificaciones de sistemas de aire acondicionado que representen más del 50% de la capacidad de servicio, ya sea en cargas de calentamiento como en enfriamiento del área de modificación. Esto incluye sistemas de aire acondicionado unitarios, unidades terminales o componentes de un aire acondicionado central. Los equipos terminales de aire acondicionado considerados en el apéndice son: cajas VAV, unidades fan-coil, unidades VRF o bombas de calor de ciclo de agua.
 - b) Cuando exista un cambio del 50% o más de las luminarias del área de la modificación.
 - c) Cuando exista un cambio del 25% o más de la envolvente del edificio.

En la subsección siguiente, se presentan en primer lugar todos aquellos detalles y pasos a considerar para la simulación del desempeño de los aires acondicionados, dependiendo del tipo del aire acondicionado y del tipo de espacio que climatizan, siendo el primero de estos, obtener la suma de las áreas climatizadas combinadas de los siguientes espacios: residencial, lugares públicos (auditorios, gimnasios, centros de convenciones, entre otros), espacios de almacenamiento únicamente con calefacción, áreas comerciales (supermercados, salas de ventas, entre otros), hospitales y otras áreas no-residenciales.

Posteriormente, se brindan directrices para la simulación en los siguientes aspectos en orden:

- a) Modelado para simulación.
- b) Adiciones y modificaciones.
- c) Clasificación del uso del espacio
- d) Horarios
- e) Envoltente del edificio
- f) Iluminación
- g) Bloques térmicos – zonas climatizadas diseñadas
- h) Bloques térmicos – zonas climatizadas sin diseñar
- i) Sistemas de aire acondicionado
- j) Sistemas de calentamiento de agua
- k) Total de carga conectada a tomacorrientes de uso general y otras cargas
- l) Limitaciones de modelación del programa de simulación
- m) Condiciones exteriores
- n) Transformadores de distribución (tipo seco – para interiores)
- o) Elevadores
- p) Generación de energía renovable en sitio

2.4 Sistemas Considerados al Realizar un Retrofit a un Edificio

El retrofit en edificios implica la modernización y mejora de sistemas existentes para aumentar la eficiencia y sostenibilidad.

Algunas áreas clave se detallan a continuación:

2.4.1 Iluminación y HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado):

Iluminación: Sustitución de luminarias convencionales por tecnología LED para aumentar eficiencia energética. Implementación de sistemas de iluminación inteligente que se ajustan según las necesidades y la luz natural.

HVAC: Actualización de sistemas HVAC con equipos más eficientes y controles de zonificación para mejorar la comodidad térmica y reducir el consumo energético.

2.4.2 Aislamiento y Ventanas:

Instalación de aislamiento térmico adicional en las paredes y techos para reducir pérdidas de energía. Reemplazo de ventanas por modelos más eficientes energéticamente.

2.4.3 Tecnología de Edificios Inteligentes:

Implementación de sistemas de gestión centralizados para controlar iluminación, HVAC y seguridad. Integración de sensores para ajustar automáticamente el entorno según las necesidades y condiciones.

2.4.4 Módulos Fotovoltaicos:

Evaluación de la viabilidad solar y diseño personalizado de un sistema de paneles solares. Instalación de sistemas de montaje seguros en el techo o fachadas. Integración con sistemas eléctricos existentes. Adicional a las siguientes consideraciones:

A. Evaluación de Viabilidad Solar:

Realización de un análisis para determinar la cantidad de radiación solar disponible en la ubicación del edificio. Evaluación del potencial de generación de energía solar.

B. Diseño Personalizado:

Colaboración con expertos en energía solar para diseñar un sistema fotovoltaico que se adapte a la estructura del edificio. Selección de la ubicación óptima para los paneles.

C. Sistemas de Montaje e Inversores:

Instalación de sistemas de montaje seguros para fijar los paneles en el techo o en otras áreas. Selección e instalación de inversores solares para convertir la corriente continua en corriente alterna.

D. Conexión a la Red o Almacenamiento de Energía:

Decisión sobre si el sistema estará conectado a la red eléctrica o si se incorporará un sistema de almacenamiento de energía, como baterías, para utilizar la energía generada durante períodos sin sol.

E. Integración con Sistemas Existentes:

Asegurarse de que la instalación se integre de manera adecuada con los sistemas eléctricos existentes del edificio. Modificación de la infraestructura eléctrica según sea necesario.

F. Permisos y Cumplimiento Normativo:

Obtención de todos los permisos necesarios y cumplimiento con los requisitos normativos locales para la instalación de sistemas solares.

G. Educación (Capacitación) y Mantenimiento:

Proporcionar educación a los ocupantes sobre el sistema solar y su contribución a la sostenibilidad. Establecimiento de un programa de mantenimiento regular para garantizar el rendimiento óptimo a lo largo del tiempo.

La integración de estos aspectos en un proyecto integral de retrofit con módulos fotovoltaicos contribuye a la transformación de un edificio de oficinas existente en un espacio eficiente, sostenible y energéticamente independiente.

CAPÍTULO 3 – CASOS DE ESTUDIO

En este capítulo, se resumen 5 casos de retrofit energético aplicados exitosamente a edificios del tipo oficina, si bien los edificios no comparten la zona climática con un edificio del AMSS, si comparten el tipo de edificio y su operación, ayudando a visualizar y evaluar el impacto de un retrofit energético en un edificio del tipo oficina.

3.1 Caso de Estudio: Retrofit Estándar a Oficinas de HRO, Wells Fargo Center, Denver Colorado.



Figura 3: Wells Fargo Center, edificio que alberga la firma legal HRO en Denver, Colorado. (Fuente: Wikipedia, 2024)

El Centro Wells Fargo es un rascacielos ubicado en Denver, Colorado, Estados Unidos, que cuenta con 50 pisos y una extensión superficial construida de 1.27 millones de pies cuadrados.

En su momento, la firma legal HRO (que funcionaba como arrendatario de un inmueble) necesitó renovar el contrato de arrendamiento en el Centro de Oficinas Wells Fargo, el cual cuenta con 24,298 pies cuadrados. Según la guía avanzada de retrofit energético para edificios de tipo oficina, el facilitar incentivos a los arrendatarios (como fondos para mejoramiento de los locales) es una práctica recurrente para retener arrendatarios (U.S. Department of Energy, 2011).

La firma legal optó no solo por renovar la mueblería y la distribución del local, sino también por mejorar la eficiencia energética de la oficina, como una estrategia de mercado para atraer clientes y talentos por medio de su compromiso con la sostenibilidad. A raíz de esta estrategia, HRO se avocó al laboratorio nacional de energías renovables (NREL) para trabajar en el diseño e implementación del proyecto que consistía en identificar y llevar a cabo las medidas más rentables para reducir el consumo energético de las cargas conectadas a tomacorrientes, del sistema de iluminación y del sistema de climatización. Este proyecto logró la reducción en un 33% de la intensidad de uso energético, logrando un nivel 91 de EnergyStar con una intensidad de 36kBTU/pie cuadrado/año (U.S. Department of Energy, 2011).

Entre las medidas más importantes que se implementaron, están las siguientes:

- Se instalaron variadores de frecuencia a las manejadoras del sistema de aire acondicionado.
- Se aumentó el 'deadband' (término en inglés para referirse al rango de temperatura en el cual el sistema está sin operar) del sistema de climatización de 1 °C a 3 °C. Es decir, el sistema estará más tiempo apagado hasta que deba encenderse para climatizar el espacio.
- Se redujo la densidad lumínica al separar las luminarias a una distancia de 16 pies entre sí, contra los 12 pies que existía de distancia anteriormente.
- Se instalaron luminarias de tipo fluorescentes compactas para sustituir las incandescentes existentes.
- Se instalaron sensores de ocupación (más sensibles que los sensores de movimiento) para el sistema de iluminación.
- Se instalaron computadores que cumplieran con la certificación EnergyStar.

Tabla 1: Resumen de Costos del Proyecto de Retrofit de HRO en el Wells Fargo Center. (Fuente: U.S. Department of Energy, 2011)

| Costo del Proyecto (Equipos e Instalación) | Incentivos Financieros | Costo Neto de la Mejora para Propietario |
|---|-------------------------------|---|
| \$42,000 | \$5,000 | \$37,000 |

Tabla 2: Resumen de ahorros del proyecto de retrofit de HRO en el Wells Fargo Center. (Fuente: U.S. Department of Energy, 2011).

| Ahorro de Consumo Eléctrico Anual Estimado | Ahorro en Dólares Anual Estimado | Periodo de Retorno de la Inversión Simple |
|---|---|--|
| 129,000 kWh | \$12,000 | 3 años |

Tabla 3: Resumen de ahorros en concepto de energía del proyecto de retrofit de HRO en el Wells Fargo Center. (Fuente: U.S. Department of Energy, 2011).

| Uso Eléctrico Estimado | | Intensidad de Uso Energético Estimada (EUI) | | Ahorro Total Estimado |
|-------------------------------|-----------------|--|------------------------------|------------------------------|
| Antes | Después | Antes | Después | |
| 384,000 kWh/año | 255,000 kWh/año | 54 kBtu/ft ² -año | 36 kBtu/ft ² -año | 33% |

Este tipo de proyectos son una muestra de que los esfuerzos para lograr la sostenibilidad deben ser multidisciplinarios, y contar con el apoyo de las altas gerencias para la consecución de los objetivos energéticos de la empresa. Si bien, en este caso de estudio se llevó a cabo el retrofit como producto de un incentivo financiero, los beneficios logrados debido al mejoramiento del rendimiento energético son bastante notables. Otra lección que se puede aprender del caso de estudio presentado, es que muchas veces las medidas de conservación energética pueden ser cosas más sencillas, como la modificación de la distancia de las luminarias entre sí, cosa que generalmente pasa por alto, al pensar únicamente en la sustitución de tecnologías obsoletas en primer lugar. Finalmente, el ahorro energético con todas las medidas de conservación de la energía fue del 33%, lo cual significa que consumen lograron reducir el consumo en una tercera parte con las medidas implementadas.

3.2 Caso de Estudio : Retrofit Profundo (Deep Retrofit) al Empire State, New York



Figura 4: Edificio Empire State, Nueva York. (Fuente: Wikipedia, 2008).

El edificio Empire State es uno de los edificios más icónicos de la ciudad de Nueva York, siendo una atracción turística muy solicitada hasta la actualidad. Hace cinco años, este edificio consumía tanta energía en un solo día como 40,000 casas, lo cual representaba un costo económico y medio ambiental insostenible (Clinton Foundation, 2014).

En el 2009, se concertó un esfuerzo en conjunto para plantear y llevar a cabo un proyecto de retrofit al Empire State, cuyo objetivo fue aumentar la eficiencia energética del edificio, reducir el consumo de energía en un 40% y servir como ejemplo para otros proyectos de retrofit de edificios sin importar la antigüedad de las edificaciones (Clinton Foundation, 2014).

En este proyecto, un enfoque clave fue la identificación de la secuencia correcta de medidas de conservación de energía (es decir, qué pasos a seguir y en qué orden). Se puede inferir que se optó primero por identificar e implementar estrategias de arquitectura pasiva, y luego considerar modificaciones sustanciales a equipos en las áreas de iluminación y climatización. Las tres consignas de estas medidas fueron: reducir cargas, instalar sistemas

eficientes e implementar un sistema de gestión y monitoreo de la energía (U.S. Department of Energy, 2011).

Se crearon diversos paquetes de medidas, con su secuencia, en los cuales se detallaron los ahorros acumulados tanto en energía como en emisiones de carbono, hasta llegar finalmente a cuatro paquetes principales. Según el modelado energético del edificio en aquel entonces, se estimó que se lograría un ahorro del 38% en uso de energía, en relación a antes del retrofit, lo que tendría un retorno de la inversión de solo tres años (U.S. Department of Energy, 2011). Entre las medidas más importantes que se implementaron, están las siguientes:

- Mejoramiento de la eficiencia de las ventanas: todas las ventanas se fabricaron nuevamente en sitio, incluyendo la aplicación de una película en el interior y la generación de un espacio de gas aislante en la parte interior de la ventana.
- Se instalaron barreras aislantes para los radiadores: esto permitió desperdiciar menos calor.
- Se mejoró el sistema de iluminación: se incluyeron balastos dimerizables, fotoceldas y sensores de ocupación en los espacios.
- Se mejoró el sistema de climatización: se realizó un retrofit a cuatro chillers, la instalación de variadores de frecuencia para las unidades manejadoras, controles neumáticos, entre otras.
- Implementación de un sistema de gestión y monitoreo de la energía: se formuló un software especial para esta tarea.

Tabla 4: Tabla Resumen de Costos del Proyecto de Retrofit Profundo en el Empire State. (Fuente: U.S. Department of Energy, 2011).

| Costos del Proyecto | | Ahorro Anual Estimado en Dólares |
|----------------------------|-----------------------------------|---|
| Total | Costo de Obras Adicionales | \$4.4 millones |
| \$106 millones | \$13.2 millones | |

Tabla 5 - Resumen de datos financieros del proyecto de retrofit profundo del Empire State. (Fuente: U.S. Department of Energy, 2011).

| Periodo de Retorno Simple | | Valor Presente Neto |
|----------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Costo Total | De Obra Adicional | |
| 24 años | 3 años | \$4.4 millones |

Tabla 6 - Tabla resumen de ahorro de energía del proyecto de retrofit profundo en el Empire State. (Fuente: U.S. Department of Energy, 2011).

| Intensidad de Uso de Energía Estimado (EUI) | | Porcentaje de Ahorro Estimado |
|---|------------------------------|-------------------------------|
| Antes del Retrofit | Después del Retrofit | |
| 88 kBtu/ft ² -año | 60 kBtu/ft ² -año | 38% |

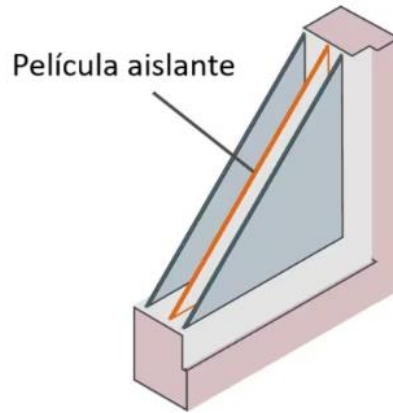


Figura 5: Película aislante instalada en las ventanas del Empire State. (Fuente: Empire State Realty Trust, 2024).

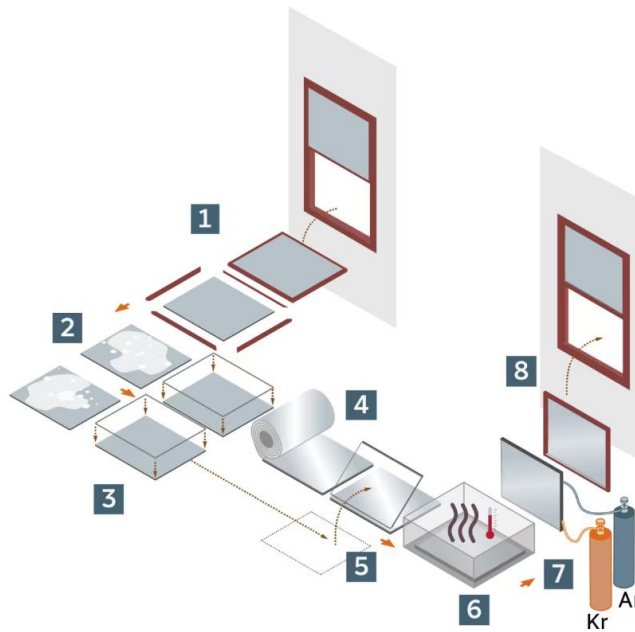


Figura 6: Ilustración del proceso completo de fabricación de las ventanas del Empire State. (Fuente: Retrofitmagazine, 2024).

Los pasos detallados a continuación, fueron los que se aplicaron a las ventanas según la CBC (Canadian Broadcasting Corporation):

1. La ventana es removida y desmantelada.
2. Cada panel es lavado tres veces.

3. Se instalan espaciadores a las ventanas.
4. Se le instala la película aislante a una de los dos vidrios de la ventana.
5. Se ensambla el segundo vidrio sobre los espaciadores, generando una sola unidad.
6. La unidad es horneada para ajustar la película aislante.
7. Se inyectan gases inertes en la unidad (Ar, Kr).
8. La unidad es reensamblada en el marco original y reinstalada.

3.3 Caso de Estudio: Retrofit Profundo (Deep Retrofit) al Leon County Cooperative Extension, Florida.

Las oficinas del Área Cooperativa de Leon County, en Tallahassee, Florida, que para el año 2014 era la única oficina gubernamental de los Estados Unidos que contaba con la distinción de edificio NZEB habiendo superado un proceso de retrofit. (Retrofit Magazine, 2014). Esta oficina fue objeto de un proyecto de retrofit, y logró obtener la certificación de NZEB, la cual fue otorgada por el Instituto de Nuevas Edificaciones con sede en Vancouver, Washington, convirtiéndose en uno de los únicos siete edificios que fueron parte de proyectos de retrofit en Estados Unidos en alcanzar esta distinción. Este edificio de 13,500 pies cuadrados no solo produce tanta energía como la que consume, sino también cuenta con cisternas con una capacidad de 400,000 galones de agua lluvia que se capturan desde el techo, las cuales son utilizadas en los sistemas de riego de la instalación (Retrofit Magazine, 2014).

El retrofit fue implementado en dos pasos:

1. Implementación de un sistema novedoso de recolección y gestión de aguas lluvias.
2. Energía y aire acondicionado: se instaló un sistema de generación de energía solar fotovoltaica de 60kW para autoconsumo y un sistema ultra eficiente de climatización de lazos cerrados geotérmicos de 17 toneladas en las instalaciones de la oficina, este sistema de climatización fue uno de los pilares del retrofit, ya que permitió que se maximizara el impacto del sistema de generación de energía solar (Retrofit Magazine, 2014). El sistema de climatización geotérmico utilizado tiene una eficiencia de 40 SEER, y tiene una capacidad de calefacción y enfriamiento de 17.5 toneladas, equivalente a 210 kBtu. Una serie de 60 perforaciones en la tierra de 90 pies (27 metros), recirculan agua a través de tuberías de pequeños diámetros. En un primer momento, el sistema fotovoltaico estaba diseñado para alimentar aproximadamente el 40% de la carga del edificio, esto se complementó con la instalación del sistema geotérmico, con el mejoramiento del sistema de iluminación

y con programas de reeducación a las personas que utilizaban el edificio para erradicar hábitos que desperdician energía, por lo que, con estas mejoras, el sistema de generación fotovoltaico ahora provee tanta energía como el edificio necesita. Para este edificio, se instalaron un total de 253 paneles (orientados al sur) sobre una estructura fabricada sobre el parqueo, brindando sombra para los vehículos y adicionalmente, una estación de carga para vehículos eléctricos. Cada panel de los 253 cuenta con un micro inversor que permite monitoreo en tiempo real de la generación individual y cómo cambian sus comportamientos (Retrofit Magazine, 2014).

Tabla 7 - Resumen de datos de proyecto. (Fuente: Retrofit Magazine, 2014).

| Tipo de Edificación: | Extensión del área Construida: | Zona Climática: | Intensidad de Uso Energético: (de la Red) | Intensidad de Uso Energético: (Autoconsumo) | Intensidad de Uso Energético Neto: |
|----------------------|--------------------------------|-----------------|---|---|------------------------------------|
| Oficinas | 13,000 ft ² | 2A | 19 kBtu/ft ² -año | 19 kBtu/ft ² -año | 0 kBtu/ft ² -año |

Este proyecto resalta mucho la importancia de las fuentes alternativas de energía basada en energías renovables como la solar y la geotérmica, pues, para este caso, se utilizó la energía geotérmica la cual fue un potenciador de los efectos positivos del sistema solar implementado.



Figura 7: Edificio Leon County Cooperative Extension. (Fuente: Retrofit Magazine, 2014).

3.4 Caso de Estudio: Retrofit Aplicado a Edificio de Oficina Anna Maria Historic Green Village, estado de Florida, Estados Unidos.

De acuerdo al perfil de proyecto de Anna Maria Historic Green Village, del Instituto de Nuevas Edificaciones de Estados Unidos, este edificio centenario, el cual cuenta con una certificación LEED Platino, es una combinación inusual de restauraciones históricas y tecnologías modernas, conservando el estilo antiguo de edificaciones en Florida incorporando sistemas como calefacción geotérmica, sistemas de generación de energía solar fotovoltaica y equipos de monitoreo (New Buildings Institute, 2012).

Las medidas de conservación de la energía adoptadas giran en torno a tres áreas principales: la envolvente aislante del edificio, tecnología geotérmica y la generación fotovoltaica. A pesar de ello, todas las medidas implementadas según el Instituto de Nuevas Edificaciones de Estados Unidos son las siguientes:

- Envolvente de alto desempeño: el aislamiento es uno de los principales aspectos de la edificación, donde cada una de las áreas está aislada por encima de los requerimientos normados y tiene ventanas de alto rendimiento.
- Tecnología geotérmica: los sistemas de aire acondicionado y la calefacción operan basado en un sistema de bombeo de calor. El agua es bombeada a 450 pies (137 metros) bajo tierra hasta un manto acuífero donde el agua se encuentra a una temperatura constante de 72 °C. En verano, el intercambiador de calor recupera calor de nueve unidades de aire acondicionado del distrito y se inyecta al reservorio subterráneo, ya que es más eficiente que liberarlo en el aire húmedo de la zona.
- Tecnología solar térmica: el agua para uso del edificio es calentada a través energía solar.
- Energía fotovoltaica: el edificio en cuestión cuenta con 17 inversores en arreglos que hacen un total de 90 kW, lo que significa un ahorro anual de \$11,200.00. Aproximadamente, 30 kW de los paneles solares están instalados sobre dos parqueos, mientras que los otros paneles solares están instalados en estructuras y se planea que se agregarán más unidades con el tiempo. El objetivo de estos nuevos paneles es mantener el estado de NZEB, debido a los planes de inclusión de nuevos negocios en el edificio.

- Monitoreo y verificación: hay sensores conectados en red que están monitoreando constantemente acometidas principales y varios circuitos. Estos datos revelaron que las cargas principales en este edificio eran el sistema de climatización y las cargas instaladas en el café (freezers, refrigeradores, y la máquina de expreso).
- Utilización de aguas lluvias: se instalaron dos cisternas de 3000 galones cada una, debajo de los parqueos. El agua de una de las cisternas es utilizada para regar jardines y el agua de la segunda es reservada para protección contra incendios. El agua de lluvia que se recolecta directamente de los techos se almacena en una cisterna separada, utilizada para los retretes.

Tabla 8 - Resumen de datos del proyecto Anna Maria Historic Green Village. (Fuente: New Buildings Institute, 2012)

| Número de Espacios del Edificio: | Extensión del Área Construida: | Zona Climática: | Intensidad de Uso Energético: (de la Red) | Intensidad de Uso Energético: (Generación para Autoconsumo) | Intensidad de Uso Energético Neto: |
|---|---------------------------------------|------------------------|--|--|---|
| 5 | 8,000 ft ² | 2A | 28 kBtu/ft ² -año | 35 kBtu/ft ² -año | -7 kBtu/ft ² -año |

De este caso de estudio, se puede retomar la importancia y el impacto que los sistemas de climatización tienen en el consumo energético de las edificaciones en zonas climáticas de tipo tropical. Se puede destacar también la inclusión de un sistema de calentamiento de agua a partir de energía solar térmica, sustituyendo los calentadores de agua tradicionales, cuyo consumo energético tiende a ser elevado.



Figura 8: Vista aérea del Anna Maria Historic Green Village. (Fuente: New Buildings Institute, 2012).

3.5 Caso de Estudio: Retrofit a Edificio de oficinas en el Estado de Hidalgo, México.



Figura 9: Edificio objeto del caso de estudio. (Fuente: plataformaptec.es)

El caso de estudio se centra en un edificio de oficinas de 5 plantas, con un total de 4665 m² construidos, ubicado en la ciudad de Pachuca, Estado de Hidalgo, México, a 2400 msnm. Este edificio fue construido a principios del s. XXI y el proyecto no tuvo especiales consideraciones a la eficiencia energética. Su envoltente es principalmente acristalada y las ventanas son no operables.

3.5.1 Estrategia de optimización: Pirámide de Prioridades

Mediante simulación energética se realizan sucesivas transformaciones en su envolvente y sistemas con el fin de convertirlo en un edificio energéticamente eficiente y autosuficiente. Este proceso se explica mediante la pirámide de la Figura 10.

La base de la pirámide es la reducción de la demanda energética. El objetivo es maximizar las opciones de funcionamiento pasivo del edificio, reduciendo el uso de sistemas mecánicos de climatización y el encendido de luz artificial durante las horas diurnas. Podríamos definir funcionamiento pasivo como aquel mediante el cual el edificio proporciona confort natural, térmico y lumínico, a sus ocupantes sin un consumo adicional de energía.

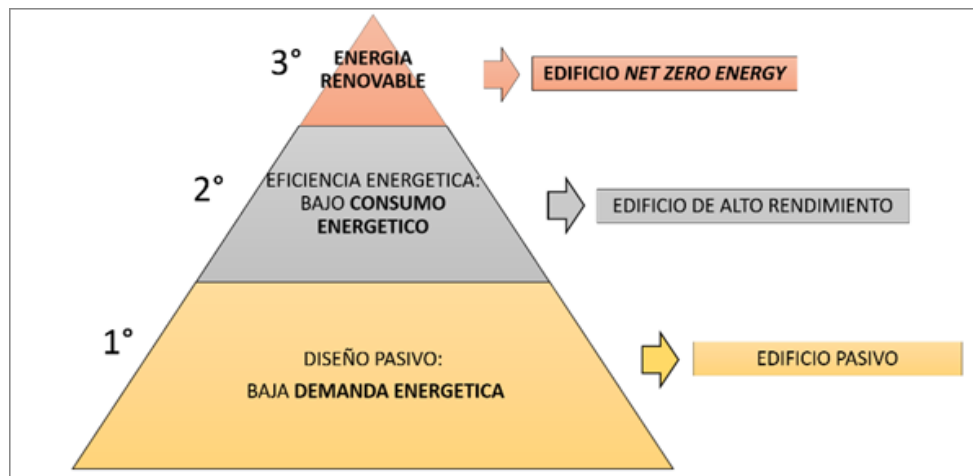


Figura 10: Pirámide de prioridades en el proceso de optimización. (Fuente: construible.es, 2024)

El segundo paso es la reducción del consumo energético, que se basa en la eficiencia de los sistemas instalados, su operación y los sistemas de control. Por último, se lleva a cabo la implementación de sistemas de generación de energía renovable. Este último paso no suele ser económicamente viable si antes no se ha optimizado el edificio y su operación.

3.5.2 Pasos para Mejorar el Balance Energético

El balance energético obtenido mediante simulación por ordenador permite detectar las estrategias a implementar para reducir la demanda energética, como se muestra en la Figura 11. Tras la implementación de mejoras se genera un nuevo modelo optimizado, que muestra los resultados de la simulación para el edificio funcionando en modo pasivo. Con el consumo energético reducido al mínimo, se dimensiona el sistema fotovoltaico a instalar, que sea capaz de satisfacer toda la demanda, procurando mantener un balance de las variables mostradas en la Figura 12.



Figura 11: Diagnóstico y Medidas a Implementar para la Mejora del Balance Energético.(Fuente: construible.es, 2024)



Figura 12: Matriz de Variables Afectadas por el Agrado de Transparencia de los Vidrios Fotovoltaicos. (Fuente: construible.es, 2024)

Tabla 9 - Análisis de variables afectadas por el grado de transparencia de los vidrios fotovoltaicos. (Fuente: construible.es, 2024)

| ATRIO FOTOVOLTAICO TOTAL 265 m2 SILICIO MONOCRISTALINO 18% EFF | % TRANSPARENCIA VIDRIO FOTOVOLTAICO | % FRACCION OCUPADA POR CELULAS FV ACTIVAS | ILUMINACION ARTIFICIAL CONSUMO ANUAL MWh | GENERACION ANUAL ENERGIA FV MWh | DIFERENCIA AUMENTO CONSUMO - GENERACION |
|--|---|---|---|---------------------------------------|--|
| OPACO | 0 | 100 | 170 | 68 | 102 |
| SEMITRASPARENTE 20% TRANSPARENCIA | 20 | 80 | 96 | 65 | 31 |
| SEMITRASPARENTE 30% TRANSPARENCIA | 30 | 70 | 83 | 61 | 22 |
| SEMITRASPARENTE 40% TRANSPARENCIA | 40 | 60 | 77 | 52 | 25 |
| SEMITRASPARENTE 50% TRANSPARENCIA | 50 | 50 | 73 | 44 | 29 |

La Tabla 9 muestra que el porcentaje de transparencia óptimo de los vidrios fotovoltaicos es 30%, ya que se logra el balance óptimo entre la cantidad de energía que se genera (61 MWh anuales) y la reducción del consumo de energía para iluminación por el aprovechamiento de la luz natural mediante controles lumínicos automatizados. Con un grado de transparencia menor, la generación energética es más alta pero no logra compensar el incremento de consumo de energía para iluminación debido a una menor entrada de luz natural. Por el contrario, si se selecciona un panel FV opaco para la doble piel del atrio, a pesar de que se van a generar más megavatiohora anuales, se incrementa la demanda de energía para iluminación, y la generación no llega a compensar el aumento del consumo.

3.5.3 Resultados Obtenidos

El consumo energético experimenta una reducción considerable gracias a la implementación de un sistema de automatización lumínico enfocado en aprovechar la luz natural y el resto de medidas mencionadas en la Figura 13, que posibilitan que el edificio funcione en modo pasivo en cuanto a climatización. La integración de renovables se realiza en 3 fases: integración a modo de sistema BIPV en la doble piel del atrio acristalado, como se muestra en la Figura 14, una matriz fotovoltaica en cubierta y una matriz de parasoles en los huecos de las ventanas orientadas al sureste.

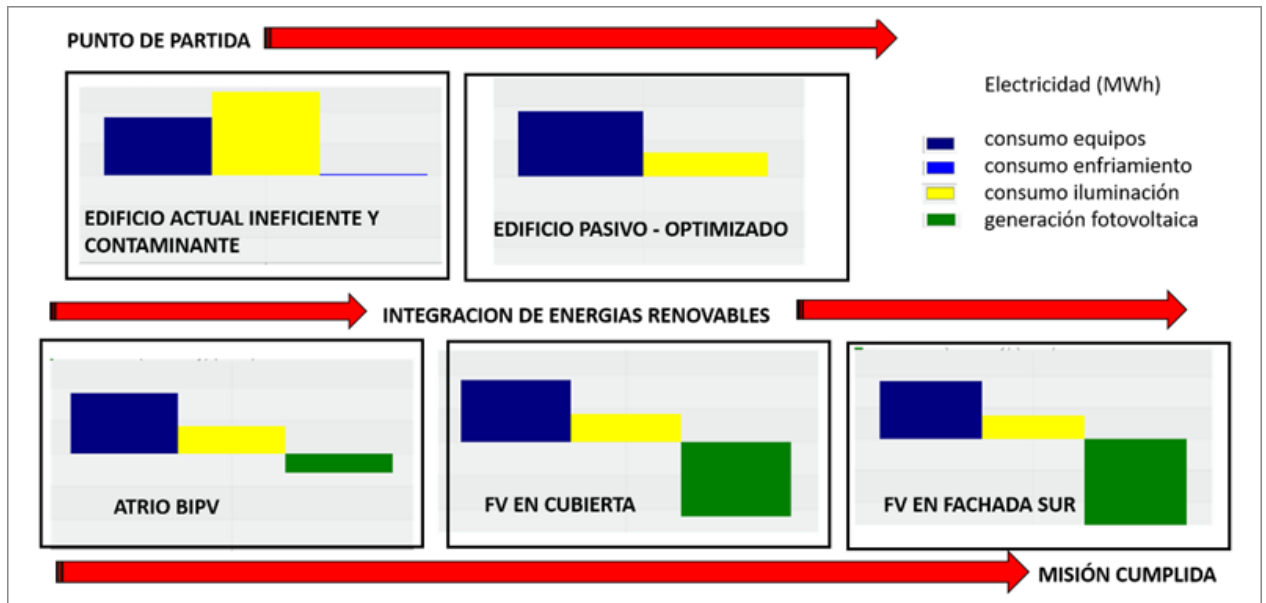


Figura 13: Gráficas de mejora progresiva en el balance energético. (Fuente: construible.es, 2024)

Los parasoles fotovoltaicos de la fachada sureste producen una doble mejora, ya que aparte de completar la generación energética necesaria para cubrir el 100% de las necesidades, limitan las ganancias solares por huecos acristalados, reduciendo aún más la demanda de energía mecánica para climatización y mejorando la sensación térmica al interior del edificio.

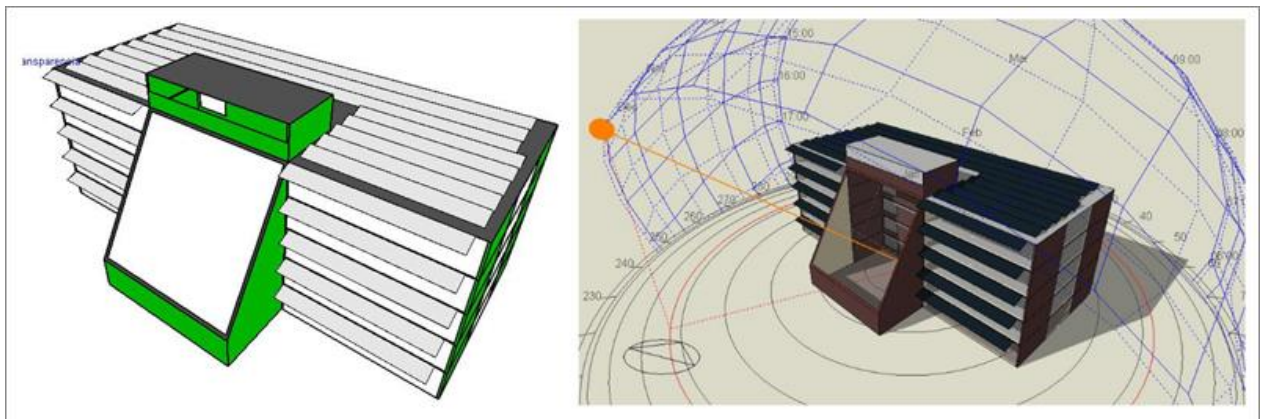


Figura 14: Imagen del edificio con las superficies fotovoltaicas integradas. (Fuente: construible.es, 2024)

La Figura 15 muestra la reducción progresiva del consumo de energía anual, que inicialmente era de 453 MWh/año y se logra bajar a 260 MWh/año, lo cual es una reducción del 43%. Con la integración de sistemas FV se logran generar 281 MWh/año, excediendo el consumo anual. Las emisiones de carbono asociadas se reducen paralelamente, de 275 toneladas anuales a un balance de -13 toneladas emitidas al año, es decir, que se logra un

edificio de balance positivo en cuanto a neutralización de su huella de carbono. Este tipo de edificios van más allá de una reducción de los impactos negativos, teniendo un impacto positivo en su entorno, al inyectar a la red el excedente de energía que generan, a lo que habría que añadir los beneficios económicos en cuanto ahorro anual en costos de operación.

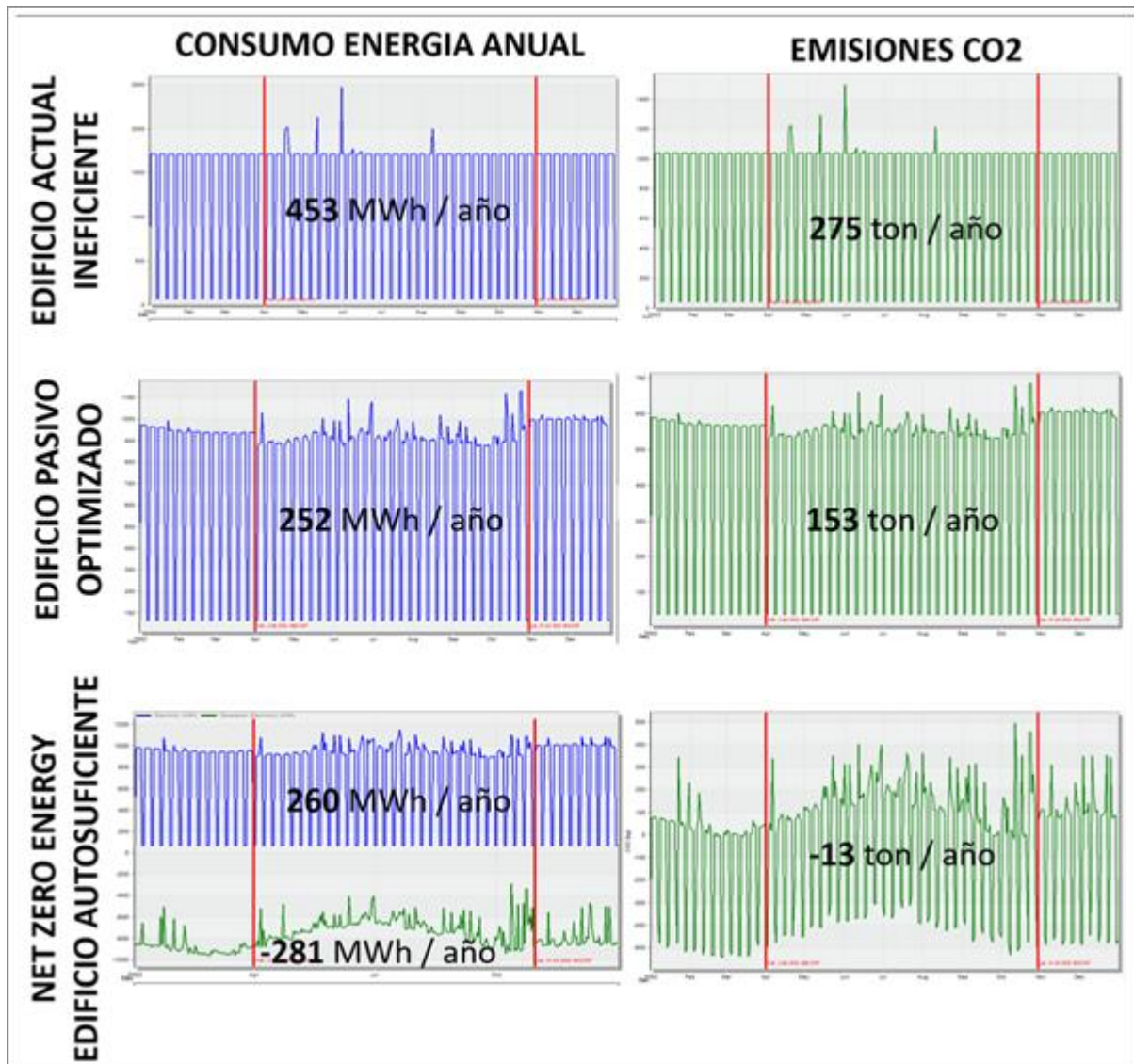


Figura 15: Gráficas de consumo y generación de energía y de emisiones a lo largo del proceso de optimización. (Fuente: construible.es, 2024)

En este edificio el consumo principal de energía era la iluminación (Figura 16), debido a que no estaba optimizado el sistema para un aprovechamiento de la luz natural. Por eso se han enfocado esfuerzos en el sistema de control de la iluminación. En otros edificios con consumos elevados en climatización, las estrategias a proponer serían de otra naturaleza.

La Figura 17 muestra la reducción progresiva en la energía de origen, que es la generada en la central, suministrada por la compañía eléctrica, hasta alcanzar un valor negativo, que significa que se está generando más energía de la que se requiere para la operación anual del edificio.

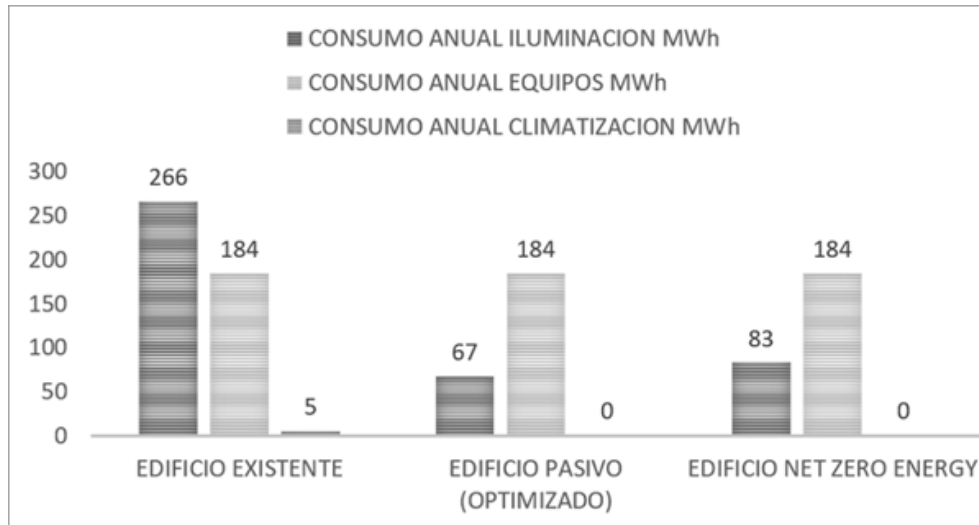


Figura 16: Gráficas de consumo energético por usos. (Fuente: construible.es, 2024)

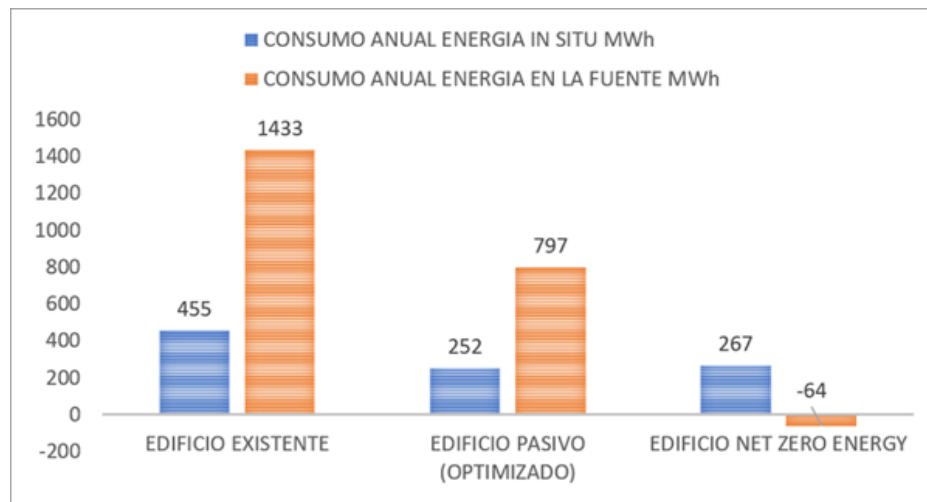


Figura 17: Gráfica de consumo energético en el edificio y en el origen. (Fuente: construible.es, 2024)

De esta forma se puede afirmar que el edificio se convierte en una central eléctrica, que inyecta a la red más energía de la que extrae. Esta práctica es fundamental para lograr una efectiva descentralización de la generación eléctrica, y con ello hacer posible que cada vez haya un porcentaje más alto de energía generada con fuentes renovables, además de hacer un uso más racional de la energía, porque se eliminan las pérdidas por transporte en redes

de alta y media tensión y en cada proceso de transformación, disminuyendo su huella de carbono como se muestra en la Figura 18.

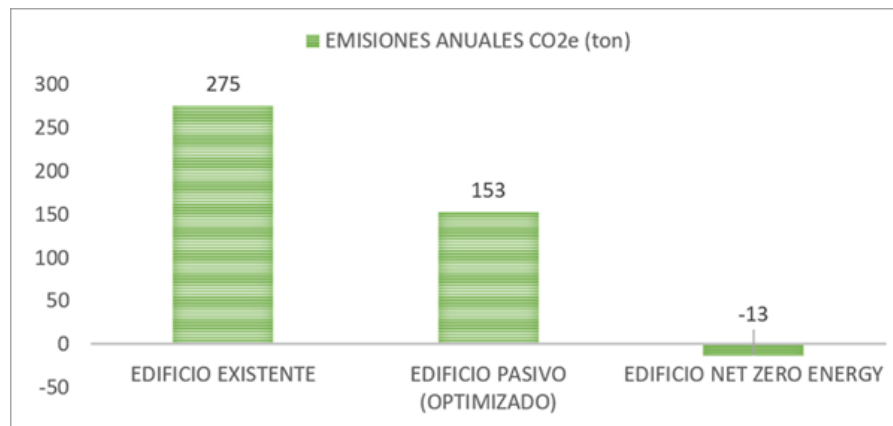


Figura 18: Gráfica de emisiones de carbono. (Fuente: construcción.es, 2024)

3.5.4 Conclusiones del Caso de Estudio

En el campo de la rehabilitación de edificios con criterios de eficiencia energética, las decisiones deberían de tomarse basadas en un análisis integral, con herramientas avanzadas como la simulación energética, y considerando los distintos parámetros que inciden en el balance energético. Se ha visto, por ejemplo, cómo un sistema de automatización de la iluminación puede originar grandes reducciones en el consumo anual de energía, así como las estrategias bioclimáticas aplicadas sobre la envolvente del edificio y algunas mejoras en su operación, siempre teniendo en cuenta las condiciones climáticas locales. Un enfoque más completo, considera todos los componentes y subcomponentes de una edificación, para adoptar las mejores medidas de conservación de energía para procurar un ahorro energético más alto, sin perder de vista otros aspectos importantes como el confort térmico o la funcionalidad de la instalación. De los casos de estudio analizados, se puede retomar que no siempre las medidas de conservación de energía tradicionales (como la sustitución de energías obsoletas por unas más eficientes) van a ser las más efectivas, sino más bien, las mejoras han de provenir de estudios y simulaciones tomando en cuenta las características propias de cada instalación, así como de la zona climática en la que opera. Esto es, en zonas climáticas con temperaturas más altas, se tendrá un mayor impacto en la reducción de consumo eléctrico, al actuar y mejorar sobre el sistema de climatización, por ejemplo, no así en zonas de climas más templados, pudiendo lograr así reducciones de consumo energético del 30% o más, según los casos de estudio analizados.

CAPÍTULO 4 – CARACTERIZACIÓN DE UN MODELO DE EDIFICIO DE TIPO OFICINA REPRESENTATIVO LOCALMENTE

Este capítulo se centra en la presentación de los pasos realizados para obtener un modelo de edificio del tipo oficina aplicable al contexto nacional, con el objetivo de establecer una línea base y posteriormente, un modelado exploratorio del impacto de las medidas realizadas adentro de la metodología de retrofit energético propuesta.

4.1 Metodología

En El Salvador, actualmente no existe un censo que caracterice a los edificios nacionales, los datos actuales que se tienen son del último censo nacional realizado en el 2007 en el que se detallan de manera descriptiva los materiales utilizados en la construcción de las viviendas censadas. A pesar de ello, se sabe que históricamente en El Salvador hay una centralización de la industria y el desarrollo en su capital, San Salvador, siendo esta zona, específicamente el Área Metropolitana de San Salvador de especial interés para el momento en el que se tengan incentivos nacionales que propicien la realización de retrofits energéticos a los edificios del país, siendo esta medida necesaria para la realización de proyectos de este tipo (Ochoa et al, 2021).

Según la investigación previa realizada para este trabajo, tampoco se encontró bibliografía que especificara a nivel nacional, hábitos de los usuarios o perfiles energéticos de los usos de energía de los edificios a nivel nacional, siendo estos datos junto con la descripción de los materiales y forma del edificio esenciales para poder realizar una simulación energética de línea base (González et al, 2023). Ante la falta de datos nacionales sobre la caracterización de edificios del tipo oficina a nivel constructivo o de demanda energética y también la falta de un instrumento nacional validado para recolectar la información necesaria para este trabajo, se procedió a adaptar una encuesta de una entidad internacional previamente utilizada, de tal forma que se tuviera certeza que se estaba utilizando un instrumento validado para la caracterización de edificios del tipo oficina.

El instrumento elegido como base para recopilar los datos para este trabajo fue la encuesta titulada “Commercial Buildings Energy Consumption Survey” (abreviada como CBESC) dicho instrumento que fue desarrollado por la U.S. Energy Information Administration en el año 2018, con el objetivo de caracterizar a los edificios según su tipo, a nivel constructivo, de comportamiento y usos finales de la energía utilizada en los edificios (File, M., 2015). La encuesta, fue modificada para adaptarla al contexto nacional, dado que originalmente recopila información que no está en el contexto nacional de El Salvador, como el uso de

calefacción o el uso de agua caliente de uso doméstico (Domestic Heat Water, DHW), uso de sistemas de distribución de gas propano o el uso de leña en el interior de los edificios como medio de calefacción. Como se detalla en las siguientes subsecciones, el instrumento CBESC resultó ser de especial ayuda para caracterizar edificios a nivel cualitativo, permitiendo conocer los diferentes tipos de combustible o fuentes de energía de un edificio, así como sus características constructivas, la cantidad de pisos, el área total ocupada del edificio, el porcentaje de área de las ventanas respecto a la pared o las áreas que componen cada piso, así como sus patrones de uso. El instrumento CBECS permite, a nivel energético conocer únicamente el consumo total por año de cada tipo de combustible de los edificios encuestados anualmente únicamente, como se puede ver en el informe “2018 Commercial Buildings Energy Consumption Survey - Consumption and Expenditures Highlights” publicado por la U.S. Energy Information Administration en Diciembre del 2022.

Para poder modelar energéticamente un edificio en un software de simulación, como Design Builder versión 7.0.2.006 que fue el utilizado en este trabajo, es necesario conocer otros aspectos adicionales a lo que plantea el instrumento CBECS, de tal forma que se conozcan de manera cuantitativa otros aspectos del edificio que son de interés para su modelado energético. Basándose en la investigación de Al Saadi, S. y Al Jabri, K. (2020), así como las variables necesarias para simular en Design Builder se elaboró la Figura 19 , en la cual se detallan las variables de entrada básicas necesarias para una simulación energética de un edificio del tipo oficina.



Figura 19: Características Físicas y Térmicas de un Edificio (Fuente: Elaboración Propia)

Los aspectos cuantitativos que no fue posible obtener mediante el instrumento CBECS referentes a la infiltración de aire, detalles del sistema de aire acondicionado y ganancias de calor internas, que corresponden propiamente a la operación de un edificio, fueron modelados utilizando como referencia los valores de un análisis energético realizado a un edificio de oficina de 3 pisos modelado por la empresa mexicana SolArq para la ciudad de Chihuahua, México (Ordoñez, A., 2023). Se utilizó este edificio como referencia por compartir los hábitos de la región de uso típicos, dado que no hay una referencia de datos nacionales y el modelo de trabajo en México se asemeja al de El Salvador en cuanto a la cultura y hábitos de trabajo. De igual manera posteriormente se utilizaron estándares de eficiencia internacionales para modificar estos valores como parte del retrofit energético.

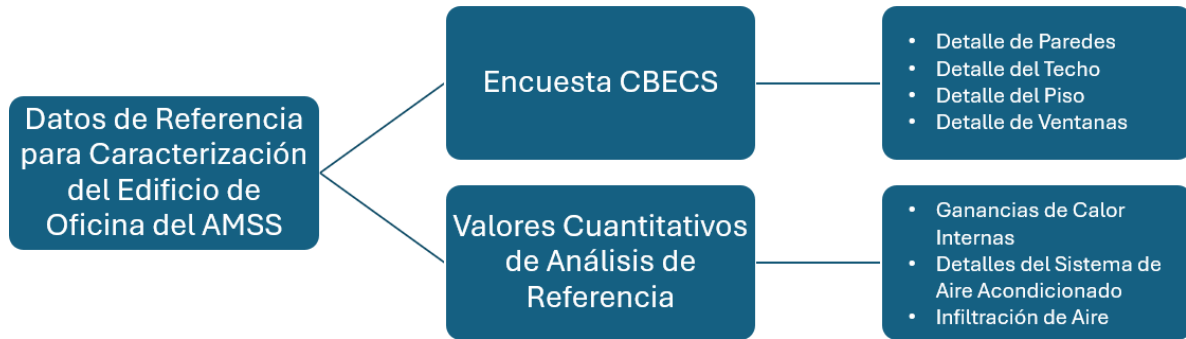


Figura 20: Origen de los Valores Utilizados en el Análisis Energético del Modelo Base (Fuente: Elaboración Propia)

4.1.1 Objetivos de la Encuesta

Recopilar la información necesaria para el modelado energético de un edificio del tipo oficina en el AMSS según las condiciones y contexto locales, así como describir de forma cualitativa al edificio de tipo oficina que servirá como modelo base de este análisis energético.

4.1.2 Población Destinataria

El grupo de interés se puede definir como sigue: todo aquel profesional de la construcción en sus distintas áreas (ingenierías y arquitectura), que cuente con experiencia en diseño, construcción o mantenimiento de edificios de tipo oficina en el AMSS.

En este estudio, el tamaño de la muestra fue de 38 profesionales locales, que contaban con amplia experiencia en las áreas mencionadas, habiendo participado en diversos proyectos de construcción o remodelación de edificios en el AMSS.

Se eligieron a los 38 profesionales, considerando los siguientes criterios.

A. Conocimiento Especializado

Los profesionales de la construcción, como arquitectos, ingenieros civiles y contratistas, poseen un conocimiento especializado sobre los materiales que se utilizan en sus proyectos. Obtener sus opiniones proporciona información valiosa y precisa sobre las tendencias y preferencias en la selección de materiales.

B. Experiencia Práctica

Estos profesionales han participado directamente en proyectos de construcción en El Salvador, lo que significa que tienen una experiencia práctica en el uso de diferentes materiales en situaciones reales. Sus opiniones reflejarán las condiciones y desafíos específicos del entorno local.

C. Variedad de Proyectos

Al encuestar a un grupo diverso de al menos 30 profesionales, es probable que se obtenga información sobre una amplia gama de proyectos, desde viviendas hasta infraestructuras más grandes. Esto proporciona una visión amplia de los materiales utilizados en diversos contextos constructivos.

D. Perspectivas Actuales

La encuesta permite capturar las tendencias y preferencias actuales en la elección de materiales de construcción. La industria de la construcción está en constante evolución, y la información recopilada ayudará a mantenerse al tanto de las últimas prácticas y tecnologías en El Salvador.

E. Toma de Decisiones Informada:

La información recopilada a través de la encuesta permitirá a los interesados tomar decisiones sobre la caracterización cualitativa de los parámetros de diseño de un edificio.

F. Adaptación a las Condiciones Locales

Dado que El Salvador puede tener condiciones geográficas, climáticas y económicas particulares, la información recopilada a través de la encuesta ayudará a adaptar los materiales de construcción a las necesidades específicas de la región.

4.1.3 Procedimiento y Gestión de la Calidad

La encuesta se diseñó preliminarmente, y se desarrolló su formulación en la plataforma gratuita de encuestas, Google Forms. Se consideraron todas las restricciones necesarias en las preguntas, de tal manera que se minimizara la generación de datos incongruentes e inválidos, como el ingreso de un valor numérico en una pregunta cualitativa, o viceversa, basándose en la CBECS como se ha mencionado posteriormente, adaptándola al contexto local.

Posteriormente, se le proporcionó el enlace de la encuesta a los profesionales que responderían, junto con una breve introducción a la encuesta, detallando los objetivos de la misma, qué tipo de información se requería, y haciendo del conocimiento de las personas encuestadas que la información se recopilaba con objetivos puramente académicos, y que serían tratados de manera confidencial. Posteriormente, se realizó una depuración de datos, y se trataron las respuestas para obtener la información buscada.

4.1.4 Contenido de la Encuesta

La encuesta adoptada en este caso, funciona como guía general para la selección de categorías de información. Es decir, la encuesta establece todas aquellas áreas de interés sobre las cuáles se recabará información, áreas que fueron modificadas para adecuarse al contexto local. Naturalmente, ciertos sistemas e infraestructura utilizada en edificios de tipo oficina en Estados Unidos no son aplicables para nuestro contexto, por ejemplo, el sistema de distribución municipal de agua caliente o gas propano, por lo que algunas preguntas y secciones fueron removidas, modificando de esta forma el instrumento original CEBCS.

Las áreas de interés contenidas en la encuesta que se pasó son las siguientes. El contenido de la encuesta se encuentra en la sección de Anexos del presente trabajo.

Sección R: Información Sobre los Encuestados.

En esta sección se recabó información sobre los encuestados, consultándoles su profesión, sus años de experiencia, área de desempeño laboral y áreas de interés en el estudio a realizarse. Esta última información sirvió para orientar las preguntas siguientes de tal manera que los encuestados tengan mayores insumos para responder, de acuerdo a su área de experiencia seleccionada.

Sección A: Tamaño, Antigüedad del Edificio y Características Estructurales.

Con las preguntas de esta sección, se pretendía conocer en primer lugar la ubicación del edificio seleccionado según los archivos de clima existentes para El Salvador (basándose en los datos disponibles para las estaciones climáticas disponibles para el AMSS), que fueron las ciudades de San Salvador, Ilopango y Soyapango, además, debido a que estos municipios cubren gran parte del AMSS. Posteriormente, se consulta acerca del área construida en metros cuadrados, materiales utilizados en las paredes tanto internas como externas, en techos, la inclinación y orientación de éste, la huella del edificio, la relación existente entre pared-ventana, número de niveles con el cual fue construido el edificio, si

tiene o no niveles subterráneos, año de construcción y de finalización de la obra y qué tipo de modificaciones se le han hecho al edificio en el pasado (si las hay).

Sección B: Actividad del Edificio o del Establecimiento.

Se pretende conocer la actividad que se realiza en el edificio o establecimiento sobre el cual responderá el encuestado. Conocer la actividad adentro del edificio contribuye a identificar los patrones de ocupación adentro del edificio.

Sección D: Fuentes de Energía, Usos y Equipos.

En esta sección se requiere al encuestado que responda acerca de las fuentes de energía que son utilizadas para abastecer el edificio, si existen fuentes alternativas de energía (como generadores de motores recíprocos, sistemas de generación fotovoltaica, entre otros), si existen dentro del edificio estaciones de carga para vehículos eléctricos o híbridos, si se aprovecha la energía solar térmica en alguna actividad, entre otros tipos de energía.

Sección E: Cargas Misceláneas.

En esta sección se pretende recabar información sobre los diversos espacios que pueden existir en los edificios de oficinas con sus respectivas áreas, conocer un número aproximado de computadoras y otros equipos misceláneos que son comúnmente utilizados, tener una idea del sistema de iluminación presente en el edificio tanto para interiores como para exteriores, conocer los tipos de luminarias comúnmente instaladas en los edificios, conocer si se aplican medidas de conservación de la energía en los sistemas de iluminación y los demás sistemas.

4.2 Pertinencia del Instrumento

Este instrumento, al ser adoptado de un contexto estadounidense, se adecuó oportunamente para que ganara validez en nuestro medio. Adicionalmente, este instrumento se desarrolló respetando los siguientes criterios que mejoran su pertinencia en este estudio.

4.2.1 Adaptación al Entorno Local

El Salvador tiene condiciones climáticas específicas, incluyendo amenazas sísmicas. Evaluar las propiedades físicas, térmicas y mecánicas es crucial para adaptar el edificio a estos factores y garantizar su resistencia y seguridad estructural.

4.2.2 Bienestar y Productividad de los Usuarios

Las propiedades organolépticas, acústicas y ópticas son esenciales para crear un entorno de trabajo que promueva el bienestar y la productividad de los ocupantes. La elección de colores, texturas y niveles de iluminación adecuados contribuye a un ambiente laboral positivo.

4.2.3 Eficiencia Energética y Sostenibilidad

La eficiencia energética y la sostenibilidad son aspectos cruciales en el diseño y construcción de edificios en la actualidad. Estos elementos no solo impactan positivamente en el medio ambiente, sino que también contribuyen a la reducción de costos operativos a lo largo del ciclo de vida del edificio. En el contexto de El Salvador, donde las condiciones climáticas pueden variar y donde hay una creciente conciencia ambiental, la incorporación de prácticas sostenibles es fundamental.

4.3 Datos Empleados para Caracterizar un Edificio de Tipo Oficina Ubicado en el AMSS

Como parte de la metodología utilizada, para crear un edificio que sirviera de línea base para el retrofit, se recolectaron datos de dos fuentes, una para caracterizar a nivel cualitativo el edificio de oficinas del AMSS que fue la adaptación de la encuesta CBECS y la otra utilizar valores cuantitativos para la descripción de cargas del edificio, como se ilustró en la Figura 20. A continuación, se detallarán los datos utilizados para la caracterización del edificio.

4.3.1 Caracterización Cualitativa del Edificio Según Encuesta

A continuación, se presentan los resultados de la encuesta realizada, el detalle de las preguntas y respuestas se encuentran en el Anexo A, teniendo el instrumento una posibilidad de realizar respuestas a preguntas cerradas o abiertas.

4.3.1.1 Resultados Sección R: Información Sobre los Encuestados

R2-1: ¿Cuál es su profesión?

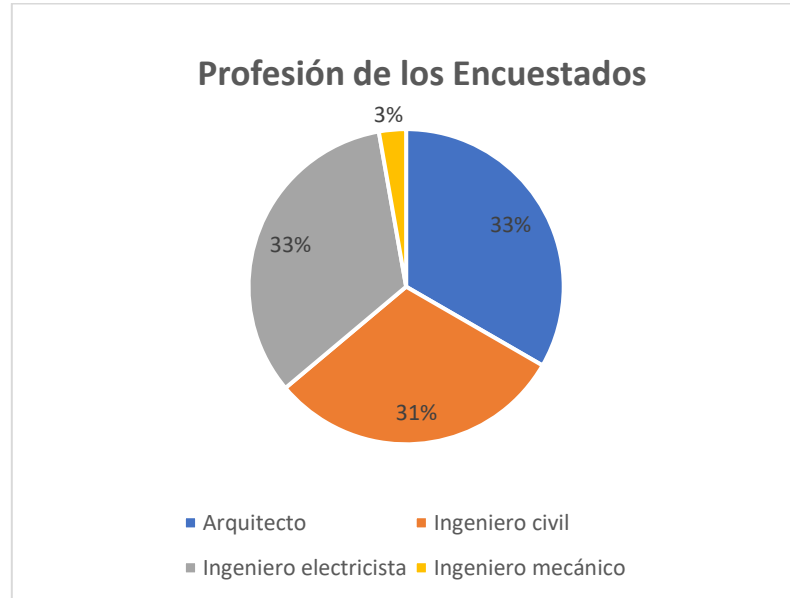


Figura 21: Gráfico de la pregunta R2-1 (Fuente: Elaboración Propia.)

La Figura 21 ilustra los resultados de la encuesta, siendo mayoritariamente arquitectos las personas que respondieron. Los profesionales entrevistados en el presente estudio, se distribuyen mayoritariamente en tres grupos, estos son: ingenieros electricistas, ingenieros civiles y arquitectos, la finalidad de entrevistar a estas tres disciplinas fue la de obtener diferentes enfoques de un edificio según la información recopilada por el instrumento. Debido a la manera en cómo se modeló la encuesta, no se incluyeron preguntas que recopilaran información técnica detallada sobre los sistemas de climatización, por lo que se priorizó entrevistar a las disciplinas mencionadas anteriormente frente a otras como la mecánica que pudo haber ayudado con el conocimiento de su disciplina sobre los sistemas de climatización.

R2-2: ¿Cuántos años tiene ejecutando su profesión?

La experiencia de los profesionales encuestados se encuentra entre los 3 y 5 años.

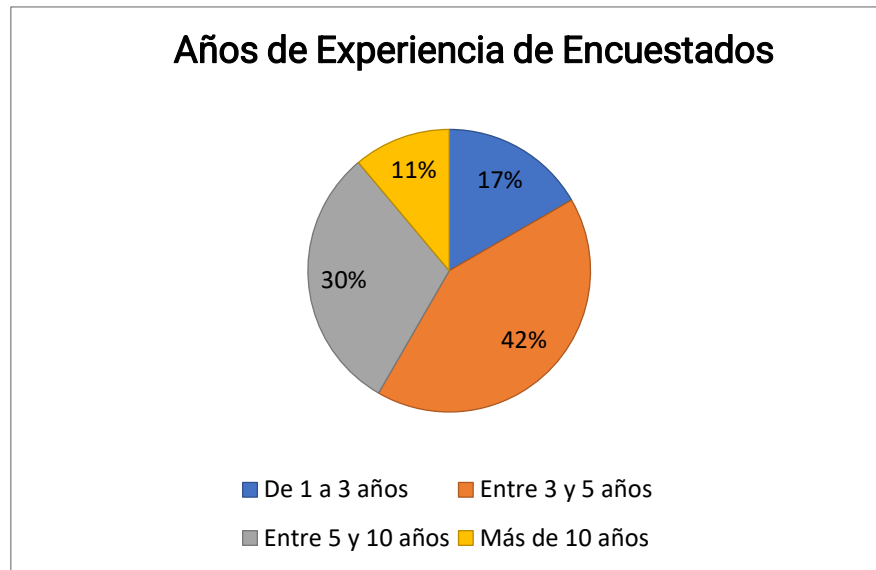


Figura 22: Gráfico de la pregunta R2-2. (Fuente: Elaboración Propia.)

R5: ¿Cuál de estas categorías describe de mejor manera la función que ha desempeñado?

El rubro más común dentro de sus profesiones en el cuál se han desempeñado los encuestados fue el de diseño y construcción de edificios.

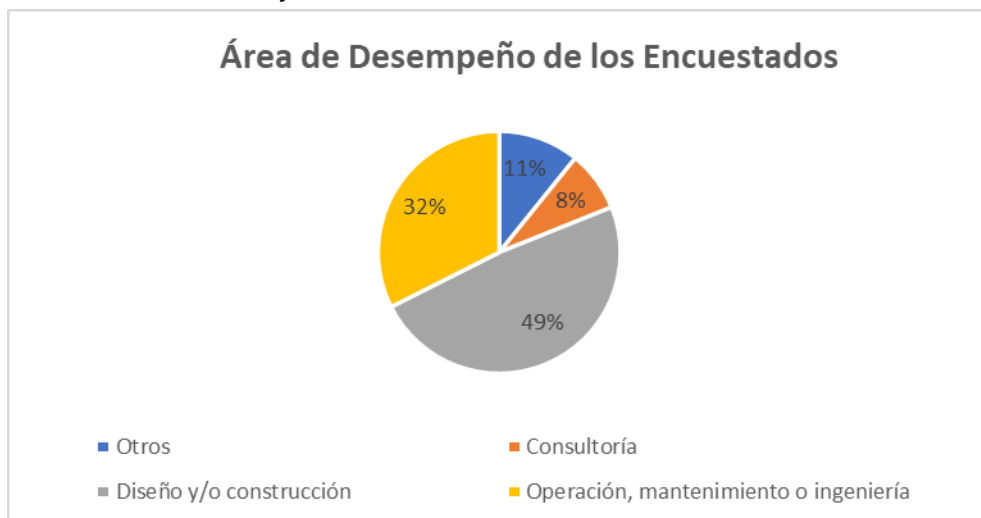


Figura 23: Gráfico de la Pregunta R5. (Fuente: Elaboración Propia.)

R6: Según su experiencia, ¿con cuál área de interés dentro del estudio se siente más familiarizado?

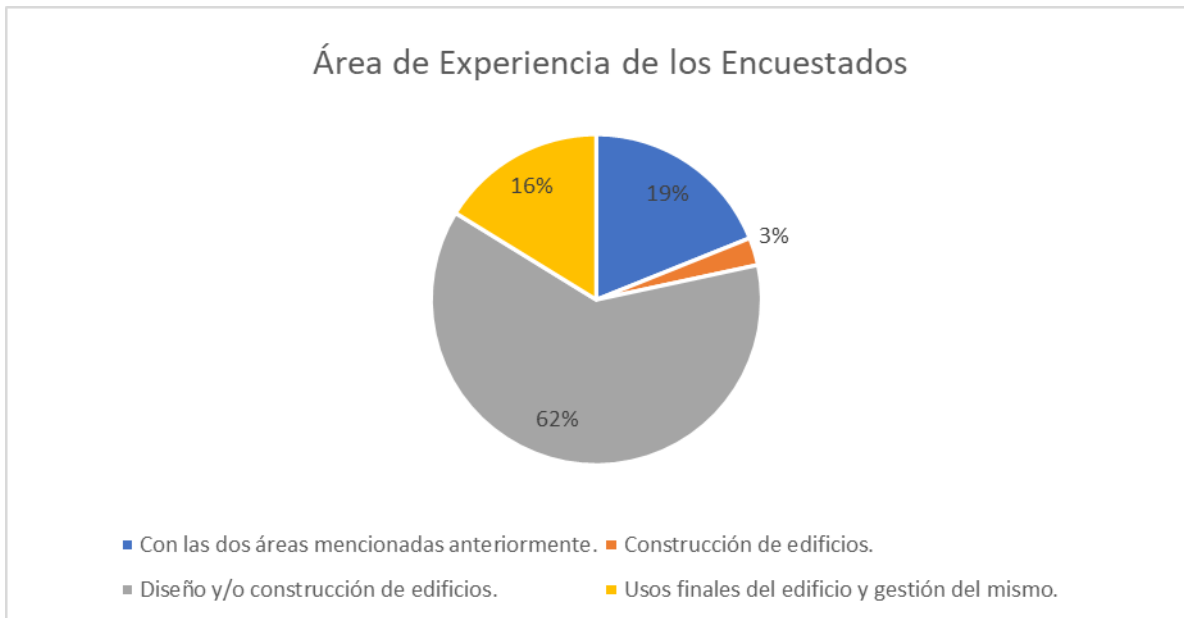


Figura 24: Gráfico de la Pregunta R6. (Fuente: Elaboración Propia.)

La Figura 24, ilustra que la mayoría de los encuestados se dedicaba al diseño y/o construcción de edificios.

4.3.1.2 Resultados de la Sección A: Tamaño, Antigüedad del Edificio y Características Estructurales

En esta sección, se procedió a realizar preguntas que ayudaron a caracterizar a nivel cualitativo el aspecto, geometría y tipo de materiales del edificio, el resumen de esta sección se presenta en la Tabla 10: Resultados de la sección A. (Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 10: Resultados de la sección A. (Fuente: Elaboración Propia.)

| Resumen de Sección A | | |
|----------------------|--|---|
| Ítem | Concepto | Resultado |
| A3 | Ubicación | San Salvador |
| A7 | Área construida | 4,645 m ² - 9,290 m ² |
| A9-1 | Material de paredes internas | Bloque de concreto o concreto vertido (de alta resistencia) |
| A9-2 | Material de cubierta exterior | Bloque de concreto o concreto vertido (de alta resistencia) |
| A10 | Material del techo | Losa de concreto |
| A13-1 | Inclinación del techo | Inclinación moderada |
| A13-2 | Valor de la inclinación (%) | 0.08 |
| A14-1 | Huella del edificio | Rectángulo amplio |
| A14-2 | Orientación de la fachada | Hacia el norte |
| A15 | Área total de ventanas/puertas de vidrio | Del 11% al 25% |
| A16 | Niveles del edificio | 5 niveles |
| A17 | Niveles subterráneos | 1 nivel |
| A18 | Altura piso-techo típica | 4.00 m |
| A21 | Número de ascensores | Ninguno |
| A23 | Número de escaleras eléctricas | Ninguna |
| A24-1 | Año de construcción del edificio | Entre 2010 y 2020 |
| A24-2 | Año que finalizó la construcción | Entre 2016 y 2021 |

4.3.1.3 Resultados de la Sección B: Actividad del Edificio o del Establecimiento

En esta sección, se identificó que el tipo de oficina del edificio caracterizado es del tipo administrativo, característica que ayudará a modelar los horarios de utilización para este tipo de oficinas de los horarios que tiene por defecto Design Builder.

Tabla 11: Resumen de sección B. (Fuente: Elaboración Propia)

| Resumen de sección B | | |
|----------------------|-------------------|--------------------------|
| Ítem | Concepto | Resultado |
| B1 | Tipo de actividad | Oficinas administrativas |

4.3.1.4 Resultados de la Sección D: Fuentes de Energía, Usos y Equipos.

En esta sección, se presentan los resultados de la encuesta que ayudaron a modelar los tipos de energía que consume el edificio que está siendo caracterizado.

Tabla 12: Resultados de la sección D. (Fuente: Elaboración Propia).

| Resumen de sección D | | |
|----------------------|---|--------------|
| Ítem | Concepto | Resultado |
| D130 | ¿Hay una rutina de mantenimiento para aire acondicionado? | Sí |
| D135 | Fuente de energía más común para cocinar en el recinto | Electricidad |
| D140 | Tecnología más común de generación de energía eléctrica | Ninguna |
| D148 | Capacidad del generador | N/A |
| D149 | Número de estaciones de carga de vehículos | Ninguno |
| D170 | ¿Se aprovecha la energía solar térmica? | No |

4.3.1.5 Resultados de la Sección E: Cargas Misceláneas.

Tabla 13: Resultados de Sección E (Fuente: Elaboración Propia)

| Resumen de sección E | | |
|----------------------|---|--|
| Ítem | Concepto | Resultado |
| E9 | ¿Existen dentro del edificio espacios destinados a conferencias o eventos sociales? | Si |
| E40 | ¿Qué categoría describe mejor el número de computadoras usadas en este edificio? | 100 a 249 |
| E41 | ¿Qué categoría describe mejor el número de laptops usadas en el edificio? | 100 a 249 |
| E49 | ¿Cuál categoría describe mejor cuántos servidores hay dentro del edificio? | 1 a 4 |
| E51 | ¿Cuáles de estos tipos de áreas de computadora se encuentran dentro del edificio? | Servidores |
| E53 | ¿Cuáles de estas características describe mejor el espacio dentro del centro de cómputo? | Acceso controlado |
| E65 | ¿Cuál es su mejor estimado en porcentaje de los metros cuadrados totales del edificio que están normalmente iluminados cuando está abierto normalmente? | 76 a 100% |
| E68 | ¿Cuál es su mejor estimado del área que debe permanecer iluminada cuando se han apagado las luces dentro del edificio? | 1 a 25% |
| E69 | ¿Qué tipos de luminaria son utilizadas para iluminar los espacios de uso general dentro del edificio? | Luces de diodos emisores de luz (LED) |
| E78 | ¿Cuáles de estos controles de iluminación o estrategias de controles de iluminación, si las hay, son utilizadas en este edificio? | Sensores de ocupación que reducen la iluminación cuando las habitaciones están desocupadas (sensores que apagan o atenúan las luces automáticamente cuando una persona sale de una habitación o espacio) |
| E79 | ¿Qué porcentaje de todas las superficies de las paredes exteriores del edificio está iluminada? | 10 a 25% |
| E80 | ¿El edificio cuenta con algún área de estacionamiento interior o exterior que esté iluminada con lámparas alimentadas a través del servicio eléctrico del edificio? | Si |
| E81 | ¿El edificio cuenta con un piso de parqueos interno, un lote o parqueo exterior o ambos? | El estacionamiento es parte del edificio (interior) |
| E82 | ¿Cuántos espacios de estacionamiento hay en esa área de estacionamiento iluminada? | 50 a 90 |
| E83 | ¿Las ventanas exteriores de este edificio contienen vidrio de una sola capa, vidrio de capas o una combinación de ambos tipos? | Vidrio de una sola capa |
| E84 | ¿Cuáles de estas características de conservación de energía o iluminación natural, si las hay, están presentes en este edificio? | Ninguno de estos |
| E85 | ¿Qué porcentaje del edificio recibe suficiente luz exterior para que no sea necesario encender las luces interiores? Si no está seguro, proporcione su mejor estimación | 20% |

Los resultados de la sección E, resumidos en la Tabla 13 tienen la finalidad de caracterizar las cargas del edificio, a nivel cualitativo, así como otros aspectos como la cantidad de capas del vidrio, tipo de luminarias o la cantidad de servidores adentro del edificio.

4.3.2 Caracterización Cuantitativa del Edificio

En base a la encuesta realizada, se obtuvo una primera aproximación a la caracterización del edificio, no obstante esta posee información para poder modelar a nivel geométrico y con algunas cualidades como los horarios de ocupación basándose en que los resultados de la encuesta caracterizan un edificio del tipo de oficina administrativa. Específicamente, los valores de consumo de energía eléctrica que dan origen a la intensidad de consumo energético (Energy Use Intensity, EUI, por sus siglas en inglés), fueron tomados de un edificio del tipo oficina administrativa modelado por la empresa mexicana SolArq para la ciudad de Chihuahua, México (Ordoñez, A., 2023), por la similitud que se tiene entre este modelo Mexicano del tipo de oficina con el modelo que se está caracterizando en el AMSS, como se definió en la Figura 20 para las fuentes de datos para este edificio. Por la naturaleza de esta investigación, el uso de estos valores de cargas como la intensidad de carga de las luminarias (Lighting Power Density, LPD, por sus siglas en inglés) y cargas misceláneas (Power Density, PD, por sus siglas en inglés) para cada área del edificio, son valores que ayudarán únicamente a definir un consumo base para el edificio del tipo oficina en el AMSS, posteriormente como parte del retrofit estos valores deberán ser modificados para cumplir con los estándares de eficiencia energética en los que se basará el retrofit energético.


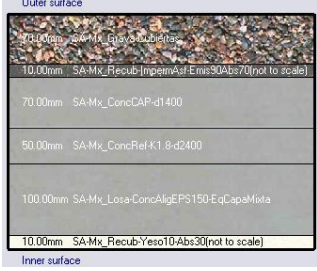
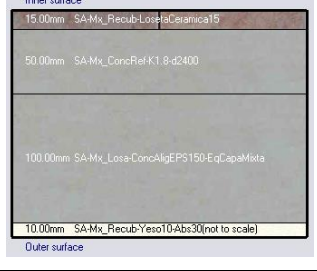

4.3.2.1 Envolvente del Edificio

Según los resultados de la Tabla 10, resumen de la sección A, se definió un edificio con un área total de 4,247 m², se modeló como un edificio de 5 pisos con un área de 958.9 m², valores que corresponden al área total. La fachada principal del edificio está orientada hacia el norte.

Se definió la envolvente del edificio modelando los materiales identificados en la encuesta para cada elemento de la envolvente, para los efectos de esta investigación la importancia de la envolvente radicó en su comportamiento térmico más que en su comportamiento estructural. El techo está levemente inclinado hacia el Sur con una inclinación del 8% hacia el sur. La Tabla 14 resume los valores de transmitancia térmica (Valor U) de la envolvente del edificio, en el caso del piso y del techo se añadieron capas de materiales que en un caso real, serían el acabado interno y externo del componente. Según la “Advanced Energy Retrofit Guide for Office Buildings” del Pacific Northwest National Laboratory, U.S. Department of Energy, para realizar un ejercicio de Retrofit Profundo (Deep Retrofit) en la envolvente, se necesita primero reducir en la medida de lo posible todas las infiltraciones

de la envolvente del edificio, para posteriormente proceder a modificar el valor U de ésta mediante la adición de capas de aislamiento exterior, la caracterización de la envolvente del edificio considerando únicamente el valor U ayudará a optimizar posteriormente el edificio al momento de aplicarle un Retrofit Profundo, los valores de infiltración modelados en DesignBuilder se considerarán constantes al momento de simular el comportamiento energético del edificio luego de aplicarle un Retrofit Profundo.

Tabla 14: Conductividad Térmica de la Envolvente del Edificio (Fuente: Elaboración Propia.)

| Elemento del Edificio | Valor de la Transmitancia Térmica (W/m ² K) | Materiales Utilizados | Imagen del Modelo | Espesor |
|-----------------------|--|---|--|---------|
| Muros Externos | 4.142 | Bloque de concreto o concreto vertido (de alta resistencia) |  | 100 mm |
| Techo | 1.238 | Losa de concreto |  | 250 mm |
| Piso Interior | 1.302 | Losa de concreto |  | 165 mm |
| Piso Exterior | 0.259 | Losa de concreto |  | 300 |

4.3.2.2. Fenestración

Se puede definir a la fenestración como todos los elementos traslúcidos de una edificación, en este caso los resultados de la sección A de la encuesta permitieron caracterizar al edificio con un porcentaje del área total de la envolvente cubierta de elementos traslucidos del 25%, se asumió que el tipo de vidrio utilizado fue el Generic PYR B CLEAR 3MM que corresponde a un cristal traslucido sin ningún tipo de película protectora y de una sola capa, denominación designada por la International Glazing Database (IGDB), siendo este vidrio uno que cumple con los requisitos de la encuesta en la sección A y sección E. En combinación con un marco de aluminio sin protección ante los puentes térmicos. A nivel térmico, los valores de la fenestración se han resumido en la Tabla 15.

Tabla 15 - Valores térmicos de la fenestración del edificio. (Fuente: elaboración propia.)

| Elemento del Edificio | Valor de la Transmitancia Térmica ($W/m^2 K$) | Coefficiente de Ganancia de Calor Solar (SGHC) |
|-------------------------|---|--|
| Cristal de las Ventanas | 3.835 | 0.768 |
| Marco de Aluminio | 5.881 | - |

4.3.2.3 Iluminación

Según los resultados de la sección A, la iluminación del edificio corresponde a luminarias de tipo LED, siendo este un tipo de luminaria de los más eficientes, su densidad de carga fue asumida con un valor de $7.5 W/m^2$, dato tomado del edificio de oficinas mexicano modelado por SolArq para la ciudad de Chihuahua, México (Ordoñez, A., 2023). La iluminación del edificio base, según la encuesta, tiene luminarias con sensores de ocupación según los resultados de la sección E de la encuesta resumidos en la Tabla 13. Según la Advanced Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings de la ASHRAE (2019), luminarias del tipo LED como controles de ocupación son de la estrategias recomendadas para lograr la cero energía, por lo que al momento de realizar el retrofit energético ya no se tomarán en cuenta este tipo de estrategias.

Tabla 16 - Caracterización de Iluminación del Edificio Base.(Fuente: Elaboración Propia).

| Elemento del Edificio | Valor |
|-----------------------|-------------|
| Tipo de Luminaria | LED |
| Densidad de Carga | $7.5 W/m^2$ |

4.3.2.4 HVAC

El sistema de aire acondicionado no fue definido con los datos de la encuesta, se tomó como referencia el edificio de oficinas Mexicano modelado por SolArq para la ciudad de Chihuahua, México (Ordoñez, A., 2023). Se modeló un aire acondicionado del tipo Split+ Ventilación Mecánica. Al momento de simular en Design Builder se utilizó la opción de diseño de sistema HVAC Simple, esta variable es asumida por DesignBuilder como una carga de enfriamiento que es suplida por una unidad de enfriamiento que alimenta a todo un distrito de edificios (opción de diseño de sistema HVAC Simple), a no ser que se detalle elemento por elemento en cada zona del edificio (opción de diseño de sistema HVAC Detallado) (DesignBuilder's Manual, 2024). Se utilizó un COP de 1, que es el valor por defecto que Design Builder utiliza cuando se elige la opción de diseño de sistema simple con autodimensionamiento.

Tabla 17 - Caracterización del Sistema de Climatización del Edificio Base. (Fuente: elaboración propia.)

| Elemento del Edificio | Valor |
|---------------------------------------|----------------------------|
| Tipo de Sistema de Aire Acondicionado | Split+Ventilación Mecánica |
| COP | 1 |

4.3.2.5 Actividad

En este apartado, DesignBuilder ayuda al usuario a definir lo que los autores Chen, M. et al. En su artículo "A Methodology to identify appropriate refurbishment strategies towards zero energy buildings in a hot humid climate" del año 2022 identifican como "Occupants Interaction", que consiste en el comportamiento de los usuarios del edificio, así como sus requerimientos de confort y consumos de energía por unidad de área de las cargas misceláneas o requerimientos de iluminación en Luxes, siendo todas parte de las medidas de retrofit o renovación identificadas como necesarias para convertir un edificio en edificio de cero energía neta en un clima húmedo y caliente.

Tabla 18 - Caracterización de la Actividad de los Usuarios del Edificio. (Fuente: Elaboración Propia.)

| Elemento del Edificio | Valor |
|---|--------------------------------|
| Set Point del Aire Acondicionado | 22 °C |
| Setback del Aire Acondicionado | 28 °C |
| Densidad de Ocupación | 0.1110 personas/m ² |
| Tasa Metabólica Promedio | 0.9 Met |
| Factor de Ropa en Invierno | 1 Clo |
| Factor de Ropa en Verano | 0.5 Clo |
| Iluminación Mínima Requerida | 400 Lux |
| Densidad de Carga del Equipo de Oficina | 11.77 W/m ² |

La Tabla 18 resume los valores de actividad dentro del edificio, todos estos datos han sido tomados del modelo de edificio de oficinas mexicano modelado por SolArq para la ciudad de Chihuahua, México (Ordoñez, A., 2023)., adicionalmente el edificio fue modelado con un horario de ocupación de 8 am a 7 pm de lunes a viernes sin trabajar los fines de semana o el fechas festivas. Con este horario trabajan los equipos de oficina, la iluminación artificial y el sistema de climatización del edificio, no se considera el uso de ventilación natural o iluminación natural en la simulación energética del edificio base para tener el consumo de carga base crítica de éste.

4.3.3 Modelado y Simulación Energética del Caso de Estudio de un Edificio de Oficina Salvadoreño

En la sección anterior, se presentaron los datos utilizados para poder caracterizar un edificio del tipo oficina del AMSS, en esta sección se presentan los resultados de su modelado, así como de su simulación energética utilizada para caracterizar su consumo base. Se utilizó el software DesignBuilder (Versión 7.0.2.6, DesignBuilder Software Ltd., Stroud, Gloucs, UK) como herramienta de simulación cuyo motor de simulación es EnergyPlus, desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos. Además de permitir realizar simulaciones energéticas este software contiene módulos para realizar análisis de sensibilidad y análisis de optimización utilizando algoritmos genéticos, siendo ambos necesarios para el análisis del edificio de oficina.

4.3.3.1 Modelado del Edificio

Para poder realizar los cálculos energéticos, se trabajó un modelo del clima de San Salvador, tomando como base el de la estación del clima de Meteororm 7 para el área de San Salvador, DesignBuilder por defecto permite elegir únicamente una estación meteorológica, que es la del aeropuerto internacional. La Figura 25 muestra los datos utilizados en el modelado del clima del AMSS. Se modificaron los datos, para el diseño de las cargas de enfriamiento, según los percentiles del 0.4%, 1% y 2% para tener una mejor precisión en los datos del clima utilizados en las simulaciones. Adicionalmente se identificó, por los datos del clima, que el AMSS pertenece a la región climática ASHRAE 1A y a la clasificación Koppen Aw, permitiendo identificar en los estándares de la ASHRAE 90.1 los valores sugeridos para dicha zona climática.

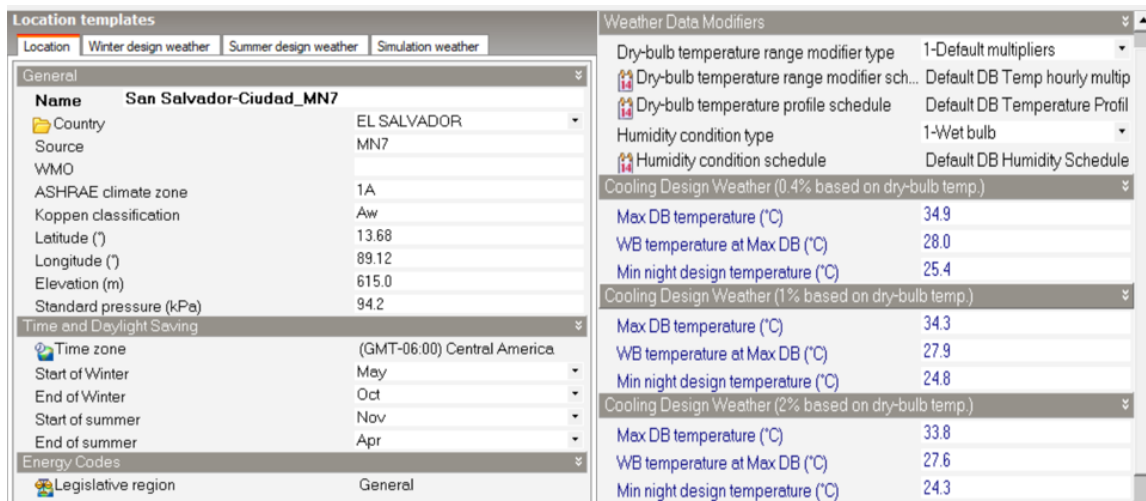


Figura 25: Modificaciones de Datos Climáticos para el AMSS. (Fuente: Elaboración Propia)

Adicionalmente a los datos del clima utilizados para definir la frontera climática del edificio, se tomaron las siguientes consideraciones para las opciones del modelo que utiliza el software en los diferentes aspectos que son simulados:

- Se ajustó la ventilación natural a la opción “calculado” en el software, la cual estima las corrientes de aire en cada apertura del edificio mediante el método de airflow network.
- Se modeló la distribución de ganancias solares como completas en el exterior.
- El algoritmo de solución de la transferencia de calor con propiedades térmicas constantes se ajustó como “Conduction Transfer Function (CTF)”, el cual no

considera el movimiento de la humedad y su impacto en las propiedades térmicas del material.

- Se consideró un buen estado de la hermeticidad del edificio, permitiendo una tasa constante de infiltración de 0.25 ac/h siempre.
- No se consideraron puentes térmicos.
- Se modeló el comportamiento térmico del suelo, no obstante, la influencia de este se descartó de los análisis posteriores porque el suelo en climas tropicales cumple una función de sumidero de calor, teniendo una relación inversa entre la conductividad de éste y el consumo energético del edificio. (Carpino et al, 2024).

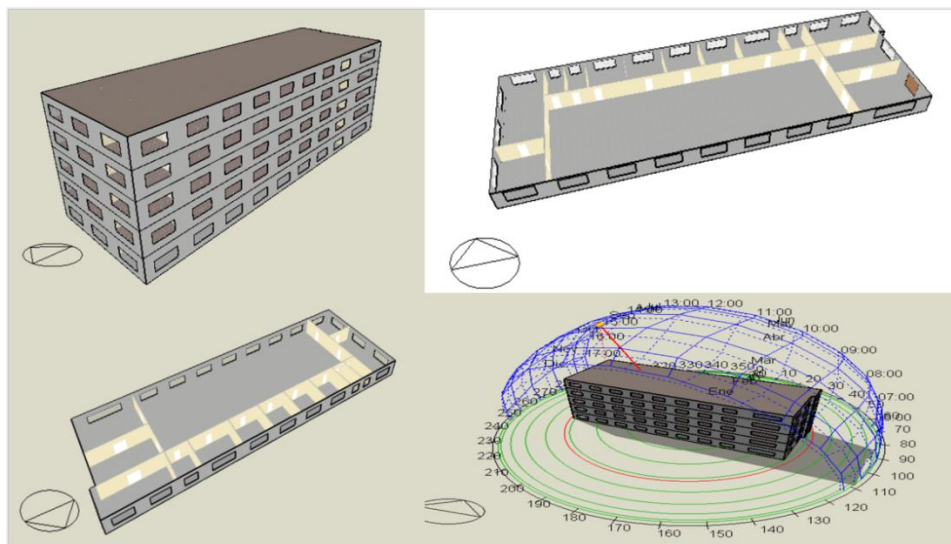


Figura 26: Representación Gráfica del Modelo Obtenido en las Encuestas a Profesionales. (Fuente: Elaboración Propia)

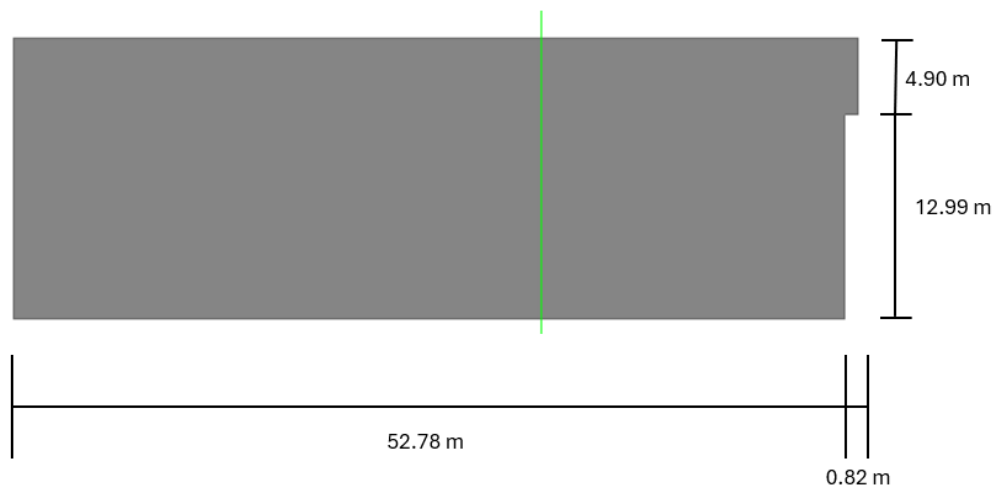


Figura 27: Huella del Edificio Base. (Fuente: Elaboración Propia)

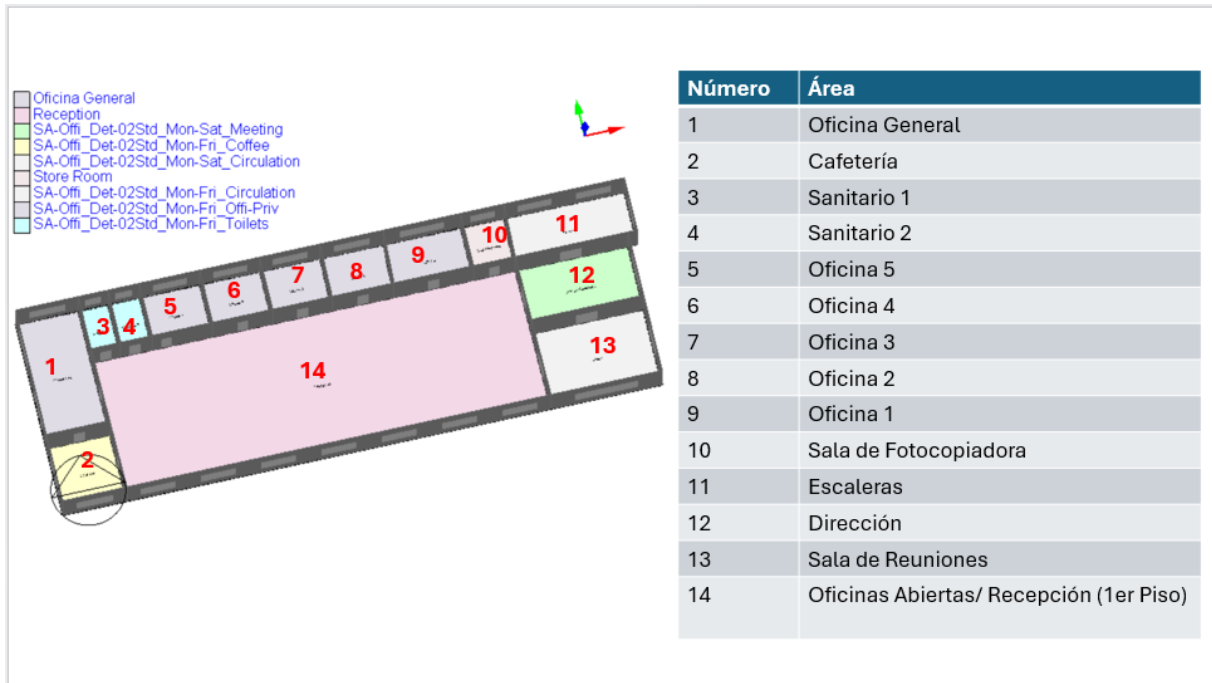


Figura 28: Distribución en Planta del Edificio. (Fuente: Elaboración Propia)

La Figura 28 ilustra la distribución en planta de cada piso del edificio, al ser un edificio de 5 pisos se asumió que se repetirían los espacios en cada piso del edificio, siendo el único piso diferente el primer piso, que en lugar de tener una zona de oficinas abiertas tiene una zona de recepción como se describe en la figura. Las zonas del edificio se modelaron según los resultados de la encuesta.

4.3.3.2 Simulación Energética del Edificio Base

La Figura 29 representa el balance energético anual del edificio base mientras que la Figura 30 representa el comportamiento de las cargas misceláneas, de iluminación y de enfriamiento del edificio anualmente. Este edificio de 5 pisos tiene un consumo anual de 1,212,119.94 kWh, dato que convertido al benchmark de consumo energético para edificios propuesto por la ASHRAE equivale a 285.41 kWh/m²-anuales, es un consumo que sobrepasa en un 286.64% al valor recomendado por la ASHRAE para edificios de cero energía neta de 73.8174 kWh/m² anuales para edificios del tipo oficina ubicados en la zona climática 1A (ASHRAE, 2019).

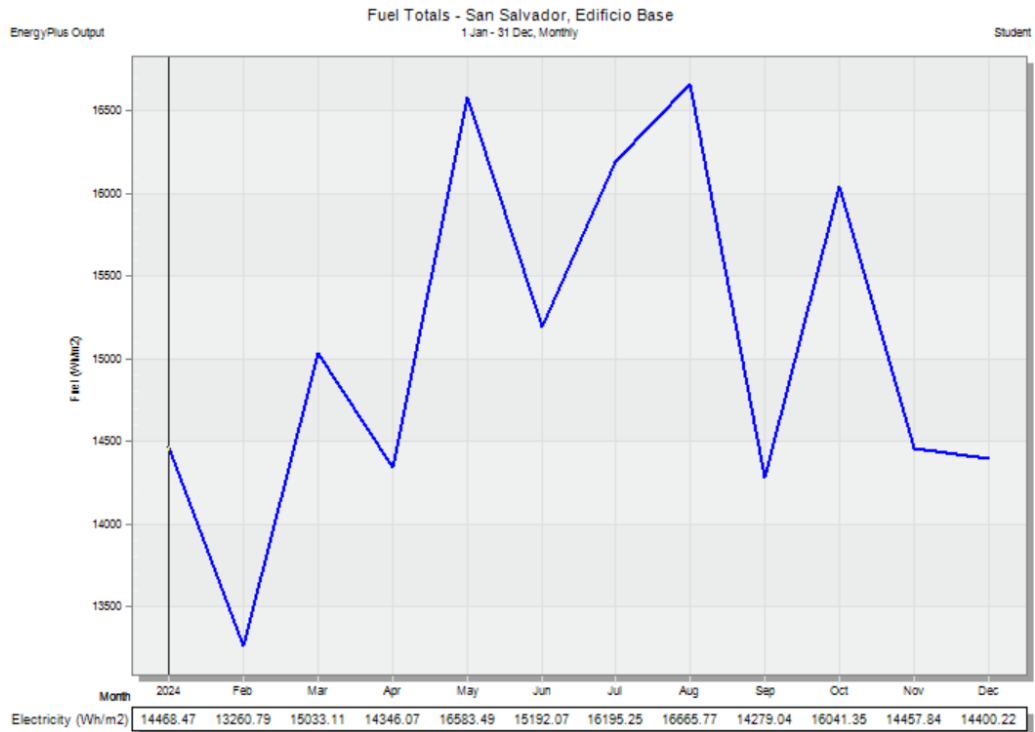


Figura 29: Balance Energético Anual del Edificio Base. (Fuente: Elaboración Propia.)

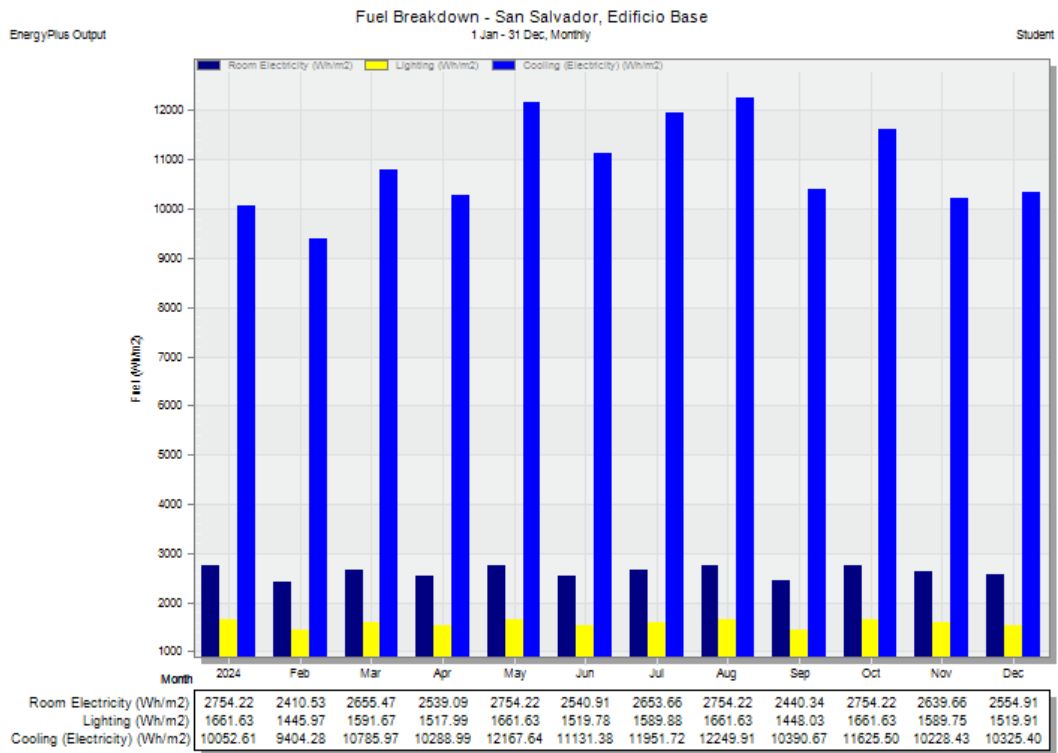


Figura 30: Balance de Cargas Anual del Edificio Base. (Fuente: Elaboración Propia.)

En la Figura 30 se puede distinguir que el mayor consumo de energía del edificio es la carga de enfriamiento, seguida de las cargas misceláneas y finalmente las cargas de iluminación.

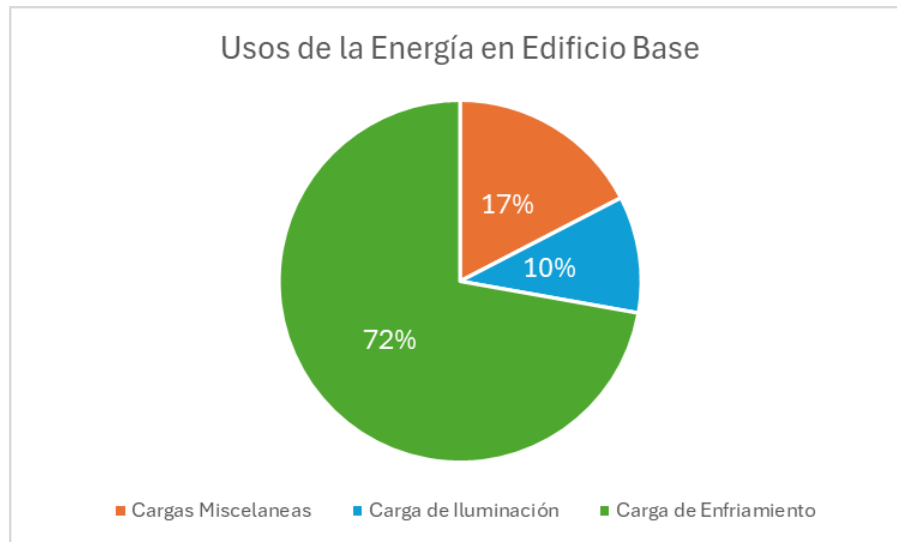


Figura 31: Porcentaje de Consumos Anuales del Edificio (Fuente: Elaboración Propia)

En la Figura 31 ilustra el comportamiento de la distribución de cargas del edificio base teniendo la mayor carga energética en el sistema de enfriamiento del edificio siendo el 72% de la carga anual, mientras que la la carga de iluminación representa el 10% y las cargas misceláneas representan el 17%. Este comportamiento es parecido al edificio de oficinas descrito por Yan et al (2020) en su artículo “Generative Adversarial Network for Fault Detection Diagnosis of Chillers” en el que caracterizan la carga de un edificio de oficina en Singapur, compartiendo con el edificio del tipo oficina del AMSS caracterizado que ambos pertenecen a la zona climática 1A de la ASHRAE, en dicho edificio se comparte que entre las cargas de enfriamiento y carga de ventilación se suma el 70% de la carga energética del edificio, la carga de iluminación representa el 15% y las cargas misceláneas representan el 15%.

Comfort - San Salvador, Edificio Base

1 Jan - 31 Dec, Monthly

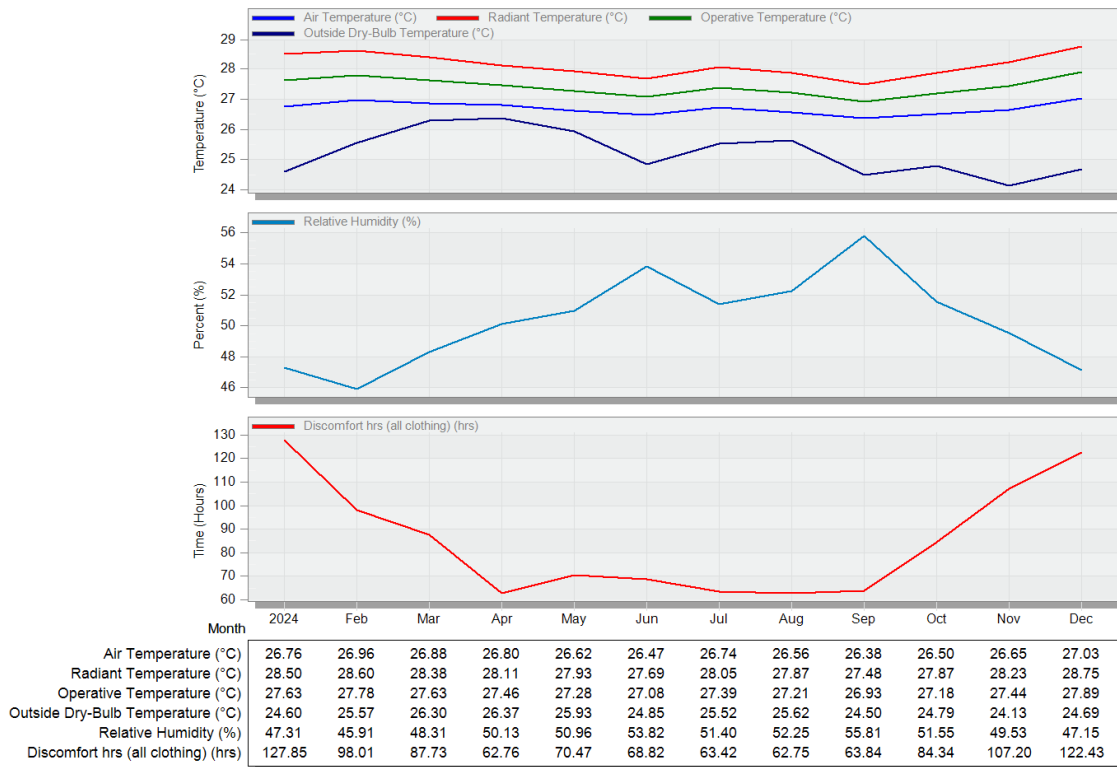


Figura 32: Discomfort Térmico en Edificio Base. (Fuente: Elaboración Propia.)

La Figura 32 muestra la caracterización del discomfort térmico adentro del edificio, dicho discomfort total anual suma la cantidad de 1019.62 horas al año, es decir en el 11.64% de horas en un año, este valor está levemente por encima de las horas de discomfort térmico establecidas por el estándar ASHRAE 55, a donde se dice que utilizando el método analítico de análisis, para edificios que cuentan tanto con ventilación mecánica como con climatización artificial el discomfort no debería exceder el 10% de horas anuales. (ASHRAE, 2010). De igual manera hay un aumento de la demanda de energía en los meses de mayo a agosto que se pueden ver en la Figura 29 del balance energético anual, en la Figura 30 se puede ver que esto se debe a un aumento en la carga de enfriamiento en este rango de meses y en la Figura 32 se puede ver que son los meses con el menor discomfort debido a que son los meses en los que más trabaja el sistema de climatización y a su vez son los meses en los que mayor es la temperatura del aire exterior.

CAPÍTULO 5 – ANÁLISIS DE UN CASO DE ESTUDIO: RETROFIT ENERGÉTICO APLICADO A UN EDIFICIO DE OFICINA SALVADOREÑO

En este capítulo, se presentan los resultados del retrofit realizado al edificio del capítulo 4, con el objetivo de disminuir el consumo energético del edificio a valores lo más cercanos posibles al valor recomendado por la ASHRAE para edificios de cero energía neta que es de 73.82 kWh/m² anuales para edificios del tipo oficina ubicados en la zona climática 1A (ASHRAE, 2019), también se buscó mantener al edificio en valores de confort térmico cercanos al mínimo aceptable por el estándar ASHRAE 55 que es del 80% de horas anuales para edificios que trabajan combinando climatización artificial y ventilación natural.

5.1 Metodología Utilizada para Realizar el Retrofit

La guía de “Advanced Energy Retrofit Guides” para edificios de oficina del Pacific Northwest National Laboratory (2011) identifica los siguientes tipos de proyectos que pueden realizarse al momento de buscar ahorros energéticos en un edificio del tipo oficina:

- a) Comisionamiento del edificio existente: Mediante la mejora en las operaciones de un edificio, así como la reestructuración de sus procesos de mantenimiento, generalmente se podrán obtener ahorros de hasta un 22% del uso de la energía con un periodo de retorno simple de 1.1 años (Mills, 2009).
- b) Standard Retrofit: Este tipo de proyecto incluye las modernizaciones del sistema que son más rentables y de menor riesgo. Estas medidas de reacondicionamiento estándar suelen ser reemplazos a nivel de componente de equipos existentes para mejorar la eficiencia energética. Por lo general, ninguna medida de reacondicionamiento estándar logrará un ahorro de energía del sitio del 25 al 45 %, pero como paquete de medidas, este rango se puede lograr fácilmente.
- c) Deep Retrofit: Los Deep Retrofits van más allá de los reemplazos a nivel de componentes y adoptan un enfoque integrado de todo el edificio para los proyectos de ahorro de energía. Se pueden lograr ahorros superiores al 45% cuando las mejoras en la envolvente del edificio se combinan con actualizaciones de los sistemas mecánicos y de iluminación.

Dado que el edificio sobrepasa en un 286.64% el consumo energético propuesto por la ASHRAE en su guía para el diseño de edificios tipo oficina de cero energía neta (2019), para este caso de un edificio existente, se optó por la siguiente metodología para reducir su consumo energético.



Figura 33: Flujo de Trabajo para el Retrofit Energético. (Fuente: Elaboración Propia)

La Figura 33 resume la metodología utilizada para realizar el retrofit energético al caso de estudio analizado. Para realizarla se tomó como base el proceso propuesto por Chen et al (2024), en su artículo “Retrofit Measures for Achieving NZE Single-Family Houses in a

Tropical Climate via Multi-Objective Optimization”, en el cuál se siguió un proceso lineal similar al propuesto en este trabajo, para realizarle un retrofit energético a una casa en Panamá para llevarla a una definición de cero energía neta, teniendo como similitudes con la metodología propuesta en este trabajo el uso de simulaciones paramétricas, análisis de sensibilidad y optimizaciones con algoritmos genéticos, de tal manera que el resultado final sea un edificio optimizado evitando realizar múltiples iteraciones en problemas complejos de este tipo a donde cada opción de cada sistema del edificio y sus combinaciones representan nuevas iteraciones, disminuyendo los tiempos de simulación.

En la metodología propuesta se partió de la condición de tener un edificio de oficinas existente, se aplicaron diferentes pasos, considerando en el paso 1 la mejora de estrategia pasiva de la implementación del uso de la ventilación natural, dejando de operar como el caso base que era con aire acondicionado durante todo el año y utilizando ventilación mixta en su lugar, en el paso 2 se aplicó una mejora en las estrategias activas que consistió en aumentar la eficiencia de los sistemas de iluminación y cargas misceláneas del edificio basándose en el estándar de la ASHRAE 90.1 versión 2019, el estándar de la ASHRAE “Advanced Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings” y la IESNA Lightning Handbook. En el paso 3 se realizó un análisis paramétrico parcial de las diferentes opciones

de acristalamiento y dispositivos de sombreamiento disponibles en Design Builder, en el paso 4 se realizó una mejora en la eficiencia del sistema de climatización del edificio para no sobredimensionarlo sin antes haber disminuido significativamente su carga térmica con los pasos del 1 al 3, finalmente en el paso 5 se realizó un análisis de sensibilidad como parte del proceso de utilizar las variables de simulación más adecuadas en la optimización con algoritmos genéticos realizada para conocer la combinación más óptima desde el punto de vista energético y de confort del edificio de la envolvente, así como del nuevo setpoint de la temperatura de operación del aire acondicionado. Se omitió la implementación del control y automatización de luces en el edificio debido a que, según la encuesta, el edificio ya cuenta con esta característica en su funcionamiento según los resultados expuestos en la Tabla 13 de la sección E.

Se optó por utilizar una metodología diferente a la propuesta por Chen et al (2024), debido a que se han incluido estrategias de eficiencia energética según lo indican los estándares citados en los pasos 2 y 3 que están adecuadas a la zona climática 1A según la clasificación ASHRAE, de igual manera al realizar un análisis paramétrico parcial en el paso 3 se disminuyó la cantidad de variables del análisis de sensibilidad y optimización realizadas como parte del paso 5. La principal ventaja de utilizar menos variables para estos casos en este tipo de análisis radica en la manera en cómo simula Design Builder v7 en su análisis de optimización, se encontró que a menor cantidad de variables discretas como todas las opciones posibles para la envolvente del edificio o su acristalamiento, menor era la confiabilidad del análisis de sensibilidad y convergencia de la optimización, inconveniente que no ocurría al utilizar variables continuas como el set point de temperatura del aire acondicionado.

5.2 Aplicación de Estrategias de Retrofit

En esta sección, se detallará cada una de las partes de la metodología de retrofit energético propuesta en la Figura 33.

5.2.1 Paso 1: Ventilación natural

Se configuró el edificio en Design Builder, para que este pudiese trabajar la climatización del edificio en modo mixto, es decir mezclando la ventilación natural cuando las condiciones lo permiten con la climatización del sistema de aire acondicionado. Para ello, además de configurar la climatización del edificio como un modo mixto, se procedió a dejar una programación del tipo de control del airflow network con un valor de "0", un valor de "0" hace que cada abertura en el edificio sea controlada según las condiciones de la zona en la que

se ubica, permitiendo un mayor control de la ventilación natural sobre todo para evitar que interfiriese con el sistema de climatización del edificio.

Tabla 19: Impacto del Uso de la Ventilación Natural en el Consumo Energético. (Fuente: Elaboración Propia.)

| Consumo Energético Modelo Base (kWh/m²-año) | Paso 1: Consumo Energético Empleando Ventilación Natural (kWh/m²-año) | % de Mejora Respecto al Modelo Base |
|---|---|--|
| 285.41 | 258.4 | 9.46 |

La Tabla 19 muestra que, para el caso analizado, emplear ventilación natural ayuda a disminuir en un 9.46% el consumo energético del edificio. A pesar de ello, el nuevo número de horas en disconfort adentro del edificio es de 1992.89, representando un total del 22.75% de horas anuales, quedando por afuera del estándar de confort de la ASHRAE 55, en el paso 5 se deberá de ajustar el set point de temperatura del edificio para volver a tener al edificio en un nivel aceptable de horas de disconfort.

5.2.2 Paso 2: Estrategias Activas - Eficiencia Energética de los Equipos y Luminarias

La mejora de las estrategias activas, en las simulaciones, consiste en simular el reemplazo de los componentes del sistema de luminarias o de los equipos eléctricos por equipos y luminarias de mayor eficiencia, para cumplir con los estándares listados. Esto ocasiona una reducción en la carga de enfriamiento del edificio, así como una reducción en la carga de iluminación y cargas misceláneas, contribuyendo de esta forma a disminuir el consumo energético del edificio.

Tabla 20 - Valores Estandarizados de Consumos Energéticos por Iluminación y Cargas Misceláneas. (Fuente: Elaboración Propia.)

| Zona | Iluminancia Caso Base (Lux) | Iluminancia según IESNA (Lux) | Densidad de Potencia Luminosa Caso Base (W/m ²) | Densidad de Potencia Luminosa según IESNA (W/m ²) | Densidad de Potencia Caso Base (W/m ²) | Densidad de Potencia según ASHRAE (W/m ²) |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|---|---|--|---|
| Oficina General | 400 | 300 | 7.5 | 4.52 | 11.77 | 5.83 |
| Recepción | 400 | 200 | 7.5 | 8.29 | 11.77 | 3.67 |
| Sala de Reuniones | 400 | 300 | 7.5 | 8.29 | 11.77 | 3.67 |
| Cafetería | 400 | 200 | 7.5 | 5.27 | 11.77 | N/A |
| Lobby | 400 | 200 | 7.5 | 3.66 | 11.77 | N/A |
| Sala Maquinas | 400 | 200 | 7.5 | 4.52 | 11.77 | N/A |
| Escaleras | 400 | 50 | 7.5 | 5.27 | 11.77 | N/A |
| Oficina 5 | 400 | 300 | 7.5 | 4.52 | 11.77 | 5.83 |
| Oficina 4 | 400 | 300 | 7.5 | 4.52 | 11.77 | 5.83 |
| Oficina 3 | 400 | 300 | 7.5 | 4.52 | 11.77 | 5.83 |
| Oficina 2 | 400 | 300 | 7.5 | 4.52 | 11.77 | 5.83 |
| Oficina 1 | 400 | 300 | 7.5 | 4.52 | 11.77 | 5.83 |
| Sanitario 1 | 400 | 100 | 7.5 | 5.49 | 11.77 | N/A |
| Sanitario 2 | 400 | 100 | 7.5 | 5.49 | 11.77 | N/A |
| Dirección | 400 | 300 | 7.5 | 4.52 | 11.77 | 5.83 |
| Oficinas Abiertas | 400 | 300 | 7.5 | 3.33 | 11.77 | 3.67 |

La Tabla 20 resume las nuevas configuraciones utilizadas en el modelo para simular las disminuciones de consumos energéticos que vienen dadas por el uso de equipo más eficientes en el sistema de luminarias o en el de cargas misceláneas. La tabla fue construida

utilizando como referencia el IESNA Lighting Handbook versión 2021, utilizando el método de “Space by Space” para las columnas de Light Level y Lightning Power Density, mientras que la referencia para la columna de Power Density fue el ASHRAE Handbook 2021. Estos nuevos valores estandarizados permitieron modelar de mejorar el desempeño del edificio en el que todas sus áreas requerían en promedio 400 Lux de iluminación, una densidad de carga o potencia de iluminación de 7.5 W/m² y tenían una densidad de carga o potencia en todas sus zonas de 11.77 W/m².

Tabla 21: Reducción del Consumo Energético Entre Paso 1 y Paso 2. (Fuente: Elaboración Propia.)

| Consumo Energético Modelo Paso 1 (kWh/m2-anual) | Paso 2: Consumo Energético Empleando Estándares de Eficiencia (kWh/m2-anual) | % de Mejora Respecto al Paso Anterior |
|--|---|--|
| 258.4 | 195.62 | 24.30 |

La Tabla 21 resume la reducción en el consumo energético del edificio al haberle aplicado el paso 2 de la metodología, reduciendo su consumo energético en un 24.3% respecto al edificio resultante del paso 1 que tenía un consumo anual de 258.4 kWh/m² y teniendo después del paso 2 un nuevo consumo de 195.62 kWh/m². En la simulación del paso 2, hay espacios del edificio que aumentaron su potencia de iluminación, como en el caso de las salas de reuniones y la recepción, esto con la finalidad de apegar al modelo a los estándares internacionales propios de su zona climática, este aumento se contrarresta con la disminución de la carga de iluminación del resto de zonas del edificio.

5.2.3 Paso 3: Simulaciones Paramétricas del Acristalamiento del Edificio

Esta etapa de la metodología para el retrofit energético consistió en la elaboración de 27 simulaciones diferentes, utilizando el método de las simulaciones paramétricas parciales para evaluar el impacto de cada variable en el consumo energético del edificio resultante del paso 2 del retrofit.

Tabla 22 - Variables Paramétricas Parciales del Acristalamiento. (Fuente: Elaboración Propia).

| Variables Paramétricas Simuladas en el Acristalamiento | | | | | | | |
|--|--|------------------|--|-------------------------|--|---------------------|--|
| Acristalamiento | | Cortina Exterior | | Lamas (Building Shades) | | Aleros Laterales | |
| Tipo | Consumo Energético (kWh/m ² -anual) | Tipo | Consumo Energético (kWh/m ² -anual) | Tipo | Consumo Energético (kWh/m ² -anual) | Tipo | Consumo Energético (kWh/m ² -anual) |
| Absorbente | 176.79 | Ts15-Tv10 | 169.24 | AS 15 | 194.19 | Laterales de 30 cm | 186.44 |
| Reflectante | 171.78 | Ts20-Tv15 | 171.31 | AS 30 | 194.41 | Laterales de 40 cm | 182.62 |
| Absorbente-Reflectante | 158.49 | Ts25-Tv20 | 173.28 | AS 45 | 194.55 | Laterales de 50 cm | 179.64 |
| Bajo Emisivo (Low E) | 182.9 | Ts30-Tv25 | 175.27 | AS 60 | 194.94 | Laterales de 60 cm | 176.2 |
| Espectral Selectivo | 173.54 | Ts35-Tv30 | 177.11 | AS 75 | 195.32 | Laterales de 70 cm | 173.1 |
| Electrocromico | 167.86 | Ts40-Tv35 | 182.24 | AS30-Angulo Regulable | 165.42 | Laterales de 80 cm | 170.64 |
| - | - | Ts45-Tv40 | 180.57 | - | - | Laterales de 90 cm | 168.4 |
| - | - | - | - | - | - | Laterales de 100 cm | 166.52 |

La Tabla 22 resume el resultado de las simulaciones paramétricas realizadas al modelo resultante del paso 2, se simularon 6 acristalamientos diferentes, 7 tipos de cortina exterior, 6 tipos de lamas y 8 tipos de aleros laterales, que juntas suman un total de 27 simulaciones, de las cuales se eligió únicamente la opción que más reducía el consumo energético del edificio respecto al modelo inicial que era el que resultó del paso 2, siguiendo la definición de simulación paramétrica parcial que indica que se deberán simular todas las opciones y elegir únicamente la mejor sin considerar su combinación con el resto de opciones posibles. El resultado final, evaluando grupo por grupo de variable del acristalamiento, consistió en un edificio con acristalamiento absorbente reflectante, el uso de lamas As30 de ángulo regulable y aleros laterales de 100 cm. En el caso del acristalamiento, este se consideró como uno de doble capa, mientras que, en el caso de las lamas, como se les conoce en España a las Building Shades, corresponde a lamas con un largo de 30 cm y ángulo regulable según el nivel de iluminación requerido en la zona que afecta la ventana. Se descartaron las cortinas exteriores debido a que las lamas demostraron ser más eficientes y ambas variables ocuparían el mismo espacio físico en el edificio. El resumen de los resultados se puede ver en la Tabla 23.

Tabla 23 - Simulación paramétrica parcial del acristalamiento. (Fuente: elaboración propia.)

| Configuración del Acristalamiento | Consumo Energético Modelo Paso 2 (kWh/m² anual) | Paso 3: Simulación Paramétrica del Acristalamiento (kWh/m² anual) | % de Mejora Acumulada Respecto al Paso Anterior |
|---|---|---|--|
| Tipo de Vidrio: Absorbente Reflectante | 195.62 | 149.64 | 23.5 |
| Tipo de Lama: As30 de Angulo Regulable | | | |
| Tipo de Alero Lateral: 100 cm | | | |

La Tabla 23 resume el resultado de la simulación energética del edificio, al cual luego de aplicarle las mejoras del paso 2 del retrofit se le aplicaron las mejoras del paso 3, pasando de un consumo de 195.62 kWh/m² anual a 149.64 kWh/m² anual, lo que equivale a 23.5% de reducción en el consumo energético, siendo una mejora en el desempeño del edificio.

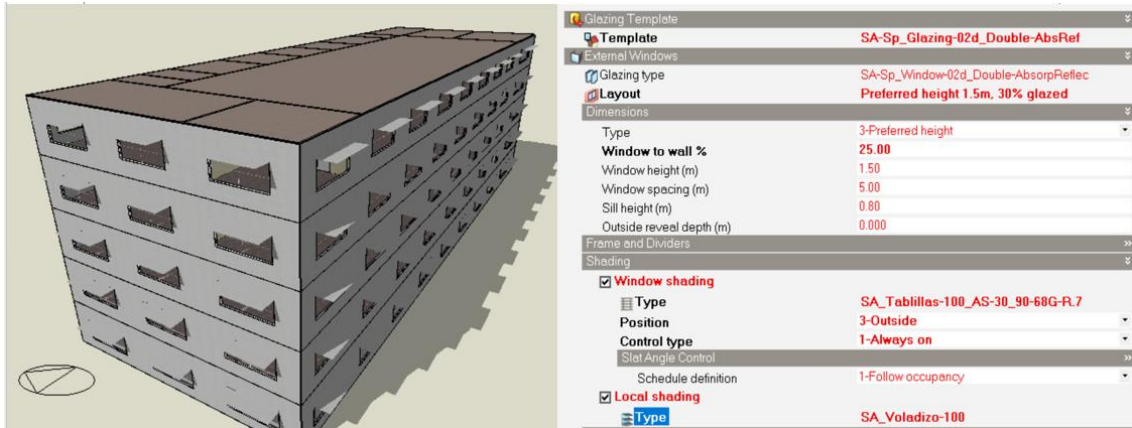


Figura 34: Resultado Final del Edificio Luego del Paso 3 (Fuente: Elaboración Propia)

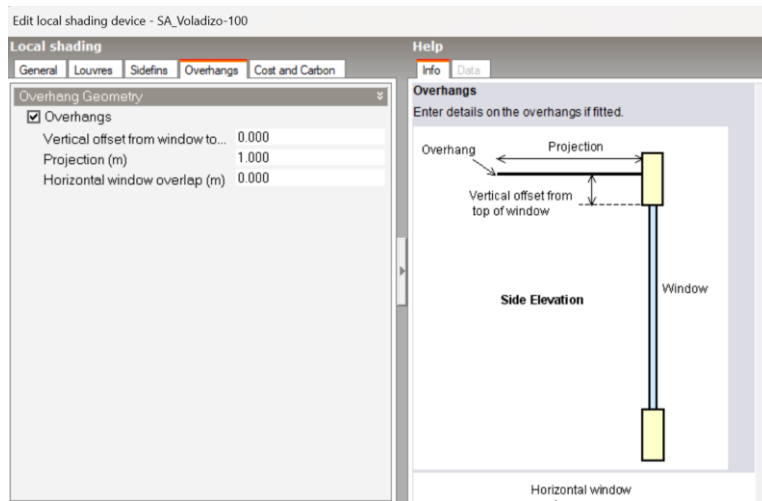


Figura 35: Esquema de Alero Lateral Utilizado (Fuente: Elaboración Propia)

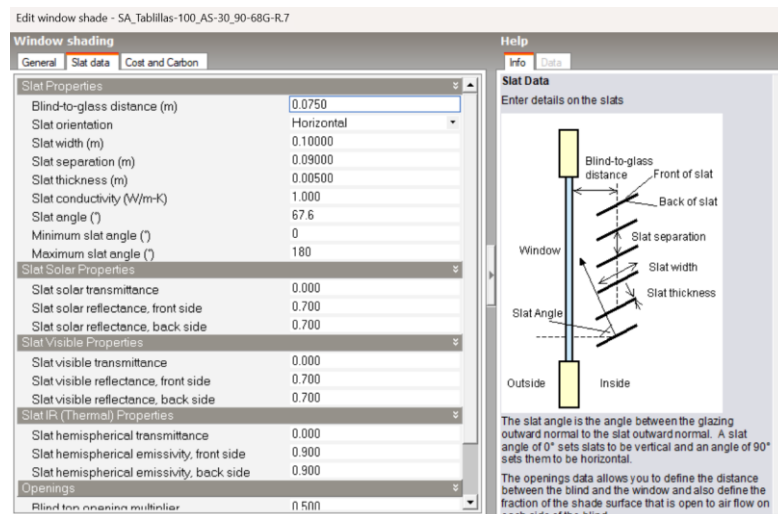


Figura 36: Esquema de Lamas (Building Shades) Utilizadas (Fuente: Elaboración Propia)

La Figura 34 ilustra el aspecto del edificio luego del paso 3 del retrofit así como la configuración utilizada para colocarle los elementos elegidos en este paso 3 para la modificación de sus ventanas, no obstante Design Builder tiene sus limitaciones al momento de mostrar en detalle las modificaciones arquitectónicas realizadas al edificio, como la adición de aleros y lamas (building shades). En la Figura 35 se muestra el esquema del alero que se le ha colocado al edificio, mientras que en la Figura 36 se muestra el esquema de las lamas colocadas al edificio, dichas lamas se simularon como elementos que se encuentran en el exterior de la ventana, como muestra la configuración de la Figura 36.

5.2.4 Paso 4: Estrategias activas – Eficiencia del Aire Acondicionado

En esta sección se procedió a evaluar el impacto de la eficiencia del sistema de aire acondicionado en el desempeño energético del edificio que ha sido modelado bajo el concepto de “modelo simple”, en el que Design Builder calcula una estimación del tamaño que debería tener el edificio según las cargas térmicas, sin necesidad de conocer en detalle todas las especificaciones del sistema. Medidas como alterar el sistema de aire acondicionado dentro de un retrofit deben tomarse después de haber reducido las cargas de iluminación, cargas misceláneas y el empleo de la ventilación natural según la “Advanced Energy Retrofit Guide” dado que estas acciones reducen el tamaño del sistema HVAC requerido en el edificio (U.S. Department of Energy, 2011).

Luego de haber reducido las cargas térmicas correspondientes a las cargas misceláneas y de iluminación del edificio, así como haber reducido las cargas térmicas por la irradiación proveniente de las ventanas, se utilizó un mejor COP, que es el indicador de eficiencia del sistema de climatización usado en DesignBuilder.

Como referencia, para conocer qué eficiencia utilizar como valor recomendado, se utilizó la tabla 5-20 de la guía “Achieving Zero Energy: Advanced Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings” a donde se recomienda una eficiencia mínima con un SEER de 15, que traducido a su valor equivalente COP es de 3.61, se eligió un COP de 4 para el modelo simulado.

Tabla 24 - Mejora en la eficiencia del sistema de aire acondicionado. (Fuente: elaboración propia.)

| Configuración del Acristalamiento | Consumo Energético Modelo Paso 3 (kWh/m ² anual) | Paso 4: Mejora de la Eficiencia del Sistema de Aire Acondicionado (kWh/m ² anual) | % de Mejora Respecto al Paso Anterior |
|--|---|--|---------------------------------------|
| Tipo de Vidrio: Absorbente Reflectante | 149.64 | 55.24 | 63 |
| Tipo de Lama: As30 de Angulo Regulable | | | |
| Tipo de Alero Lateral: 100 cm | | | |

La Tabla 24 muestra un porcentaje de mejora del 63% respecto al modelo proveniente del paso 3 de la metodología, con el nuevo consumo energético de 55.24 kWh/m² anual, el edificio tiene un rendimiento menor al de un edificio del tipo oficina de cero energía neta para la zona climática 1A, que es de 73.82 kWh/m² anuales.

5.2.5 Optimización de la Envolvente y Set Point de Temperatura

En los edificios existentes, se requiere de una inversión monetaria significativa, además de asegurar que estructuralmente el edificio es apto para aplicar una capa de insulación en su exterior o aplicar materiales para modificar su masa térmica. Adicionalmente, se tiene como referencia la “Advanced Energy Retrofit Guide” que recomienda antes de modificar la envolvente del edificio, modificar las infiltraciones de éste y su desempeño térmico (U.S. Department of Energy, 2011). Se sabe que las infiltraciones del modelo ya están estandarizadas con un valor de 0.25 ac/h, el desempeño térmico de las ventanas fue modificado añadiendo dispositivos de sombreamiento y cambio de tipos de vidrio. En este último paso, se realizó como paso previo a la optimización un análisis de sensibilidad para poder evaluar el impacto de la masa térmica, valor U del techo y de las paredes y el valor de configuración del aire acondicionado y su impacto en el consumo energético del edificio y en su confort térmico. Es necesario realizar la optimización mediante algoritmos genéticos con Design Builder, utilizando el menor número de variables discretas posibles tanto para acelerar la simulación como para garantizar su convergencia, en el problema analizado los diferentes tipos de pared, techo e masa térmica representaban variables discretas en la simulación, para ello el análisis de sensibilidad tiene la función de evaluar previamente el comportamiento del modelo ante cada variable de forma individual, ayudando a elegir los mejores ajustes del modelo al momento de realizar la optimización.

Como se definió en los objetivos de este trabajo, el edificio será optimizado, de tal manera que cumpla con los requerimientos necesarios para lograr la cero energía neta, pero también cumpliendo con los requerimientos para cumplir los estándares de confort térmico de la ASHRAE 55 versión 2010 para edificios que trabajan con ventilación mixta (climatización mecánica+ventilación natural), por lo que se realizó un análisis de sensibilidad considerando únicamente el comportamiento energético y otro considerando únicamente el comportamiento del confort térmico, posteriormente se interceptaron los resultados de ambos análisis para encontrar la sensibilidad de las variables dependientes analizadas (consumo energético y confort térmico) frente a las variables independientes analizadas. Fue importante que en ambos análisis de sensibilidad se repitieran las mismas variables independientes, cambiando únicamente las variables dependientes como se explica a continuación, permitiendo obtener resultados concluyentes.

5.2.5.1 Análisis de Sensibilidad

Se hizo un análisis de sensibilidad, con el objetivo de identificar las variables de diseño, que tienen más impacto sobre las variables objetivo del estudio. Se consideró como variables dependientes de este análisis, el desconfort térmico y el consumo energético total. Las variables independientes de los modelos son el aislamiento del techo, aislamiento para la pared y la masa térmica. Estas variables se distribuyen de forma discreta, es decir que se evaluó una serie de valores puntuales, en un rango definido. adicional a estas, se consideró la temperatura de enfriamiento de lugar (Set Point de Temperatura), con la diferencia que la distribución de la misma en el modelo se consideró bajo una curva normal, en un rango de 16 °C a 28 °C como se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25. Variables Consideradas en el Análisis de Sensibilidad. (Fuente: Elaboración Propia.)

| Categoría de Variable | Variable | Unidades | Categoría de Distribución | Curva de Distribución | Parámetros de Distribución | Tipo de Variable |
|-----------------------|--------------------------------|----------|---------------------------|-----------------------|--|------------------|
| Independiente | Roof Insulation | W/m2-K | Discreta | Uniforme (Discreta) | -Energy Code (U=0.34) -Typical Ref. (U=0.346) -Uninsulated (U=1.54) | Nominal |
| | Walls Insulation | W/m2-K | Discreta | Uniforme (Discreta) | -Energy Code (U=0.251) -Typical Ref (U=0.351) -Uninsolated (U=2.071) | Nominal |
| | Thermal Mass | - | Discreta | Uniforme (Discreta) | .-Light -Medium | Nominal |
| | Temperature Setpoint | °C | Continua | Curva Normal | Min: 16 Max: 28 | Escalar |
| Dependiente | Discomfort ASHRAE 55 (all clo) | h | Continua | Curva Normal | Estimado | Escalar |
| | Total Energy Site | kW/m2/yr | Continua | Curva Normal | Estimado | Escalar |

Se utilizó el módulo de análisis de sensibilidad de DesignBuilder para obtener los datos para un análisis de sensibilidad más detallado que el que proporciona el programa que se basa únicamente en el coeficiente de confiabilidad R^2 para esto, se decidió tomar 200 muestras (simulaciones) para el análisis. Se recomienda utilizar al menos 10 veces el número de variables independientes del modelo (40 para este análisis), no obstante, se incluyeron más datos para mejorar la potencia del modelo. El método seleccionado para el muestreo fue el cubo latino (LHS).

El cubo latino es un método de muestreo que ofrece una forma sistemática y eficiente de organizar y seleccionar muestras. Se le considera una extensión tridimensional del cuadrado latino. En un cuadrado latino de orden η , cada fila y cada columna contiene exactamente una vez cada uno de los números del 1 al η . Un cubo latino, por tanto, es una

disposición tridimensional donde cada "capa" bidimensional del cubo también es un cuadrado latino. (Colbourn & Dinitz, 2007)

En el contexto del diseño experimental, los cubos latinos se utilizan para organizar los tratamientos de manera que se controle la variabilidad a lo largo de tres dimensiones. Por ejemplo, en un experimento que involucra tres factores (como tiempo, lugar y condición), un cubo latino permite que cada combinación de niveles de los factores sea representada exactamente una vez. Esto ayuda a aislar el efecto de cada factor y a minimizar la influencia de factores de confusión. En estudios con múltiples factores, esta disposición permite evaluar las interacciones entre factores de manera eficiente y precisa. (Colbourn & Dinitz, 2007)

A partir de las simulaciones generadas, se elaboró una regresión múltiple para la evaluación de la influencia de las variables en los resultados. Un modelo de regresión lineal múltiple es una herramienta estadística versátil para evaluar las relaciones entre una variable dependiente continua y múltiples predictores. Estos predictores pueden ser variables continuas, categóricas o derivadas, permitiendo así la incorporación de relaciones no lineales en el análisis. El modelo es denominado lineal porque cada predictor se suma y se multiplica por un coeficiente estimado, incluyendo un término constante (intercepto). La fórmula general del modelo es $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon$, donde $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ son los parámetros y ϵ es el término de error. Estos coeficientes indican la magnitud del efecto de las variables independientes sobre la dependiente y. El término β_0 es constante y representa el error del modelo. (Baños, Torrado Fonseca, & Reguant Alvarez, 2018)

Los coeficientes de la regresión se estiman a partir de los datos de la muestra para las variables del modelo. Este proceso de estimación sigue el criterio de mínimos cuadrados, que minimiza la suma de los cuadrados de los residuos, logrando así la recta de regresión que mejor se ajusta a los datos observados. La expresión matemática para este criterio es $\min \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$. Para la estimación de los coeficientes, se utiliza la expresión $y = X\beta + \epsilon$ donde X es la matriz de predictores. La suma del cuadrado del error se representa como $SCE = \epsilon^T \epsilon = (y - X\beta)^T (y - X\beta)$, y al derivar con respecto a β e igualar a cero, se obtiene $\beta = (X^T X)^{-1} X^T y$ (siempre que la matriz $X^T X$ tenga una inversa), lo cual implica que los predictores serán linealmente independientes. (Baños, Torrado Fonseca, & Reguant Alvarez, 2018)

El modelo ajustado de regresión se expresa como $y=X\beta$, y el vector de valores ajustados es $\hat{y}=X\hat{\beta}=Hy$, donde H es la matriz sombrero. Los residuales se calculan como $e=y-\hat{y}$, y los coeficientes de apalancamiento h_i se encuentran en la diagonal de la matriz H. El coeficiente de determinación múltiple R^2 mide la intensidad de la relación entre un conjunto de variables independientes y una variable dependiente. Se calcula a partir de la relación entre la suma de cuadrados de la regresión (SCR) y la suma total de cuadrados (STC), expresada como $STC=SCR+SCE$. (Baños, Torrado Fonseca, & Reguant Alvarez, 2018)

El modelo de regresión lineal múltiple se basa en varios supuestos: linealidad, independencia de los errores, homocedasticidad (varianza constante de los errores), normalidad de los errores y no colinealidad entre las variables independientes. Para verificar la significancia del modelo y de los coeficientes estimados se utilizan las pruebas F y t. La prueba F determina si existe una relación significativa entre la variable dependiente y el conjunto de variables independientes, mientras que la prueba t evalúa la significancia individual de cada coeficiente del modelo.

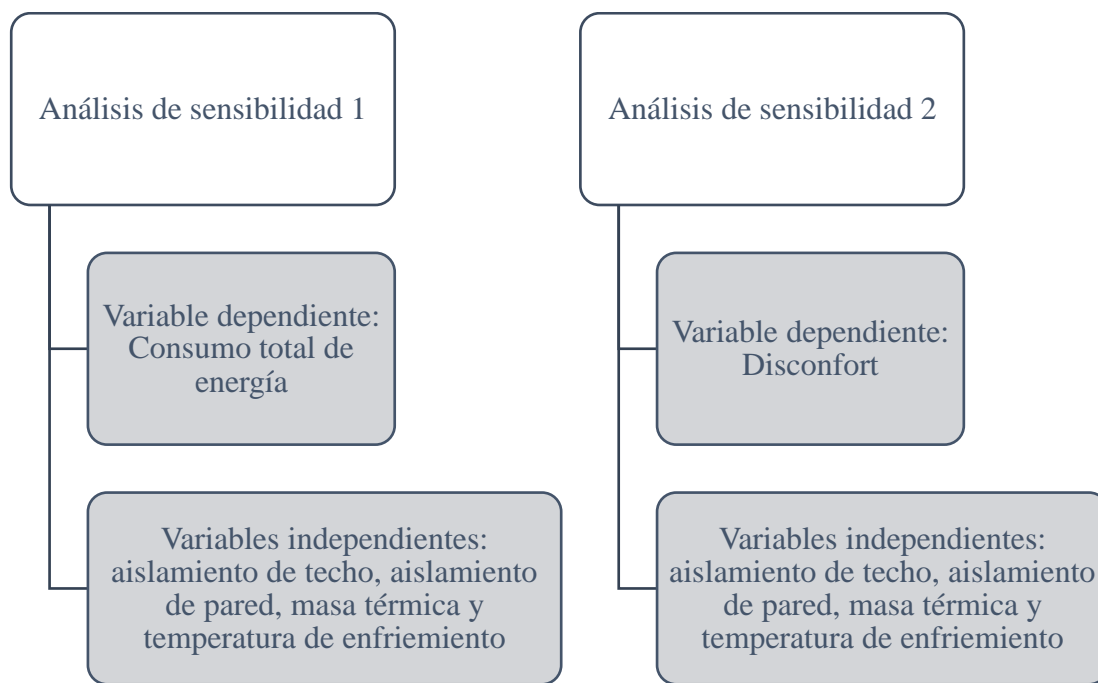


Figura 37: Resumen de los Modelos Considerados en el Análisis de Sensibilidad. (Fuente: Elaboración Propia.)

El análisis de residuales es crucial para verificar los supuestos del modelo. Los residuos deben distribuirse normalmente y no mostrar patrones sistemáticos. Las herramientas

gráficas, como los gráficos de dispersión de los residuales y los gráficos P-P, ayudan a evaluar la normalidad y la homocedasticidad de los residuos.

En el análisis de datos, se seleccionan variables dependientes e independientes pertinentes. En este caso, se estudió la demanda total del edificio en relación con los niveles de aislamiento de techo y paredes, la masa térmica y la temperatura configurada de enfriamiento. Asimismo, se hizo un segundo modelo, que toma como variable dependiente el desconfort térmico, y como variables independientes al mismo conjunto de variables del primer modelo como se muestran en la Tabla 25.

El software SPSS® de IBM facilita este análisis, permitiendo la interpretación de los coeficientes de regresión. La bondad de ajuste del modelo se evalúa a través del coeficiente de determinación ajustado R^2 y del estadístico F en el análisis de varianza (ANOVA), proporcionando una medida de qué tan bien el modelo explica la variabilidad de la variable dependiente. A continuación, se resumen los resultados principales de este análisis.

A. Modelo 1: Energía Total del Edificio

Se hizo un análisis de sensibilidad, tomando el consumo total del edificio como variable dependiente, y las variables aislamiento del techo, paredes y la masa térmica como independientes. Tal como se resume en la Tabla 25, se ha tomado en cuenta que la variable continua independiente es la temperatura de enfriamiento únicamente, mientras que el resto de variables independientes tienen una distribución discreta, y que no se encuentra balanceada en toda la muestra (es decir que no existe un mismo número de ensayos para cada una de las categorías de las variables independientes).

Se encontró que el consumo total de energía del sitio está influenciado principalmente por la temperatura de enfriamiento. Esta relación es, a su vez, inversa. Es decir que aumentar la temperatura de ajuste del punto de enfriamiento conduce a una disminución en el consumo total de energía del sitio. El aislamiento del techo, aislamiento de las paredes y la masa térmica no tienen una influencia notable en el consumo total de energía del sitio, por lo tanto, estos factores pueden ser ignorados en análisis posteriores del consumo total de energía del sitio para este modelo.

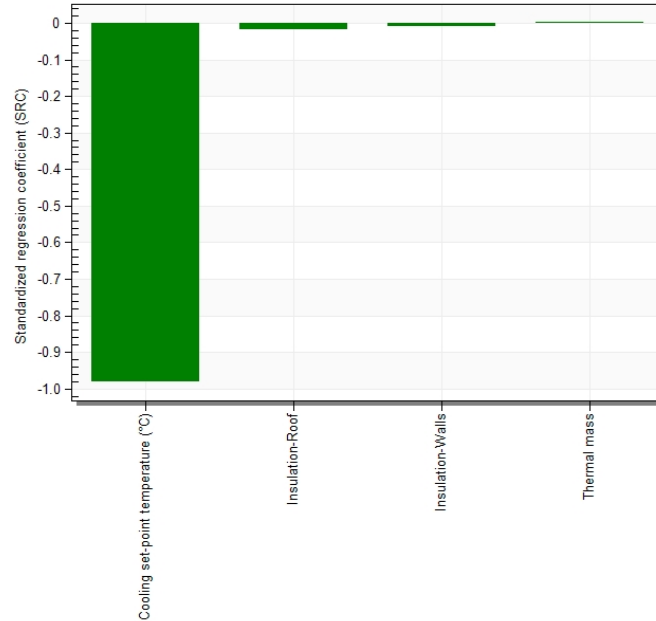


Figura 38: Resultados Globales del Modelo de Regresión Lineal: Consumo de Energía. (Fuente: Elaboración Propia.)

En la Figura 38 se observa que es la temperatura de enfriamiento la que se encarga de representar la mayor parte de la variabilidad de los datos. Es la que mayor influencia tiene sobre la variable dependiente. La bondad de ajuste del modelo, representada por el R2 es del 0.9643, es decir, el modelo es capaz de representar el 96.43% de la variabilidad de los datos, a un nivel de confianza del 95%. Este ajuste es bueno, no obstante, de las variables consideradas, únicamente la temperatura de enfriamiento resultó significativa.

Tabla 26 - Resumen de los Coeficientes de la Regresión. (Fuente: elaboración propia.)

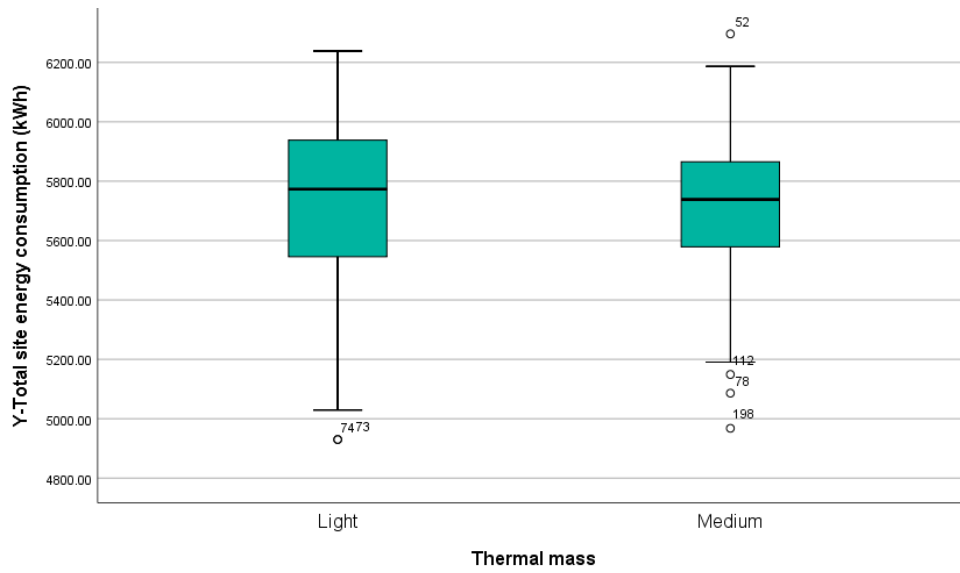
| Variable | Coeficiente (β) | Std. Reg. Coef. | Std. Error | P Value |
|---|-----------------|-----------------|------------|---------|
| Intercepto | 9085.5259 | 0.0000 | 46.9775 | 0.0000 |
| Cooling set-point temperature (°C) | -139.9816 | -0.9821 | 1.9102 | 0.0000 |
| Insulation-Roof (No Units) | -4.5446 | -0.0186 | 3.2830 | 0.1679 |
| Insulation-Walls (No Units) | -1.9688 | -0.0081 | 3.2922 | 0.5505 |
| Thermal mass (No Units) | 1.3983 | 0.0041 | 4.6130 | 0.7621 |

En el modelo de regresión lineal múltiple se interpreta cada coeficiente de la regresión como el cambio en la variable dependiente y , cuando el resto de variables independientes se mantienen constantes. Para corroborar la significancia estadística de cada una de las variables del modelo (y concluir sobre su influencia en la variable dependiente) se utiliza una prueba t para cada una de estas. La hipótesis nula en cada uno de estos casos es que el coeficiente estimador $b_i = 0$, la hipótesis alternativa, es que este es diferente de cero ($b_i \neq 0$).

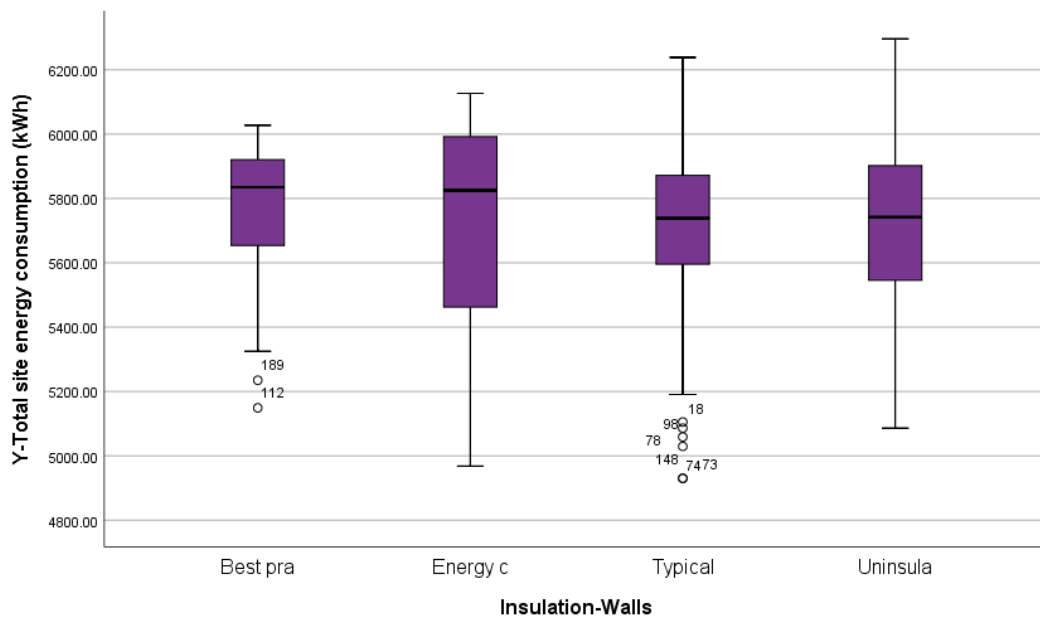
El criterio de rechazo para la hipótesis nula, es que el p -valor estimado para la variable, debe ser menor al nivel de significancia seleccionado para el estudio (p -valor < 0.05 en este caso, ya que se estimó un nivel de confianza del 95%). Para las variables de este modelo las únicas dos variables que cumplen con este criterio (concluyendo, por tanto, que son significativas) son el intercepto del modelo (un consumo de energía base), y la temperatura de enfriamiento seleccionada. El resto no aportan al modelo de forma significativa.

Sobre el valor de los coeficientes estandarizados, se observa que la variable de temperatura de enfriamiento, tiene una relación fuerte e inversamente proporcional con el consumo de energía total. Asimismo, la influencia o aporte del resto de variables es mínimo, y de carácter inversamente proporcional para la insulación de paredes y techo, y proporcional para la masa térmica.

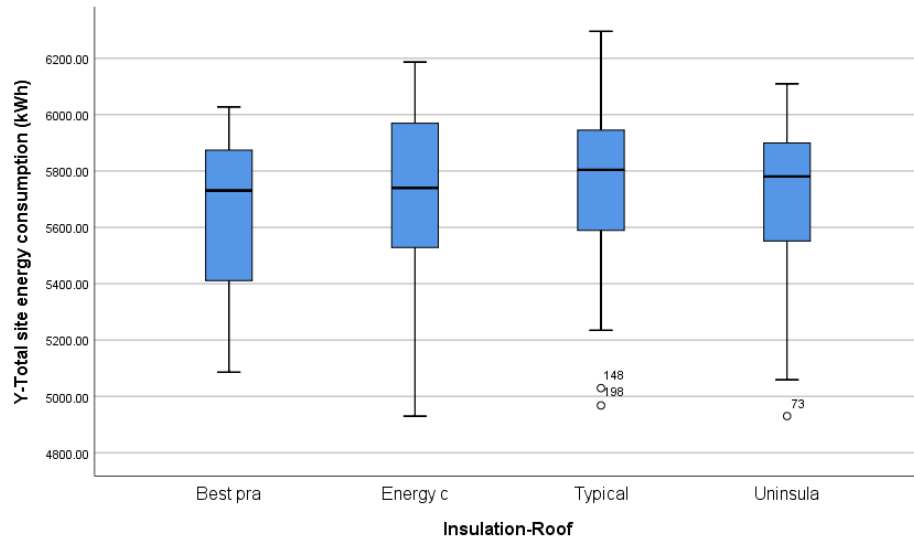
Ya que las variables incluidas en el modelo son categóricas para la insulación del techo y paredes, y la masa térmica, se hizo un análisis extra, con un modelo ANOVA simple, para cada una de las variables independientes. En dicho modelo tampoco se encontró que existan diferencias significativas entre los niveles de cada una de estas variables categóricas, y no se cumplen los supuestos del modelo. Esto puede ser debido a la distribución de la variable.



(a)



(b)



(c)

Figura 39: Diagrama de Cajas y Bigotes para las Variables Independientes del Análisis de Sensibilidad 1. (Fuente: Elaboración Propia.)

- (a) Masa térmica vs consumo total de energía.
- (b) Insulación de la pared vs consumo total de energía.
- (c) Insulación del techo vs consumo total de energía.

En la Figura 39 se observan los diagramas de cajas y bigotes de cada una de las variables independientes categóricas vs el consumo de energía total. Se puede apreciar que los rangos de respuesta para cada categoría de las variables independientes, en general, es amplio. A pesar de ello, no se observa claramente que una categoría tenga mayor impacto (incremente o disminuya el consumo medio de energía) de forma significativa.

Lo que sí se pudo apreciar es que para la insulación de la pared (b), aparentemente, las categorías de insulación típica, y la no insulación favorecen la reducción del consumo energético, mientras que para el aislamiento del techo (c) son las categorías de mejores prácticas y código de energía son las que permiten una reducción del consumo total de energía.

Con el uso del software Minitab 17® se pudo corroborar esto, al encontrar que todos los modelos presentan que no existe una diferencia significativa entre cada uno de los niveles de las categorías indicadas.

Tabla 27 - Resumen de Pruebas ANOVA por Niveles para las Variables Categóricas. (Fuente: Elaboración Propia.)

| Variable independiente | Categorías | Valor-p |
|---------------------------|---|---------|
| Masa térmica | Light, medium | 0.811 |
| Insulación de las paredes | Best practice; Energy code; Typical ref; Uninsulated | 0.809 |
| Insulación del techo | Best practice; Energy code; Typical ref; Uninsulated | 0.323 |

Como se resume en la Tabla 27, para todas las variables independientes categóricas el valor-p estimado es mayor a 0.05 (significancia), por lo que se acepta la hipótesis nula y se concluye que no existen diferencias significativas entre los niveles de aislamiento de techo y paredes, en torno al consumo de energía. Adicional, se hicieron pruebas de Tukey para analizar los pares en los diferentes niveles de las categorías, donde tampoco se encontró alguna diferencia significativa, que pruebe que alguna categoría ejerce más influencia sobre la variable dependiente.

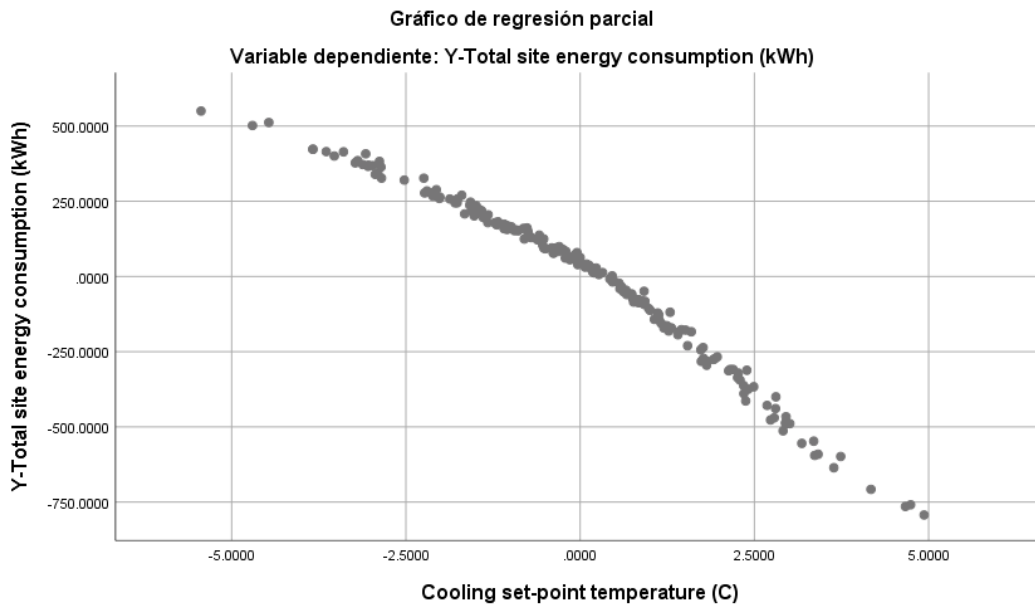
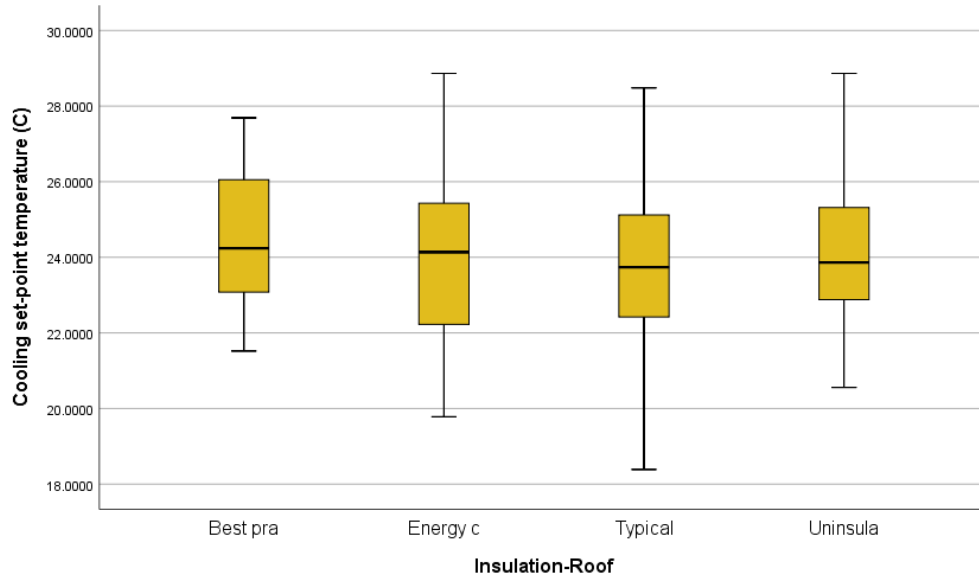
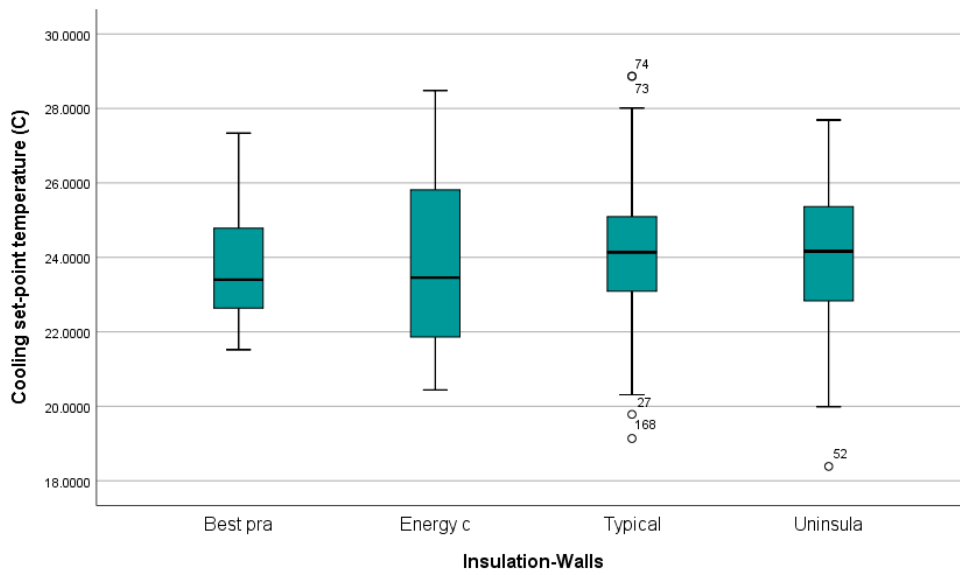


Figura 40: Gráfico de Regresión Parcial Entre Consumo Energético Total y el Set Point de Temperatura. (Fuente: Elaboración Propia.)

A pesar de ello, la temperatura de enfriamiento sí muestra una asociación fuerte con el consumo de energía, y, por tanto, resulta de interés evaluar la asociación entre las variables independientes categóricas, y la temperatura de enfriamiento.



(a)



(b)

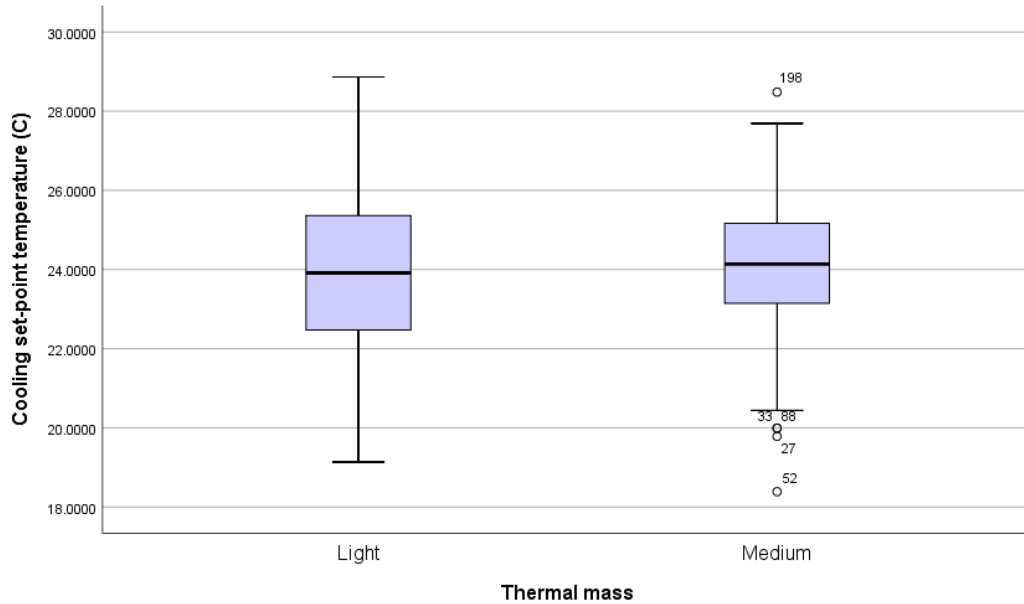


Figura 41: Influencia de los Niveles de las Variables Categóricas en la Temperatura de Enfriamiento. (Fuente: Elaboración Propia.)

(c)

- (a) Insulación de las paredes.
- (b) Insulación del techo.
- (c) Masa térmica.

En cuanto a esta asociación, en la Figura 41 se muestra como no parece haber un nivel que disminuya el consumo en el caso de la masa térmica, mientras que, para la insulación de las paredes, los niveles de mejor practica y código de energía favorecen una temperatura de enfriamiento más baja (que se traduce en un menor consumo de energía), y para el techo las categorías típica y código de energía favorecen una temperatura más baja. A pesar de ello, estas tendencias no son estadísticamente significativas en el análisis ANOVA (Tabla 28), y tampoco para las pruebas por pares de Tukey, para los niveles de las 3 variables independientes. Sí se observa un mejor ajuste del modelo en el sentido de que cumple con los supuestos, pero sin exhibir asociaciones significativas, a un nivel de confianza del 95%.

Tabla 28. Resultados análisis ANOVA tomando como variable dependiente la Temperatura de enfriamiento.
(Fuente: elaboración propia.)

| Variable independiente | Categorías | Valor-p |
|----------------------------------|---|----------------|
| Masa térmica | Light, medium | 0.740 |
| Insulación de las paredes | Best practice; Energy code; Typical ref; Uninsulated | 0.731 |
| Insulación del techo | Best practice; Energy code; Typical ref; Uninsulated | 0.326 |

Si bien estas asociaciones no son significativas a nivel estadístico, queda a criterio del diseñador la opción selectiva de aquel material aislante que mejor resultado le brinde a la hora del modelado final del edificio.

B. Modelo 2: Discomfort Térmico

De forma similar al modelo anterior, se realizó este análisis contemplando las mismas variables independientes y los niveles de cada una de estas (ver Tabla 25). Se encontró que el discomfort está más influenciado por la temperatura de ajuste del punto de enfriamiento. Es decir que Aumentar la temperatura de ajuste del punto de enfriamiento conduce a un aumento del malestar (toda la vestimenta). La masa térmica, la insulación de las paredes y la insulación del techo no tienen una influencia notable en el discomfort (toda la vestimenta), por lo tanto, estos factores pueden ser ignorados en análisis posteriores del discomfort (toda la vestimenta) para este modelo.

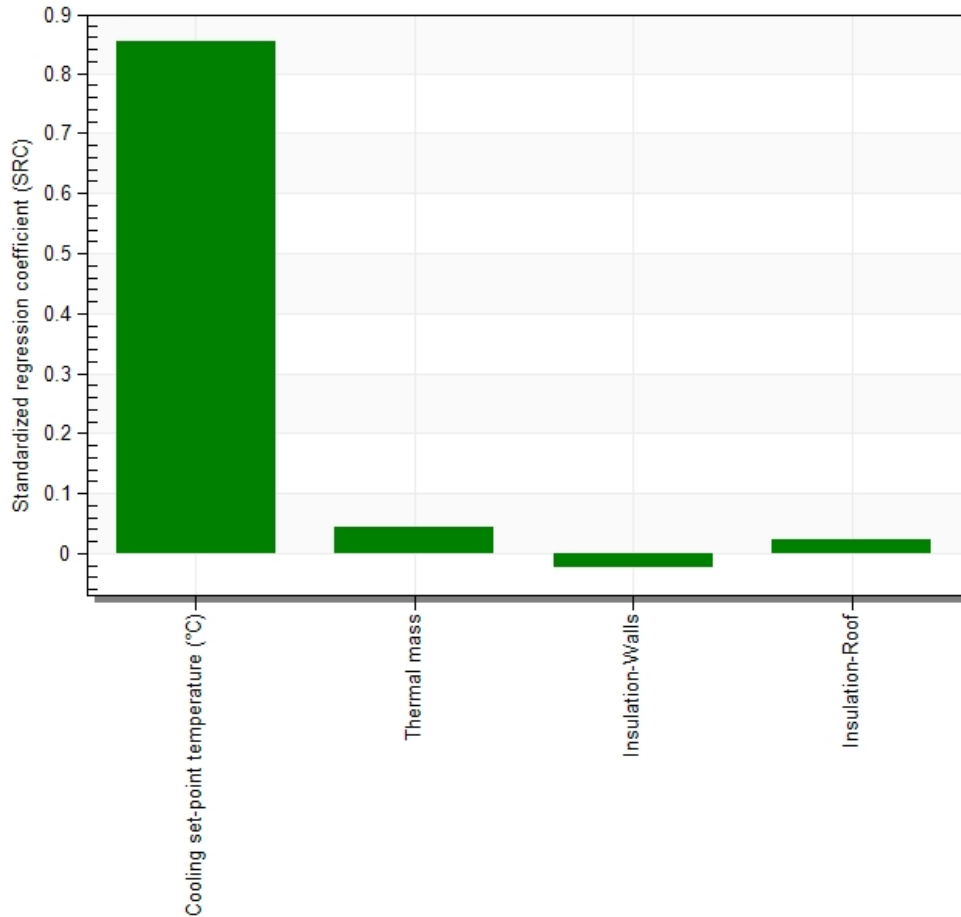


Figura 42: Resumen de Variables del Modelo de Sensibilidad No. 2. (Fuente: Elaboración Propia.)

En la Figura 42 se puede observar que es, de nuevo, la temperatura de enfriamiento seleccionada, la que explica buena parte de la variabilidad de los datos. El coeficiente de determinación ajustado (R^2) del modelo es de 0.7282, es decir que el modelo es capaz de explicar el 72.82% de la variabilidad de los datos, lo que implica que solo se puede explicar el disconfort de manera parcial, ya sea porque se necesitan más datos o porque existen otras variables que también influyen en el disconfort, pero no se tomaron en cuenta en el modelo.

Tabla 29. Coeficientes de la Regresión Múltiple Tomando Como V.D. la Temperatura de Enfriamiento.
(Fuente: Elaboración Propia.)

| Variable | Reg. Coef. | Std. Reg. Coef. | Std. Error | P Value |
|---|------------|-----------------|------------|---------|
| Intercept | -7.2396 | 0.0000 | 2.0067 | 0.0004 |
| Cooling set-point temperature (°C) | 1.8517 | 0.8545 | 0.0807 | 0.0000 |
| Thermal mass (No Units) | 0.2339 | 0.0447 | 0.1938 | 0.2289 |
| Insulation-Walls (No Units) | -0.0918 | -0.0246 | 0.1387 | 0.5090 |
| Insulation-Roof (No Units) | 0.0817 | 0.0219 | 0.1379 | 0.5543 |

En la Tabla 29 se resumen los coeficientes individuales de la regresión, donde se observa que únicamente el intercepto y la temperatura de enfriamiento tienen influencia sobre el desconfort (es decir, tienen un p-valor < 0.05 por lo que se acepta la hipótesis alternativa y el coeficiente es significativo).

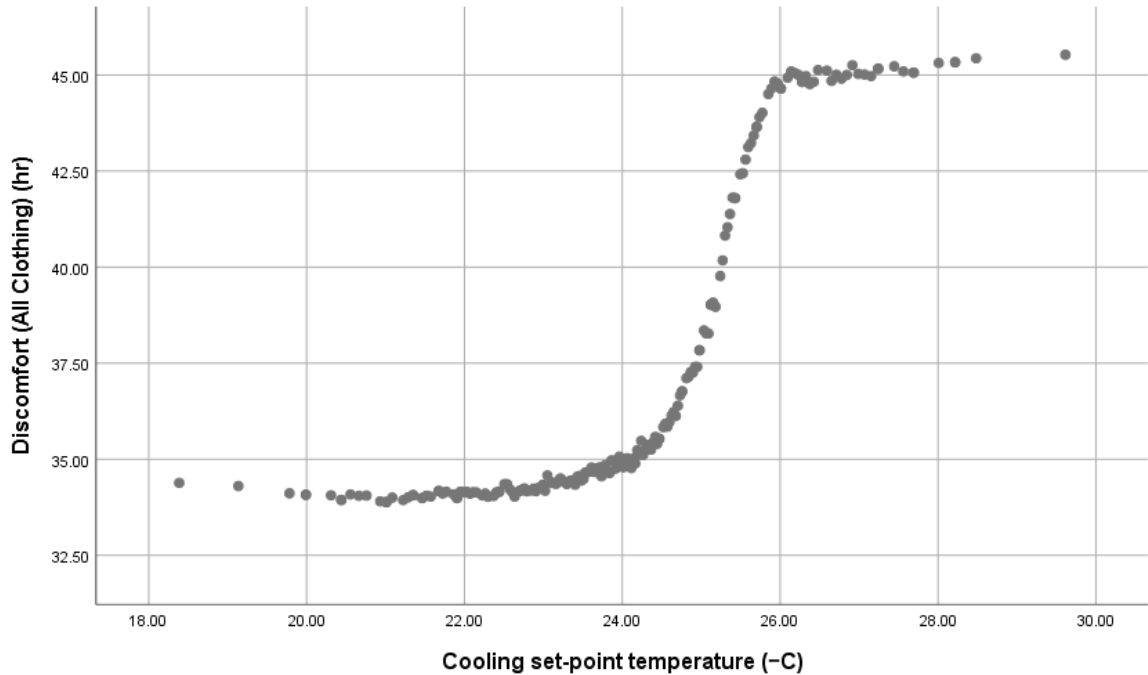
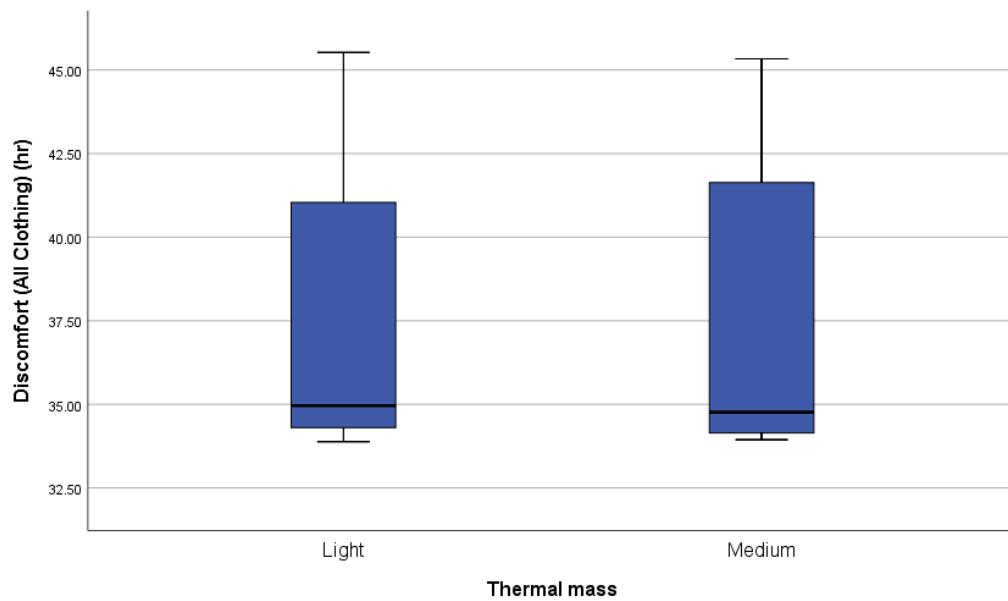
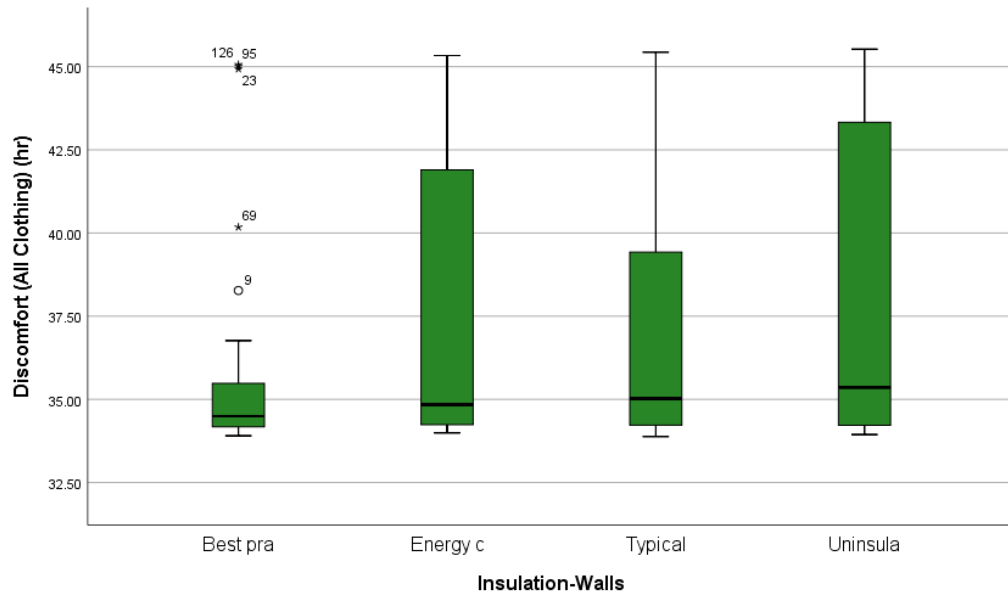


Figura 43: Relación Entre la Temperatura de Enfriamiento y el Desconfort Térmico (Fuente: Elaboración Propia)

Se volvió a elaborar el modelo usando los datos de las simulaciones y el software SPSS® de IBM para evaluar la influencia de las variables independiente en la bondad de ajuste del modelo, pero se obtuvo los mismos resultados, y se concluye que únicamente la temperatura de enfriamiento es significativa para el discomfort, mostrando una tendencia más bien polinómica, y a lo mejor es por esta razón que la bondad del ajuste no alcanza a representar toda la varianza (ver Figura 43).



(a)



(b)

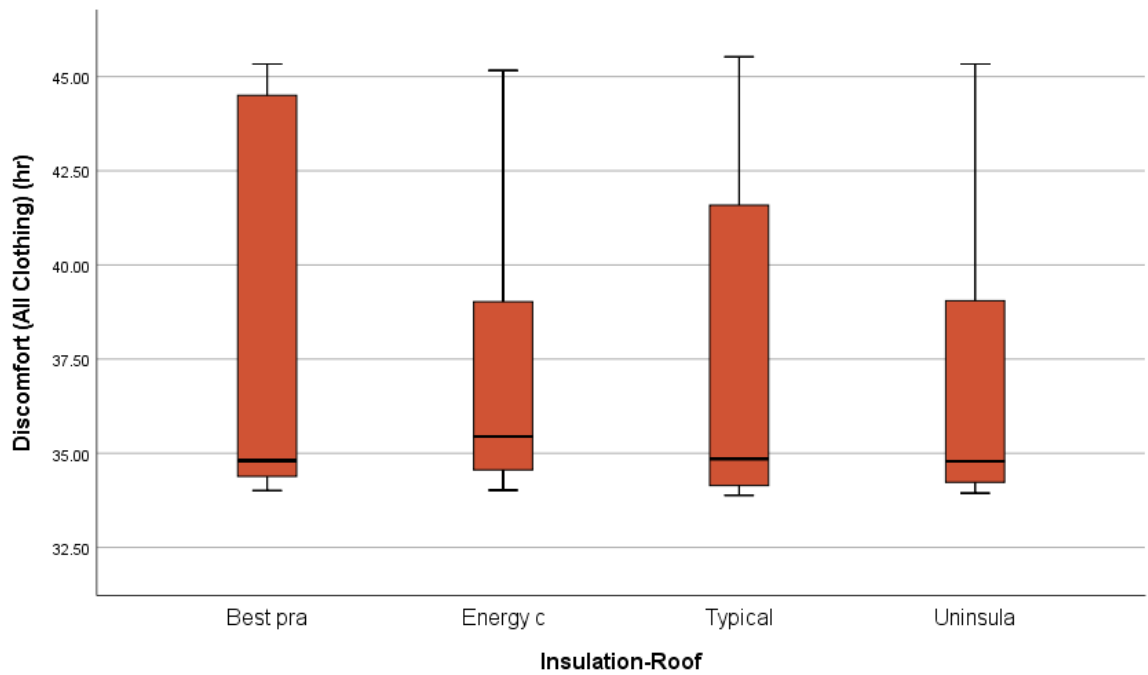


Figura 44: Diagrama de Cajas y Bigotes Tomando como Variable Dependiente el Discomfort. (a) Masa Térmica; (b) Aislamiento de la Pared; (c) Aislamiento del Techo. (Fuente: Elaboración Propia)

Para finalizar, se hizo un análisis ANOVA sobre las variables categóricas. En la Figura 44 se puede apreciar que tanto para los tipos de aislamiento de techo y pared, así como la masa térmica, no se observan categorías que favorezcan una reducción del discomfort, lo que soporta que su influencia sobre la misma no es significativa para este modelo. A pesar

de ello, es importante notar también que los valores de las medias se encuentran en los extremos del diagrama, sugiriendo que la distribución de los datos no es normal, y en este caso, parece ser que la distribución (frecuencias) de los ensayos no se encontró balanceada, es decir, que no se encuentra el mismo número de ensayo para todos los niveles de las categorías evaluadas, y esto podría influir en el grado de asociación de estos con su variable independiente.

Tabla 30. Resumen análisis ANOVA Tomando como Variable de Respuesta el Disconfort. (Fuente: Elaboración Propia)

| Variable Independiente | Categorías | Valor-p |
|----------------------------------|---|----------------|
| Masa térmica | Light, medium | 0.980 |
| Insulación de las paredes | Best practice; Energy code; Typical ref; Uninsulated | 0.357 |
| Insulación del techo | Best practice; Energy code; Typical ref; Uninsulated | 0.952 |

5.2.5.2 Optimización del Consumo Energético y Confort Térmico para Edificio del Tipo Oficina en el AMSS

Para la simulación de la optimización de las variables independientes set point de temperatura de enfriamiento, insulación del techo, insulación de las paredes y masa térmica, se realizó una simplificación para poder simular el edificio. Al tratarse de un edificio de 5 pisos con múltiples espacios en su interior, se realizó únicamente una simulación del quinto piso, que es el crítico porque recibe en su techo toda la radiación solar, para una semana de diseño en la época de verano que es la comprendida entre el 26 de Marzo y el 01 de Abril, siendo la semana más caliente según la base de datos climáticos utilizada. Posteriormente, los resultados de los valores óptimos para el quinto piso se le asignaron en una simulación energética posterior a todo el edificio.

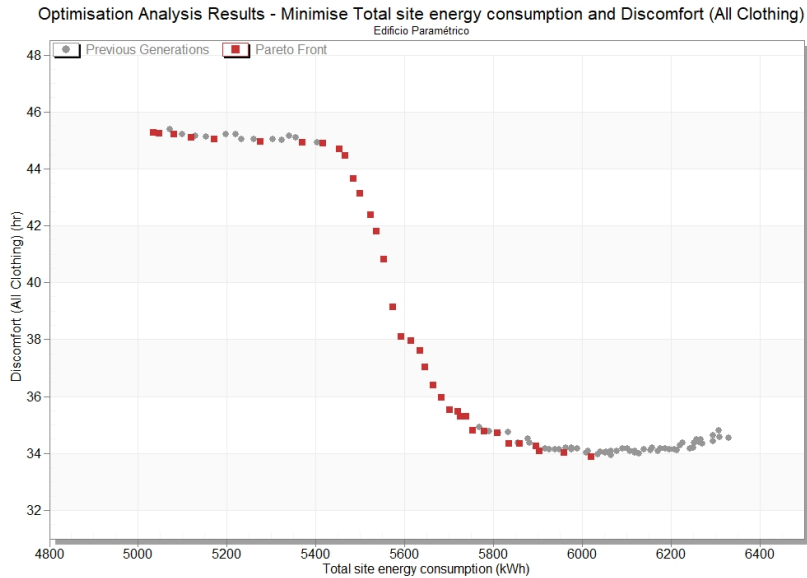


Figura 45: Gráfico de Pareto de la Optimización del Consumo Energético y Discomfort (Fuente: Elaboración Propia)

La Figura 45 representa el resultado del análisis de optimización mediante el método de algoritmos genéticos realizado por DesignBuilder, dicho análisis muestra que ambas variables dependientes, están fuertemente influenciadas únicamente por una variable independiente que es el set point de temperatura, por ello tiene una dispersión de datos casi imperceptible, siendo algo que ya se había predicho con los análisis de sensibilidad realizados anteriormente, se puede ver en el gráfico cómo al aumentar el consumo energético disminuye el discomfort, representando en ambos casos qué ocurre cuando se varía la temperatura del termostato, disminuye el discomfort mientras más se baja la temperatura pero aumenta el consumo energético total del edificio que está fuertemente influenciado por el consumo energético del aire acondicionado. El set point de temperatura predomina sobre el aislamiento del edificio o su inercia térmica en cuanto al consumo energético del edificio o su confort térmico. En este caso, la solución óptima para la cero energía neta, se encontró utilizando los siguientes criterios:

- Tener un porcentaje de horas de discomfort para todo el edificio, inferior al 20% para todo el año, que es el mínimo aceptable según el estándar de la ASHRAE 55 para edificios que trabajan con ventilación natural.
- Tener un consumo energético menor o igual a la generación fotovoltaica predicha, si se considera que se cubrirá el techo con paneles fotovoltaicos, la generación prevista es de 60.14 kWh/m²-Anuales como se explicará más adelante.

Tabla 31: Combinación Óptima de Envoltente y Set point (Fuente: Elaboración Propia)

| Iteración en la Optimización | Variable | Variable | Variable | Variable |
|------------------------------|--------------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------|
| | Set Point de Temperatura | Masa Térmica | Insulación de la Pared | Insulación del Techo |
| 9 | 24.2 | Media | Typical Reference (U=0.351) | Energy Code (U=0.341) |

Con los valores de la Tabla 31, el consumo energético es de 58.87 kWh/m² Anual, estando por debajo de la energía anual generada y el discomfort anual es del 19.48%, estando por debajo del máximo aceptable que es del 20%. Optimizando el diseño final en función de ambas variables dependientes.

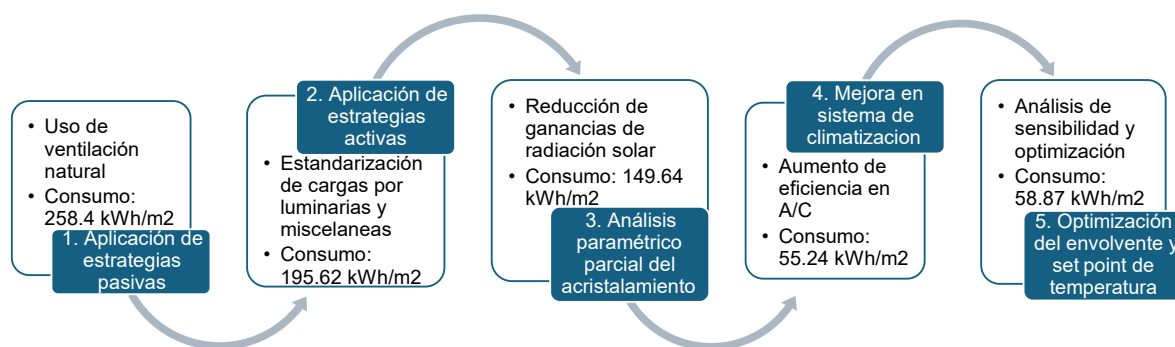


Figura 46: Retrofit Energético Realizado a Edificio de Oficina (Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 32: Resumen del Consumo Energético en Cada Fase del Retrofit Energético (Fuente: Elaboración Propia)

| Etapa del Retrofit | Consumo Energético (kWh/m ² -anual) |
|--------------------------------|---|
| Consumo Energético Base | 285.41 |
| Paso 1 del Retrofit | 258.4 |
| Paso 2 del Retrofit | 195.62 |
| Paso 3 del Retrofit | 149.64 |
| Paso 4 del Retrofit | 55.24 |
| Paso 5 del Retrofit | 58.87 |

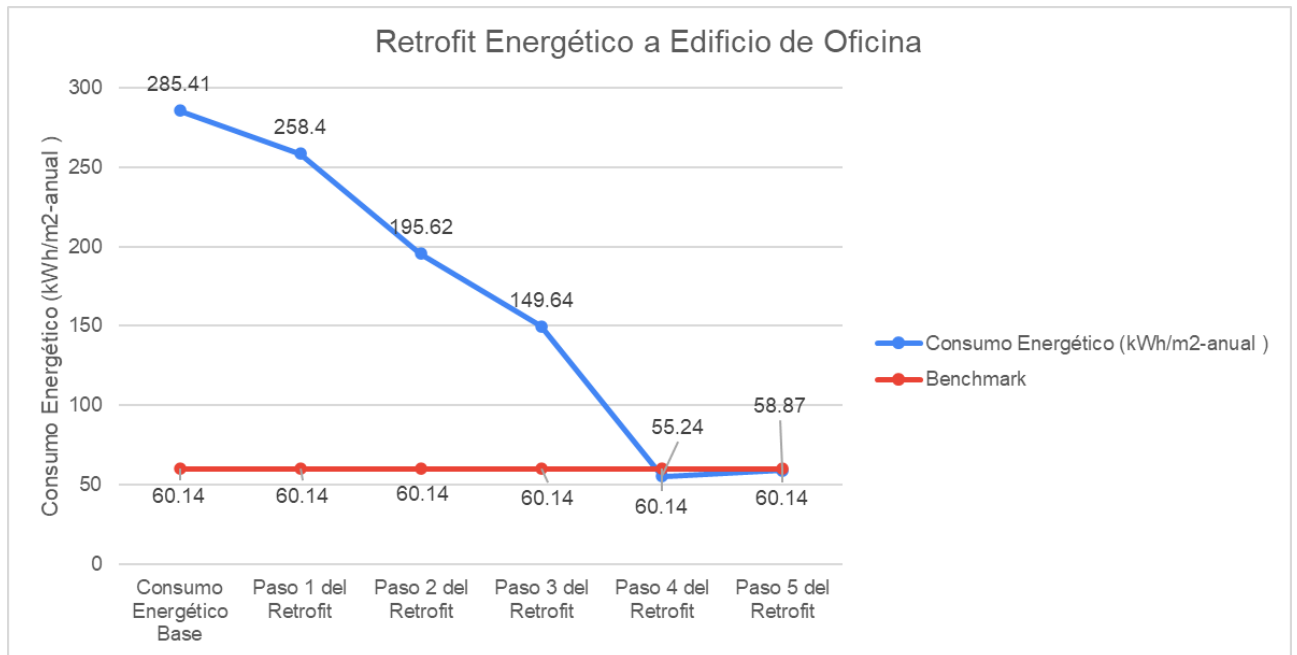


Figura 47: Comportamiento Energético del Edificio a Través del Retrofit (Fuente: Elaboración Propia)

La Figura 46 resume los pasos realizados en el retrofit energético realizado al edificio base, en el cual se aplicaron estrategias de arquitectura pasiva como el empleo de la ventilación natural para reducir la carga de enfriamiento, el uso de estrategias activas como el uso de equipos e iluminación de alta eficiencia energética, el uso de la mejor combinación de elementos para el acristalamiento para reducir la ganancia de radiación solar a través de las ventanas, estos primeros 3 pasos del retrofit redujeron además de las cargas misceláneas e iluminación, también la carga de enfriamiento del edificio permitiendo reducir su tamaño en el paso 4 y aumentar su eficiencia. Finalmente, en el paso 5 del retrofit se realizó un análisis de sensibilidad y una optimización mediante algoritmos genéticos para encontrar la mejor combinación entre la insulación de las paredes y techo, masa térmica y set point de temperatura para poder alcanzar la cero energía neta con el balance energético del edificio manteniendo el confort dentro de él en valores aceptables. La Figura 47 ilustra el impacto en el consumo energético del edificio en cada paso del retrofit realizado, habiendo un pequeño aumento en el consumo energético entre los pasos 4 y 5 del retrofit para aumentar el confort adentro del edificio cuidando de mantener el balance energético anual dentro del límite de la cero energía neta.

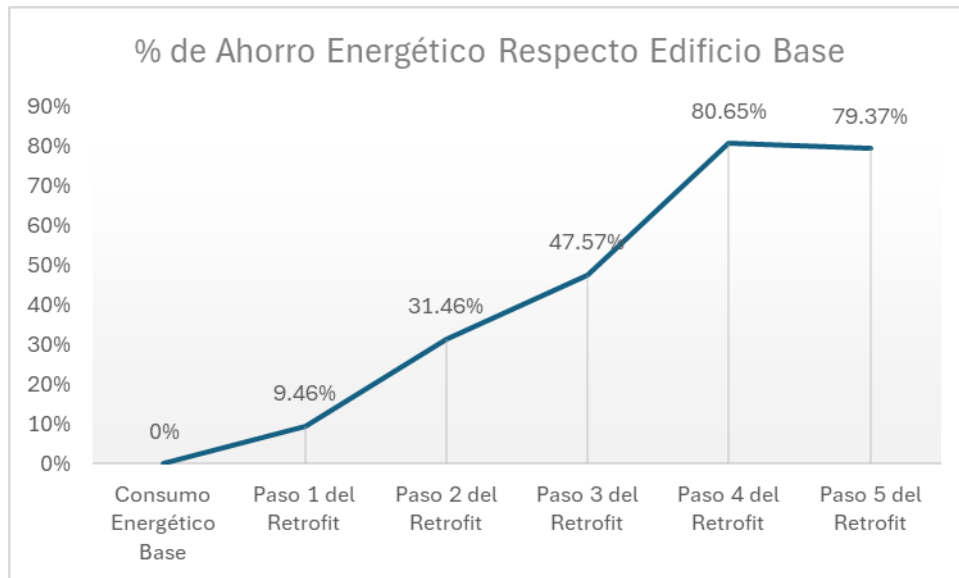


Figura 48: Porcentaje de Ahorro de Energía en Cada Paso del Retrofit Respecto al Edificio Base (Fuente: Elaboración Propia)

Según la Figura 48 representa el acumulado de aplicar de forma sucesiva los pasos del retrofit energético propuestos, se puede identificar que los pasos del retrofit que más impacto han tenido en el ahorro energético del edificio fueron los pasos 2 del Retrofit y el paso 4 de éste, es decir que de las medidas la que tuvo un mayor impacto en el consumo energético del edificio fue el paso 4 que es el cambio en la eficiencia del sistema de aire acondicionado representó un cambio del 47.57% de ahorro al 80.65%, siendo esta diferencia del 33.08% de ahorro. Mientras que el paso 2, significó un cambio en el ahorro pasando del 9.46% al 31.46%, siendo esta diferencia del 22% de ahorro energético al implementar esta medida que significó el cambio de los consumos energéticos de la iluminación y cargas misceláneas haciendo que estos sean disminuidos (y aumentados en los dos casos puntuales señalados) a los valores recomendados por la ASHRAE.

5.3 Proyección de la Generación Fotovoltaica

Para lograr la cero energía neta, además de optimizar el consumo energético del edificio es necesario tener las consideraciones necesarias para que el sistema funcione de acuerdo a la demanda energética. Dichas consideraciones son tomadas en cuenta a continuación.

5.3.1 Evaluación Inicial para el Diseño del Sistema Fotovoltaico

5.3.1.1 Evaluar el Consumo de Energía del Edificio

- **Recopilación de Datos:** Para este proceso se tomaron como referencia los datos de consumo obtenidos en la simulación del edificio luego del paso 5 del retrofit, es decir 58.87 kWh/m²-año.
- **Análisis del Consumo:** Para obtener un consumo mensual promedio, se dividió el consumo anual entre los 12 meses del año, obteniendo de esta forma un consumo mensual de 4.91 kWh/m²-mes.

5.3.2 Evaluar el Sitio

- **Orientación e Inclinación del Techo:** Un techo orientado hacia el sur (en el hemisferio norte) o hacia el norte (en el hemisferio sur) es ideal. La inclinación óptima dependerá de la latitud del sitio, pero suele estar cerca del ángulo de latitud del lugar, en la región salvadoreña interesan los techos o cubiertas orientadas al sur, ya que en ellos se obtiene la mejor irradiación durante la mayor parte del año.
- **Sombra:** Debido a que el edificio no se encuentra en un emplazamiento cercano a obstáculos externos (árboles, edificios, entre otras fuentes de sombreado) que proyecten sombra desde el exterior, no se pudo realizar un análisis de sombreados circundantes, los cuales podrán variar dependiente de dicho entorno, si en un futuro se agregan edificaciones cercanas. Sin embargo, para el análisis del edificio simulado, si se consideraron las sombras proyectadas por las fascias de las paredes del edificio, las cuales si se encuentran dentro de las consideraciones propias del edificio independientemente al emplazamiento.

5.3.3 Condiciones Climáticas

- **Irradiación Solar:** Para conocer si el sistema propuesto se encuentra en una zona con irradiación aceptable, se utilizó la base de datos de irradiación solar Meteonorm la cual se encuentra dentro del software PVsyst (software utilizado para la simulación del sistema). Como alternativas dentro de dicha base de datos también se encuentran PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) o datos de la NASA, que de igual forma pueden servir para obtener la cantidad de energía solar disponible en el emplazamiento de cada edificio.

Tabla 33: Generación Fotovoltaica (Fuente: Elaboración Propia)

| Balances and main results | | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|---------------|-------------|
| | GlobHor kWh/m ² | DiffHor kWh/m ² | T_Amb °C | GlobInc kWh/m ² | GlobEff kWh/m ² | EArray MWh | E_Grid MWh | PR ratio |
| January | 173.2 | 46.84 | 24.54 | 172.3 | 162.2 | 21.73 | 21.46 | 0.793 |
| February | 165.0 | 47.61 | 25.49 | 164.3 | 155.4 | 20.59 | 20.34 | 0.789 |
| March | 202.2 | 64.92 | 26.22 | 201.6 | 190.8 | 25.12 | 24.82 | 0.784 |
| April | 188.2 | 69.95 | 26.27 | 187.5 | 177.1 | 23.30 | 23.02 | 0.782 |
| May | 179.6 | 73.97 | 25.90 | 178.9 | 168.9 | 22.48 | 22.21 | 0.791 |
| June | 178.1 | 66.08 | 24.90 | 177.3 | 167.6 | 22.37 | 19.45 | 0.699 |
| July | 200.7 | 69.78 | 25.68 | 199.8 | 188.8 | 25.07 | 24.78 | 0.790 |
| August | 184.4 | 78.00 | 25.36 | 183.8 | 173.4 | 23.21 | 20.20 | 0.700 |
| September | 172.4 | 68.31 | 24.36 | 171.7 | 162.1 | 21.63 | 21.37 | 0.793 |
| October | 155.9 | 60.07 | 24.56 | 155.1 | 146.1 | 19.65 | 19.41 | 0.797 |
| November | 156.7 | 51.35 | 24.15 | 156.0 | 146.7 | 19.78 | 18.39 | 0.751 |
| December | 160.5 | 40.16 | 24.60 | 159.9 | 150.2 | 20.25 | 20.00 | 0.797 |
| Year | 2116.8 | 737.04 | 25.17 | 2108.3 | 1989.4 | 265.18 | 255.44 | 0.772 |

Legends

| | | | |
|---------|--|--------|---|
| GlobHor | Global horizontal irradiation | EArray | Effective energy at the output of the array |
| DiffHor | Horizontal diffuse irradiation | E_Grid | Energy injected into grid |
| T_Amb | Ambient Temperature | PR | Performance Ratio |
| GlobInc | Global incident in coll. plane | | |
| GlobEff | Effective Global, corr. for IAM and shadings | | |

5.3.4 Dimensionamiento del Sistema

5.3.4.1 Cálculo del Tamaño del Sistema

- **Consumo Energético Objetivo:** Para definir el consumo objetivo se tomó el total del consumo del edificio, por ello el porcentaje a cubrir fue toda la cubierta.
- **Horas Pico de Sol:** Se consultaron los datos locales de horas pico de sol, los cuales representan el número de horas al día con irradiancia solar de 1,000 W/m². Este dato puede variar según la ubicación.

Para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$Potencia\ del\ sistema\ [kW] = \frac{Consumo\ anual\ de\ energía\ [kWh]}{Horas\ pico\ de\ sol\ al\ año\ [h]} \quad (Ec. 2)$$

Dado que el consumo anual analizado fue de 243,225.11 kWh y las horas pico de sol al año son 1,500:

$$Potencia\ del\ sistema\ [kW] = \frac{243,225.11\ kWh}{1,500\ h} = 162.15\ kW$$

La potencia del sistema calculada para el sistema resultó 162.15 kWp, la cual en el ámbito fotovoltaico se suele denominar potencia pico del sistema.

5.3.4.2 Selección de Componentes

- **Paneles Solares:** Para esta etapa se tomaron en cuenta muchos aspectos actuales, tales como: la eficiencia, el tipo (monocristalino, policristalino, de película delgada), el costo y la garantía. Para ello se tomó en consideración una de las marcas Top Tier en la actualidad (Potencia entre 400W o superior).

| SPECIFICATIONS | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------------|--------|----------------------------------|--------|----------------------------------|--------|----------------------------------|--------|----------------------------------|--------|
| Module Type | JKM530M-72HL4 JKM530M-72HL4-V | | JKM535M-72HL4 JKM535M-72HL4-V | | JKM540M-72HL4 JKM540M-72HL4-V | | JKM545M-72HL4 JKM545M-72HL4-V | | JKM550M-72HL4 JKM550M-72HL4-V | |
| | STC | NOCT | STC | NOCT | STC | NOCT | STC | NOCT | STC | NOCT |
| Maximum Power (Pmax) | 530Wp | 394Wp | 535Wp | 398Wp | 540Wp | 402Wp | 545Wp | 405Wp | 550Wp | 409Wp |
| Maximum Power Voltage (Vmp) | 40.56V | 37.84V | 40.63V | 37.91V | 40.70V | 38.08V | 40.80V | 38.25V | 40.90V | 38.42V |
| Maximum Power Current (Imp) | 13.07A | 10.42A | 13.17A | 10.50A | 13.27A | 10.55A | 13.36A | 10.60A | 13.45A | 10.65A |
| Open-circuit Voltage (Voc) | 49.26V | 46.50V | 49.34V | 46.57V | 49.42V | 46.65V | 49.52V | 46.74V | 49.62V | 46.84V |
| Short-circuit Current (Isc) | 13.71A | 11.07A | 13.79A | 11.14A | 13.85A | 11.19A | 13.94A | 11.26A | 14.03A | 11.33A |
| Module Efficiency STC (%) | 20.55% | | 20.75% | | 20.94% | | 21.13% | | 21.33% | |
| Operating Temperature(°C) | -40°C~+85°C | | | | | | | | | |
| Maximum system voltage | 1000/1500VDC (IEC) | | | | | | | | | |
| Maximum series fuse rating | 25A | | | | | | | | | |
| Power tolerance | 0~+3% | | | | | | | | | |
| Temperature coefficients of Pmax | -0.35%/°C | | | | | | | | | |
| Temperature coefficients of Voc | -0.28%/°C | | | | | | | | | |
| Temperature coefficients of Isc | 0.048%/°C | | | | | | | | | |
| Nominal operating cell temperature (NOCT) | 45±2°C | | | | | | | | | |

*STC: Irradiance 1000W/m² Cell Temperature 25°C AM=1.5
 NOCT: Irradiance 800W/m² Ambient Temperature 20°C AM=1.5 Wind Speed 1m/s

Figura 49: Datos Técnicos del Módulo (Panel) Fotovoltaico Seleccionado (Fuente: Jinko Solar, 2024).

- **Inversores:** Se tomaron en consideración muchos aspectos, entre los cuales los siguientes tipos: inversores tipo cadena, microinversores o inversores híbridos. Para el caso de estudio se tomó un inversor tipo cadena debido a que este puede utilizar diferentes configuraciones de cadenas de paneles, al contar con 6 MPPTs, y 2 entradas por cada MPPT.

| Especificaciones técnicas | SUN2000-60KTL-M0 |
|---|---|
| Eficiencia | |
| Máxima eficiencia | 98.9% @480 V; 98.7% @380 V / 400 V |
| Eficiencia europea ponderada | 98.7% @480 V; 98.5% @380 V / 400 V |
| Entrada | |
| Tensión máxima de entrada ¹ | 1,100 V |
| Corriente de entrada máxima por MPPT | 22 A |
| Corriente de cortocircuito máxima | 30 A |
| Tensión de arranque | 200 V |
| Tensión de funcionamiento MPPT ² | 200 V ~ 1,000 V |
| Tensión nominal de entrada | 600 V @380 Vac / 400 Vac; 720 V @480 Vac |
| Cantidad de MPPTs | 6 |
| Cantidad máxima de entradas por MPPT | 2 |
| Salida | |
| Potencia activa | 60,000 W |
| Max. Potencia aparante de CA | 66,000 VA |
| Max. Potencia activa de CA (cosφ = 1) | 66,000 W |
| Tensión nominal de salida | 220 V / 380 V, 230 V / 400 V, por defecto 3W + N + PE; 3W + PE opcional en configuraciones; 277 V / 480 V, 3W + PE |
| Frecuencia nominal de red de CA | 50 Hz / 60 Hz |
| Intensidad nominal de salida | 91.2 A @380 V, 86.7 A @400 V, 72.2 A @480 V |
| Max. intensidad de salida | 100 A @380 V, 95.3 A @400 V, 79.4 A @480 V |
| Factor de potencia ajustable | 0,8 capacitivo ... 0,8 inductivo |
| Distorsión armónica total máxima | < 3% |

Figura 50: Datos Técnicos del Inversor Seleccionado (Fuente: Huawei, 2024).

- **Estructuras de Montaje:** El tipo de estructura utilizada fue utilizando dos orientaciones, para lo cual se podrá utilizar diferentes tipos de estructura de fabricantes distintos en la actualidad.
- **Sistemas de Monitoreo:** Los inversores utilizados cuentan con una plataforma propia por lo cual no se utilizó el monitoreo de un tercero a estos.

5.3.5 Diseño del Sistema

5.3.5.1 Diseño Eléctrico

- **Esquema de Conexión:** Para la conexión entre módulos fotovoltaicos se utilizó un arreglo tipo cadenas (Strings), debido a que de esta forma se obtiene una menor pérdida en el cableado, al sumar el voltaje (Voc, Voltaje en circuito abierto).

Dado que el inversor soporta un voltaje máximo de 1,100 V, La mayor cantidad de módulos en serie se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Cantidad máxima de módulos en serie} = \frac{\text{Voltaje máximo del inversor [V]}}{\text{Voltaje en circuito abierto del módulo [V]}}$$

$$\text{Cantidad máxima de módulos en serie} = \frac{1,100 \text{ V}}{49.52 \text{ V}} = 22.21$$

Cantidad máxima de módulos en serie = 22 módulos

Para el sistema del edificio se utilizaron cadenas de 18 módulos, no llegando al valor máximo permitido por el inversor para evitar sobrevoltajes que puedan dañarlo. Así mismo se tomó en cuenta la corriente de operación del inversor, el cual es 22A por cada MPPT. Siendo la corriente de operación del módulo de 13.36A, el sistema se mantuvo dentro de los rangos permitidos entre sí.

El sistema utilizado se detalla en el siguiente diagrama unifilar:

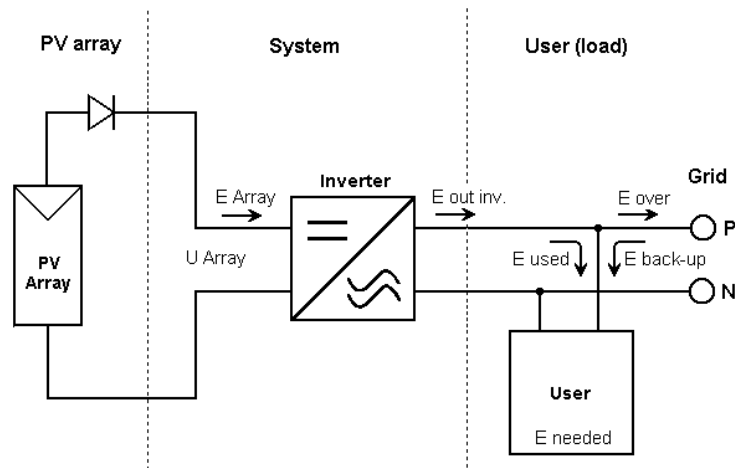


Figura 51: Diagrama unifilar del sistema (Fuente: Elaboración Propia).

- **Dimensionamiento de Cables:** Para el dimensionamiento electromecánico, se ingresaron las longitudes y secciones transversales de los cables al balance de cargas de pvsyst, utilizando las fórmulas de caída de tensión para asegurar que la pérdida no exceda el 2-3%.

Pérdidas CA después del inversor

Circuito CA: inversor al punto de inyección (por inversor)

Utiliza pérdida óhmica del circuito CA

Longitud del inversor a inyección m

Fracción pérdida en STC %

STC: Pca = 77.6 kW, Vca = 480 V Tri, I = 93.4 A

Caída de voltaje en STC 3.6 V (0.76%)

Sección cables

Cobre

Alu

Utiliza uno o varios transformadores MV

Utiliza un transformador de AT

Figura 52: Pérdidas Utilizadas en la Simulación del Sistema (Fuente: Elaboración Propia).

5.3.5.2 Diseño Mecánico

- Distribución de Paneles:** Se tomó en consideración que los paneles estén dispuestos de manera que maximicen la exposición al sol y minimicen las sombras, para el edificio en estudio, no se disponían de muchas variables al ser del tipo cubierta fija, por lo tanto, el sistema de instalación se realizó en las dos orientaciones establecidas. Al realizar la implantación de módulos en el espacio establecido por el edificio, es decir la cubierta, se obtuvo una disponibilidad de 288 módulos de 545W que suman una potencia pico de 157kWp, potencia inferior a la calculada de 162.15 kWp, debido a que los espacios disponibles en la esquinas de los bloques servirán para el montaje y mantenimiento de los módulos.

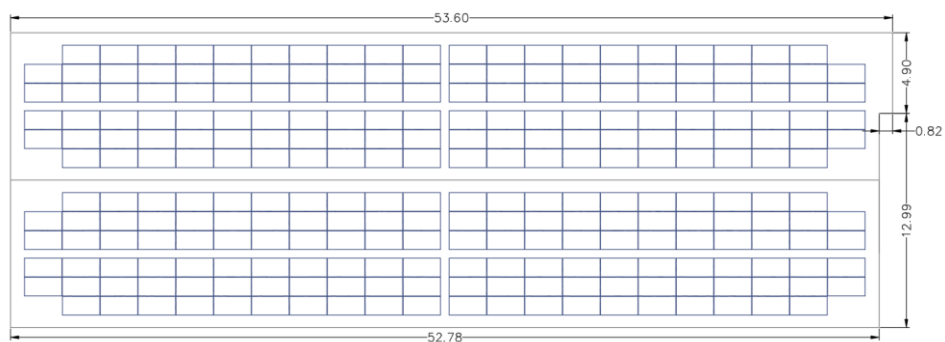


Figura 53: Distribución de Módulos Fotovoltaicos (Fuente: Elaboración Propia)

- Estructura de Soporte:** Debido a que el caso de estudio no abarca sistemas de análisis estructurales, se menciona que esto deberá ser tomado en cuenta antes de

realizar un acuerdo contractual con el instalador, debido a que no todos los techos o cubiertas son aptos para soportan la carga de módulos y estructura, la cual ronda los 10–15 kg/m².

El método utilizado para este edificio en estudio fue simular a través de PVsyst el sistema utilizando los siguientes equipos:

- **Paneles Fotovoltaicos:** 288 paneles JINKO SOLAR de 545W (JKM545M-7RL4-V) (16 cadenas de 18 módulos).
- **Inversores:** 2 inversores HUAWEI de 60 kW (SUN2000-60KTL-M0).

Tabla 34: Configuración del Sistema Fotovoltaico (Fuente: Elaboración Propia)

| PV Array Characteristics | | | |
|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------|
| PV module | | Inverter | |
| Manufacturer | Jinkosolar | Manufacturer | Huawei Technologies |
| Model | JKM545M-7RL4-V | Model | SUN2000-60KTL-M0 |
| (Custom parameters definition) | | (Custom parameters definition) | |
| Unit Nom. Power | 545 Wp | Unit Nom. Power | 60.0 kWac |
| Number of PV modules | 288 units | Number of inverters | 2 units |
| Nominal (STC) | 157 kWp | Total power | 120 kWac |
| Modules | 16 Strings x 18 In series | Operating voltage | 200-1000 V |
| At operating cond. (50°C) | | Pnom ratio (DC:AC) | 1.31 |
| Pmpp | 143 kWp | | |
| U mpp | 674 V | | |
| I mpp | 213 A | | |
| Total PV power | | Total inverter power | |
| Nominal (STC) | 157 kWp | Total power | 120 kWac |
| Total | 288 modules | Nb. of inverters | 2 units |
| Module area | 743 m ² | Pnom ratio | 1.31 |

5.3.6 Permisos y Regulaciones

5.3.6.1 Permisos Municipales

- **Documentación Necesaria:** Debido a que esta etapa se deberá tramitar con entidades municipales se deben preparar los planos de instalación, el diseño eléctrico y mecánico, y las especificaciones de los componentes para presentar a las autoridades locales, ya sean alcaldías u oficinas de planificación locales, como OPVSA, OPAMSS, OPLAGEST, entre otros.
- **Cumplimiento de Normativas:** Se deberá asegurar de que la instalación cumpla con los códigos eléctricos y de construcción locales. Esto puede incluir normas de seguridad eléctrica y estructural.

5.3.6.2 Conexión a la Red

- **Acuerdo de Interconexión:** Se deberá contactar a la compañía eléctrica para conocer los requisitos para conectar el sistema fotovoltaico a la red. Esto puede incluir la instalación de un medidor bidireccional, de acuerdo a lo establecido en la normativa vigente de la SIGET, es decir *NORMA PARA USUARIOS FINALES PRODUCTORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON RECURSOS RENOVABLES (UPR)*.

5.3.7 Instalación y Puesta en Marcha

5.3.7.1 Instalación de Paneles y Equipos

- **Instalación Mecánica:** El montaje de las estructuras y fijación de los paneles solares se deberá realizar de acuerdo con el diseño establecido por el contratista.
- **Instalación Eléctrica:** Se deberá conectar los paneles al inversor y luego al sistema eléctrico del edificio. Siguiendo las recomendaciones del fabricante para todas las conexiones y verificar que todas las conexiones estén seguras y libres de humedad.

5.3.7.2 Pruebas y Comisionamiento

- **Pruebas Iniciales:** Se deberá verificar la continuidad del sistema, medir las tensiones y corrientes, y asegurarse de que el sistema funcione según lo diseñado.
- **Configuración del Monitoreo:** se deberá configurar el sistema de monitoreo para rastrear el rendimiento en tiempo real. Esto puede incluir la instalación de software en un ordenador o dispositivo móvil.

5.3.8 Mantenimiento y Monitoreo

5.3.8.1 Mantenimiento Regular

- **Limpieza de Paneles:** La acumulación de polvo y residuos puede reducir la eficiencia. Para ellos se deberá programar limpiezas regulares, especialmente en áreas con alta polución o poco lluviosas.
- **Inspección de Componentes:** Se deberá realizar inspecciones periódicas de los cables, conexiones, inversores y estructuras para identificar y reparar cualquier desgaste o daño.

5.3.8.2 Monitoreo

- **Sistema de Monitoreo:** Se deberá utilizar el sistema de monitoreo para revisar el rendimiento diario. Identificar rápidamente cualquier caída en la producción y realiza las correcciones necesarias.
- **Alertas y Reportes:** Se deberá configurar alertas para problemas críticos y genera informes periódicos para analizar el rendimiento a largo plazo.

5.4 Balance de Cero Energía

Posterior al retrofit energético, se prevé que el edificio consuma 58.87 kWh/m² anuales, mientras que la generación de energía fotovoltaica proveniente del generador ubicado sobre su techo es de 60.14 kWh/m² anuales, inyectando un excedente neto a la red de 1.28 kWh/m² anuales distribuidos a lo largo de los 12 meses del año.

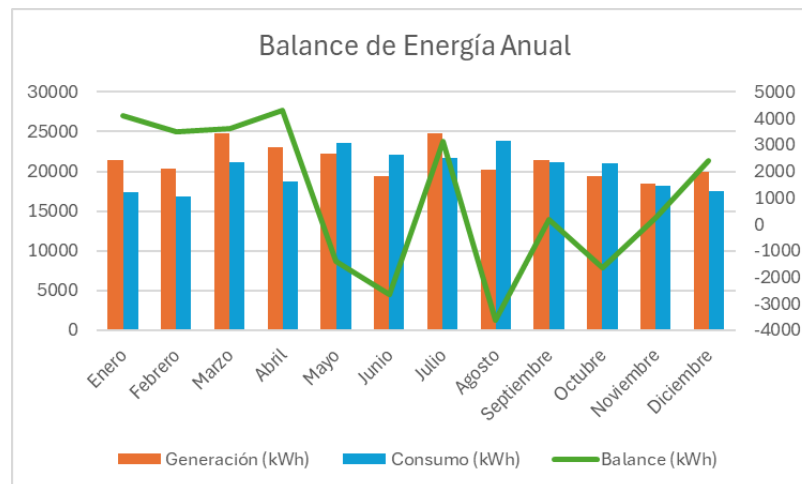


Figura 54: Balance de Energía Anual del Edificio (Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 35: Balance Energético del Edificio Optimizado (Fuente: Elaboración Propia)

| Mes | Generación (kWh) | Consumo (kWh) | Balance (kWh) |
|-------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| Enero | 21460 | 17340.55 | 4119.45 |
| Febrero | 20340 | 16855.17 | 3484.83 |
| Marzo | 24820 | 21208.97 | 3611.03 |
| Abril | 23020 | 18699.46 | 4320.54 |
| Mayo | 22210 | 23615.33 | -1405.33 |
| Junio | 19450 | 22114.68 | -2664.68 |
| Julio | 24780 | 21650.80 | 3129.20 |
| Agosto | 20200 | 23802.61 | -3602.61 |
| Septiembre | 21370 | 21188.32 | 181.68 |
| Octubre | 19410 | 21043.54 | -1633.54 |
| Noviembre | 18390 | 18128.27 | 261.73 |
| Diciembre | 20000 | 17577.42 | 2422.58 |
| Total | 255450 | 243225.11 | 12224.89 |

La Tabla 35 y la Figura 54 demuestran el impacto positivo de las medidas de retrofit energético aplicadas al edificio cuya demanda energética fue optimizada. Tras la implementación de estas mejoras, el edificio se proyecta capaz de interactuar eficientemente con el consumo de energía de la red de distribución eléctrica y con la energía generada por el generador fotovoltaico instalado en su techo.

Este enfoque integrado ha culminado en el logro de un balance energético neto anual favorable, esencial para alcanzar la categoría de edificio de cero energía neta. En el caso analizado se omitió el control y automatización en el edificio, debido a que por las respuestas de la encuesta el edificio ya contaba con estos elementos de control, no obstante son elementos que deben de incluirse dentro de las estrategias de un retrofit energético en caso que el edificio no cuente con ellos.

La ecuación 1 ha sido fundamental en el cálculo preciso de este balance energético, permitiendo cuantificar la cantidad de energía consumida y la cantidad de energía generada y exportada por el edificio. Este análisis detallado ha validado la capacidad del retrofit no solo para reducir significativamente la demanda energética del edificio, sino también para maximizar la utilización de fuentes renovables, como la energía solar, contribuyendo así a su sostenibilidad ambiental y económica a lo largo del año simulado.

En resumen, los resultados presentados subrayan la efectividad del retrofit energético como estrategia integral para transformar edificios del tipo oficina del AMSS en infraestructuras modernas y eficientes desde el punto de vista energético, cumpliendo con estándares rigurosos como los de cero energía neta y manteniendo su confort térmico.

CAPITULO 6.: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

1. Para lograr alcanzar la definición de cero energía neta en un edificio, es necesario implementar más de una medida de retrofit en un edificio, es necesario integrar estrategias pasivas, activas y de comportamiento (como el uso adecuado del set point de temperatura del aire acondicionado) para lograr un consumo de energía lo suficientemente bajo para mantener la cero energía neta.
2. Se necesitan considerar varios elementos a la hora de aplicar la optimización de resultados, pues, en este proceso se pueden afectar cuestiones como el confort térmico a costa de reducir efectivamente el consumo energético de los sistemas de climatización.. Como se demostró en el paso 4 del retrofit, el consumo energético se redujo sustancialmente al reducir el tamaño del aire acondicionado, pero teniendo como consecuencia el aumento del desconfort adentro del edificio; con la optimización se pueden conocer valores de set point de temperatura del aire acondicionado que mantengan el confort adentro del edificio en valores aceptables y manteniendo el consumo energético controlado para mantener la definición de cero energía neta.
3. La primera medida que debe de realizarse en un retrofit energético es la reducción de consumos, esto se concluye en el caso analizado después de aplicar el paso 2 del retrofit que constituyó la reducción de densidades de carga misceláneas y de iluminación. Esta medida tuvo un ahorro energético del 22% por si sola.
4. Dentro de un retrofit, modificar los valores U de paredes y techo es importante para aumentar el confort adentro del edificio, teniendo impacto en el set point de temperatura necesario en el interior del edificio para mantener niveles de confort aceptables. A su vez, el set point de temperatura tiene un impacto significativo como variable relacionada con el comportamiento de los usuarios en el consumo energético del edificio y sus niveles de confort térmico interior, como se encontró en el paso 5 del retrofit.
5. Es necesario combinar más de una estrategia al momento de disminuir la carga térmica de la irradiación de las ventanas. En el caso analizado, la combinación de reemplazar los vidrios de las ventanas, utilizar cortinas exteriores (laminas o building shades) y aleros laterales significó un ahorro energético del 16.11 % respecto al consumo energético base en el paso 3 del retrofit.

6. El uso de la ventilación natural, por si sola puede representar ahorros de hasta el 9.46% anuales según el caso analizado, no obstante, en el caso de la ventilación natural esto también conlleva un aumento de las horas de discomfort como se analizó en el paso 1 del retrofit.
7. Es necesario tomar en consideración que los excedentes anuales del sistema fotovoltaico actualmente no son retribuidos o compensados de manera monetaria de acuerdo a lo establecido en el UPR, por lo que el sistema deberá limitarse para evitar recargos al propietario por excedentes. De igual forma el propietario podrá instalar sistemas que controlen los excedentes en tiempo real para evitar inyectarlos a la red de acuerdo con la programación de cada equipo.
8. Para el caso analizado, el consumo energético se ve más influenciado por el set point de temperatura del aire acondicionado que por el aislamiento de las paredes o techo del edificio, como se pudo ver en el análisis de sensibilidad realizado como parte del paso 5 del retrofit energético.

6.2 Recomendaciones

1. Es necesario un análisis más detallado utilizando métodos de optimización para obtener más de una solución a un retrofit, teniendo el cuidado de emplear el mayor número de variables continuas en el análisis, dado que utilizar variables discretas obliga a los métodos de optimización a generar matrices de identidad, proceso que hace necesario aumentar el número de datos generados para el análisis y aumentar los tiempos de simulación así como necesitar mayores volúmenes de datos para obtener coeficientes de confiabilidad, como el valor R^2 dentro de valores aceptables para confiar en los datos.
2. Es necesario un trabajo interdisciplinar al momento de realizar un retrofit energético a un edificio. En la solución propuesta no se ha considerado el análisis estructural o el impacto en el uso de la iluminación natural adentro del edificio, la solución propone valores de consumo y confort térmico aceptables, sin considerar estos aspectos.
3. Se recomienda optimizar la solución de los retrofit energéticos, incluyendo el costo del retrofit para determinar el periodo del retorno de inversión de este tipo de proyectos.
4. El control y la automatización son elementales en un retrofit energético y se recomienda incluirlos siempre que el edificio base no los tenga incluidos en su funcionamiento.

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS

- Allen, E., & Iano, J. (2014). *Fundamentals of Building Construction: Materials and Methods* (6th ed.). John Wiley & Sons.
- Al-Saadi, S. N., & Al-Jabri, K. S. (2020). Optimization of envelope design for housing in hot climates using a genetic algorithm (GA) computational approach. *Journal of Building Engineering*, 32, 101712.
- Al-Saadi, S. N., & Al-Jabri, K. S. (2020). Optimization of envelope design for housing in hot climates using a genetic algorithm (GA) computational approach. *Journal of Building Engineering*, 32, 101712.
- ASHRAE, U., & DOE, U. (2019). *Achieving Zero Energy: Advanced Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings.*”.
- ASHRAE. (2016). *ASHRAE Handbook—HVAC Applications*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2017). *ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment (SI Edition)*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Asociación de Ingeniería Civil. (2016). *Manual de Hidrología para Ingeniería*. Asociación de Ingeniería Civil.
- Austin, M. C., Carpino, C., Mora, D., & Arcuri, N. (2022, December). A Methodology to identify appropriate refurbishment strategies towards zero energy buildings in a hot and humid climate. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2385, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.
- Baños, R. V., Torrado Fonseca, M., & Reguant Alvarez, M. (2018). Análisis de regresión lineal múltiple con SPSS: un ejemplo práctico. Universidad de Barcelona, Instituto de Desarrollo Profesional. Obtenido de <https://revistes.ub.edu/index.php/REIRE/article/view/reire2019.12.222704/28913>
- Bestraten, S., Hormias, E., & Altemir, A. (2011). Construcción con tierra en el siglo XXI. *Informes de la Construcción*, 63(523), 5-20. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.10.046>
- BREEAM. (2018). *BREEAM Manual: SD5076: BREEAM New Construction 2018 Technical Manual*. Building Research Establishment (BRE).

Carpino, C., Chen Austin, M., Mora, D., & Arcuri, N. (2024). Retrofit Measures for Achieving NZE Single-Family Houses in a Tropical Climate via Multi-Objective Optimization. *Buildings*, 14(3), 566.

Chen Austin, M., Arnedo, L., Yuil, O., & Mora, D. (2021). Energy consumption influenced by occupant behavior: A study in residential buildings in Panama. LACCEI Inc.

Chen Austin, M., Chung-Camargo, K., & Mora, D. (2021). Review of Zero Energy Building Concept-Definition and Developments in Latin America: A Framework Definition for Application in Panama. (MDPI, Ed.) *Energies*, 30.

Consejo Nacional de Energía. (2020). Política Energética El Salvador 2020-2050. Obtenido de <https://www.cne.gob.sv/wp-content/uploads/2021/12/PEN2050.pdf>

Consejo Nacional de Energía. (2020). Política Energética El Salvador 2020-2050. Obtenido de <https://www.cne.gob.sv/wp-content/uploads/2021/12/PEN2050.pdf>

ESTANDAR ASHRAE 55: www.seiscubos.com

File, M. (2015). Commercial buildings energy consumption survey (CBECS). US Department of Energy: Washington, DC, USA.

Givoni, B. (1994). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. Van Nostrand Reinhold.

González, J., Mora, D., & Chen Austin, M. (2023). Energy Consumption Difference Found between Typical and Standard Occupancy in Residential Buildings in a Tropical Developing Country. *Buildings*, 13(9), 2235.

Green, M. A. (2008). *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*. Springer.

Hendron, R., Leach, M., Bonnema, E., Shekhar, D., & Pless, S. (2013). *Advanced Energy Retrofit Guide (AERG): Practical Ways to Improve Energy Performance; Healthcare Facilities (Book)* (No. DOE/GO-102013-3960). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Hernandez-Moro, J., & Martinez-Duart, J. M. (2013). "Analytical model for solar PV and CSP electricity costs: Present LCOE values and their future evolution." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 119-132.

Huld, T. A., & Müller, R. W. (2013). *Solar Resource Mapping: Fundamentals and Applications* (Vol. 50). Academic Press.

International Electrotechnical Commission (IEC) Standards: IEC 61215 (Crystalline silicon terrestrial photovoltaic modules), IEC 61730 (Photovoltaic (PV) module safety qualification), etc.

International Solar Energy Society (ISES): <https://www.ises.org/>

Kalogirou, S. A. (2004). "Solar thermal collectors and applications." *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231-295.

Kibert, C. J. (2008). *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Komp, R. J. (2002). *Practical Photovoltaics: Electricity from Solar Cells*. Aatec Publications.

Lopez-Ochoa, L. M., Las-Heras-Casas, J., Olasolo-Alonso, P., & López-González, L. M. (2021). Towards nearly zero-energy buildings in Mediterranean countries: Fifteen years of implementing the Energy Performance of Buildings Directive in Spain (2006–2020). *Journal of Building Engineering*, 44, 102962.

Lstiburek, J. (2006). *Builder's Guide to Cold Climates*. Building Science Press.

Luque, A., & Hegedus, S. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley.

Masters, G. M. (2004). *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. John Wiley & Sons.

Mays, L. W. (2009). *Water Resources Engineering*. John Wiley & Sons.

National Electric Code (NEC), especialmente el Artículo 690 sobre sistemas fotovoltaicos.

NREL (National Renewable Energy Laboratory): <https://www.nrel.gov/>

Olgay, V. (1963). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press.

Oliveira, F., & Ukil, A. (2019). Comparative performance analysis of induction and synchronous reluctance motors in chiller systems for energy efficient buildings. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(8), 4384-4393.

One Angel Square: www.burohappold.com/projects

Ordoñez, A. (2023). Cálculos y Simulaciones-Guía del Ejercicio DB v7 [Class handout]. Diplomado en Simulación Energética y Ambiental de Edificios, Instituto Superior de Arquitectura y Diseño.

Patiño Cambeiro, F., Armesto, J., Patiño Barbeito, F., & Bastos, G. (2016). Perspectives on Near ZEB Renovation Projects for Residential Buildings: The Spanish Case. *Energies*, 16.

Pless, S., & Torcellini, P. (2010). Net-zero energy buildings: A classification system based on renewable energy supply options . National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).

Pless, S., & Torcellini, P. (2010). Net-Zero Energy Buildings: A Classification System Based on Renewable Energy Supply Options. Golden, CO (United States): National Renewable Energy Lab. (NREL), .

PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System):
https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html

PVSYST (Photovoltaic Software, versión de prueba).

R. Sánchez-Hernández, M. Suárez-Barríos, J. M^a. Martín-Pozas. (2000). Caracterización de materiales antiguos de construcción (tapial y adobe) en las iglesias de Cisneros, Villada y Boada de Campos (Palencia). *Materiales de Construcción*, 50(257): 33-45, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2000.v50.i257.416>.

Rea, M. S. (2000). IESNA Lighting Handbook: Reference and Application (9th ed.). Illuminating Engineering Society.

Reyes, Luis (2022). Características y propiedades mecánicas de materiales comunes en la construcción. Disponible en: <https://es.slideshare.net/slideshow/caractersticas-y-propiedades-mecnicas-de-materiales-comunes-en-la-construccinpdf/254463247>

Solar Energy Industries Association (SEIA): <https://www.seia.org/>

Standard, A. S. H. R. A. E. (2019). Standard 90.1-2019; Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE): New York, NY, USA.

Straube, J. F., & Burnett, E. F. (2005). Moisture Control Handbook: Principles and Practices for Residential and Small Commercial Buildings. John Wiley & Sons.

Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., & Crawley, D. (2006). Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. ACEEE Summer Study (pág. 15). Long Beach: California.

Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., & Crawley, D. (2006). Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. ACEEE Summer Study, 15.

Transformacion-de-Edificio-de-Oficinas-Convencional-en-Nzeb-Caso-de-Estudio-por-Simulacion-Energetica: plataformaptec.es

U.S. Energy Information Administration. (2022, diciembre). 2018 Commercial Buildings Energy Consumption Survey - Consumption and Expenditures Highlights. Recuperado de <https://www.eia.gov/consumption/commercial/>

U.S. Green Building Council. (2016). LEED Reference Guide for Building Design and Construction. U.S. Green Building Council.

UPR (Norma para usuarios finales productores de energía eléctrica con recursos renovables).

Valdez, C., & Rapimán, J. (2007). Propiedades físicas y mecánicas de bloques de hormigón compuestos con áridos reciclados. Información Tecnológica, 18(3), 81-88. Recuperado de: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v18n3/art10.pdf>

Vélez Moreno, Ligia María (2013). Propiedades Materiales de Construcción. Disponible en: <https://propiedadesmaterialesdeconstruccin.blogspot.com/2013/04/propiedades-mecanicas-de-los-materiales.htm>

Yan, K., Chong, A., & Mo, Y. (2020). Generative adversarial network for fault detection diagnosis of chillers. Building and Environment, 172, 106698.

I

ANEXO A: ENCUESTA UTILIZADA PARA CARACTERIZAR EDIFICIO DE LINEA BASE

Caracterización energética de Edificios Dedicados para Oficinas de San Salvador

En el marco del trabajo de investigación de maestría titulado: "**RETROFIT DE EDIFICIOS DE OFICINA EN EL SALVADOR CON EL OBJETIVO DE ALCANZAR UN NIVEL DE DESEMPEÑO**

NZEB" se presenta la siguiente encuesta.

Esta encuesta está dirigida a profesionales y/o personal dedicado al área de diseño y/o construcción y al área de gestión y operación de edificios de tipo oficina, con conocimientos sobre los tipos de materiales utilizados en los edificios, así como de estructuras, usos finales de la infraestructura, actividades que requieran algún consumo energético, estrategias de arquitectura pasiva y todas aquellas características más comunes, que sirvan para realizar una caracterización del desempeño energético del edificio y con esto, estimar un modelo general. Los datos vertidos en esta encuesta servirán para caracterizar los edificios de tipo oficina que se encuentran operando dentro de la ciudad de San Salvador con el objetivo de servir como base para el modelado energético de estos mismos.

Para tal fin, se pretende que el encuestado seleccione un edificio de oficinas dentro de San Salvador, sobre el que se tenga mayor información con respecto a las características constructivas de este y de su operación.

Nota: todos los datos recolectados con este instrumento se tratarán con confidencialidad, y serán utilizados únicamente con fines académicos, relacionados al presente estudio.

* Indica que la pregunta es obligatoria

Correo electrónico *

Sección R: Información sobre el Perfil Profesional de los Encuestados y Selección del Edificio de Oficinas.

Las preguntas de esta sección están orientadas a conocer el área en la que se han desempeñado los profesionales encuestados, con el objetivo de dirigir las preguntas de acuerdo a su área de experiencia.

R2-1: ¿Cuál es su profesión? *

Marca solo un óvalo.

Arquitecto I

Ingeniero civil

Ingeniero electricista

Ingeniero mecánico

Otros:

R2-2: ¿Cuántos años tiene ejerciendo su profesión? *

Marca solo un óvalo.

De 1 a 3 años

Entre 3 a 5 años

Entre 5 a 10 años

Más de 10 años

R5: ¿Cuál de estas categorías describe de mejor manera la función que ha desempeñado?

Marca solo un óvalo.

Operación, mantenimiento o ingeniería

Administración de propiedades/inmuebles

Administración de una tienda o negocio

Administración de un centro comercial

Administración o dirección de empresas

Gestión energética o ambiental

Propietario de un edificio

Dueño de un negocio Contabilidad, finanzas o planillas

Funcionario ejecutivo

Funcionario en un centro educativo

Funcionario religioso

Personal de apoyo

Diseño y/o construcción

Consultoría

Otros:

R-6: Según su experiencia, ¿con cuál área de interés dentro del estudio se siente más familiarizado?

Esta respuesta servirá para orientar las secciones siguientes de la encuesta a su área de experiencia.

Marca solo un óvalo.

Diseño y/o construcción de edificios. *(Ir a la pregunta 62)*

Usos finales del edificio y gestión del mismo.

Con las dos áreas mencionadas anteriormente.

Sección A: Características Estructurales, Tamaño y Antigüedad del Edificio

En esta sección se caracterizarán los componentes estructurales del edificio.

A3: ¿En qué ciudad se encuentra ubicado el edificio? *

Marca solo un óvalo.

San Salvador (municipio)

Ilopango

Soyapango

A7: ¿Qué categoría describe aproximadamente el área total construida del Edificio?

P.d.: El Área total construida de un edificio es el total del área bruta de cada piso/nivel

encerrado por las paredes exteriores del edificio (incluida la profundidad de la pared sección). Pudiendo ser la suma del área de cada piso si el edificio tiene más de un piso, las estructuras que no están "encerradas" dentro del edificio no deberán ser contadas dentro de esta definición.

Marca solo un óvalo.

0 - 100 m² (Aproximadamente el área de un estacionamiento para dos vehículos) 101 m² - 465 m²
(Aproximadamente el área de un restaurante familiar)

466 m²-930 m² (Aproximadamente el área de una franquicia de comida rápida) 931 m²-2,323 m²
(Aproximadamente el área de una arena para jugar basketball) 2,324 m²-4,645 m² (Aproximadamente
el área de un supermercado)

4,645 m²- 9,290 m² (Aproximadamente el área de una tienda de descuentos ropa Americana)

9,291 m²- 18,581 m² (Aproximadamente el área de un estadio de fútbol)

Otros:

A9-1: ¿Cuál de estas categorías describe de mejor manera los materiales utilizados en las paredes
externas del edificio? (puede marcar más de una)

Selecciona todas las opciones que correspondan.

Ladrillo, piedra o estuco (con repello)

Ladrillo, piedra o estuco (sin repello)

Páneles de hormigón prefabricado

Bloques de concreto o concreto vertido (de alta resistencia)

Aluminio, asbesto, plástico o madera (revestimientos, tejas, azulejos)

Páneles metálicos

Ventanas o paneles de vidrio transparente (se puede ver a través de él)

Paneles de vidrio opaco decorativo o de construcción (no se puede ver a través de él)

Azulejos blancos o de un color claro que refleje la luz

Cubierta de aluminio

Cubierta lastrada

Cubierta vegetal

Drywall o paneles de yeso laminados

Otros:

A9-2: ¿Cuál de estas categorías describe de mejor manera los materiales utilizados en las paredes internas del edificio? (puede marcar más de una)

Selecciona todas las opciones que correspondan

Ladrillo, piedra o estuco (con repello)

Ladrillo, piedra o estuco (sin repello)

Páneles de hormigón prefabricado

Bloques de concreto o concreto vertido (de alta resistencia)

Aluminio, asbesto, plástico o madera (revestimientos, tejas, azulejos)

Páneles metálicos

Ventanas o paneles de vidrio transparente (se puede ver a través de él)

Paneles de vidrio opaco decorativo o de construcción (no se puede ver a través de él)

Azulejos blancos o de un color claro que refleje la luz

Cubierta de aluminio

Cubierta lastrada

Cubierta vegetal

Drywall o paneles de yeso laminados

Otros:

A10: ¿Cuál de estas categorías describe de mejor manera los materiales utilizados predominantemente en la cubierta exterior de los techos de los edificios de oficinas?

Lámina de fibrocemento

Lámina insulada

Lámina metálica ondulada

Lámina metálica troquelada

Teja de barro

Techo de palma

Losa de concreto

Techos metálicos auto-soportantes

Teja asfáltica

Techo construido (alquitrán, fieltros, fibra de vidrio o techo lastrado)

Techo de madera

Asfalto o fibra de vidrio

Superficie metálica

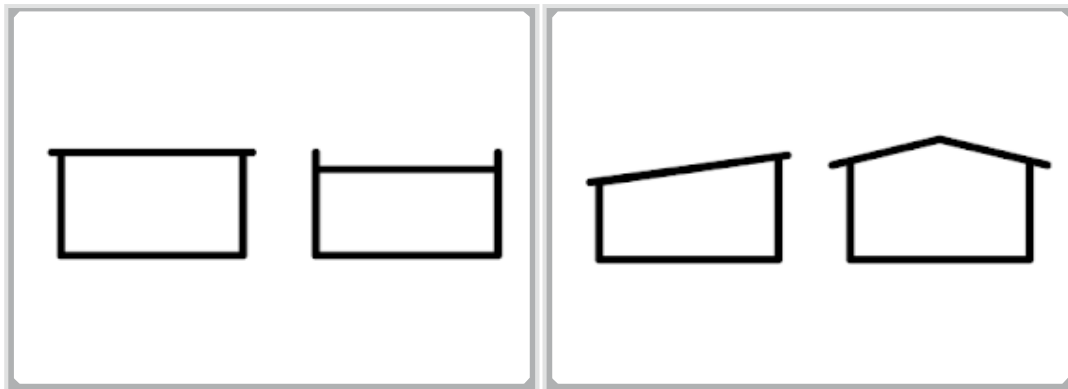
Plástico, caucho o cubierta sintética

Concreto

Otros:

A13: ¿Cuál de estas imágenes representa de mejor manera la inclinación de la azotea de los edificios?

Marca solo un óvalo.

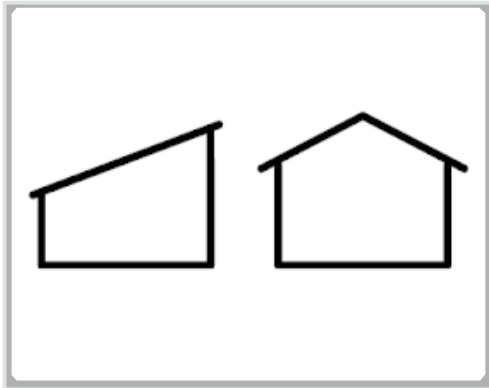


Sin inclinación

Inclinación moderada

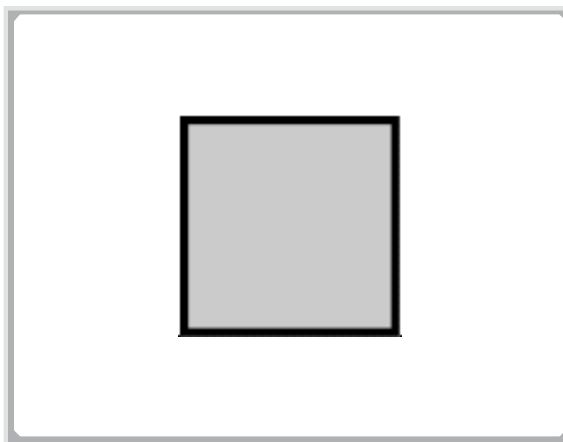
Techo empinado

A13-2: En caso se presentar inclinación, ¿cuál es el porcentaje de caída con el cual se construyó el techo?
(Si seleccionó techo sin inclinación, responder "N/A")

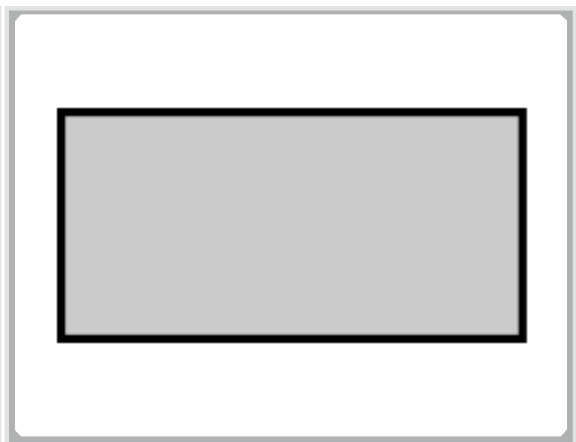


A14: ¿Cuál de estas imágenes se parece más a la "huella" del edificio seleccionado?

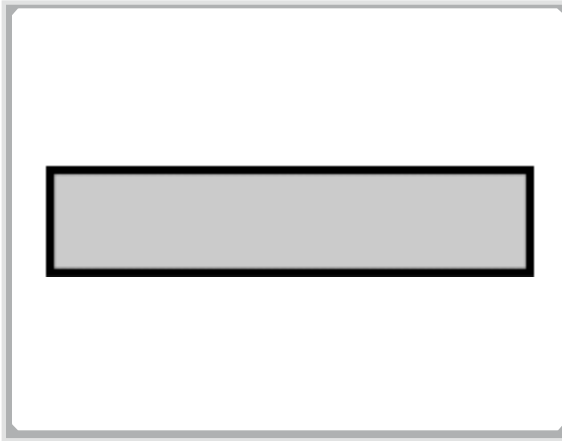
Marca solo un óvalo.



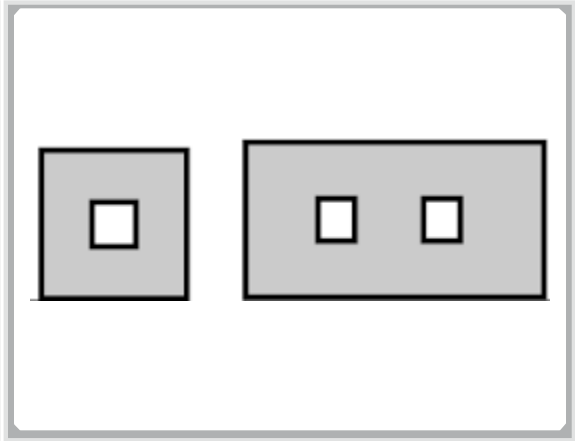
Cuadrado



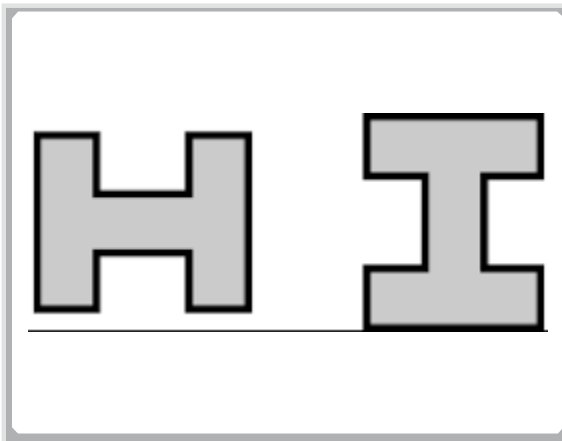
Rectángulo amplio



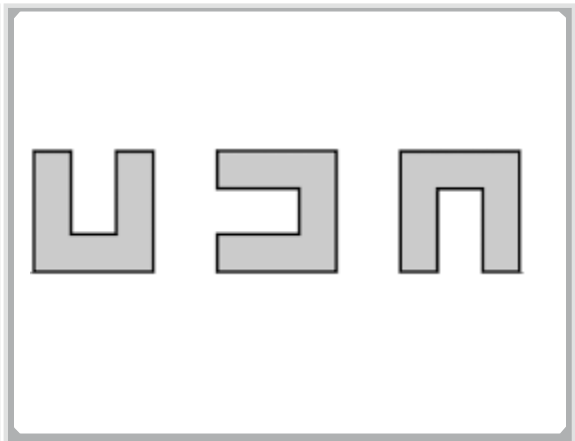
Rectángulo angosto



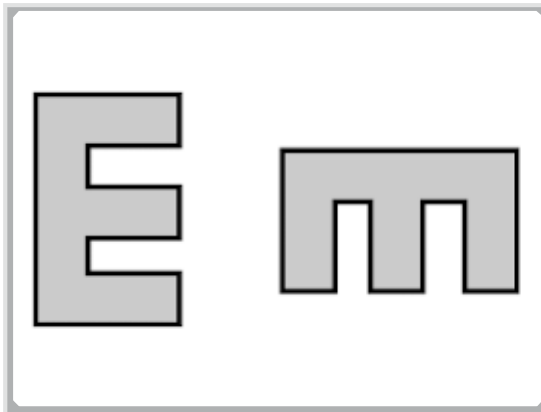
Cuadrado o rectangular con patio interno



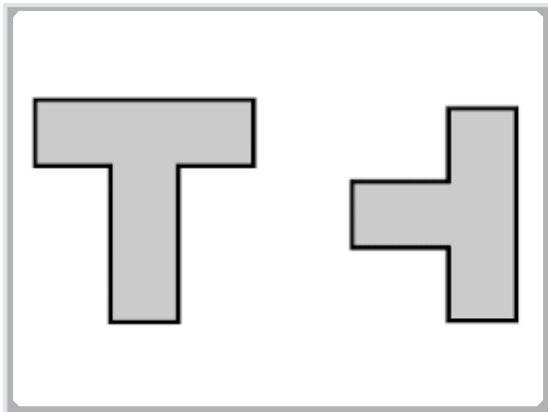
En forma de "H"



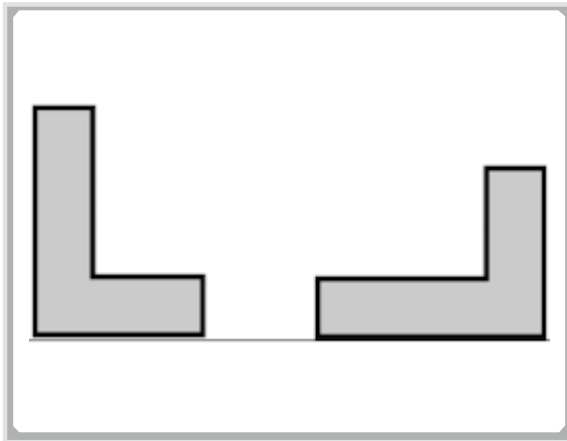
En forma de "U"



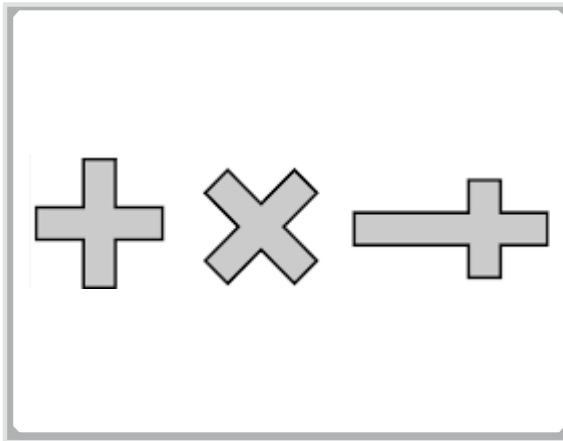
En forma de "E"



En forma de "T"



En forma de "L"



En forma de "X"

A14-2: ¿Hacia qué dirección se encuentra orientada la fachada principal? *

Marca solo un óvalo.

Hacia el norte.

Hacia el sur.

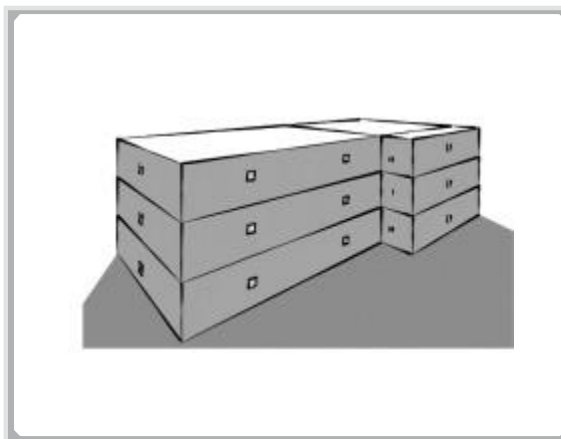
Hacia el este.

Hacia el oeste.

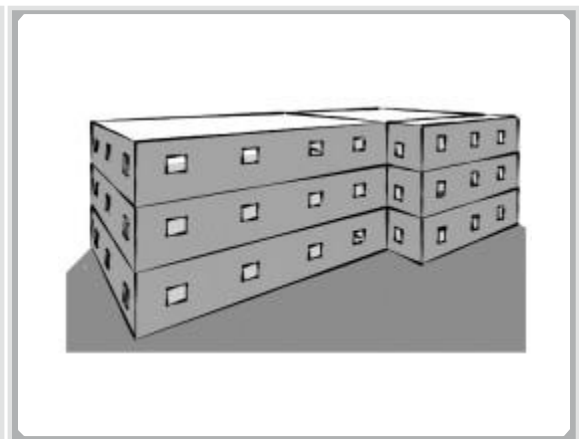
Otros: _____

A15: ¿Cuál de estos rangos describen de mejor manera el porcentaje de superficie exterior del edificio que está cubierta con ventanas o puertas de vidrio?

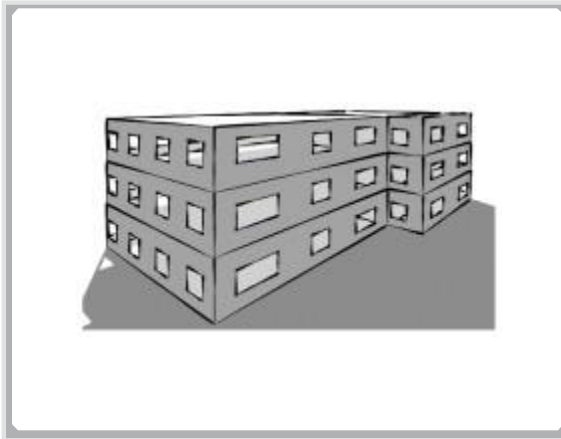
Marca solo un óvalo.



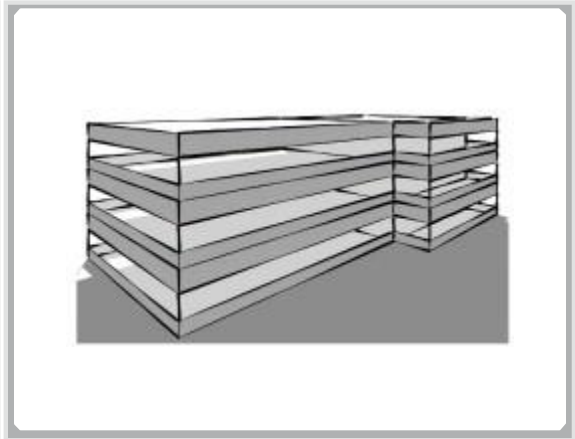
1% o menos



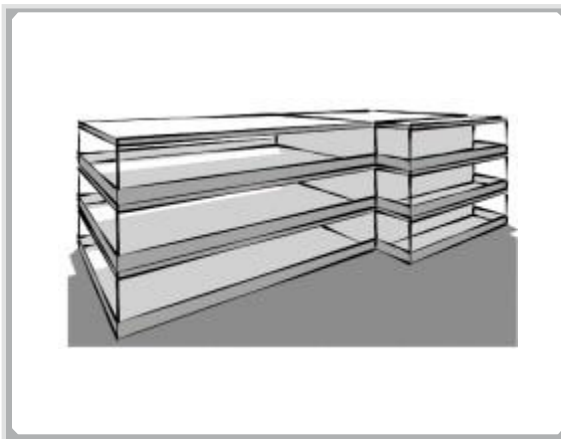
Del 2% al 10%



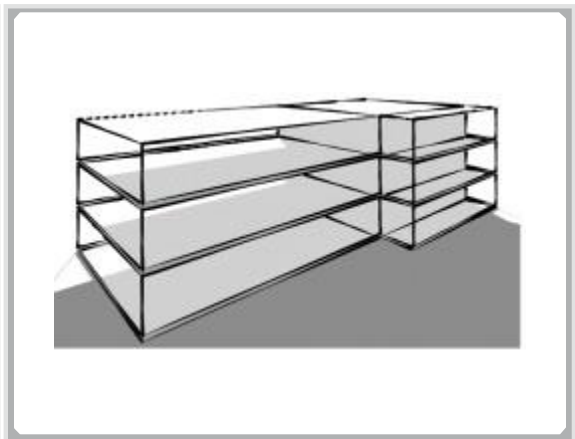
Del 11% al 25%



Del 26% al 50%



Del 51% al 75%



Del 76% al 100%

A16: ¿Cuántos pisos tiene el edificio? *

Favor tome en cuenta sótanos, niveles dedicados a parqueo o cualquier otro piso bajo nivel de suelo. No tomar en cuenta áticos, medio pisos, mezzanines, balcones y lofts. Si no está seguro, favor responda con su mejor estimación.

A17: ¿Cuántos de esos pisos son subterráneos? *

A18: ¿Cuál es la altura típica del piso al techo por nivel en el edificio? *

A21: ¿Cuántos elevadores tiene el edificio? *

Marca solo un óvalo.

No tiene.

Un elevador.

Dos elevadores.

Tres elevadores.

Tiene más de tres elevadores.

A23: ¿Cuántas escaleras eléctricas tiene el edificio? *

Marca solo un óvalo.

No tiene.

Tiene una.

Tiene dos.

Tiene tres.

Tiene más de tres.

A24: ¿En qué año finalizó la construcción del edificio? (Si desconoce el dato exacto, brinde su mejor estimación).

Marca solo un óvalo.

Entre 1986 y 1991

Entre 1992 y 1997

Entre 1998 y 2003

Entre 2004 y 2009

Entre 2010 y 2015

Entre 2016 y 2021

Entre 2021 y 2023

Otros: _____

A25: ¿cuál es el año de construcción del edificio? *

Marca solo un óvalo.

Antes del año 1,920

Entre el año 1,921 y el año 1,945

Entre el año 1,946 y el año 1,959

Entre el año 1,960 y el año 1,969

Entre el año 1,970 y el año 1,979

Entre el año 1,980 y el año 1,989

Entre el año 1,990 y el año 1,999

Entre el año 2,000 y el año 2,009

Entre el año 2,010 y el año 2,020

Después del 2,020

A28: ¿Alguna parte del edificio ha sufrido alguna modificación mayor? *

Marca solo un óvalo.

Sí

No

A29: ¿Qué tipo de modificaciones se han ejecutado? *

Selecciona todas las opciones que correspondan.

Renovación de un espacio

Ampliación de un espacio

No se ha realizado ninguna modificación.

Otros:

Sección B: Categorización de las actividades que se desarrollan dentro del edificio

B1: ¿Qué tipo de oficinas alberga el edificio? *

Selecciona todas las opciones que correspondan.

Oficinas administrativas o edificio de oficinas profesionales (por ej. servicios de consultoría, aseguradoras, rubro leyes, oficina de compañías de servicios, administración de servicios educativos)

Oficina gubernamental

Oficina mixta

Oficina bancaria o cualquier institución financiera (por ej. cooperativa).

Oficina de contratista (por ej. constructora, instaladores de paneles solares, fibra óptica, instalaciones eléctricas, etc).

Oficina de organización sin fines de lucro

Otros:

Sección D: Fuentes de Energía, Usos y Equipos

Preguntas Relacionadas al Suministro Energético del Edificio

D130: ¿Existe un mantenimiento programado de manera regular para el sistema de aire acondicionado del edificio?

Marca solo un óvalo.

Sí

No

D135: ¿Cuál es la fuente de energía principal utilizada para cocinar en el interior del edificio? (Si es que cuenta con espacios para preparación de alimentos).

Marca solo un óvalo.

Gas natural

Electricidad

Leña

Ninguna

Otros: _____

D140: ¿Cuáles de las siguientes tecnologías son utilizadas para generar energía para suministrarla al edificio para uso regular?

Selecciona todas las opciones que correspondan.

Paneles solares para generar electricidad

Generadores de motores recíprocos ("Plantas eléctricas de emergencia")

Turbinas eólicas en pequeña escala

Ninguna

Otros: _____

D148: ¿De qué capacidad es el generador de electricidad instalado? (Si no existe, responda "N/A").

D149: ¿Existe alguna estación de carga de vehículos eléctricos asociada a este edificio dentro o fuera de éste?

Marca solo un óvalo.

Sí

No

D170: Si se utiliza energía solar térmica en el edificio, ¿en qué actividad se aprovecha esta energía en el edificio?

Sección E: Equipos Misceláneos

E1: ¿Qué tipos de áreas de preparación o ingesta de alimentos existen dentro del edificio?

Selecciona todas las opciones que correspondan.

Sala de estar con máquinas expendedoras de comida

Área de cocina pequeña (de un tamaño similar al de las cocinas residenciales)

Área para tomar café, venta de snacks, desayunador

Cafetín o pequeña venta de comida

Cafetería o restaurante

Ninguna de las anteriores

Otros:

E3: Para las áreas destinadas a la cocina o ingesta de alimentos dentro del edificio, ¿cuánta es el área en metros cuadrados destinada a estas actividades?

E9: ¿Existen dentro del edificio espacios destinados a conferencias o a eventos sociales?

Marca solo un óvalo.

Sí

No

E10: Si existen estos espacios, ¿cuál es el porcentaje del área total del edificio que está destinado a usarse en estos eventos? (Si no existen estos espacios, favor responda "N/A").

E38: ¿Cuáles de los siguientes equipos de computación son utilizados dentro del edificio?

Selecciona todas las opciones que correspondan.

Computadoras de escritorio

Laptops

Tablets Servidores

Otros:

E39: ¿Cuántas computadoras de escritorio son utilizadas dentro de este edificio? *

E40: ¿Qué categoría describe mejor el número de computadoras usadas en este edificio?

Marca solo un óvalo.

1 a 4

5 a 9

10 a 19

20 a 49

50 a 99

100 a 249

250 a 499

500 a 999

1000 a 2499

2500 a 4999

5000 a más

E41: ¿Qué categoría describe mejor el número de laptops utilizadas en el edificio? *

Marca solo un óvalo.

1 a 4

5 a 9

10 a 19

20 a 49

50 a 99

100 a 249

250 a 499

500 a 999

1000 a 2499

2500 a 4999

5000 a más

E48: ¿Cuántos servidores hay dentro de este edificios? (Si no los hay, favor responda "N/A").

E49: ¿Cuál categoría describe mejor cuántos servidores hay dentro del edificio? *

Marca solo un óvalo.

1 a 4

5 a 24

25 a 499

500 o más

Ninguno.

E51: ¿Cuáles de estos tipos de áreas de computadora se encuentran dentro del edificio?

Selecciona todas las opciones que correspondan.

Servidores

Centro de datos

Cuartos de entrenamiento auxiliados por computadoras

Centros de computo públicos o estudiantiles

Centro de finanzas Ninguno de estos tipos

E52: ¿Cuál es el área en metros cuadrados del espacio dedicado para centro de computo?, si no está seguro por favor escriba su mejor estimación.

E53: ¿Cuáles de estas características describen mejor el espacio dentro del centro de computo?

Selecciona todas las opciones que correspondan.

Piso elevado

Sistema de enfriamiento separado

Control de humedad

Fuente de alimentación sin interrupción (UPS)

Acceso controlado

Ninguna de las anteriores

E60: ¿Cuántos cajeros automáticos tiene el edificio? (Responda con números). *

E65: ¿Cuál es su mejor estimado en porcentaje de los metros cuadrados totales de edificios que están normalmente iluminados cuando está abierto normalmente?

Marca solo un óvalo.

1 a 25%

26 a 50%

51 a 75%

76 a 100%

No está iluminado normalmente cuando está abierto

E66: Dentro de un periodo de 24 horas, ¿existe algún momento en el cual algunas de las luces son apagadas?

E67: ¿qué porcentaje del área del edificio está iluminada fuera de horario laboral? *

E68: ¿Cuál es su mejor estimado del área que debe permanecer iluminada cuando se han apagado las luces dentro del edificio?

Marca solo un óvalo.

1 a 25%

26 a 50%

51 a 75%

76 a 100%

Nada queda iluminado cuando se apagan las luces dentro del edificio

E69: ¿Qué tipos de luminaria son utilizadas para iluminar los espacios de uso general dentro del edificio?

Marca solo un óvalo.

Iluminación fluorescente distinta de las bombillas fluorescentes compactas

Bombillas fluorescentes compactas (CFL)

Bombillas de luz incandescente, excepto las bombillas halógenas

Bombillas halógenas

Luces de descarga de alta intensidad (HID) como vapor de sodio, haluro metálico o mercurio a alta presión

Luces de diodos emisores de luz (LED)

Otros:

E78: ¿Cuáles de estos controles de iluminación o estrategias de controles de iluminación, si las hay, son utilizadas en este edificio?

Selecciona todas las opciones que correspondan.

Programación, (Las luces se atenúan o apagan automáticamente en ciertos momentos del día).

Sensores de ocupación que reducen la iluminación cuando las habitaciones están desocupadas (Sensores que apagan o atenúan las luces automáticamente cuando una persona sale de una habitación o espacio)

Iluminación o atenuación de niveles múltiples (Dispositivos de control que ajustan la potencia de iluminación mediante atenuación continua, atenuación escalonada o conmutación escalonada).

Aprovechamiento de la luz del día (Un sistema de control de iluminación y persianas que atenúa automáticamente las lámparas cuando hay luz natural disponible y/o ajusta las persianas para que la combinación de luz natural y luz artificial se combine para proporcionar el nivel de iluminación deseado).

Recorte de alta gama o ajuste de nivel de luz (El recorte de gama alta establece el nivel máximo de iluminación a menos del 100%. El ajuste del nivel de luz establece el nivel aún más bajo si una habitación o espacio necesita menos luz).

Control de carga de enchufe (Dispositivo que apaga automáticamente los enchufes de pared y las luces cuando una persona sale de una habitación o espacio).

Iluminación sensible a la demanda (Reduce la iluminación en momentos de pico de precios de electricidad).

Ninguna de las anteriores

E79: ¿Qué porcentaje de todas las superficies de las paredes exteriores del edificio está iluminada?

Marca solo un óvalo.

Menos que un 10%

10 a 25%

25 a 50%

Más que un 50%

E80: ¿El edificio cuenta con algún área de estacionamiento interior o exterior que esté iluminada con lámparas alimentadas a través del servicio eléctrico de edificio?

Marca solo un óvalo.

Sí

No

E81: ¿El edificio cuenta con un piso de parqueos interno, un lote o parqueo exterior o ambos?

Marca solo un óvalo.

El estacionamiento es parte del edificio (interior)

Estacionamiento separado (lote o garaje)

Ambos tipos de estacionamientos

E82: ¿Cuántos espacios de estacionamiento hay en esta área de estacionamiento iluminada?

E83: ¿Las ventanas exteriores de este edificio contienen vidrio de una sola capa, vidrio de varias capas o una combinación de ambos tipos?

Marca solo un óvalo.

Vidrio de una sola capa

Vidrio multicapa

Combinación de ambos

Sin ventanas

E84: ¿Cuáles de estas características de conservación de energía o iluminación natural, si las hay, están presentes en este edificio?

Selecciona todas las opciones que correspondan.

Vidrio de ventana polarizado

Vidrio de ventana reflectante

Voladizos o toldos exteriores

Tragaluces o atrios diseñados para proporcionar luz

Ninguno de estos

E85: ¿Qué porcentaje del edificio recibe suficiente luz exterior para que no sea necesario encender las luces interiores? Si no está seguro, proporcione su mejor estimación.