

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y
APLICADAS (IICBA)**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS
APLICADAS (CIICAp)**

**Análisis de la disminución de emisiones de CO₂ en
el acondicionamiento de un espacio con un sistema
pasivo.**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA**

PRESENTA – JULIO CESAR BRITO REYNA

**DR. ROSENBERG J ROMERO DOMÍNGUEZ - DIRECTOR DE TESIS
DR. JESÚS CEREZO ROMÁN
DRA. GABRIELA HERNÁNDEZ LUNA
DR. MOISÉS MONTIEL GONZÁLEZ**

2023

CUERNAVACA MORELOS, MÉXICO



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



Nomenclatura

ACV: Análisis de Ciclo de Vida	HFC: Hidrofluorocarbonos
ADP: Abiotic Depletion Potential	HiPS: Polystyrene de alto impacto
AG-ONU: Asamblea General de las Naciones Unidas	HTTP: Human Toxicity Potential
AP: Acidification Potential	HVAC: Heating, Ventilation and Air conditioning
ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers	IEA: International Energy Agency
BTU: British Thermal Unit	INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía
CAD: Computer Assisted Design	IPCC: Panel Intergubernamental del Cambio Climático
CC: Cambio Climático	ISO: International Organization for Standardization
CIB: Centro de Investigaciones Biológicas	kg: Kilogramo
CIICAp: Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas	kW: Kilo Watt
CH₄: Metano	kWh: Kilo Watt-hora
CML: Centro de Estudios Medioambientales	LCA: Life Cycle Assessment
CONAGUA: Comisión Nacional del Agua	m: Metro
CO₂: Dióxido de Carbono	msnm: Metros sobre el nivel del mar
ELCD: European Commission's Reference Life Cycle Data System	m²: Metro cuadrado
EMA: Estaciones Meteorológicas Automáticas	MAETP: Marine aquatic ecotoxicity potential
EP: Eutrophication Potential	MJ: Megajoule
EUA: Estados Unidos de América	NC: Nitrocelulosa
EPDM: Caucho de Etileno Propileno Dieno	N₂O: Óxido Nitroso
EPS: Polystyrene expanded	OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
FAETP: Freshwater Ecotoxicity Potential	ODP: Ozone Depletion Potential
FDP: Fossil Depletion Potential	ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible
FLIR: Forward Looking InfraRed	ONU: Organización de las Naciones Unidas
GCA: Global Carbon Atlas	PA-6: Poliamida 6
GEI: Gases de Efecto Invernadero	PFC: Perfluorocarbonos
GWh: Gigavatio-hora	POCP: Photochemical Ozone Creation Potential
GWP: Global Warming Potential	PP: Polipropileno
HDPE: Polietileno de alta densidad	PS: Poliestireno
	PVC: Policloruro de vinilo
	SENER: Secretaría de Energía
	SF₆: Hexafluoruro de Azufre



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



SMN: Servicio Meteorológico
Nacional

TR: Tonelada Refrigerante

TETP: Terrestrial Ecotoxicity
Potential

TRNSYS: The Transiet Energy
System Simulation Tool

TMY: Typical Meteorological Year

UAEM: Universidad Autónoma
del Estado de Morelos

UNAM: Universidad Nacional
Autónoma de México

V: Voltio

W: Watt

WHO: World Health Organization

°C: Grado Celsius

Resumen

En el contexto global de la dependencia de fuentes de energía fósil en el modelo energético actual, la electricidad desempeña un papel fundamental en el crecimiento y desarrollo de las ciudades. Derivado del consumo excesivo de estas fuentes, se genera la presencia de fenómenos como el Cambio Climático, evidenciando así el uso generalizado de sistemas de climatización en edificaciones durante la temporada de verano en áreas geográficas con climas tropicales y cálidos.

El trabajo presenta un estudio comparativo anual de los impactos ambientales de dos sistemas de climatización en un espacio construido previamente: un sistema activo y un sistema pasivo. El estudio se llevó a cabo mediante la simulación de procesos sustentables utilizando el software TRNSYS® y también se evaluaron los indicadores de Calentamiento Global, Agotamiento de la Capa de Ozono y Agotamiento de combustibles fósiles, por mencionar a algunos, utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en el software OpenLCA. Los resultados demuestran una reducción de los impactos ambientales mediante el uso de elementos pasivos en comparación con el uso de dos aires acondicionados y su consumo eléctrico, evitando una huella de carbono de un 98% en su etapa de construcción y hasta en un 100% en su etapa de operación.

Este estudio contribuye al conocimiento sobre la importancia de implementar estrategias de climatización pasiva en edificaciones existentes como una alternativa sostenible y de bajo impacto ambiental. Los hallazgos respaldan la necesidad de promover soluciones más eficientes y respetuosas con el medio ambiente en el sector de la climatización, en línea con la transición hacia un modelo energético más sostenible y la mitigación del Cambio Climático.

Palabras claves:

Energía eléctrica, climatización, sustentabilidad, Cambio Climático.

Abstract

In the global context of dependence on fossil fuel energy sources in the current energy model, electricity plays a crucial role in the growth and development of cities. This is evident in the widespread use of air conditioning systems in buildings during the summer season in areas with tropical and warm climates.

This work presents an annual comparative study of the environmental impacts of two cooling systems in a pre-existing space: the active system and the passive system. The study was carried out through the simulation of sustainable processes using the TRNSYS® software, and various indicators such as Global Warming Potential (GWP100a), Ozone Depletion Potential, and Fossil Fuel Depletion were evaluated using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology in the OpenLCA software. The results demonstrate a reduction in environmental impacts through the use of passive elements compared to the use of two air conditioning units and their electricity consumption, avoiding a carbon footprint of 98% during its construction stage and up to 100% during its operational stage

This study contributes to the understanding of the importance of implementing passive cooling strategies in existing buildings as a sustainable and low-impact alternative. The findings support the need to promote more efficient and environmentally-friendly solutions in the cooling sector, in line with the transition towards a more sustainable energy model and the mitigation of Climate Change.

Keywords:

Electricity, cooling, sustainability, Climate Change.

Dedicatoria

El presente trabajo de investigación lo dedico primordialmente a Dios, por ser Él quien ha puesto en mí el conocimiento, dedicación y darme la fuerza necesaria para continuar en este proceso de obtener uno de mis anhelos.

A mi madre y hermanos por su apoyo, su amor y confianza, porque gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.

Gracias

Agradecimientos

A Dios por permitirme estar en este mundo junto a mi madre que me dió la vida, así mismo por brindarme la oportunidad de llegar hasta este punto de experiencias profesionales que me han llenado de gratitud en muchos sentidos.

A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos por ser mi alma mater, en especial al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas por la oportunidad que me ha brindado dentro de sus instalaciones para formarme como maestro en Sustentabilidad Energética.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnologías (antes CONACyT) por la beca otorgada.

A mi asesor el Dr. Rosenberg J Romero Domínguez, por guiarme durante todo el posgrado y en especial a mis sinodales la Dra. Gabriela Hernández Luna, el Dr. Jesús Cerezo Román y el Dr. Moisés Montiel González, por cada uno de sus comentarios para mejorar académicamente día a día.

Finalmente a mis profesores, a mis compañeros y a todos los colaboradores del CIICAp, quienes hacen que este espacio funcione en la UAEM.

Tablas

Tabla 1. Equipos de aire acondicionado, instalados y ventas anuales. Fuente: World Energy Statistics and Balances, IEA, 2021.	19
Tabla 2. Temperaturas medias registradas en el Estado de Morelos del año 1985 a 2022. Fuente: [20].	35
Tabla 3. Temperaturas medias en la UAEM 2012-2022. Fuente: Laboratorio de Edafoclimatología del CIB-UAEM, 2023.	36
Tabla 4. Temperaturas obtenidas en condiciones iniciales de la oficina de estudio y la oficina inferior.	41
Tabla 6. Propiedades físicas de elementos del lugar construido.	44
Tabla 7. Elementos que constituyen el sistema de sombreado en cubierta de oficina de estudio.	48
Tabla 8. Fuentes de datos usadas en este estudio.	50
Tabla 9. Inventario de sistema activo. Fuente: [24].	52
Tabla 10. Inventario de elemento pasivo para sombreado en muro sur en este estudio.	52
Tabla 11. Clasificación de categorías de impacto para el método de evaluación CML-IA. Fuentes: [27-28].	53
Tabla 12. Temperaturas obtenidas antes y después del tratamiento con techo doble en losa de azotea de la oficina de estudio.	59
Tabla 13. Resultados del Análisis de Ciclo de Vida para dos sistemas activos y un elemento pasivo por categoría de impacto. Fuente: [15].	63
Tabla 14. Resultados del Análisis de Ciclo de Vida para un sistema activo y un elemento pasivo por categoría de impacto. Fuente: [15].	64
Tabla 15. Análisis de sensibilidad mediante dos métodos de evaluación de impacto al sistema activo en su etapa de operación. Fuente: [15].	66
Tabla 16. Resultados de los análisis por categoría de impacto en las etapas de construcción y operación para un sistema activo y uno pasivo.	68
Tabla 17. Diferencia de huella de carbono por ambos sistemas analizados.	69

Figuras

Figura 1. Generación de electricidad por fuente de energía en México. Fuente: World Energy Statistics and Balances, IEA 2020.	10
Figura 2. Emisiones de CO ₂ por sector en México. Fuente: World Energy Statistics and Balances, IEA, 2020.	11
Figura 3. Equipos de aire acondicionado instalados en el mundo. Fuente: World Energy Statistics and Balances, IEA, 2020.	18
Figura 4. Aire acondicionado de ventana y minisplit.	21
Figura 5. Aire acondicionado de un solo ducto.	21
Figura 6. Aire acondicionado de dos ductos.	22
Figura 7. Funcionamiento del programa TRNSYS®. Fuente: Volumen 1- empezando- TRNSYS®.	27
Figura 8. Principios y marco de referencia de la metodología de ACV. Fuente: [19].	29



Figura 9. Planta arquitectónica de ubicación espacial de la oficina estudiada. .. 32

Figura 10. Fotografía de muro sur del edificio donde se encuentra la oficina de estudio..... 32

Figura 11. Volumetría de la oficina de estudio en presentación 3D..... 33

Figura 12. Reporte fotográfico de sombreado en muro sur del edificio donde se encuentra la oficina de estudio..... 34

Figura 13. Reporte fotográfico tomado con cámara termográfica de muro sur, losa de azotea interior y exterior en oficina analizada, en condiciones iniciales. 38

Figura 14. Reporte fotográfico tomado con cámara termográfica de muro sur y losa de entepiso de la oficina inferior con relación a la oficina analizada, en condiciones iniciales. 39

Figura 15. Temperaturas presentadas en la oficina de estudio y una oficina inferior, con ayuda de una cámara termográfica en condiciones iniciales..... 41

Figura 16. Configuración de la oficina en Simulation Studio..... 43

Figura 17. Funcionamiento del ciclo de un equipo de aire acondicionado. 45

Figura 18. Elementos pasivos de sombreado en ventanas. 46

Figura 19. Corte transversal del sistema de sombreado para cubierta construida en la oficina de estudio. 47

Figura 20. Ángulo formado por la colocación entre tablas del sistema de sombreado para cubierta construida en la oficina de estudio..... 47

Figura 21. Vista superior del sistema de sombreado para cubierta construida en la oficina de estudio..... 47

Figura 22. Reporte fotográfico tomado con cámara termográfica en muro sur y losa de azotea de oficina analizada con tratamiento de techo doble y su transferencia de calor hacia oficina inferior. 56

Figura 23. Reporte fotográfico tomado con cámara termográfica en losa de entepiso de oficina analizada con tratamiento de techo doble y su transferencia de calor hacia oficina inferior. 57

Figura 24. Temperaturas presentadas en la oficina de estudio y una oficina inferior, con ayuda de una cámara termográfica, antes y después del tratamiento con techo doble en losa de azotea de la oficina de estudio..... 60

Figura 25. Simulación de oficina sin sistemas de climatización en TRNSYS®... 62

Figura 26. Simulación de oficina climatizada mediante un aire acondicionado en TRNSYS®..... 62

Figura 27. Simulación de oficina climatizada mediante un aire acondicionado en TRNSYS® para los meses de marzo a junio. 63

Figura 28. Resultado para la categoría de impacto de Agotamiento de combustibles fósiles, mediante dos métodos de evaluación de impacto..... 68

Figura 29. Porcentajes de contribuciones a las categorías de impacto por etapa. 70

Ecuaciones

Ecuación 1. Demanda total de energía eléctrica para los sistemas activos de climatización..... 49

Contenido

Nomenclatura	1
Resumen	1
Abstract	2
Dedicatoria	3
Agradecimientos	4
Tablas	5
Figuras	5
Ecuaciones	6
CAPÍTULO I Introducción	9
1.1 Introducción	9
1.2 Justificación	13
1.3 Hipótesis	14
1.4 Objetivos	15
1.4.1 General.....	15
1.4.2 Específicos.....	15
CAPÍTULO II Marco Teórico, climatización de edificios	17
2.1 Climatización de edificios mediante sistemas activos.....	17
2.1.1 Tipos de aires acondicionados	20
2.2 Climatización de edificios mediante sistemas pasivos.....	22
2.2.1 Tipos de sistemas pasivos.....	23
2.3 Simulación en TRNSYS®	24
2.3.1 Funcionamiento de TRNSYS®	25
2.3.2 Aplicaciones de TRNSYS®	25
.....	27
2.4 Análisis de Ciclo de Vida en OpenLCA	27
2.4.1 Normatividad del ACV	29
2.4.2 Fases del Análisis de Ciclo de Vida	29
CAPÍTULO III Zona de estudio, características climatológicas y descripción de los análisis comparativos a evaluar	31
3.1 Zona de estudio	31
3.1.1 Características constructivas propias del edificio analizado.	31
3.2 Características climatológicas	34
3.2.1 Temperatura	34



3.2.1.1	Transferencia de calor en oficina de estudio y oficina inferior	37
3.3	Diseño experimental de simulación en TRNSYS®.....	41
3.3.1	Configuración del edificio en Simulation Studio	42
3.3.2	Configuración del edificio en TRNBuild	43
3.4	Descripción de los sistemas activos de climatización analizados.....	44
3.4.1	Sistema activo	44
3.4.2	Sistema pasivo	45
3.5	Análisis comparativo del sistema activo y sistema pasivo	48
3.5.1	Comparación de dos sistemas activos en ACV.....	48
3.5.2	Comparación de un sistema activo y un sistema pasivo en ACV.....	51
CAPÍTULO IV Resultados generales y discusión		55
4.1	Tratamiento en losa de azotea con techo doble.....	55
4.2	Simulación en TRNSYS®	61
4.3	Análisis de Ciclo de Vida en la etapa de operación	63
4.4	Análisis de Ciclo de Vida en la etapa de construcción	64
4.5	Análisis de sensibilidad.....	65
4.6	Análisis y discusión	68
4.7	Conclusiones	71
4.8	Anexos	74
4.8.1	Anexo número 1: Transferencia de calor losa de azotea y techo de madera sobre la oficina de estudio	74
	Convección	74
	Conducción	76
4.8.2	Anexo número 2: Resultados de comparación entre un sistema activo y un sistema pasivo.....	78
4.8.3	Anexo número 3: Productos de la investigación	79
4.9	Referencias Bibliográficas	81

CAPÍTULO I Introducción

1.1 Introducción

El presente trabajo de investigación se incorpora dentro del pensamiento filosófico actual, desde la atención por el medio ambiente, el espacio construido y en la relación del ser humano con el Planeta Tierra.

Nuestro modo de vida globalizado está basado en un modelo energético centrado en el consumo de fuentes fósiles: petróleo, carbón, gas natural, etc. [1], así como en el uso irracional de combustibles para la generación de energía eléctrica [2].

El acceso universal a un nivel asequible, confiable, sostenible y moderno de energía¹ resulta indispensable para contribuir al cumplimiento de otros Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), tal como lo estableció la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en el año 2015, los cuales constituyen el eje de los esfuerzos para hacer frente al Cambio Climático² (CC) mediante la Agenda 2030³.

En el caso específico de la energía eléctrica mundial para el año 2020, el 63% se generó a partir de fuentes fósiles; México no es la excepción y para el mismo año el suministro eléctrico fue del 89% a través de las fuentes señaladas, lo anterior se pueden observar en la Figura 1 – generación de electricidad por fuente energética en México [1], lo anterior

¹ Objetivo de Desarrollo Sostenible número 7, las cuatro dimensiones de este objetivo podrían generar el acceso mundial de la energía eléctrica, sin embargo, para lograrlo debe considerarse el crecimiento demográfico y medio ambiental debido al desarrollo de las ciudades.

² La Organización de las Naciones Unidas (ONU), refiere al Cambio Climático como las variaciones de temperatura y patrones climáticos de la Tierra a largo plazo.

³ La Agenda 2030 llamada -plan para lograr un futuro mejor y más sostenible para todos- es una resolución dada por la Asamblea General de las Naciones Unidas (AG-ONU) de fecha 25 de septiembre del 2015 y el cual contiene 17 objetivos globales.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

de acuerdo a datos de la Agencia Internacional de Energía (por sus siglas en inglés, International Energy Agency - IEA).

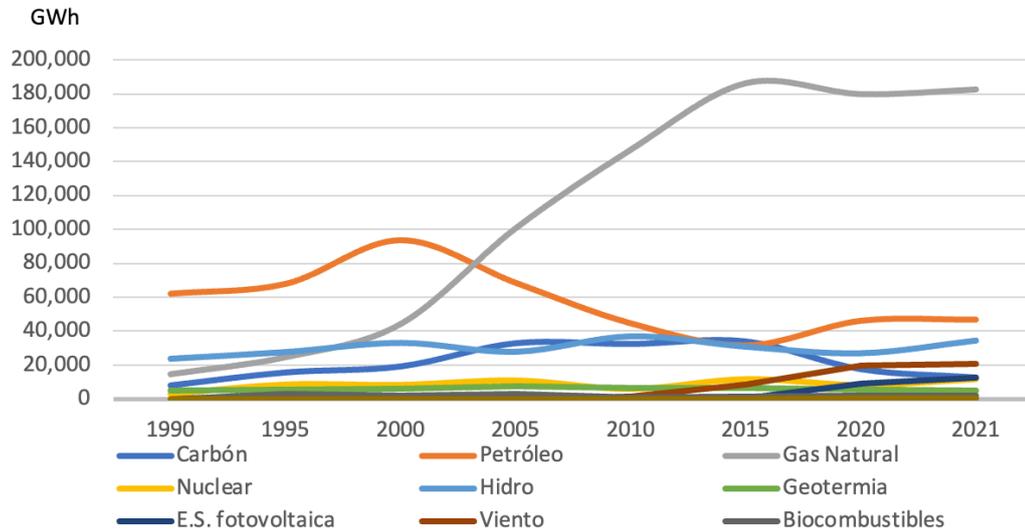


Figura 1. Generación de electricidad por fuente de energía en México. Fuente: World Energy Statistics and Balances, IEA 2020.

Las emisiones de GEI forman parte de los fenómenos asociados al Cambio Climático, con especial incidencia en las personas afectadas por condiciones meteorológicas extremas y otros peligros climáticos, que se refiere a los cambios a largo plazo en el clima de la Tierra, incluyendo un aumento de la temperatura media global, un aumento del nivel del mar y cambios en los patrones de precipitación.

Estos cambios pueden tener impactos graves en la salud humana, incluyendo condiciones meteorológicas extremas como olas de calor, sequías, inundaciones, enfermedades transmitidas por vectores y otros efectos indirectos como la disminución de la calidad del aire y del agua [4].

La Figura 2 muestra la evolución de las emisiones en México por sector, debido al uso de combustibles fósiles. Esta información se obtuvo a partir de los balances energéticos de la IEA y se muestra en intervalos de cinco años, desde 1990 hasta el 2020. La figura permite observar que,

después del sector transporte, la producción de electricidad es la de mayor contribución a las emisiones de CO₂ [5].

Para el año 2022 en América Latina y el Caribe, México emitió 357 Mt CO₂ de emisiones de gases asociados al Cambio Climático, encontrándose solo por debajo de Brasil con 467 Mt CO₂, posicionándose en el número 16 y 12 respectivamente [3], de acuerdo al Atlas Global del Carbón (por sus siglas en inglés, Global Carbon Atlas - GCA).

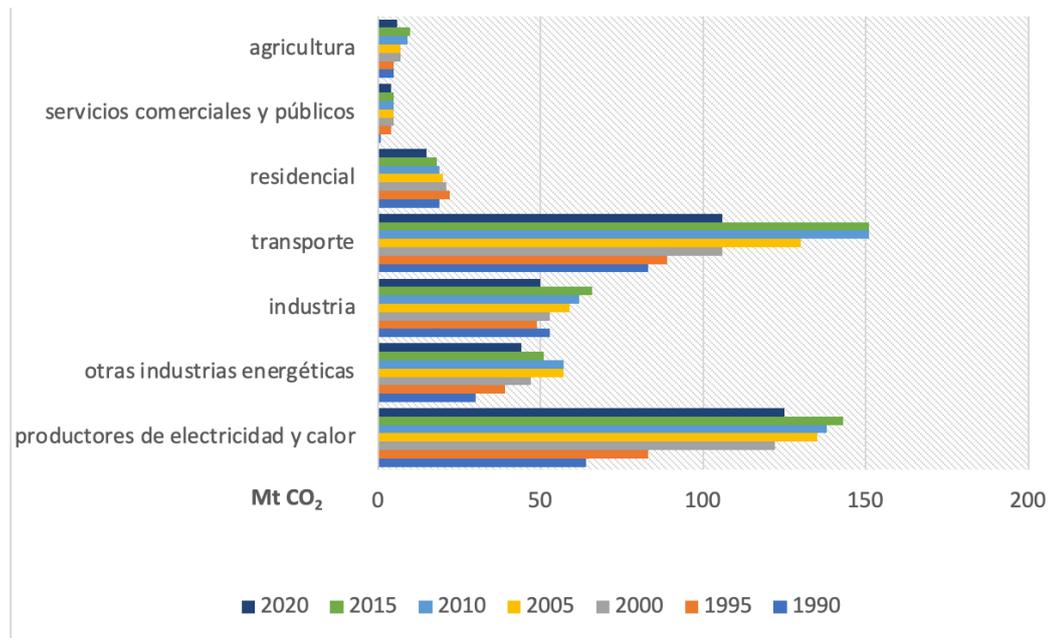


Figura 2. Emisiones de CO₂ por sector en México. Fuente: World Energy Statistics and Balances, IEA, 2020.

La pérdida de biodiversidad, el adelgazamiento de la capa de ozono, el cambio de la tierra, la disponibilidad de agua potable, las reservas de energía o la eutrofización, son algunos otros de los impactos ambientales significativos en el proceso conocido como Cambio Climático de la Tierra.

De acuerdo a datos de la IEA, existen cerca de 2 mil millones de equipos de aire acondicionado en funcionamiento en todo el mundo [5], la demanda eléctrica para la operación de estos equipos muestra el mayor crecimiento durante el año 2021 de entre todos los usos finales de edificios.

El uso de los equipos de aire acondicionado convencional representa el 16% del consumo final de electricidad total en los edificios y el 10% del consumo eléctrico mundial [5].

De acuerdo con la terminología de la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (por sus siglas en inglés American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – ASHRAE) un sistema pasivo es una técnica en la cual las fuerzas naturales se utilizan en sustitución de fuentes mecanizadas, eléctricas o químicas para la climatización [6], en comparación como sucede con los sistemas activos.

Entre las investigaciones realizadas para el acondicionamiento de las edificaciones con sistemas pasivos, se encuentran los trabajos de Omrany [7], en el que se mencionan aplicaciones de elementos pasivos, algunos de ellos como los muros “trombe”⁴ o los de “doble pared”⁵, logrando mejorar la eficiencia energética en los edificios evaluados.

La utilización de un sistema pasivo considera un conjunto de elementos interrelacionados entre sí para aprovechar los recursos

⁴ El muro trombe hace referencia a un muro orientado hacia el sol, construido con materiales aislantes y con una forma que permita el tránsito del aire.

⁵ El muro de doble pared está formado principalmente de dos muros, el primero puede estar construido con materiales convencionales, mientras que el segundo deberá colocarse con materiales aislantes, logrando así ganancias de calor o evitándolas, por lo que su funcionamiento puede emplearse en verano como para invierno. Recuperado de: <https://www.archdaily.mx/mx/02-68622/en-detalle-muro-trombe>. Fecha de consulta: 27 de agosto del 2023.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



naturales, adaptarse a las condiciones climáticas del lugar, buscando conseguir el confort térmico⁶ interior con el menor uso final de energía.

Algunos ejemplos de estos sistemas pasivos son: “el muro trombe”, “los muros verdes”, los “muros dobles”, o bien la ventilación cruzada y los aleros, empleados como sobra para disminuir las temperaturas interiores en los edificios.

Se han realizado investigaciones al respecto de los sistemas pasivos con un enfoque sobre los rendimientos energéticos en edificaciones bioclimáticas y también en comparación con edificaciones sin elementos de climatización, obteniendo resultados de correlación entre la reducción de la temperatura y las características de sistemas de confort térmico [8-9], algunas herramientas utilizadas en estos estudios han sido programas como Transient System Simulation Tool (TRNSYS⁷).

1.2 Justificación

El objeto de estudio de la investigación es una oficina de 38.4 m³ ubicada en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) en la ciudad de Cuernavaca, destinada a un profesor investigador de tiempo completo.

La zona de análisis se ubica geográficamente entre los paralelos 18°58' de latitud norte, 99° 14' de longitud oeste y a una altitud de 1,870 msnm. La Ciudad de Cuernavaca presenta clima cálido subhúmedo con

⁶ La ASHRAE en su apartado de terminología define al confort térmico como la condición mental de una persona, que expresa satisfacción de su entorno circundante con el cuerpo humano.

⁷ Los software de simulación como el TRNSYS®, resultan una herramienta para la evaluación de sistemas de energía solar por procesos transitorios, dividido en dos secciones: el Kernel y la biblioteca de componentes.



lluvias en verano de mayo a octubre (precipitación mensual promedio de 192.56 mm) y estiaje de noviembre a abril (con precipitación mensual promedio de 10.26 mm) [10].

La época más cálida se presenta en primavera-verano con temperatura máxima mensual de 32°C y mínima promedio de 11°C. [10]. De acuerdo a los datos anteriores en Cuernavaca, durante el verano se observa una mayor demanda de enfriamiento en el interior de la oficina analizada, implicando la necesidad de utilizar un sistema de acondicionamiento de aire. Además, alrededor del edificio se carece de árboles que ayuden a renovar el aire interior ni proporcionen sombra para reducir las temperaturas interiores, por lo que la comodidad térmica en el interior de la oficina podría lograrse mediante el uso de un sistema activo o pasivo.

Aunado a lo anterior, si se utiliza un aire acondicionado convencional para satisfacer la necesidad de climatización en la oficina, ésto implicaría una demanda de energía eléctrica para su funcionamiento. Así al proponer un sistema pasivo en la edificación se proporciona una perspectiva de nula utilización de energía en la operación de climatización, a su vez se traduciría cero emisiones de GEI y otros impactos ambientales.

1.3 Hipótesis

El uso de elementos pasivo-arquitectónico discipa la cantidad de calor por radiación solar en muros y techos, las temperaturas interiores se disminuyen, además del requerimiento de energía para acondicionar el interior de ese espacio. El uso de estos elementos pasivos, disminuye reduce las emisiones de CO₂ en comparación con la utilización de sistemas activos.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Análisis de la disminución de emisiones de CO₂ para el acondicionamiento de una oficina para un profesor investigador de tiempo completo, por medio de elementos pasivo-arquitectónico, en comparación con un equipo de aire acondicionado convencional en su etapa de construcción y operación.

1.4.2 Específicos

- Estimación de CO₂ para el acondicionamiento de aire acondicionado convencional.
- Estudio de calentamiento en zonas tropicales para una estructura construida de materiales convencionales.
- Propuesta de elementos pasivos arquitectónicos durante la temporada de verano en zonas geográficas con climas tropicales, cálidos sub-húmedos.
- Comparación de un sistema activo con uno pasivo en su etapa de construcción y operación en una edificación construida.

La demanda de energía eléctrica es una condición fundamental para el crecimiento económico y el desarrollo social, puesto que es un recurso indispensable para mejorar la calidad de vida de las personas. Sin embargo, también es importante considerar que el crecimiento económico y el consumo de energía están estrechamente relacionados y pueden tener modelos críticos de satisfacción.

En las edificaciones es fundamental promover la implementación de tecnologías y prácticas sostenibles que permitan reducir el consumo energético, minimizar el impacto ambiental de la construcción y el uso de los edificios.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



En este sentido, el uso de energías renovables como la solar, eólica, hidráulica y geotérmica es una alternativa interesante y eficiente para cubrir parte de las necesidades energéticas de los edificios. Además, es importante fomentar la aplicación de elementos pasivos como la orientación, el diseño y la ventilación natural, que permiten maximizar el aprovechamiento de la energía solar y reducir el consumo energético sin necesidad de utilizar sistemas activos de climatización.

En resumen, la construcción sostenible debe estar orientada a facilitar el uso de energías renovables, reducir el consumo energético, respetar el entorno y fomentar la aplicación de elementos pasivos que brinden respuesta a las necesidades de confort y calidad de vida de las personas que habitan o trabajan en los edificios

CAPÍTULO II Marco Teórico, climatización de edificios

2.1 Climatización de edificios mediante sistemas activos

Las consecuencias de una práctica desmedida sobre el consumo de energía son múltiples y diversas. Algunas de ellas van más allá de lo que esa práctica puede controlar y en gran medida puede superar el fin para el cual fue creado, nos referimos a la utilización de la energía eléctrica para la climatización de edificios.

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) menciona que existen diferentes formas de mantener en confort térmico a los interiores de los edificios, algunos son:

- Uso de la sombra: mediante el uso de elementos de sombra, como toldos, persianas, árboles, etc., se puede reducir la radiación solar directa sobre las ventanas y paredes del edificio, disminuyendo así las temperaturas presentadas al interior de la edificación.
- Orientación solar: la orientación del edificio y de sus ventanas puede aprovechar la radiación solar para el calentamiento en invierno y el enfriamiento en verano.
- Ventiladores eléctricos: la circulación de aire puede ayudar a reducir la sensación térmica, sin necesidad de bajar la temperatura del aire mediante un aire acondicionado.
- Tecnologías eficientes: existen tecnologías más eficientes y sostenibles que los aires acondicionados convencionales, como los sistemas de enfriamiento evaporativo, los sistemas de geotermia, entre otros⁸.

⁸ Tanto los sistemas de enfriamiento como los de geotermia son poco utilizados debido a su alta inversión de riesgo, en comparación con las inversiones en energía solar, estos requieren de estudios previos para su implementación, sin la garantía de lograr lo deseado. Recuperado de: <https://petroquimex.com/estado-de-la-energia-geotermica-en-mexico/>
Fecha de consulta: 27 de agosto del 2023.

La demanda de energía eléctrica para la climatización mediante equipos de aire acondicionado convencional y ventiladores eléctricos se ha duplicado desde el año 2000, convirtiéndose en el uso final de más rápido crecimiento en edificios [5]. El impulso de su uso está dado por el acelerado crecimiento demográfico en las zonas más cálidas del planeta.

De acuerdo con la figura 3, China es actualmente el país con mayor cantidad de equipos de aire acondicionado instalados en todo el mundo, con cifras que superan los 500 millones de unidades, representando cerca de un tercio del total de equipos instalados en todo el mundo [5].

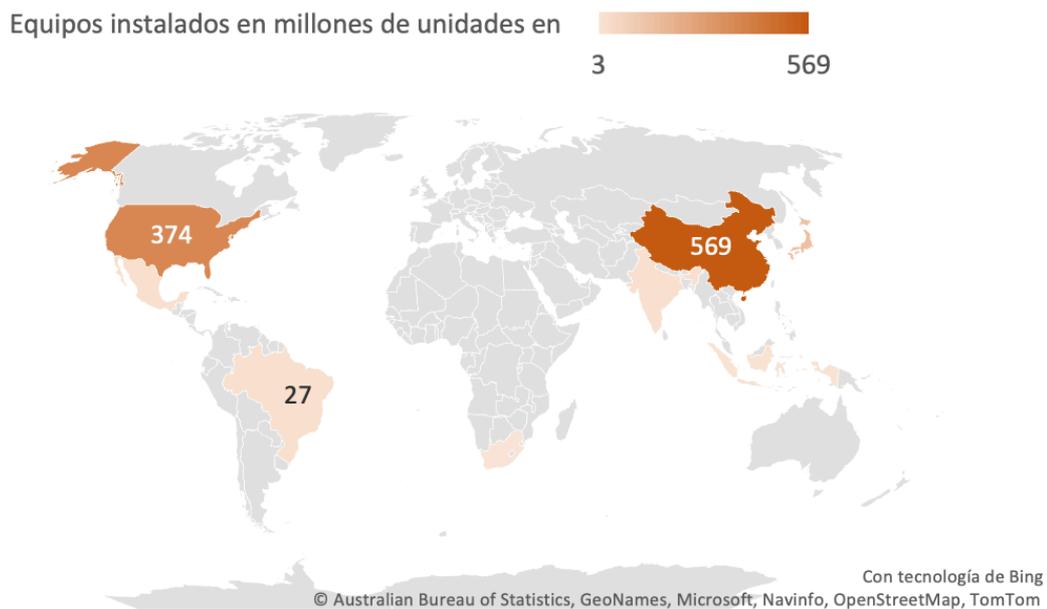


Figura 3. Equipos de aire acondicionado instalados en el mundo. Fuente: World Energy Statistics and Balances, IEA, 2020.

Así mismo en la Tabla 1 se puede apreciar que Estados Unidos de América es actualmente el país con la mayor demanda de energía para el funcionamiento de equipos de aire acondicionado en todo el mundo.

Según las estadísticas del año 2021, la demanda de energía eléctrica para la operación de los equipos de aire acondicionado en los sectores comercial-residencial en los Estados Unidos de América fue de



4,726 GW, representando poco más del 40% del total de la demanda de energía eléctrica para la operación del total de los equipos de aire acondicionado en todo el mundo [5].

Tabla 1. Equipos de aire acondicionado, instalados y ventas anuales. Fuente: *World Energy Statistics and Balances*, IEA, 2021.

Países	Equipos instalados de aire acondicionado		Ventas anuales	
	Millones de unidades	Demanda GW	Millones de unidades	Demanda GW
China	569	2,899	53	386
Estados Unidos de América - EUA	374	4,726	24	443
Japón	148	759	11	61
Unión Europea ⁹	97	847	12	75
Korea	59	348	4	34
Medio Oriente ¹⁰	47	299	6	45
India	27	149	4	25
Brasil	27	127	1	6
México	16	105	2	10
Indonesia	12	59	2	9
Sudáfrica	3	22	0.3	2.1
Mundo	1,622	11,673	135	1,207

Por otro lado, en cuanto a las ventas anuales de equipos de aire acondicionado, China es el país con la mayor cantidad de unidades vendidas con 53 millones, representando aproximadamente un tercio del total mundial de ventas. Esto, a su vez, se traduce en una demanda de electricidad para la operación de estos equipos de poco más de 400 GW [5]. Lo anterior va en función del clima en cada zona y uso final.

⁹ La Agencia Internacional de Energía considera a la Unión Europea como una entidad geopolítica formada por 27 países, Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chequia, Chipre, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Países Bajos, Polonia, Portugal, Rumania y Suecia.

¹⁰ La Agencia Internacional de Energía considera al Medio Oriente como una entidad geopolítica formada por 12 países, República Islámica de Irán, Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos, Irak, Qatar, Kuwait, Omán, Baréin, República Árabe Siria, Jordán, Líbano y Yemen.

2.1.1 Tipos de aires acondicionados

Los sistemas de aire acondicionado convencionales se utilizan comúnmente a pequeña escala, en hogares y oficinas pequeñas, sin embargo, también existen sistemas más grandes para edificios de mayor tamaño, como centros comerciales, hospitales, hoteles y rascacielos.

En casos de edificaciones mayores, se utilizan sistemas de aire acondicionado centralizados, los cuales pueden incluir torres de enfriamiento, conductos de aire, entre otros componentes. Estos sistemas son más complejos y suelen requerir un mayor consumo de energía eléctrica para su operación, lo que puede generar impactos ambientales significativos.

Los equipos de aire acondicionado comerciales suelen estar compuestos por una unidad interior y otra exterior, comunicadas mediante tuberías. La unidad interior suele incluir el evaporador con el ventilador, mientras que la unidad exterior incluye el compresor, el condensador, la válvula de expansión y otros dispositivos para su debido funcionamiento.

El compresor se encarga de comprimir el gas refrigerante para aumentar su temperatura, mientras que el condensador se encarga de disipar el calor generado en el proceso de condensación del gas refrigerante. El evaporador tiene la función de evaporar el líquido refrigerante en la unidad interior, permitiendo que el aire que circule por el equipo, se enfríe y se distribuya en la habitación. Algunos tipos de estos aires acondicionados (convencionales) son los siguientes:

- Aire acondicionado sin conductos: son una opción para climatizar espacios específicos o zonas cerradas. Los *“equipos de ventana”* son un tipo de estos aires, se instalan en una abertura en la pared o

en la ventana, mientras que los “*mini-split*” son otro tipo de aire, constan de una unidad interior y una unidad exterior conectadas por tuberías. Estos equipos son una alternativa eficiente a los sistemas de aire acondicionado centralizados con conductos, no se pierde energía en la distribución de aire a través de conductos [5], ver Figura 4.



Figura 4. Aire acondicionado de ventana y minisplit.

- Aire acondicionado de un solo conducto: también conocido como “*sistema de paquete*”, consta de una unidad externa y una unidad interna que se coloca en una pared o techo. El aire frío se distribuye a través de un solo conducto hacia las diferentes habitaciones o zonas, se regula la temperatura y la velocidad del flujo de aire mediante una serie de controles y salidas de aire [5], ver Figura 5.

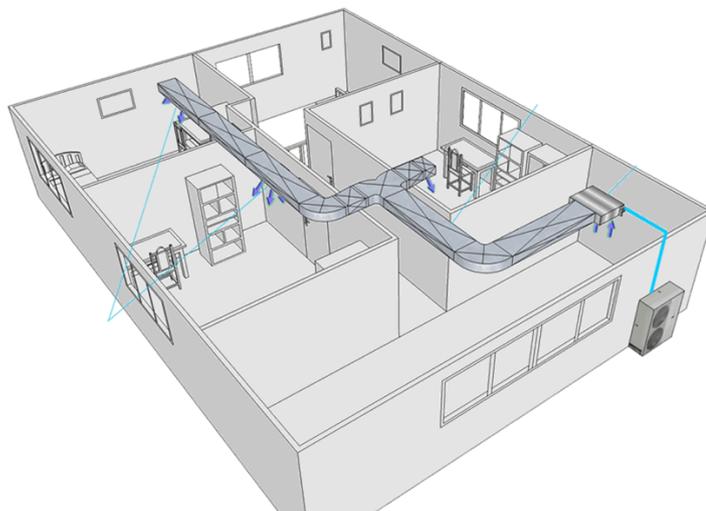


Figura 5. Aire acondicionado de un solo ducto.

- Aire acondicionado de doble conducto: este tipo de sistema utiliza dos conductos, uno para el aire frío y otro para el aire caliente. El aire frío se distribuye a través de un conducto y el aire caliente a través del otro. El aire frío se mezcla con el aire del interior de la habitación y luego es succionado nuevamente al sistema para ser enfriado y distribuido de nuevo. El aire caliente se expulsa fuera del edificio. Este proceso se repite continuamente para mantener la temperatura deseada en las diferentes zonas y habitaciones [5], ver Figura 6.

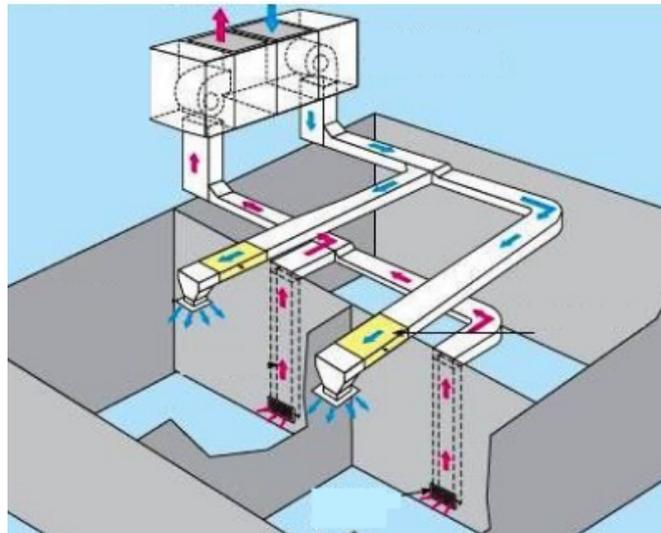


Figura 6. Aire acondicionado de dos ductos.

2.2 Climatización de edificios mediante sistemas pasivos

La aplicación del acondicionamiento en zonas específicas al interior de un casa o edificio, mediante herramientas y estrategias como los sistemas pasivos, pretende lograr o en su defecto acercar al nivel de confort térmico respecto de parámetros meteorológicos del lugar donde se ubican.

De manera muy similar al acondicionamiento mediante aire acondicionado como sistema activo, el objetivo principal de un sistema pasivo, refiere la intervención del fenómeno de transferencia de calor por



conducción [11] y la relación existente con las edificaciones respecto de la diferencia con de la demanda de energía eléctrica para su operación [12].

Los sistemas pasivos son una alternativa sostenible y eficiente para el acondicionamiento de espacios, basados en el uso de elementos y técnicas arquitectónicas, aprovechando las condiciones naturales del entorno para lograr un confort térmico adecuado sin necesidad de consumir energía adicional.

Entre los sistemas pasivos más utilizados se encuentran la ventilación natural, el uso de sombras y el aprovechamiento de la inercia térmica de los materiales. Además, pueden utilizarse estrategias de diseño, la orientación y la distribución de los espacios para maximizar su eficiencia energética. Algunos de estos se describen en el siguiente subtema.

2.2.1 Tipos de sistemas pasivos

En definitiva, el uso de sistemas pasivos contribuye a la reducción del consumo de energía, a la disminución de GEI y también puede mejorar la calidad de vida de los usuarios de los espacios, al generar ambientes saludables y confortables. Algunos de los elementos pasivos pueden ser:

Orientación para ventilación: es una estrategia pasiva basada en aprovechar la fuerza y velocidad del viento para mejorar la calidad del aire y la sensación térmica de las personas en los espacios interiores. Para lograrlo, es importante tener en cuenta la ubicación y dimensión de las ventanas, así como la orientación del edificio con respecto a la dirección de los vientos dominantes. También se pueden implementar técnicas como la ventilación cruzada, la cual consiste en abrir ventanas en lados opuestos del edificio para crear una corriente de aire refrescante al ambiente de manera natural.

Orientación por radiación: es una estrategia de diseño pasivo que consiste en ubicar el edificio de tal manera que se aproveche la radiación solar durante el invierno para calentar el interior y evitarla durante el verano para lograr reducir el calor. Ésto se logra mediante el diseño de elementos arquitectónicos como ventanas, aleros, muros y techos que permiten el control de la entrada de luz y calor en el edificio.

Color de superficie de techos y paredes: la elección del color de las superficies exteriores puede tener un impacto significativo en la temperatura interior del edificio, los colores claros reflejan la luz y reducen la cantidad de calor absorbido, mientras los colores oscuros absorben mayoritariamente la luz solar y aumentan la cantidad de calor absorbido. Ésto puede ser especialmente importante para las superficies de la losa de azotea, ya que reciben una cantidad significativa de radiación solar directa. Se puede utilizar vegetación y elementos de sombra para controlar la cantidad de radiación solar.

2.3 Simulación en TRNSYS®

Investigadores como Crawley realizaron comparaciones de las capacidades de veinte programas importantes de simulación de desempeño energético en edificaciones, brindando indicadores de uso y demanda energética, temperatura, humedad y costos, todo lo anterior basado en la información de los desarrolladores durante los últimos 50 años [13]. Dentro de éstas investigaciones se destaca al programa TRNSYS® por su entorno gráfico de fácil acceso.

TRNSYS® es una herramienta de simulación transitoria y en estado estacionario, con una estructura modular, permitiendo modelar el comportamiento térmico de edificios e implementa un enfoque basado en



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



componentes¹¹. También es usado para validar desarrollos energéticos, incluyendo estrategias de control y sistemas alternativos de fuentes de energía.

Cada módulo es llamado “*Type*” (por ejemplo, el type 1 es un colector solar, mientras que un edificio multizona es el type 56) y éstos a su vez son representados por una sub-rutina que describe el comportamiento, todos los módulos contienen modelos físico-matemáticos basados en ecuaciones de transferencia de calor y masa.

2.3.1 Funcionamiento de TRNSYS®

Los componentes se configuran y se ensamblan utilizando una interfaz visual llamada TRNSYS® Simulation Studio, mientras que la configuración de los datos de entrada, respecto de las condiciones climatológicas del edificio, propiedades termo físicas de los materiales de construcción, orientaciones y establecimiento de temperatura de confort, se ingresan a través de la interfaz llamada TRNBuild.

Posteriormente a la configuración, el motor de simulación resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales y algebraicas, representando el sistema energético completo. Véase la Figura 7.

2.3.2 Aplicaciones de TRNSYS®

Existen diversas investigaciones que utilizan como base las herramientas de simulación para la cuantificación de la demanda energética y el control térmico interior en las edificaciones, tal es el caso de

¹¹ La forma para generar un proyecto en TRNSYS® requiere de conexiones gráficas por medio de los componentes del sistema; llamados “types”, los cuales se generan en la interfaz visual Simulation Studio. Este programa tiene una biblioteca de componentes de aproximadamente 150 modelos entre los que destacan las bombas, edificios multizona y turbinas de viento.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



la utilización del programa TRNSYS®, este software fue desarrollado por el laboratorio de Energía Solar en la Universidad de Wisconsin-Madison.

TRNSYS® tiene un abanico de usuarios en todo el mundo, investigadores, consultores, energéticos, ingenieros, expertos en simulación de edificios, estudiantes y arquitectos; por mencionar a algunos.

Gracias a su potencial funcionamiento, flexibilidad y aplicación se utiliza en:

- Simulación de edificios
- Sistemas solares térmicos
- Sistemas solares fotovoltaicos
- Generación e implementación de edificios de baja demanda energética
- Sistemas de climatización (por sus siglas en inglés, Heating – Ventilation – Air conditioning – HVAC¹²)
- Plantas de biomasa, cogeneración y trigeneración
- Simulación de procesos de transferencia de calor
- Bombas de calor geotérmicas
- Simulación de zonas térmicas acopladas
- Modelado de flujos de aire
- Optimización de sistemas energéticos
- Investigación y desarrollo de sistemas de producción y distribución energética
- Evaluación de tecnologías emergentes
- Pilas de combustible

¹² Las siglas HVAC engloban la calefacción, ventilación y aire acondicionado, término utilizado para señalar la climatización de las edificaciones.

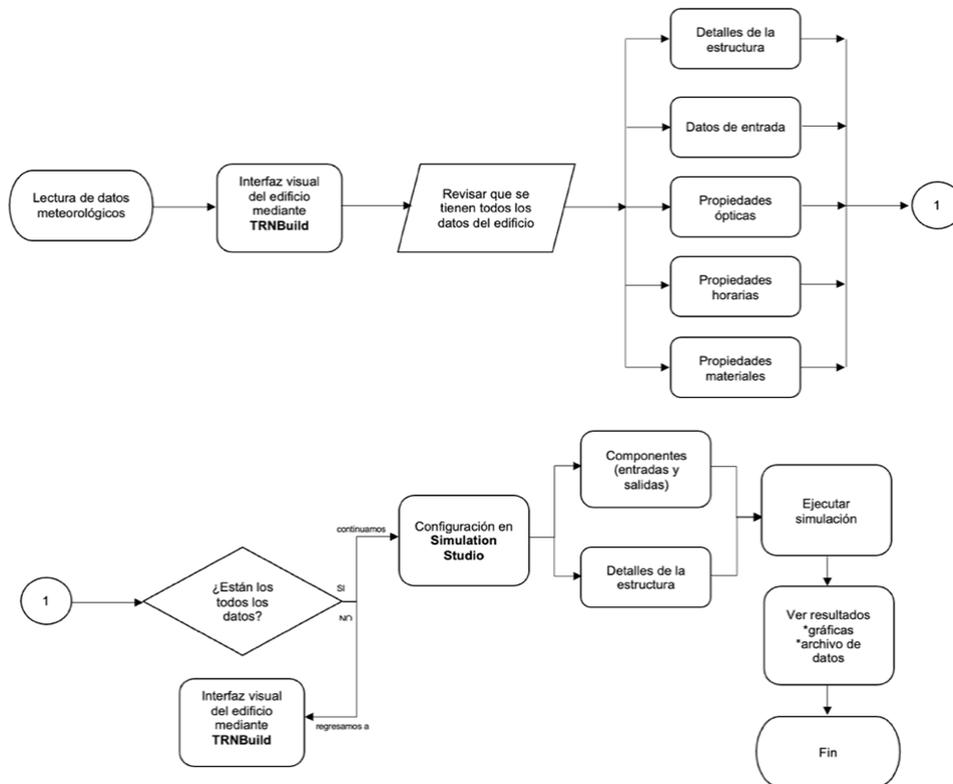


Figura 7. Funcionamiento del programa TRNSYS®. Fuente: Volumen 1-empezando- TRNSYS®.

2.4 Análisis de Ciclo de Vida en OpenLCA

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de un producto, bien o servicio; intenta identificar, cuantificar y caracterizar la diversificación de impactos ambientales potenciales, asociadas a las etapas de la vida del producto, incluyendo la extracción, materias primas, manufactura, transporte, distribución, operación, reutilización y disposición final cuando de se trate de economía circular [14-15].

La Organización Internacional para la Estandarización (por sus siglas en inglés, *International Organization for Standardization – ISO*) define a la metodología de ACV como un método para comprender y tratar los



posibles impactos asociados con los productos manufacturados y consumidos [16].

De acuerdo a la Comisión Europea sobre datos, herramientas y servicios basados en el pensamiento de ciclo de vida (por sus siglas en inglés, *European Commission's Reference Life Cycle Data System – ELCD*) [17] define al ACV como una herramienta metodológica del ciclo de vida de una manera cuantitativa al análisis ambiental de actividades relacionadas con procesos y productos.

Así mismo la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México – UNAM [18] define al ACV como una metodología que permite cuantificar los impactos ambientales de productos, materiales, procesos, actividades o servicios de una forma integral; permitiendo identificar oportunidades de mejorar en el desempeño ambiental de las edificaciones.

Algunas de las características más significativas de esta metodología son las siguientes:

- Evaluar la magnitud de la contribución de cada elemento que integra el proceso (emisiones y uso de recursos de un sistema de productos) reflejado en un impacto al medio ambiente.
- Está automatizado por alguno de los software existentes (de acceso gratuito o bajo cuota) el cual ayuda a realizar comparaciones de procesos energéticos.
- La información evaluada, se traduce en puntajes de impacto ambiental.
- Brinda como resultado información útil para la fase de la interpretación.

- Propone una perspectiva de toma de decisiones para productores, consumidores y políticas públicas gubernamentales.

2.4.1 Normatividad del ACV

Realizar estudios de esta naturaleza conlleva la necesidad de obtener resultados objetivos, claros y precisos, ISO es el organismo desarrollador de una serie de estándares enfocados a la *Gestión Ambiental*, entre ellos el ISO-14001 [16].

Si bien la adopción de estos estándares es voluntaria, muchas organizaciones los utilizan como guía para mejorar su gestión ambiental y demostrar su compromiso con la sostenibilidad.

2.4.2 Fases del Análisis de Ciclo de Vida

Un ACV tiene cuatro principales fases, las cuales están determinadas por la serie ISO 14041-14043 como se pueden observar en la Figura 8, su aplicación está dada por la correlación entre ellas, por lo que, cada fase está interconectada y los resultados obtenidos en una fase son utilizados como fuente principal de datos para la siguiente fase.

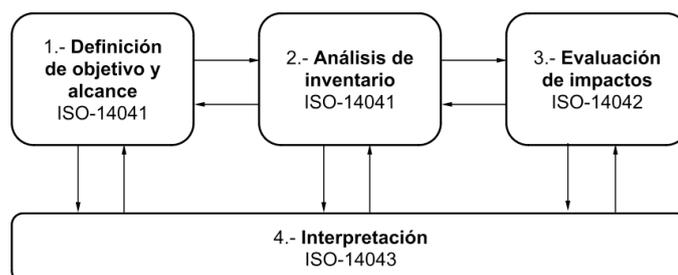


Figura 8. Principios y marco de referencia de la metodología de ACV. Fuente: [19].

1. Etapa de definición de objetivo y alcance: en esta etapa se determina el límite del sistema, los procesos que habrán de analizarse por su importancia para lograr el objetivo y alcance planteados.



2. Etapa de análisis de inventario: es la etapa que justifica la investigación de la información que habrá de utilizarse para el análisis.
3. Etapa de evaluación de impacto: esta etapa es dependiente en su totalidad del software que habrá de utilizarse, se introduce la información de la etapa anterior, se selecciona uno de los métodos de evaluación de impactos que ofrece el programa y que es el idóneo por resultar de interés como consecuencia de la etapa 1.
4. Etapa de interpretación: es conocida como la última de las etapas y lleva consigo la responsabilidad de mostrar los resultados generados por el programa. A su vez quien maneja la información es el responsable de ser objetivo con los aspectos observados.

CAPÍTULO III Zona de estudio, características climatológicas y descripción de los análisis comparativos a evaluar

3.1 Zona de estudio

Se seleccionó como caso de estudio una oficina en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), perteneciente a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), ubicada en la ciudad de Cuernavaca.

La oficina tiene un volumen construido de 38.4m^3 , con una envolvente exterior dada por un material rugoso (tabique rojo recocido y junta de mortero) sin ningún tipo de aislante térmico en su exterior. Esta oficina es usada por un profesor investigador de tiempo completo.

3.1.1 Características constructivas propias del edificio analizado.

La oficina seleccionada se encuentra en la segunda planta de unos de los edificios pertenecientes al CIICAp, se conforma por tres plantas: planta baja, primera planta y segunda planta. La Figura 9, muestra el plano arquitectónico para una mejor apreciación de la zona, destacándola en color amarillo.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



Figura 9. Planta arquitectónica de ubicación espacial de la oficina estudiada.

Así mismo la Figura 10, muestra la cara sur donde se encuentra la oficina de estudio, señalada en contorno rojo y en color azul una oficina inferior que servirá de apoyo en la evaluación de transferencia de calor.



Figura 10. Fotografía de muro sur del edificio donde se encuentra la oficina de estudio.

La volumetría del edificio fue dibujada utilizando el software de representación 3D SketchUp. La información para el modelado se extrajo utilizando los planos en AutoCAD presentados en la figura 9. La inclusión de las imágenes puede ser útil para observar detalles omitidos en la descripción textual del espacio y para ilustrar las características de la envolvente del edificio. Ver figura 11.

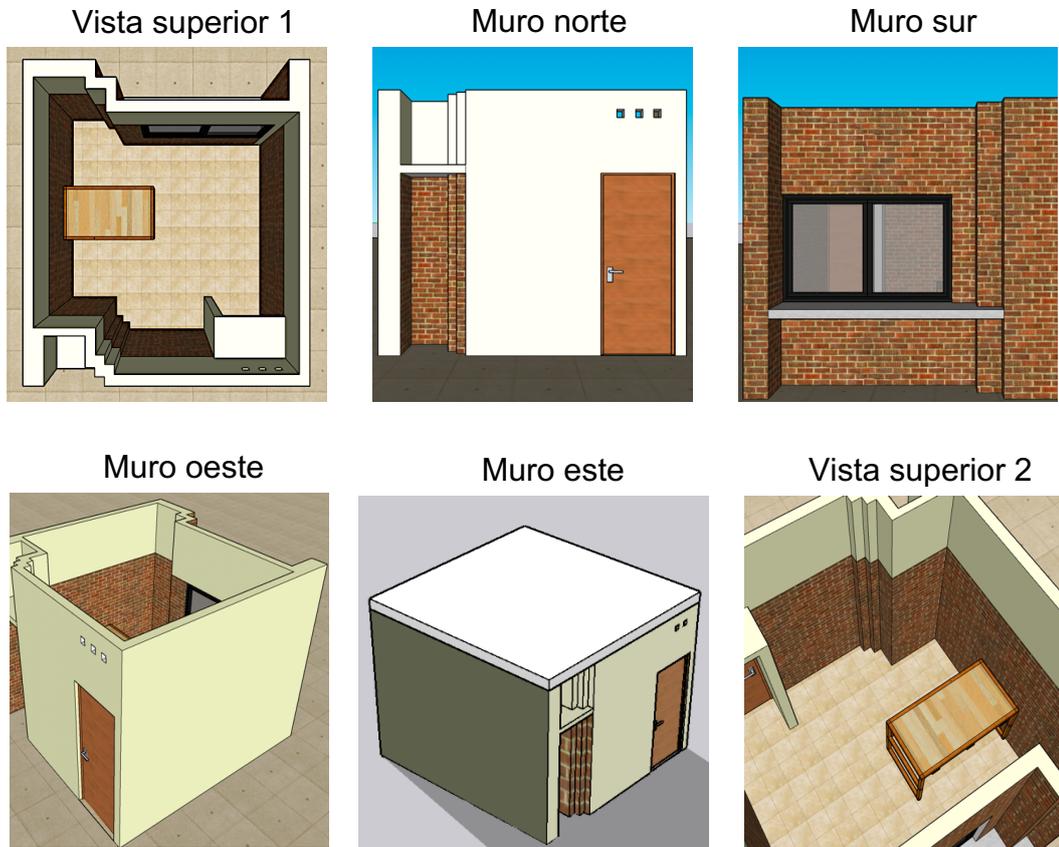


Figura 11. Volumetría de la oficina de estudio en presentación 3D.

La Figura 12 muestra el sombreado correspondiente al muro sur del edificio donde se encuentra la oficina, tomado en cinco horarios para el día 21 de marzo del 2023. El asoleamiento observado, nos indica un mayor porcentaje de radiación solar directa en el muro sur y en la losa de azotea de la oficina de estudio. La cara norte se encuentra al interior del edificio, mientras que el muro este y el muro oeste son adyacentes de otras oficinas, por lo tanto, estos tres muros reciben nula radiación.



Figura 12. Reporte fotográfico de sombreado en muro sur del edificio donde se encuentra la oficina de estudio.

3.2 Características climatológicas

La zona de análisis se ubica geográficamente entre los paralelos $18^{\circ}58'$ de latitud norte, $-99^{\circ} 14'$ de longitud oeste y a una altitud de 1,870 msnm. La ciudad de Cuernavaca, Morelos se encuentra en la zona climática de cálido subhúmedo. Sin embargo, dentro de esta zona climática, existen diferentes microclimas según la altitud, la topografía y la vegetación.

Por ejemplo, en las zonas más bajas y cercanas a ríos, el clima puede ser más húmedo y cálido, mientras que en las zonas más altas y con más vegetación, el clima puede ser fresco y templado.

En resumen, aunque la zona climática general de Cuernavaca es cálida y subhúmeda, la presencia de microclimas en la ciudad generan variaciones en la temperatura según la zona en la que se encuentran las edificaciones que se evalúen.

3.2.1 Temperatura

La época más caliente en la Ciudad de Cuernavaca se presenta en primavera-verano (marzo a agosto) con temperatura máxima promedio de 32°C y mínima promedio de 11°C [10].



La Tabla 2 muestra el resumen mensual de temperaturas medias durante 38 años, comprendidos de 1985 al 2022 en el Estado de Morelos [20]. En la tabla se aprecia la época de mayores temperaturas medias, siendo éstas en, los meses de abril a junio, presentandose temperaturas superiores a los 26 °C.

Tabla 2. Temperaturas medias registradas en el Estado de Morelos del año 1985 a 2022. Fuente: [20].

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1985	19.1	20.1	22.3	23.6	24.2	22.3	21.2	21.9	21.0	20.8	19.4	19.0	21.2
1986	17.4	19.6	20.3	23.5	23.6	22.2	21.6	21.8	21.5	21.4	21.2	19.4	21.1
1987	19.1	20.1	21.8	23.1	24.3	23.0	22.0	22.1	22.5	20.3	19.9	20.0	21.5
1988	18.6	20.7	22.1	24.0	24.9	23.7	22.2	21.9	21.3	21.2	20.1	19.0	21.6
1989	19.7	19.7	20.9	23.0	24.1	23.0	21.6	21.3	21.2	20.4	20.5	18.8	21.2
1990	19.4	20.4	22.1	23.5	23.8	22.9	21.5	21.7	21.5	21.4	20.1	19.0	21.4
1991	19.4	21.0	22.8	24.8	24.7	23.7	22.0	22.5	21.4	21.2	19.8	19.3	21.9
1992	18.8	19.0	22.3	23.3	23.1	23.0	22.0	21.8	21.5	21.3	20.4	19.8	21.4
1993	19.7	20.7	22.0	23.5	24.6	24.4	22.4	22.8	22.1	22.0	21.0	19.5	22.1
1994	19.5	21.4	23.4	24.2	24.9	22.8	22.7	22.2	22.0	21.9	20.9	20.5	22.2
1995	20.1	21.4	23.0	24.2	24.5	23.5	22.0	22.2	22.2	21.7	21.1	19.3	22.1
1996	18.2	19.9	21.3	23.2	24.5	22.5	22.1	21.9	22.2	21.4	20.0	19.3	21.4
1997	18.4	20.6	22.3	22.9	23.4	23.5	22.3	22.6	22.0	21.2	20.7	19.3	21.6
1998	18.3	19.1	22.1	25.2	25.4	25.2	23.1	22.4	22.0	21.8	21.2	19.1	22.1
1999	18.6	20.4	22.5	24.2	24.7	24.0	22.1	22.4	22.0	20.5	19.5	18.2	21.6
2000	18.3	19.9	22.3	24.0	23.7	22.2	22.4	22.0	22.0	21.4	21.4	18.7	21.5
2001	18.9	20.5	21.5	23.4	23.7	22.2	21.7	22.0	21.7	21.0	19.6	19.1	21.3
2002	18.8	20.4	22.8	24.5	24.5	22.3	21.9	22.1	21.3	21.0	18.6	18.0	21.3
2003	18.7	20.5	22.2	24.7	25.5	22.8	22.1	21.9	21.6	21.4	20.2	17.4	21.6
2004	17.7	18.8	21.7	22.8	23.7	21.8	20.9	21.1	20.9	20.9	18.9	16.2	20.4
2005	17.8	19.9	20.7	23.3	23.6	23.4	21.5	20.1	19.9	19.5	18.7	17.7	20.5
2006	19.1	21.3	23.4	24.8	24.7	22.7	22.6	21.9	21.8	21.9	18.8	18.5	21.8
2007	20.7	21.4	23.6	24.7	25.0	24.0	22.0	22.9	22.3	21.3	19.9	20.7	22.4
2008	19.5	20.8	23.3	24.9	24.5	23.0	20.9	23.1	21.7	20.8	19.3	17.6	21.6
2009	19.2	21.1	22.6	24.5	24.7	23.1	21.1	22.4	22.1	22.0	19.3	19.9	21.8
2010	17.3	19.0	22.5	23.4	26.4	24.9	22.2	22.2	21.9	21.7	19.7	17.5	21.6
2011	18.4	20.4	22.6	24.8	24.8	22.7	22.1	21.3	21.6	20.2	20.2	18.4	21.5
2012	18.7	20.3	22.1	23.1	24.2	22.9	21.6	22.2	21.9	21.2	19.6	19.6	21.5
2013	19.7	21.5	22.6	25.1	24.7	23.0	22.2	22.6	21.8	22.2	20.9	19.9	22.2
2014	19.1	22.1	24.4	25.3	24.3	23.3	22.4	22.7	22.2	21.7	20.2	19.2	22.2
2015	19.9	20.7	22.6	25.7	24.3	23.1	22.7	23.0	22.8	22.8	22.6	20.7	22.6
2016	18.2	20.7	22.5	25.1	25.9	23.2	22.8	22.4	22.0	22.2	20.6	21.1	22.2
2017	19.7	21.5	23.4	25.0	25.4	23.1	22.5	22.6	22.2	21.6	20.3	18.8	22.2
2018	18.4	22.1	24.6	25.0	24.0	23.2	23.1	21.9	21.8	21.8	20.6	19.1	22.1
2019	19.2	21.9	24.4	24.6	25.4	23.6	22.4	22.6	22.4	21.7	21.2	19.5	22.4
2020	19.4	21.4	24.7	26.0	25.3	24.8	22.9	22.6	22.0	21.0	20.9	20.0	22.6
2021	19.7	20.7	23.7	24.8	24.5	22.6	22.4	22.4	22.2	22.3	20.0	20.1	22.1
2022	19.7	20.9	23.0	25.0	26.3	23.8	23.5	22.8	22.1	22.4	22.0	19.5	22.6

De acuerdo a ASHRAE [21], el rango óptimo para lograr el confort térmico en el interior de los edificios durante las condiciones de verano se sitúa entre los 23°C y los 25°C. Sin embargo, los datos experimentales que más adelante se detallan, indican que a partir del mes de marzo se registran temperaturas considerablemente superiores a este límite establecido. Esto



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

pone de manifiesto la necesidad de implementar sistemas de climatización en la oficina de estudio.

Así mismo, de la Tabla 2, se observa que el año 1985 registró una temperatura promedio de 21.2°C, mientras que el año 2022 alcanzó los 22.6°C. Esta diferencia de temperaturas indica que la temperatura promedio en el Estado de Morelos ha aumentado 1.4°C en un periodo de 37 años. El aumento de temperatura puede tener implicaciones para el clima y el medio ambiente local, reflejándose posiblemente en la alteración de la circulación de los vientos, la distribución de las precipitaciones y las corrientes marinas [22].

De acuerdo con los datos obtenidos diariamente por el Laboratorio de Edafoclimatología del Centro de Investigaciones Biológicas (CIB), a través de la Estación Meteorológica número 17 ubicada en la UAEM, se presentan en la Tabla 3 las temperaturas medias, registradas en el lugar de estudio durante el periodo de 2012 a 2022.

Tabla 3. Temperaturas medias en la UAEM 2012-2022. Fuente: Laboratorio de Edafoclimatología del CIB-UAEM, 2023.

Temperaturas promedio en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos 2012-2022													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
2012	14.9	16.7	19.5	18.6	18.9	18.9	15.5	16.9	17.2	17.7	18.1	18.2	17.6
2013	18.0	19.7	17.8	20.8	19.8	18.2	18.4	17.4	16.4	17.1	17.2	17.2	18.2
2014	17.3	17.3	17.3	20.6	26.3	17.3	18.7	18.0	18.5	17.8	18.2	16.7	18.7
2015	17.9	18.8	19.3	20.4	19.4	18.8	19.1	18.6	17.8	18.7	19.7	17.1	18.8
2016	15.1	18.3	18.0	19.5	20.9	16.7	15.5	16.4	15.7	15.5	15.5	16.6	17.0
2017	14.8	17.4	17.5	18.3	18.9	17.7	16.1	16.7	16.8	17.4	16.2	13.4	16.8
2018	10.9	14.5	16.4	15.7	15.7	15.5	16.3	15.7	15.5	15.2	15.0	14.5	15.1
2019	15.1	16.4	15.9	17.3	18.1	17.6	17.2	17.3	16.6	16.7	17.4	15.8	16.8
2020	16.2	17.5	20.3	18.6	17.5	18.2	17.3	17.0	17.4	16.3	17.2	17.1	17.6
2021	16.6	17.0	18.2	19.8	18.8	17.5	17.4	16.9	16.7	16.6	16.1	16.8	17.4
2022	16.7	17.5	19.8	20.7	20.8	18.8	18.4	18.0	17.3	17.4	17.7	17.2	18.3

Los datos obtenidos muestran que la zona de estudio ha experimentado un aumento en la temperatura durante la última década. Según los registros, la temperatura promedio ha aumentado cerca de 1°C, lo cual representa un cambio considerable en términos climáticos.

3.2.1.1 Transferencia de calor en oficina de estudio y oficina inferior

Los siguientes reportes fotográficos corresponden al interior y exterior de la oficina analizada, así como una oficina más en la parte inferior, la cual puede apreciarse en la Figura 10.

Las imágenes fueron tomadas con una cámara termográfica FLIR®, que mide la radiación infrarroja emitida en tres superficies: el muro sur interior, la losa de azotea y la losa de entrepiso. Para conocer más a detalle los resultados obtenidos, ver las Figuras 13 y 14.



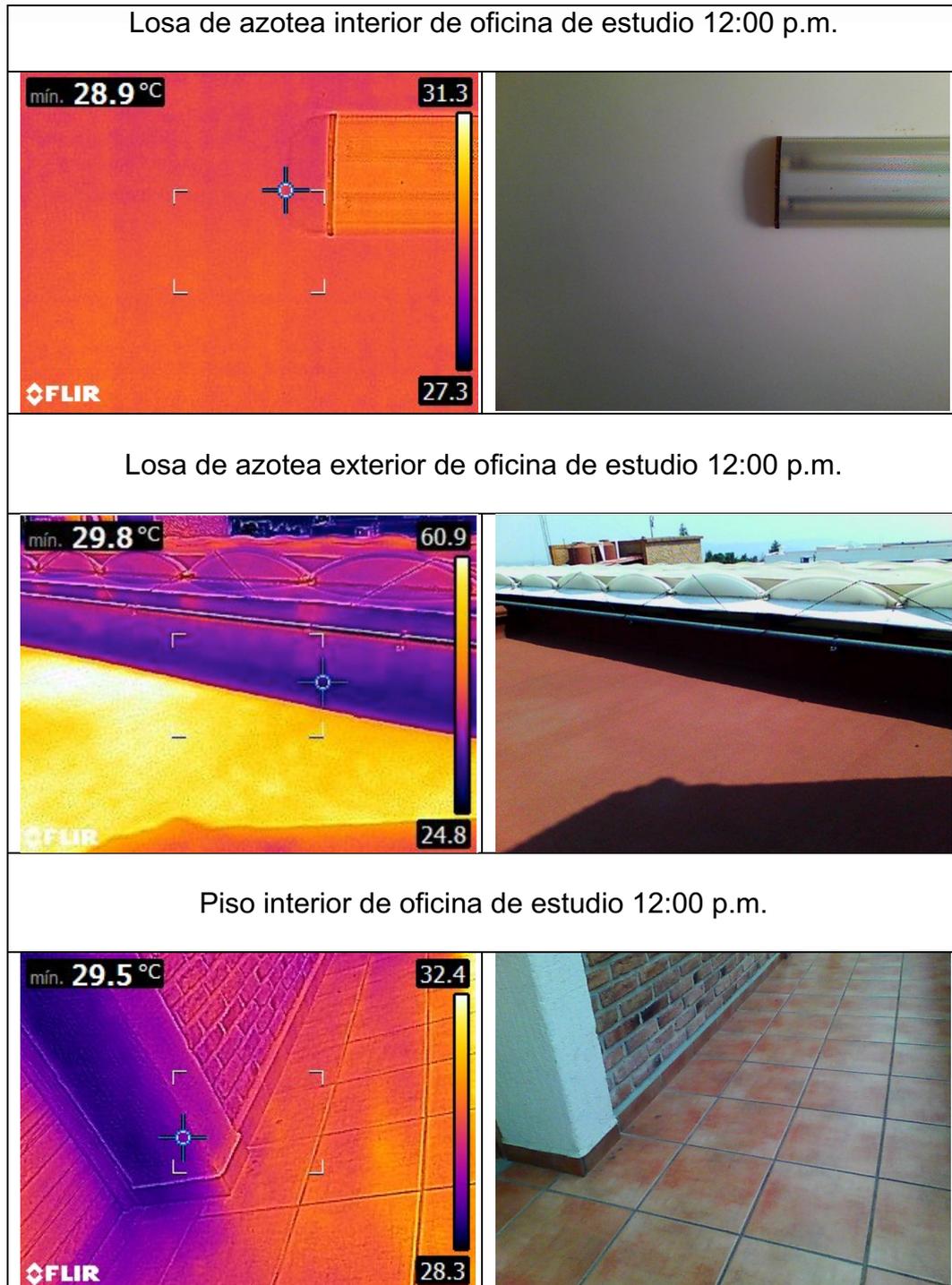


Figura 13. Reporte fotográfico tomado con cámara termográfica de muro sur, losa de azotea interior y exterior en oficina analizada, en condiciones iniciales.

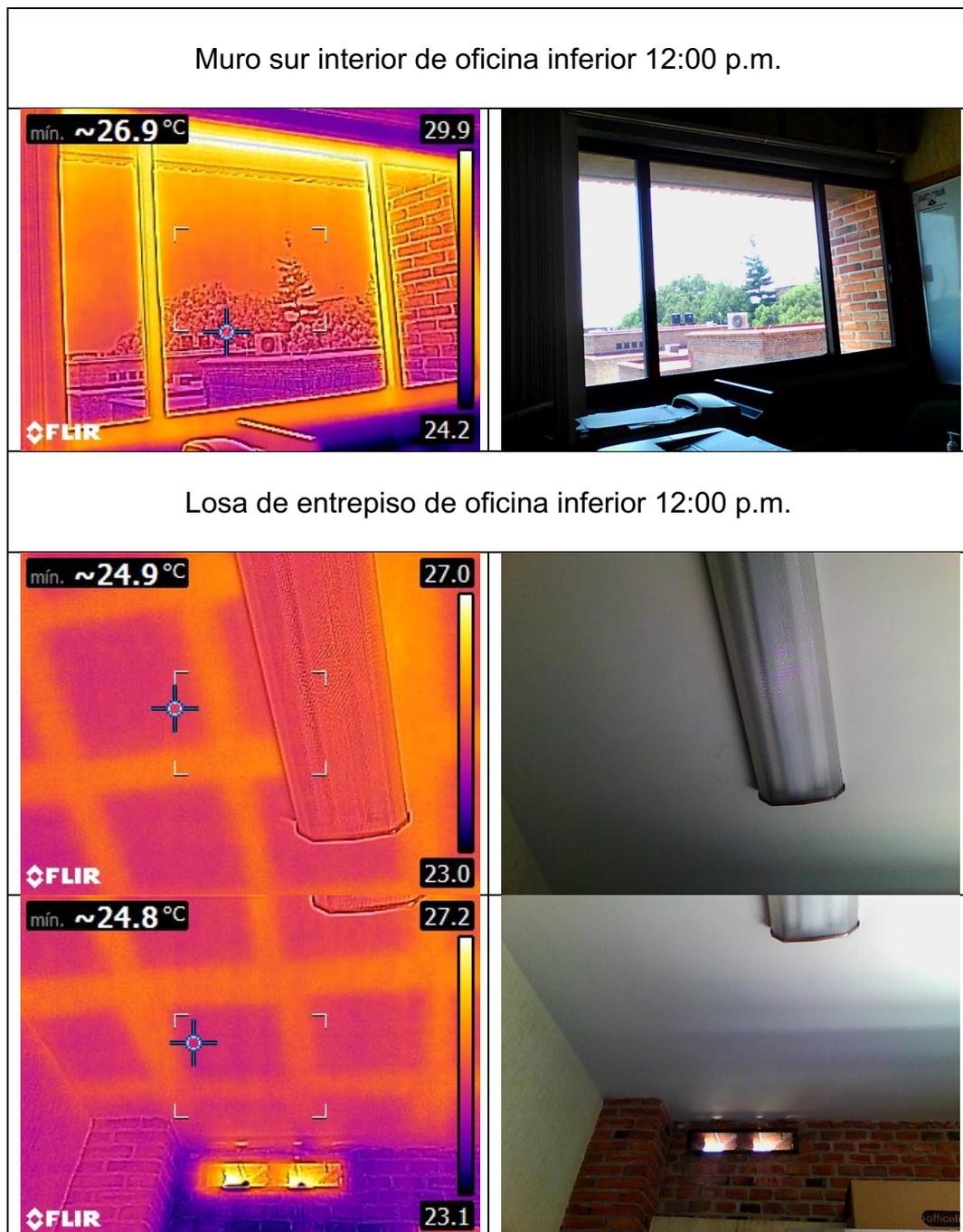


Figura 14. Reporte fotográfico tomado con cámara termográfica de muro sur y losa de entepiso de la oficina inferior con relación a la oficina analizada, en condiciones iniciales.

Basado en el reporte fotográfico tomado, se muestra la existencia de una diferencia significativa en las temperaturas entre el muro sur de la oficina superior y la oficina inferior. La temperatura del muro y la ventana



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



en la oficina superior está por encima de los 38°C, en la oficina inferior está alrededor de los 26°C, con temperaturas cercanas a los 29°C en el contorno de la ventana de aluminio. La diferencia de temperaturas entre ambas oficinas es de aproximadamente 9°C en valores máximos.

Se observa una diferencia significativa de temperatura en la losa de azotea de la oficina analizada. La temperatura de la losa en el interior de la oficina es superior a los 30°C y en la parte exterior con radiación solar directa la temperatura es superior a los 60°C. La diferencia de temperatura para la losa de azotea es de alrededor de 30°C.

Así mismo se presenta una diferencia significativa de temperatura en la losa de entrepiso, la cual funciona como piso de la oficina analizada y como techo de la oficina inferior. La temperatura de la losa en la oficina analizada es superior a los 30°C y en la oficina inferior la temperatura en el área de las nervaduras es superior a los 25°C y cerca de 24°C en los casetones.

Estas temperaturas puede tener implicaciones para el confort térmico de los ocupantes de ambas oficinas y también puede influir en el consumo de energía necesario para mantener una temperatura adecuada en cada espacio.

Una solución para mejorar la eficiencia energética y reducir la diferencia de temperaturas podría ser la implementación de tecnologías sustentables, como la instalación de aislamiento térmico, la optimización del diseño del espacio, la utilización de vidrios de baja emisividad y la implementación de sistemas de ventilación adecuados, por mencionar algunas estrategias.

En la Tabla 4 y Figura 15 se muestra a manera de resumen lo descrito en este mismo apartado.

Tabla 4. Temperaturas obtenidas en condiciones iniciales de la oficina de estudio y la oficina inferior.

Superficie analizada		Temperatura antes de tratamiento con techo doble (°C)	
		Oficina analizada	Oficina inferior
Muro sur		38	26
Ventana en muro sur		38	29
Losas de azotea	interior	29	
	exterior	60	
Losas de entrepiso	funciona como piso	30	
	funciona como techo		25

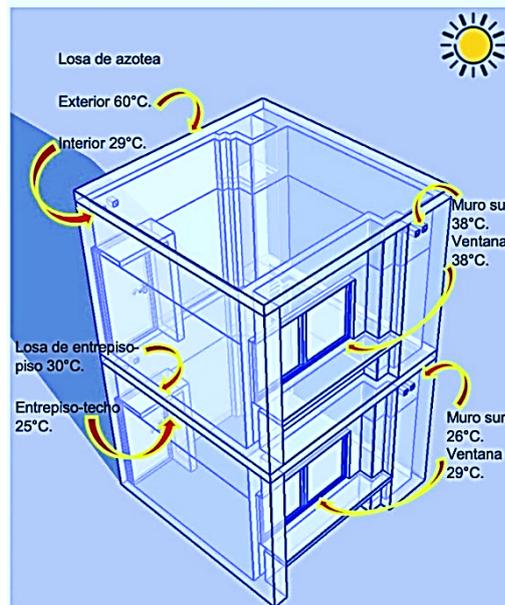


Figura 15. Temperaturas presentadas en la oficina de estudio y una oficina inferior, con ayuda de una cámara termográfica en condiciones iniciales.

3.3 Diseño experimental de simulación en TRNSYS®

Para la siguiente parte del estudio se analizan dos escenarios simulados de acondicionamiento térmico: el primero se plantea sin ningún



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



sistema de acondicionamiento y el segundo con la implementación de un sistema activo de acondicionamiento.

El objetivo es evaluar la contribución de la construcción y envolvente del edificio al comportamiento térmico del aire interior en cada uno de los escenarios. Para ello, se utiliza el software de simulación TRNSYS®, el cual permite modelar el comportamiento térmico de los edificios y evaluar su desempeño energético conforme los escenarios que se plantean.

3.3.1 Configuración del edificio en Simulation Studio

El análisis del desempeño térmico del edificio requiere datos climáticos de la zona de estudio, primordialmente de un año, con la finalidad de evaluar la interacción que mantiene el edificio con el clima del lugar.

El análisis se realizó para un año representativo con las condiciones climáticas promedio de la zona mediante la configuración del type TMY2. Esta herramienta contiene los valores horarios de radiación solar y elementos meteorológicos de la Ciudad de México, por así convenir en la interfaz precargada en el simulador.

El conjunto de datos que integra el TMY2 se diseñó originalmente por TRNSYS® para simplificar el cálculo de la climatización de las edificaciones. Este tipifica las condiciones meteorológicas a un sitio de interés y está basado en datos meteorológicos anuales, produciendo años sintéticos, haciendo predicciones de resultados cercanos a los promedios a largo plazo.

Se estableció un periodo de ocupación comprendido de lunes a viernes en un horario de 10:00 a 18:00 horas (8 horas). Se busca una temperatura de 29 °C conforme lo indica la Tabla 12, toda vez que ésta es

la temperatura obtenida en el interior de la oficina analizada, en condiciones reales de ocupación.

La Figura 16 muestra la configuración de los componentes gráficos. Cada componente está descrito mediante un modelo matemático en el motor de simulación coincidentes en la interfaz de Simulation Studio. Para este estudio se puede ver el type TMY2 conectado al type 52, este último componente simula el comportamiento térmico de un edificio, en este caso, de la oficina de estudio.

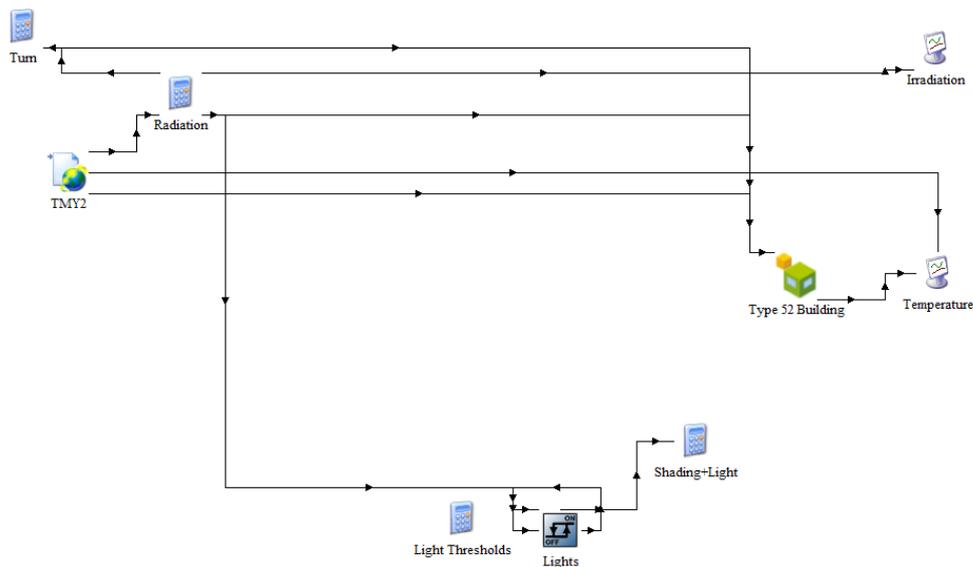


Figura 16. Configuración de la oficina en Simulation Studio.

3.3.2 Configuración del edificio en TRNBuild

En el módulo TRNBuild se realizó el traslado del modelado del edificio, posteriormente se configuraron las propiedades físicas de los elementos que conforman la oficina: longitudes de muros, espesores, colores de acabado interior y exterior, así como materiales de construcción, estos datos se encuentran en la Tabla 6.

Tabla 5. Propiedades físicas de elementos del lugar construido.

Muro	Ejes	Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	Color interior	Color exterior	Material	Otro
M N	7-8	4.00	3.20	0.12	rojo	rojo	ladrillo	
M E	A-B	4.00	3.20	0.15	beige	beige	aplanado yeso	
M S	7-8	4.00	3.20	0.12	rojo	rojo	ladrillo	
M O	A-B	4.00	3.20	0.15	beige	beige	aplanado yeso	
L H		4.00		0.15	blanco	rojo	concreto armado	
V	7'-8'	2.20	1.25	0.003			crystal	aluminio negro

M N: Muro norte, M E: Muro este, M S: Muro sur, M O: Muro oeste, L H: Losa horizontal, V: ventana

3.4 Descripción de los sistemas activos de climatización analizados

En este estudio, se evaluará el aire acondicionado sin ductos mejor conocido como mini-split, seleccionando dos modelos: el primero con tecnología on-off y el segundo con tecnología inverter.

3.4.1 Sistema activo

El equipo tipo mini-split¹³ consta de una unidad interior que se instala en la zona a climatizar y una unidad exterior que se coloca en el exterior del edificio. El fluido refrigerante se encarga de transportar el calor desde la unidad interior hasta la unidad exterior para ser disipado en el ambiente. El termostato permite controlar la temperatura deseada y la operación del equipo, véase la Figura 17.

¹³ Los equipos de aire acondicionado funcionan por compresión. El proceso de refrigeración se lleva a cabo mediante circuitos frigoríficos, a través de un fluido refrigerante, pasando de un estado gaseoso a líquido y viceversa (de acuerdo al proceso dentro de los circuitos en el equipo). Al producirse el cambio químico del fluido refrigerante, se absorbe el calor existente en la zona de estudio y finalmente se envían al exterior. Recuperado de: <https://airesacondicionadosportatiles.net/diagrama-de-mollier/>. Fecha de consulta: 01 de marzo del 2023.

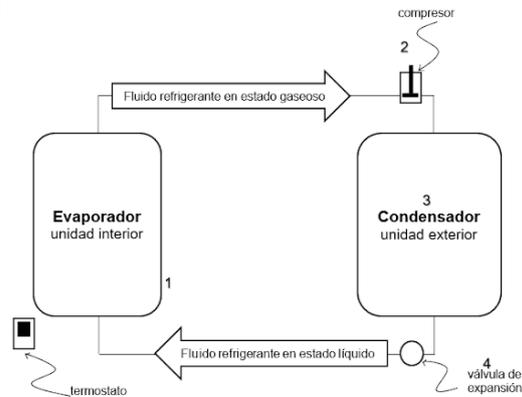


Figura 17. Funcionamiento del ciclo de un equipo de aire acondicionado.

La información técnica sobre la eficiencia energética de ambos equipos de aire acondicionado se ha obtenido de la Secretaría de Energía [23].

El registro de consumo eléctrico promedio por día de la tecnología on-off es de 6.49 kWh y el de tecnología inverter es de 2.02 kWh. Con capacidad de refrigeración de 1 tonelada (12,000 BTU/h). La tensión de la red eléctrica se ha considerado de bajo voltaje (120 V).

3.4.2 Sistema pasivo

Como alternativa a los sistemas activos y aprovechando los recursos que puede tener la envolvente del edificio donde se localiza la oficina estudiada, se describe a continuación los elementos de control solar propuestos.

Los elementos de control solar pasivo se utilizan para minimizar el impacto de la radiación solar en la temperatura interior del edificio, reduciendo la demanda de energía para el funcionamiento de sistemas activos de climatización y por consiguiente contribuyendo a la eficiencia energética que nos atañe. Además, también pueden tener un impacto positivo en la iluminación natural y en la estética del edificio.

En el caso de los aleros, se ubican en la parte superior de las ventanas para proyectar sombra sobre ellas. En cuanto a los partesoles, se ubican en la parte lateral de las ventanas para proyectar sombra sobre los marcos y cristales, reduciendo el ingreso de radiación directa. Los elementos híbridos combinan ambas técnicas para lograr un mayor control solar. Vease la Figura 18.

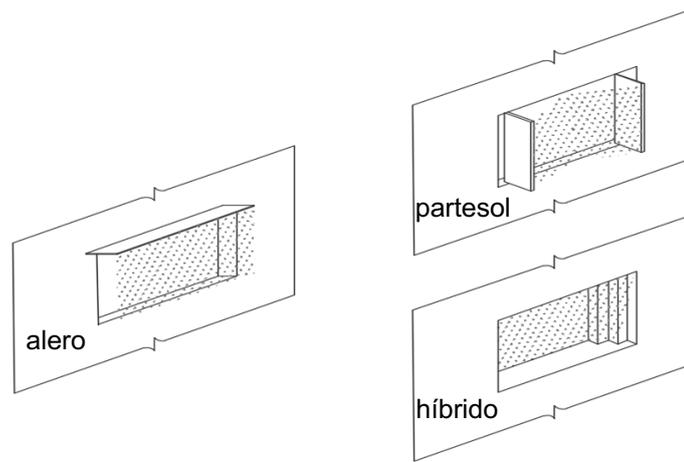


Figura 18. Elementos pasivos de sombreado en ventanas.

En cuanto al sistema de sombreado pasivo para la cubierta de la oficina objeto de estudio en este proyecto, se han implementado elementos de control solar diseñados y contruidos para interceptar la radiación solar directa. Estos elementos son paralelos a la losa de azotea.

La función principal de estos elementos es proporcionar sombreado en la zona donde los rayos solares generan mayor ganancia de calor durante el día y en especial en la temporada de verano. Para ello, se ha considerado el punto de mayor incidencia solar, que en este caso ha sido el muro sur y la losa de azotea.

En este estudio se eligió implementar un sistema de sombreado para la losa de azotea que consta de catorce tablas soportadas en tres polines y pequeñas piezas de madera para entrada de aire exterior.

En la Figura 19 se puede observar un corte transversal del diseño del sistema de sombreado en la losa de azotea de la oficina de estudio. En el corte transversal se muestra al polín colocado de manera horizontal y cada una de las tablas soportadas por pequeñas piezas de madera, dichos soportes generan un ángulo cercano a 6° (ver Figura 20) entre cada una de las tablas colocadas. Finalmente la Figura 21 corresponde a la vista superior de todas las tablas colocadas sobre los polines.

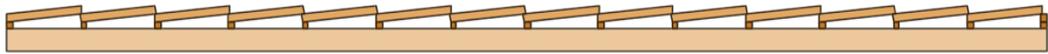


Figura 19. Corte transversal del sistema de sombreado para cubierta construida en la oficina de estudio.

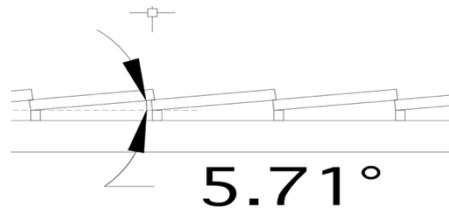


Figura 20. Ángulo formado por la colocación entre tablas del sistema de sombreado para cubierta construida en la oficina de estudio.

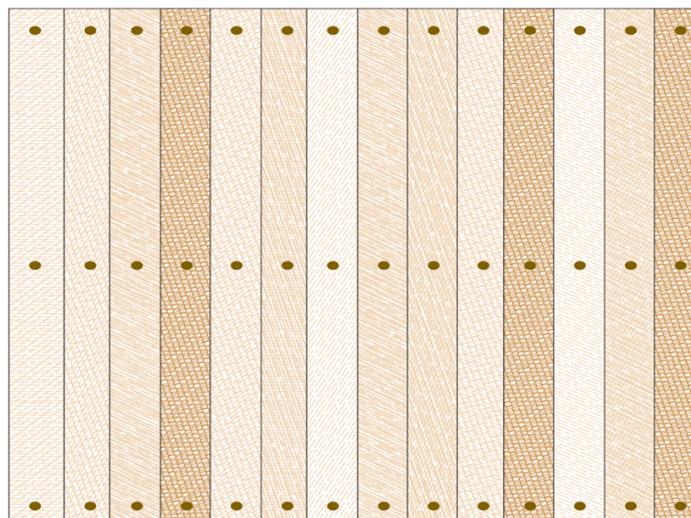


Figura 21. Vista superior del sistema de sombreado para cubierta construida en la oficina de estudio.

El sistema de sombreado propuesto para la cubierta de la oficina estudiada en este proyecto está compuesto por elementos de madera, los cuales se han diseñado cuidadosamente para cubrir en el punto de mayor incidencia solar durante el día, evitando así la ganancia de calor transmitido al interior de la oficina. La Tabla 7 detalla las características técnicas de los elementos de madera utilizados en el sistema de sombreado.

Tabla 6. Elementos que constituyen el sistema de sombreado en cubierta de oficina de estudio.

	<i>Elemento</i>	<i>Material</i>	<i>Cantidad (unidades)</i>	<i>Largo (m)</i>	<i>Ancho (m)</i>	<i>Espesor (m)</i>
Elementos colocados horizontalmente	polines	madera	3	2.50	0.08	0.08
Elementos colocados con ángulo de incidencia	tablas	madera	14	2.50	0.25	0.03

3.5 Análisis comparativo del sistema activo y sistema pasivo

A continuación se presentan las descripciones de dos ACV realizados los sistemas de estudio. El primero corresponde a la comparación de dos sistemas activos y el segundo corresponde a la comparación de un sistema activo con un sistema pasivo.

3.5.1 Comparación de dos sistemas activos en ACV

Este análisis corresponde a la comparación de dos aires acondicionados, el on-off y el inverter, en su etapa de operación.

El objetivo es evaluar los dos modelos de aire acondicionado seleccionados mediante el análisis del consumo eléctrico promedio diario junto con la información técnica de eficiencia energética proporcionada por la Secretaría de Energía [23].

El alcance y límite del sistema, el estudio se realiza en la etapa de operación (consumo eléctrico) de los equipos de aire acondicionado. Se



excluyen del estudio otros aspectos del ciclo de vida de los equipos, como su construcción, transporte, instalación, mantenimiento y desecho.

La unidad funcional para este estudio es el sistema de aire acondicionado utilizado para climatizar una oficina con un volumen de aire de 38.4 m³ en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Se ha empleado la configuración del inventario correspondiente a cada caso en la interfaz del software OpenLCA con el apoyo de la base de datos Ecoinvent. En dicha base de datos, la unidad de medida para la electricidad es en megajoules (MJ). Por lo tanto, para poder realizar una comparación adecuada, ha sido necesario realizar una conversión del consumo eléctrico anual de los equipos de aire acondicionado, que se encuentra en kilo Watt-hora (kWh) a (MJ).

Mediante la Ecuación 1 se ha determinado las demandas energéticas para ambos equipos de climatización:

$$DT (MJ) = ((dta) * (ded * ho)) * (3.6 kWh)$$

Donde:

$DT (MJ)$, consumo total en Megajulios

dta , días trabajo anual

ded , consumo electricidad por día

ho , horas ocupación

valores para el equipo **on-off**

$$\begin{aligned}DT (MJ) &= ((260 \text{ días}) * (6.49 kWh * 8 h)) * (3.6 kWh) \\&= ((260 \text{ días}) * (51.92 kWh)) * (3.6 kWh) \\&= (13,499.2 kWh) * (3.6 kWh) \\&= 48,597.12 MJ\end{aligned}$$

valores para el equipo **inverter**

$$\begin{aligned}DT (MJ) &= ((260 \text{ días}) * (2.02 kWh * 8 h)) * (3.6 kWh) \\&= ((260 \text{ días}) * (16.16 kWh)) * (3.6 kWh) \\&= (4,201.6 kWh) * (3.6 kWh) \\&= 15,125.76 MJ\end{aligned}$$

Ecuación 1. Demanda total de energía eléctrica para los sistemas activos de climatización.

De acuerdo a los datos anteriores el equipo on-off requiere más energía eléctrica para su operación en comparación con el equipo inverter, exactamente 3.21 veces más, con una diferencia de 33,471.36 MJ. Es importante considerar que la generación de energía eléctrica puede tener impactos ambientales significativos, por lo tanto, el equipo inverter puede tener una ventaja ambiental en comparación con el on-off al tener una menor demanda de energía eléctrica.

Open LCA permite la realización de análisis de ciclo de vida en una amplia variedad de sectores y productos, es una herramienta muy útil para el desarrollo de estudios ambientales. Además, cuenta con una amplia variedad de bases de datos disponibles para su uso, lo que facilita la realización de análisis de ciclo de vida con datos precisos y actualizados. Las fuentes de información se presentan en la Tabla 8.

Tabla 7. Fuentes de datos usadas en este estudio.

Material	Versión	Fuente
Software	OpenLCA	https://www.openlca.org/download/
Base de datos	Ecoinvent 64 bits v.3.8	Versión libre para Green Delta https://www.openlca.org/
Impacto del ciclo de vida	Métodos OpenLCA LCIA	https://nexus.openlca.org/database/openLCA%20LCIA%20methods
Paquete de evaluación	v.2.1.3	https://nexus.openlca.org/database/openLCA%20LCIA%20methods
Método de evaluación de impacto	CML-IA (línea de base)	Métodos OpenLCA LCIA v.2.1.3
Datos	Comparativo de eficiencia energética de sistemas de aire acondicionado con tecnologías <i>on-off</i> e <i>Inverter</i> .	https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/346457/Bolet_n_03_EE_Aire_Acondicionado.pdf
Datos	Ficha técnica de equipo on-off (<i>minisplit</i> modelo mirage absolut X).	https://www.airesmirageqdl.com/ficha-tecnica-19-absolut_x-1.0Toneladas-220V-frio
Datos	Ficha técnica de equipo Inverter (<i>minisplit</i> modelo inverteX EMC121K CMC121K).	https://webmx.s3.amazonaws.com/pdf/specs/minisplit_inverter_x.pdf

3.5.2 Comparación de un sistema activo y un sistema pasivo en ACV

A continuación, se detalla la comparación de las contribuciones e impactos de un sistema de climatización activo y un sistema de climatización pasivo en la reducción de las temperaturas presentadas para la oficina de estudio utilizando la metodología de ACV.

El objetivo de esta comparación es analizar las contribuciones para la etapa de construcción en el sistema activo inverter de climatización, en comparación con el elemento pasivo de sombreado.

En este segundo caso comparativo, se evalúan las emisiones e impactos ambientales asociados a las etapas de construcción de ambos sistemas: el sistema activo inverter y el sistema pasivo de sombreado. El objetivo es conocer las contribuciones de cada sistema en las diferentes categorías de impacto ambiental. Para ello, se ha definido el alcance y límite del sistema, teniendo en cuenta los procesos involucrados en la construcción de cada sistema y su correspondiente consumo energético.

La unidad funcional utilizada para la comparación corresponde a la cantidad de masa de los equipos. En este caso se considera una masa de 12.10 kg para el aire acondicionado y una masa de 3.14 kg para el elemento pasivo utilizado como sombreado.

Es importante señalar que el inventario utilizado en este estudio se basó en datos de referencia sobre materiales recopilados de la literatura [24] y su integración se puede ver en la Tabla 9.

Tabla 8. Inventario de sistema activo. Fuente: [24].

<i>Material</i>			<i>Masa (%) (Boustani, 2010)</i>	<i>Masa (kg)</i>	<i>Total (kg)</i>
Metal	No ferroso	Aluminio	06.21	00.74	66.93
		Cobre	17.00	02.04	
	Ferroso	Hierro	07.13	00.85	
		Acero inoxidable	01.47	00.17	
		Acero	35.12	04.21	
Plástico	Polietileno de alta densidad (HDPE)		00.07	00.01	31.11
	Polipropileno (PP)		00.82	00.09	
	Poliestireno (PS)		06.55	00.78	
	Poliestireno expandido (EPS)		00.39	00.04	
	Poliestireno de alto impacto (HiPS)		16.17	01.94	
	Cloruro de polivinilo (PVC)		04.04	00.48	
	Poliamida (PA-6)		01.27	00.15	
	Tereftalato de polibutileno (PBT)		00.60	00.07	
	Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)		00.21	00.02	
	Laca		00.86	00.10	
	Caucho		00.02	00.01	
	Caucho etileno propileno dieno (EPDM)		00.15	00.01	
	Fluido	Refrigerante R410A		--	

La información sobre los materiales utilizados en el inventario del elemento pasivo se ha obtenido de materiales de construcción convencionales disponibles en el mercado, tal como se puede verificar en la Tabla 10.

Tabla 9. Inventario de elemento pasivo para sombreado en muro sur en este estudio.

<i>Material</i>		<i>Masa (%)</i>	<i>Masa (kg)</i>	<i>Total (kg)</i>
Madera	Madera	86.30	02.71	02.71
Metal ferroso	Acero inoxidable	11.21	00.35	00.37
	Acero	00.50	00.02	
Plástico	Polietileno de alta densidad (HDPE)	00.30	00.01	00.01
Fluido	Nitrocelulosa (NC)	10.59	00.05	00.05
<i>Total peso materiales (kg)</i>				03.14



El software OpenLCA permite tomar diferentes métodos de evaluación de impacto, sin embargo, se ha seleccionado al método de evaluación del Instituto de Ciencias Ambientales (indicado de la siguiente manera en el software, CML-IA baseline) [25] por ofrecer una cantidad más amplia de categorías de impacto a diferencia de otros como IPCC y el método ReCIPE [26]. En la Tabla 11 se describen las categorías de impacto que ofrece el método de evaluación designado.

Tabla 10. Clasificación de categorías de impacto para el método de evaluación CML-IA. Fuentes: [27-28].

Categoría de impacto		Unidad de referencia	Factor de caracterización
Agotamiento Abiótico	El agotamiento abiótico se produce cuando se extraen minerales para su uso en la fabricación de productos o para la generación de energía [27].	kg Sb eq	Abiotic Depletion Potential (ADP)
Agotamiento de combustibles fósiles	Evalúa el potencial de agotamiento de los recursos fósiles no renovables, como el carbón, el petróleo y el gas natural, que son utilizados como combustibles para la producción de energía y otros fines [27].	MJ	Fossil Depletion Potential (FDP)
Acidificación	Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógenos descargados a la atmósfera [27].	kg SO ₂ eq	Acidification Potential (AP)
Eutrofización	Es un impacto ambiental asociado a la liberación de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, en cuerpos de agua. Estos nutrientes pueden provenir de diversas fuentes como la agricultura, la industria y las aguas residuales, y su exceso puede provocar un crecimiento excesivo de algas y otras plantas acuáticas, lo que a su vez puede disminuir la cantidad de oxígeno en el agua y afectar la vida acuática [27].	kg PO ₄ --- eq	Eutrophication Potential (EP)
Ecotox acuático de agua dulce	Se evalúa mediante la determinación de la concentración de sustancias tóxicas en el agua y la exposición de los organismos acuáticos a estas sustancias [28].	kg 1,4-DB eq	Freshwater Ecotoxicity Potential (FAETP)
Calentamiento Global	Impacto potencial de la emisión de gases de efecto invernadero, expresado en términos de su potencial de calentamiento global (Global Warming Potential, GWP). El GWP es un índice numérico que expresa la capacidad de un gas para atrapar el calor en la atmósfera durante un período de tiempo determinado [27].	kg CO ₂ eq	Global Warming Potential (GWP) a 100 años
Toxicidad humana	Se evalúa el impacto en términos de la cantidad de sustancias tóxicas liberadas al medio ambiente y su capacidad de causar efectos tóxicos a través de diferentes rutas de	kg 1,4-DB eq	Human Toxicity Potential (HTP)



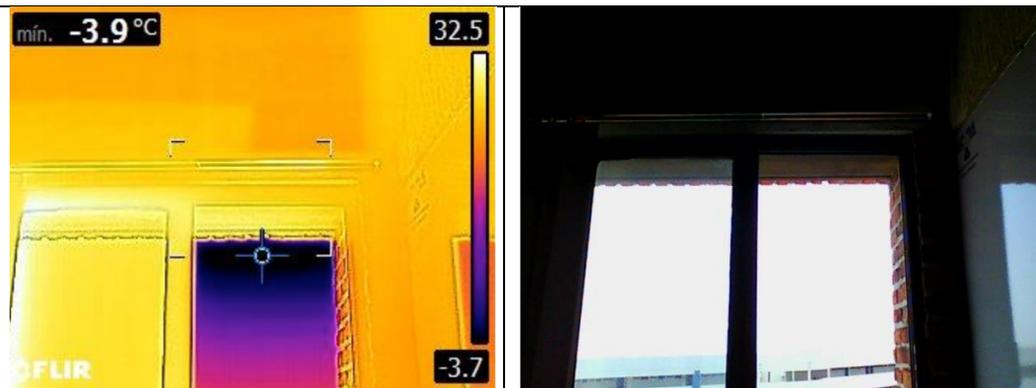
	exposición, como inhalación, ingestión y contacto dérmico [27].		
Ecotoxicidad acuática marina	Se basa en la toxicidad aguda, crónica y persistente de las sustancias químicas en los organismos marinos, y considera factores como la bioacumulación y la toxicidad a largo plazo en los ecosistemas marinos [28].	kg 1,4-DB eq	Marine aquatic ecotoxicity potential (MAETP)
Agotamiento de la Capa de Ozono	Es la reducción de la cantidad de ozono presente en la estratosfera terrestre, causada por la emisión de sustancias químicas, principalmente clorofluorocarbonos (CFC), que degradan el ozono. Este impacto puede aumentar la exposición de la vida terrestre a la radiación ultravioleta (UV) dañina, lo que puede causar cáncer de piel, cataratas y otras enfermedades [27].	kg CFC- ¹¹ eq	Ozone Depletion Potential (ODP)
Oxidación fotoquímica	Se refiere al proceso de producción de oxidantes a través de reacciones fotoquímicas, principalmente en la presencia de la radiación solar. Estos oxidantes pueden causar efectos negativos en la calidad del aire y la salud humana [28].	kg C ₂ H ₄ eq	Photochemical Ozone Creation Potential (POCP)
Ecotoxicidad terrestre	Se refiere a la capacidad de una sustancia o material para afectar la vida silvestre y el medio ambiente terrestre. La evaluación de la ecotoxicidad terrestre puede incluir la toxicidad aguda y crónica de la sustancia para organismos terrestres, como invertebrados, plantas y mamíferos, así como su capacidad para bioacumularse en el suelo y en los organismos terrestres [28].	kg 1,4-DB eq	Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP)

CAPÍTULO IV Resultados generales y discusión

4.1 Tratamiento en losa de azotea con techo doble

Posterior a la colocación del techo doble de madera, se han tomado los siguientes reportes fotográficos con la cámara termográfica FLIR®, en tres superficies de la oficina de estudio: el muro sur interior, la losa de azotea y la losa de entrepiso, así mismo en una de las superficies en la oficina inferior: la losa de entrepiso. Para conocer más a detalle los resultados obtenidos, ver las Figuras 22 y 23.

Muro sur interior de oficina de estudio 12:00 p.m. (el color morado intenso corresponde a la percepción del cielo por la cámara termográfica).



Efecto convección en rejillas en muro sur de oficina de estudio 12:00 p.m.





Figura 22. Reporte fotográfico tomado con cámara termográfica en muro sur y losa de azotea de oficina analizada con tratamiento de techo doble y su transferencia de calor hacia oficina inferior.

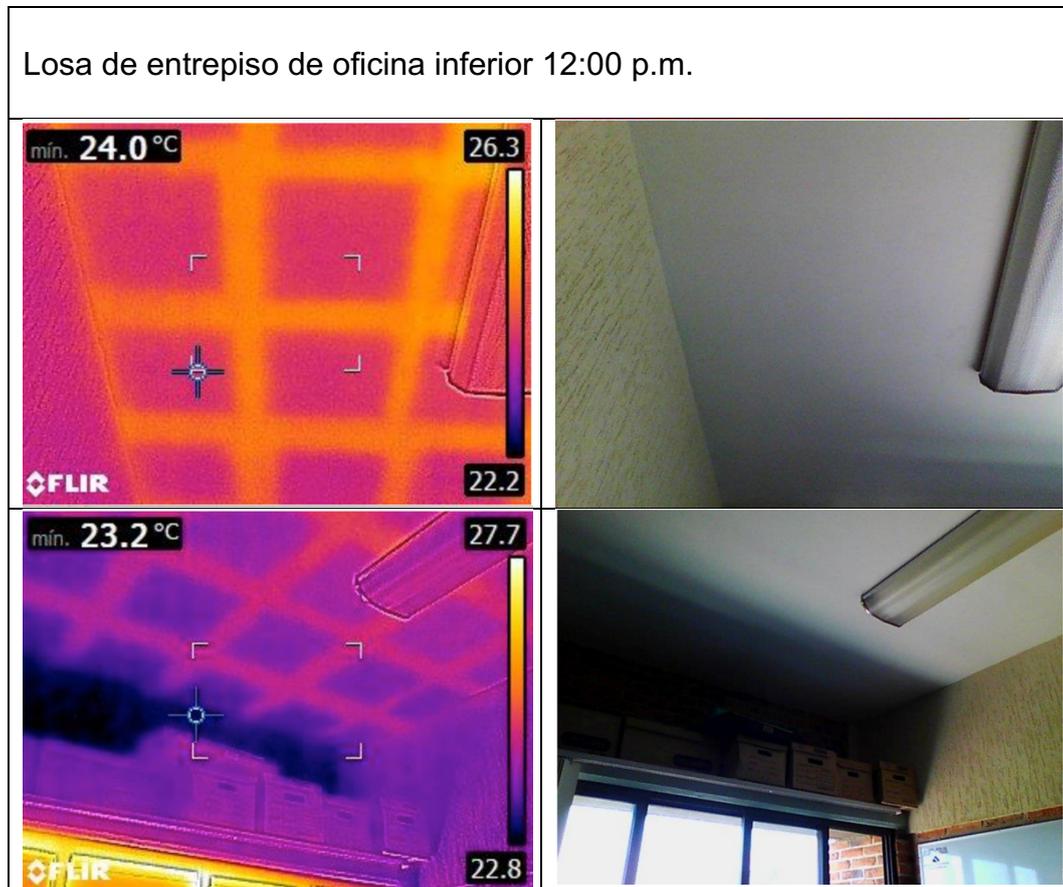


Figura 23. Reporte fotográfico tomado con cámara termográfica en losa de entrepiso de oficina analizada con tratamiento de techo doble y su transferencia de calor hacia oficina inferior.

Basándonos en el reporte fotográfico después del tratamiento con un techo doble, colocado en el exterior de la oficina analizada, se observa un efecto positivo en la reducción de la temperatura en el muro sur. Después del tratamiento, la temperatura en el muro sur es de 31°C, representa una reducción de 7°C en comparación con el reporte fotográfico antes del tratamiento.

Para la oficina inferior, después del tratamiento, se registraron temperaturas de 24°C en el muro sur y de 27°C en el marco de la ventana. Estos valores sugieren una reducción del 18% en la temperatura para



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



ambas superficies, en comparación con el reporte fotográfico antes del tratamiento.

La temperatura en el techo interior de la oficina analizada ha tenido un efecto ligero en la reducción de la temperatura. Después del tratamiento, el área tratada muestra una temperatura de alrededor de 26°C, lo que representa una reducción de alrededor de 2 a 3°C en comparación con el área no tratada.

El indicador de reducción puede parecer pequeño, cada grado de reducción en la temperatura puede contribuir a mejorar el confort térmico de los ocupantes, reduciendo el consumo de energía necesario para mantener una temperatura adecuada en el interior del espacio. Además, es importante considerar que el tratamiento mediante un techo doble en el techo exterior puede tener un impacto en conjunto con otras soluciones de eficiencia energética y confort térmico, como la ventilación natural o controlada.

Antes del tratamiento, la losa de azotea con radiación solar directa mostraba una temperatura superior a los 60°C, mientras que después del tratamiento, la temperatura ha disminuido en un rango de entre 30 a 40°C en el área tratada, lo que significa que la temperatura ahora oscila entre los 20 y 30°C.

La losa de entrepiso que funciona como techo para la oficina inferior presenta temperaturas de alrededor de 24°C en el área de las nervaduras y 23°C en los casetones, sugiriendo que no hay una transferencia significativa de calor de la oficina superior. Ésto puede ser una buena noticia, significa que la oficina inferior no está recibiendo un exceso de calor desde la oficina superior.

La instalación de un techo doble puede ayudar a reducir la cantidad de calor que ingresa al interior del edificio, a través de la losa de azotea, lo que a su vez puede reducir la necesidad de utilizar sistemas de aire acondicionado para enfriar el espacio, con la solicitud de disminuir el consumo de energía eléctrica. Ésto es particularmente importante en la zona de estudio, donde las temperaturas pueden ser muy altas durante la primavera y el verano.

En la Tabla 12 se muestra a manera de resumen lo descrito en este mismo apartado, los valores corresponden a las imágenes tomadas con la cámara termográfica FLIR® que ha medido la radiación infrarroja emitida en tres superficies de la oficina analizada (así como la oficina inferior): el muro sur interior, la losa de azotea y la losa de entrepiso.

Tabla 11. Temperaturas obtenidas antes y después del tratamiento con techo doble en losa de azotea de la oficina de estudio.

Superficie analizada		Temperatura antes de tratamiento con techo doble (°C)	
		Oficina analizada	Oficina inferior
Muro sur		38	26
Ventana en muro sur		38	29
Losa de azotea	interior	29	
	exterior	60	
Losa de entrepiso	funciona como piso	30	
	funciona como techo		25

Superficie analizada		Temperatura después de tratamiento con techo doble (°C)		Diferencias en temperatura			
		Oficina analizada	Oficina inferior	Oficina analizada (°C)	%	Oficina inferior (°C)	%
Muro sur		31	24	7	18	2	8
Ventana en muro sur		31	27	7	18	2	7
Losas de azotea	interior	26		3	10		
	exterior	30		30	50		
Losas de entrepiso	funciona como piso	28		2	7		
	funciona como techo		24			1	4

En resumen, la instalación de un techo doble ha demostrado ser una solución eficaz para reducir las ganancias de calor, por ende, disminuir la transferencia de calor a la oficina inferior. Además, se ha observado un efecto en cadena, debido a la reducción de ganancias de calor en la oficina analizada y hacia la oficina inferior. Ver Figura 24.

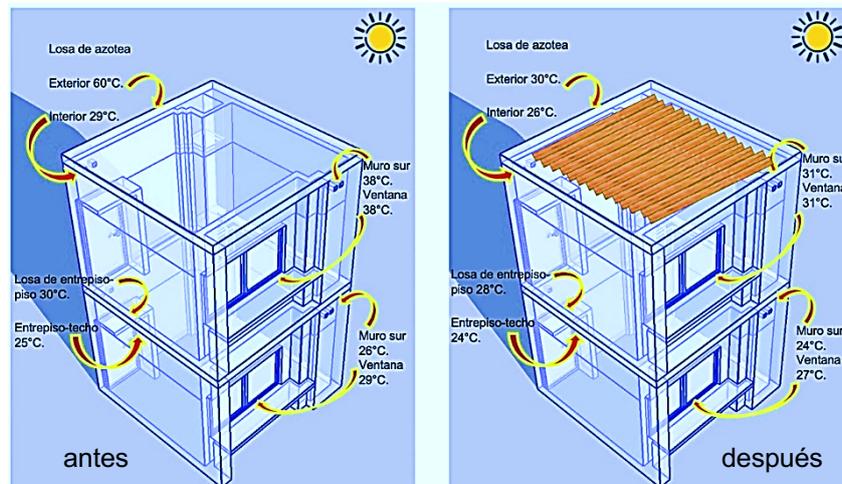


Figura 24. Temperaturas presentadas en la oficina de estudio y una oficina inferior, con ayuda de una cámara termográfica, antes y después del tratamiento con techo doble en losa de azotea de la oficina de estudio.

Los datos indican la reducción de ganancias de calor a través del muro sur y losa de azotea de un 18% hasta un 50% en la oficina de estudio y de un 4% a un 8% para la oficina inferior. Esta última reducción puede parecer pequeña, pero puede marcar una gran diferencia en la sensación térmica de los ocupantes y en consecuencia, en su confort térmico.

Lo anterior permite la reducción del uso del sistema activo y, por lo tanto, el consumo de energía necesario. Además, es importante considerar que el tratamiento mediante un techo doble en el techo exterior puede tener un impacto en conjunto con otras soluciones de eficiencia energética y confort térmico. Lo anterior puede verificarse con el Anexo número 1, que se integra al final de este trabajo.

4.2 Simulación en TRNSYS®

La simulación se ha establecido con y sin el uso de sistemas de climatización en la oficina estudiada. Se solicitó estar a una temperatura de 29°C conforme lo indica la Tabla 12, en donde dicha temperatura nos ha funcionado como un indicador en condiciones reales de ocupación antes de la implementación de cualquier sistema de climatización.

Los resultados se muestran en las Figuras 25 y 26, los datos en las ordenadas “X” indican los doce meses del año analizados, mientras que los datos en las ordenadas “Y” indican las temperaturas presentadas en la oficina de estudio.

En la Figura 25 se muestra la simulación de la oficina seleccionada mediante el software TRNSYS® sin ningún tipo de sistema de climatización, las temperaturas horarias obtenidas representan el comportamiento de la envolvente térmica.

Los resultados gráficos de la simulación indican temperaturas superiores a los 45°C para los meses de marzo, mayo y junio con la simulación sin el uso de un sistema de climatización.

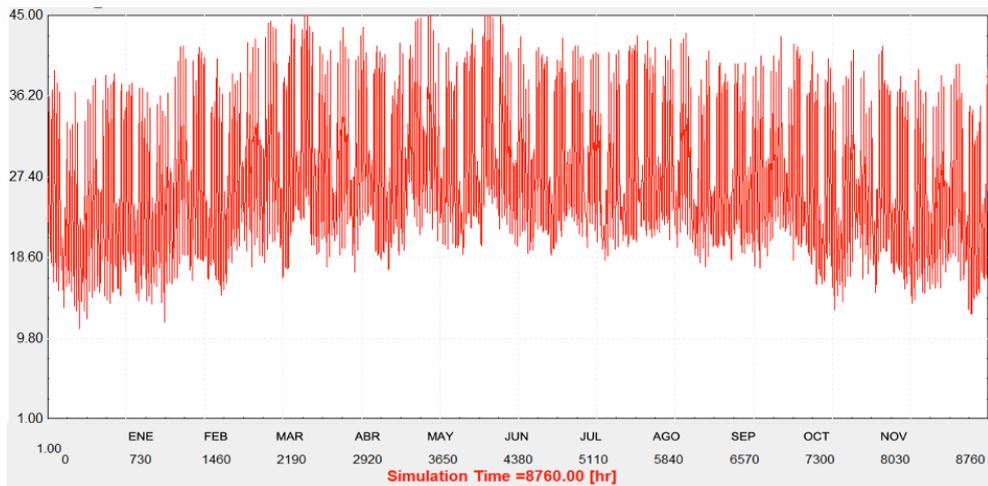


Figura 25. Simulación de oficina sin sistemas de climatización en TRNSYS®.

Posteriormente la Figura 26 muestra la oficina de estudio considerando la climatización mediante un equipo de aire acondicionado, las temperaturas resultantes en color rojo muestran el comportamiento térmico del edificio al operar el sistema, mientras que de color azul se indica la potencia requerida por parte del equipo de climatización.

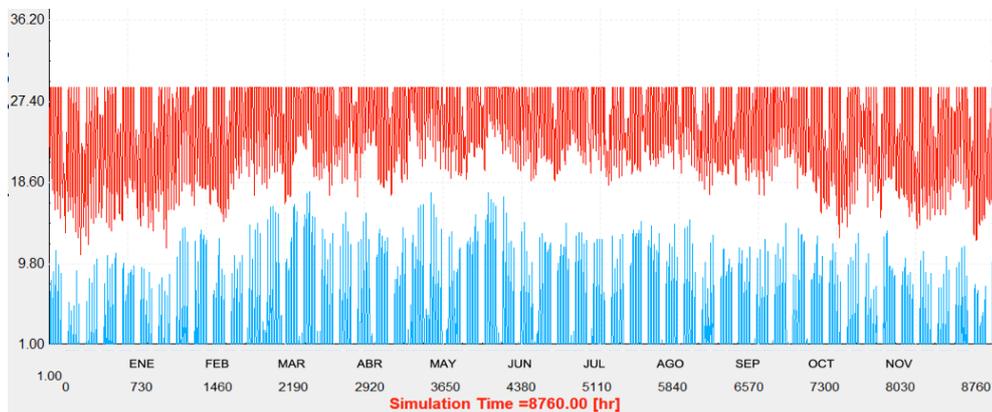


Figura 26. Simulación de oficina climatizada mediante un aire acondicionado en TRNSYS®.

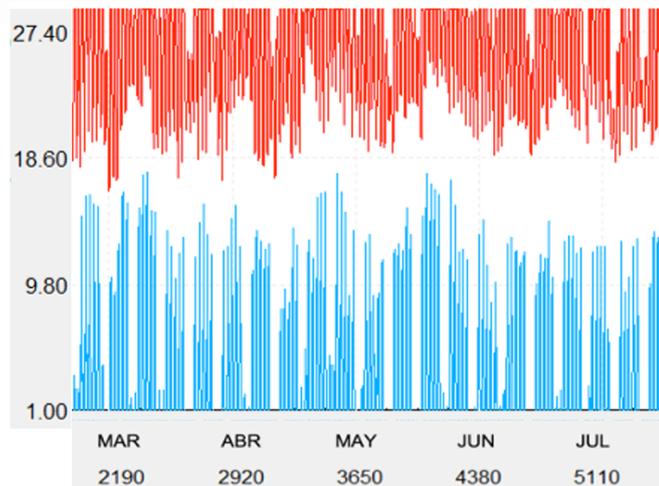


Figura 27. Simulación de oficina climatizada mediante un aire acondicionado en TRNSYS® para los meses de marzo a junio.

La figura 27 muestra la simulación de la oficina climatizada a la temperatura de 29°C en los meses de marzo a julio, especialmente la semana tres de marzo, la semana tres del mes de mayo y la semana dos de junio son los más críticos de acuerdo con los resultados, por requerir una mayor potencia por el equipo de aire acondicionado.

4.3 Análisis de Ciclo de Vida en la etapa de operación

En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos del ACV de los equipos de aire acondicionado con tecnología on-off e inverter a lo largo de la etapa de operación, es decir, el consumo eléctrico para su funcionamiento. Derivado del análisis se presentan los impactos totales por cada categoría analizada en la Tabla 13.

Tabla 12. Resultados del Análisis de Ciclo de Vida para dos sistemas activos y un elemento pasivo por categoría de impacto. Fuente: [15].

Categoría de impacto	Unidad	Etapa operación		
		on-off	inverter	Elemento pasivo
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq (antimonio)	1.99E-02	6.20E-03	0.00



Agotamiento de Combustibles Fósiles	MJ (Megajoule)	3.29E+04	1.02E+04	0.00
Acidificación	kg SO ₂ eq (dióxido de azufre)	3.13E+01	9.76E+00	0.00
Eutrofización	kg PO ₄ ⁻⁻⁻ eq (fosfato)	2.35E+01	7.32E+00	0.00
Ecotox Auático de Agua Dulce	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	3.91E+03	1.22E+03	0.00
Calentamiento Global (GWP100a)	kg CO ₂ eq (dióxido de carbono)	5.19E+03	1.62E+03	0.00
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	3.71E+03	1.15E+03	0.00
Ecotoxicidad Acuática Marina	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	1.14E+07	3.53E+06	0.00
Agotamiento de la Capa de Ozono	kg CFC ⁻¹¹ eq (triclorofluoro metano)	5.09E-04	1.59E-04	0.00
Oxidación Fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq (etileno)	1.06E+00	3.31E-01	0.00
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	1.27E+02	3.96E+01	0.00

4.4 Análisis de Ciclo de Vida en la etapa de construcción

En la Tabla 14 se muestran los resultados del ACV del sistema activo y el elemento pasivo. Los impactos totales se presentan por categoría analizada en la etapa de construcción, es decir por la integración del inventario de ambos sistemas.

Tabla 13. Resultados del Análisis de Ciclo de Vida para un sistema activo y un elemento pasivo por categoría de impacto. Fuente: [15].

Categoría de impacto	Unidad	Etapa construcción	
		inverter	Elemento pasivo
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq (antimonio)	5.88E-02	1.48E-04
Agotamiento de Combustibles Fósiles	MJ (Megajoule)	4.25E+03	5.11E+01
Acidificación	kg SO ₂ eq (dióxido de azufre)	1.02E+01	4.23E-02
Eutrofización	kg PO ₄ ⁻⁻⁻ eq (fosfato)	6.96E+00	1.39E-02
Ecotox Auático de Agua Dulce	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	1.84E+03	1.67E+01



Calentamiento Global (GWP100a)	kg CO ₂ eq (dióxido de carbono)	3.64E+02	7.39E+00
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq (diclorobenceno)	3.69E+03	8.50E+01
Ecotoxicidad Acuática Marina	kg 1,4-DB eq (diclorobenceno)	5.20E+06	2.06E+04
Agotamiento de la Capa de Ozono	kg CFC ⁻¹¹ eq (triclorofluorometano)	1.48E-05	4.79E-07
Oxidación Fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq (etileno)	4.30E-01	3.18E-03
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq (diclorobenceno)	4.26E+00	1.22E-01

4.5 Análisis de sensibilidad

Es común realizar análisis de sensibilidad en los ACV para evaluar la variabilidad de los resultados en función de las elecciones de los métodos de evaluación de impacto que el software seleccionado ofrece.

En este caso, se ha realizado un nuevo análisis con apoyo del método de evaluación IMPACT 2002+ [29], ésto con el objetivo de comparar los valores obtenidos en categorías de impacto similares. IMPACT 2002+ al igual que CML-IA, es un método de evaluación de impacto utilizado comúnmente en ACV.

Al utilizar diferentes métodos de evaluación, es posible obtener resultados distintos debido a factores de conversión, hipótesis y unidades de referencia. La realización del análisis de sensibilidad con apoyo de otro método de evaluación ha ayudado a verificar la incertidumbre en los resultados y la diferencia asociada con la elección de los métodos de evaluación de impacto.

Es interesante observar que, como se muestra en la Tabla 15, los resultados en las categorías de impacto de Calentamiento Global y Agotamiento de la Capa de Ozono, son similares para los dos métodos de evaluación de impacto. Ésto indica que los resultados en estas categorías,



son relativamente robustos y no varían significativamente con ambos métodos.

Tabla 14. Análisis de sensibilidad mediante dos métodos de evaluación de impacto al sistema activo en su etapa de operación. Fuente: [15].

Categoría de impacto	on-off		inverter		Unidad de Caracterización	Diferencia
	CML-IA	IMPACT 2002+	CML-IA	IMPACT 2002+		
Calentamiento Global (GWP100a)	6.49E+02	6.09E+02	2.02E+02	1.89E+02	kg CO ₂ eq	-6%
Agotamiento de la Capa de Ozono	6.37E-05	6.37E-05	1.98E-05	1.98E-05	kg CFC ₁₁ eq	0%
Agotamiento de combustibles fósiles	4.11E+03	No indicado por el software	1.28E+03	No indicado por el software	MJ	No comparable

En el caso de la categoría de impacto de Agotamiento de combustibles fósiles, los métodos de evaluación lo calculan de manera diferente, por lo tanto, sus resultados no son comparables entre sí. Como se puede observar en la Figura 27, cada método de evaluación de impacto utiliza diferentes factores de caracterización para la categoría de impacto en mención.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Método CML-IA

electricity, low voltage, production MX, at grid/kWh tecnología on-off

Flujo: Water, unspecified natural origin, RoW - Resource/in groun
 Categoría de impacto: Abiotic depletion (fossil fuels)

Contribución	Proceso	Cantidad	Unid...
100.00%	electricity, low voltage, production PK,...	4110.39226	MJ
> 98.72%	electricity, medium voltage, productio...	4057.93844	MJ
01.28%	distribution network construction, elec...	52.45335	MJ
00.00%	sulfur hexafluoride production, liquid ...	0.00048	MJ

electricity, low voltage, production MX, at grid/kWh tecnología Inverter

Flujo: Water, unspecified natural origin, RoW - Resource/in groun
 Categoría de impacto: Abiotic depletion (fossil fuels)

Contribución	Proceso	Cantidad	Unidad
100.00%	electricity, low voltage, production PK, at grid/kWh - MX	1.02348E4	MJ
> 98.72%	electricity, medium voltage, production PK, at grid/kWh - PK	1.01042E4	MJ
01.28%	distribution network construction, electricity, low voltage - CH	130.60802	MJ
00.00%	sulfur hexafluoride production, liquid - RER	0.00118	MJ

Método IMPACT 2002+

electricity, low voltage, production MX, at grid/kWh tecnología on-off

Flujo: Water, unspecified natural origin, RoW - Resource/in groun
 Categoría de impacto: Mineral extraction

Contribución	Proceso	Cantidad	Unidad
100.00%	electricity, low voltage, production PK,...	55.66227	MJ surplus
81.81%	distribution network construction, elec...	45.53972	MJ surplus
> 18.19%	electricity, medium voltage, productio...	10.12255	MJ surplus
00.00%	sulfur hexafluoride production, liquid ...	2.47613E-6	MJ surplus

electricity, low voltage, production MX, at grid/kWh tecnología Inverter

Flujo: Water, unspecified natural origin, RoW - Resource/in groun
 Categoría de impacto: Mineral extraction

Contribución	Proceso	Cantidad	Unidad
100.00%	electricity, low voltage, production PK,...	138.59820	MJ surplus
81.81%	distribution network construction, elec...	113.39319	MJ surplus
> 18.19%	electricity, medium voltage, productio...	25.20500	MJ surplus
00.00%	sulfur hexafluoride production, liquid ...	6.16553E-6	MJ surplus



Figura 28. Resultado para la categoría de impacto de Agotamiento de combustibles fósiles, mediante dos métodos de evaluación de impacto.

4.6 Análisis y discusión

La Tabla 16 muestra el ponorama general de ambos análisis, es decir, en la etapa de construcción, en la etapa de operación y las diferencias respectivas mediante el software de ACV, para un sistema activo en comparación con el sistema pasivo (Ver anexo 2 a detalle).

Tabla 15. Resultados de los análisis por categoría de impacto en las etapas de construcción y operación para un sistema activo y uno pasivo.

Categoría de Impacto	Unidad de Caracterización	inverter (1)	elemento pasivo (2)	Diferencia en cantidad de veces más de impacto (1/2) (%)
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq (antimonio)	0.06	0.00	396.59
Agotamiento de Combustibles Fósiles	MJ (Megajoule)	4254.10	51.07	83.30
Acidificación	kg SO ₂ eq (dióxido de azufre)	10.23	0.04	242.00
Eutrofización	kg PO ₄ ⁻⁻⁻ eq (fosfato)	6.96	0.01	499.10
Ecotox Acuático de Agua Dulce	kg 1,4-DB eq (diclorobenceno)	1838.53	16.72	109.94
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq (dióxido de carbono)	364.39	7.39	49.29
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq (diclorobenceno)	3694.88	85.01	43.46
Ecotoxicidad Acuática Marina	kg 1,4-DB eq (diclorobenceno)	5196801.82	20560.60	252.76
Agotamiento de la Capa de Ozono	kg CFC ⁻¹¹ eq (triclorofluorometano)	0.00	0.00	30.92
Oxidación Fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq (etileno)	0.43	0.00	135.46
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq (diclorobenceno)	4.26	0.12	34.90



Categoría de Impacto	Unidad de Caracterización	on off (3)	inverter (4)	elemento pasivo (5)	Diferencia en cantidad de veces más de impacto (3/4) (%)
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq (antimonio)	0.02	0.01	0.00	3.21
Agotamiento de Combustibles Fósiles	MJ (Megajoule)	32883.14	10234.81	0.00	3.21
Acidificación	kg SO ₂ eq (dióxido de azufre)	31.34	9.76	0.00	3.21
Eutrofización	kg PO ₄ — eq (fosfato)	23.53	7.32	0.00	3.21
Ecotox Acuático de Agua Dulce	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	3909.68	1216.88	0.00	3.21
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq (dióxido de carbono)	5189.32	1615.17	0.00	3.21
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	3705.31	1153.27	0.00	3.21
Ecotoxicidad Acuática Marina	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	11351837.00	3533237.40	0.00	3.21
Agotamiento de la Capa de Ozono	kg CFC ⁻¹¹ eq (triclorofluorometano)	0.00	0.00	0.00	3.21
Oxidación Fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq (etileno)	1.06	0.33	0.00	3.21
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	127.20	39.59	0.00	3.21

De conformidad con la Tabla 16 y para fines de comparación respecto de la huella de carbono en la construcción del sistema activo y el elemento pasivo, se ha tomado la categoría de impacto de Calentamiento Global, en la Tabla 17 se presenta la diferencia correspondiente a la huella de carbono.

Tabla 16. Diferencia de huella de carbono por ambos sistemas analizados.

	Construcción sistema activo		
Calentamiento Global	364.39	kg CO ₂ eq	100%
	Construcción elemento pasivo		
Calentamiento Global	7.39	kg CO ₂ eq	2%
Diferencia	357.00	kg CO₂ eq	98%

La Figura 28 indica resultados de dos ACV comparativos (uno en la etapa de construcción y otro en la etapa de operación) presentados en el capítulo anterior.

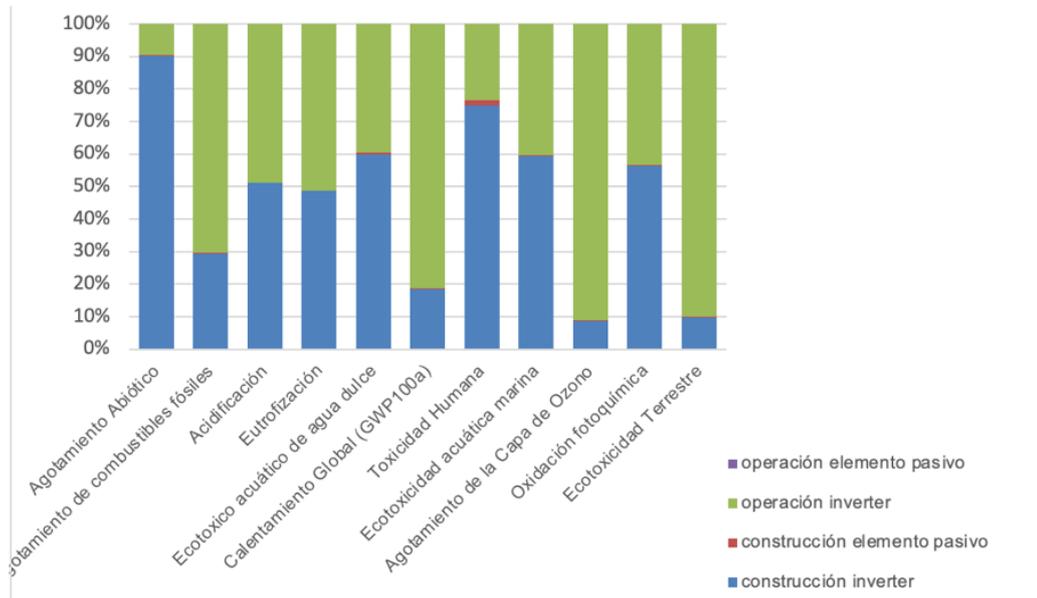


Figura 29. Porcentajes de contribuciones a las categorías de impacto por etapa.

De acuerdo con los resultados del análisis de ambos sistemas, en la etapa de construcción, el 60% del total de las categorías analizadas corresponden a impactos generados durante la etapa de operación del sistema activo, representando el mayor porcentaje. Asimismo, se observa un porcentaje muy similar de impactos en la etapa de construcción para el mismo sistema.

En la etapa de operación el sistema pasivo, presenta una significativa ventaja de menores impactos frente al sistema activo, toda vez que el elemento pasivo analizado tiene nulo consumo eléctrico. Por lo tanto, su uso implica una reducción del 100% en las emisiones de CO₂ en comparación con el consumo eléctrico del sistema activo.

En la etapa de construcción el sistema pasivo, muestra pequeñas contribuciones a las categorías analizadas, considerándose despreciables en comparación para la misma etapa pero del sistema activo.

Los resultados de ambos análisis muestran que la incorporación del sistema pasivo propuesto tiene una reducción importante en la demanda de materias primas para su construcción. El inventario del sistema pasivo está integrado por el 25% del total de materiales necesarios para la construcción del sistema activo.

La propuesta del sistema pasivo representa una solución altamente sostenible para reducir la huella de carbono y mitigar los impactos ambientales asociados con el consumo de energía eléctrica en el uso de los aires acondicionados convencionales.

4.7 Conclusiones

El software TRNSYS® ha sido una valiosa herramienta para el análisis de simulación sobre la necesidad de climatización en la oficina analizada. De acuerdo a los resultados la oficina analizada presenta temperaturas por encima de los rangos aceptables de confort térmico durante la jornada laboral del personal ocupacional a lo largo de año verificado, especialmente en los meses de marzo, mayo y junio.

Se llevó a cabo un análisis del comportamiento térmico de la oficina con apoyo del software, confirmando la necesidad de implementar alguno de los sistemas planteados en el estudio, ya sea a través de medios mecánicos o elementos pasivos, para lograr mejorar las condiciones temperatura solicitada.

El objetivo de este trabajo fue analizar la viabilidad de reducir el consumo energético del caso de estudio a través del uso de un sistema pasivo, oficina que ocupa un profesor investigador de tiempo completo. Por lo que ha sido necesario utilizar como indicador una temperatura inicial de 29°C, la cual se encuentra fuera del rango de confort, pero sí la real para realizar las comparaciones entre el sistema activo y pasivo propuesto. Los



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



resultados indican que es posible su implementación y las contribuciones son positivas.

En este estudio, además se ha utilizado la metodología de ACV para evaluar los impactos ambientales del sistema activo y del sistema pasivo en dos de sus etapas. La primer etapa evaluada a través del inventario de materiales para su construcción y la segunda en relación a la demanda energética para su operación de los dos sistemas.

Los resultados de ambas evaluaciones se presentan en once categorías, las cuales se traducen en indicadores potenciales de impacto para la salud humana, el medio ambiente y el agotamiento de recursos naturales.

La construcción del elemento pasivo genera una huella de carbono un 98% menor en comparación con la construcción de un aire acondicionado, lo anterior indica que la construcción del sistema pasivo tiene un impacto ambiental significativamente menor en términos de emisiones de GEI. Mientras que en términos de operación el sistema pasivo evita el 100% de emisiones a lo utilizar energía eléctrica.

Posteriormente para comprender las posibles variaciones a los resultados por la selección del método de evaluación de impacto aplicado a ambos análisis, se ha utilizado un análisis de sensibilidad considerando tres de las once categorías que contempla CML-IA e IMPACT 2002+. Los resultados para dos de las tres categorías son relativamente robustos y no varían significativamente con ambos métodos de evaluación de impacto.

La implementación de prácticas tecno-arquitectónicas en México no solo representa una oportunidad para avanzar en la investigación científica y tecnológica, sino también para desarrollar soluciones innovadoras adaptables a las condiciones climáticas y ambientales específicas del país. Además, estas soluciones pueden contribuir a la reducción de los impactos



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



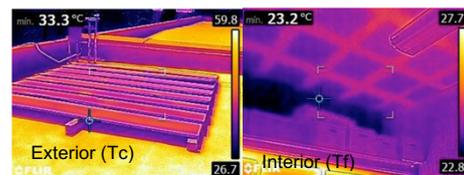
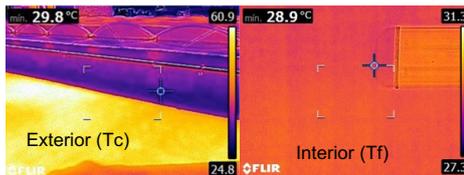
ambientales de los edificios, lo que resulta esencial en la búsqueda de la sostenibilidad ambiental y la lucha contra el cambio climático.

Es importante destacar que la implementación de estas prácticas puede tener un impacto positivo en la economía y la calidad de vida de los habitantes de las ciudades, al reducir los costos de operación junto con los de mantenimiento de los edificios y mejorar las condiciones climáticas en los espacios interiores.

4.8 Anexos

4.8.1 Anexo número 1: Transferencia de calor losa de azotea y techo de madera sobre la oficina de estudio

Convección



Convección caso losa de azotea		Convección caso techo de madera			
$Q_c = h A (T_c - T_f)$		$Q_c = h A (T_c - T_f)$			
Donde:					
$h =$	Es el coeficiente de transferencia de calor convectivo				
$A =$	Es la superficie del área				
$T_c =$	Es la temperatura del fluido caliente				
$T_f =$	Es la temperatura del fluido frío				
$h =$	25.00	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	$h =$	25.00	$W/m^2 K$
$A =$	12.80	m^2	$A =$	10.50	m^2
$T_c =$	60.00	$^\circ C$	$T_c =$	40.00	$^\circ C$
$T_f =$	29.00	$^\circ C$	$T_f =$	29.00	$^\circ C$
$Q_c =$	9.92	kW	$Q_c =$	2.89	kW
Refrigeración	2.82	TR	Refrigeración	0.82	TR
Diferencia de convección por uso de techo de madera					29%

Las condiciones del análisis se presentan a continuación. En el primer caso, se tiene una losa de azotea con un área de 12.80 m^2 , una temperatura exterior (T_c) de $60^\circ C$ y una temperatura interior de la oficina (T_f) de $29^\circ C$, resultando en una tasa de transferencia de calor de 9.92 kW . En el segundo caso, se tiene un techo de madera con un área de 10.50 m^2 , una temperatura (T_c) de $40^\circ C$ en la superficie con radiación directa y una temperatura interior (T_f) de $29^\circ C$, lo que resulta en una tasa de transferencia de calor (Q_c) de 2.89 kW .



Para el caso de la losa de azotea

con material de concreto armado, el cálculo de la cantidad de refrigeración (TR) requerida al equipo activo (aire acondicionado) para lograr la solicitud de 29°C al interior de la oficina, ha sido necesario la conversión de 3.51 kW correspondiente a una tonelada de refrigeración en referencia a la tasa de transferencia de calor (Q_c) de 9.92 kW. Esto sugiere el requerimiento de un equipo de mínimo 2.82 toneladas de refrigeración.

El cálculo de la cantidad de refrigeración (T) requerida al equipo activo (aire acondicionado) y bajo la solicitud de 29°C al interior de la oficina, ha sido necesario la conversión de 3.51 kW correspondiente a una tonelada de refrigeración en referencia a la tasa de transferencia de calor (Q_c) de 2.89 kW. De acuerdo con esto, se requeriría un equipo de al menos 1.00 tonelada de refrigeración, en condiciones del techo doble instalado sobre la cubierta.

Finalmente los resultados indican la diferencia en la tasa de transferencia de calor en la losa de azotea con radiación directa y el techo de madera funcionando técnicamente como un aislante térmico, representando una mejora del 29% en términos de eficiencia de la demanda de refrigeración para la oficina analizada.

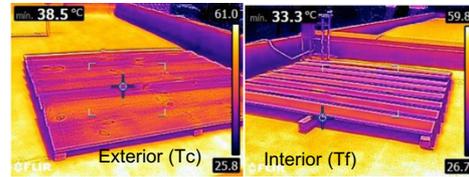
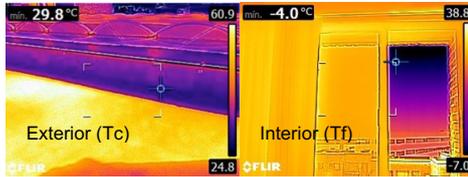


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



Conducción



Conducción caso losa de azotea			Conducción caso techo madera		
$Q_r = k A DT/Dx$			$Q_r = k A DT/Dx$		
Donde:					
k=					
A= Es la superficie del área					
Tc= Es la temperatura del fluido caliente					
Tf= Es la temperatura del fluido frío					
DT= Es la diferencia de temperaturas resultante de TC-Tf					
Dx= Es el espesor del material					
k=	1.50	W/m°C	k=	0.20	W/m°C
A=	12.80	m ²	A=	10.50	m ²
Tc=	60.00	°C	Tc=	43.00	°C
Tf=	38.00	°C	Tf=	33.00	°C
DT=	22.00	°C	DT=	10.00	°C
Dx=	0.25	m	Dx=	0.03	m
Qr=	1.69	kW	Qr=	0.84	kW

En el contexto de conservar la losa de azotea en su estado constructivo actual, se plantea la necesidad de reducir la temperatura de 38°C a 29°C, lo que implica una disminución de 9°C para alcanzar el nivel óptimo de confort térmico. Por otro lado, en el caso de la implementación de un techo de madera, se busca reducir la temperatura de 33°C a 29°C, generando una disminución de temperatura de 4°C.

Lo anterior revela una diferencia significativa en los requerimientos de energía necesarios para alcanzar la zona de confort térmico entre ambas opciones. En particular, se observa que la implementación del techo de madera ofrece una ventaja sustancial al requerir un 56% menor en valores de temperatura, en comparación con la losa de azotea para alcanzar la temperatura objetivo.

Estos resultados ponen de manifiesto el potencial de la implementación de un techo de madera como una estrategia efectiva para la reducción de la temperatura y la optimización del consumo energético en el entorno de la oficina, contribuyendo así a la eficiencia y sostenibilidad del sistema de climatización.



4.8.2 Anexo número 2: Resultados de comparación entre un sistema activo y un sistema pasivo

Categoría de Impacto	Unidad de Caracterización	invertir (1)	elemento pasivo (2)	Diferencia en cantidad de veces más de impacto (1/2) (%)
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq (antimonio)	0.06	0.00	396.59
Agotamiento de Combustibles Fósiles	MJ (Megajoule)	4254.10	51.07	83.30
Acidificación	kg SO ₂ eq (dióxido de azufre)	10.23	0.04	242.00
Eutrofización	kg PO ₄ — eq (fosfato)	6.96	0.01	499.10
Ecotox Acuático de Agua Dulce	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	1838.53	16.72	109.94
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq (dióxido de carbono)	364.39	7.39	49.29
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	3694.88	85.01	43.46
Ecotoxicidad Acuática Marina	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	5196801.82	20560.60	252.76
Agotamiento de la Capa de Ozono	kg CFC ⁻¹¹ eq (triclorofluorometano)	0.00	0.00	30.92
Oxidación Fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq (etileno)	0.43	0.00	135.46
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	4.26	0.12	34.90

Categoría de Impacto	Unidad de Caracterización	on off (3)	invertir (4)	elemento pasivo (5)	Diferencia en cantidad de veces más de impacto (3/4) (%)	Diferencia en cantidad de veces más de impacto (3/5) (%)	Diferencia en cantidad de veces más de impacto (4/5) (%)
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq (antimonio)	0.02	0.01	0.00	3.21	19,907,686,840	6,196,229,186
Agotamiento de Combustibles Fósiles	MJ (Megajoule)	32883.14	10234.81	0.00	3.21	32,883,138,060,000,000	10,234,813,390,000,000
Acidificación	kg SO ₂ eq (dióxido de azufre)	31.34	9.76	0.00	3.21	31,343,988,880,000	9,765,756,168,000
Eutrofización	kg PO ₄ — eq (fosfato)	23.53	7.32	0.00	3.21	23,527,376,020,000	7,322,850,470,000
Ecotox Acuático de Agua Dulce	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	3909.68	1216.88	0.00	3.21	3,909,676,905,000,000	1,216,879,407,000,000
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq (dióxido de carbono)	5189.32	1615.17	0.00	3.21	5,189,324,104,000,000	1,615,167,132,000,000
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	3705.31	1153.27	0.00	3.21	3,705,313,875,000,000	1,153,271,807,000,000
Ecotoxicidad Acuática Marina	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	11351837.00	3533237.40	0.00	3.21	11,351,837,000,000,000	3,533,237,402,000,000,000
Agotamiento de la Capa de Ozono	kg CFC ⁻¹¹ eq (triclorofluorometano)	0.00	0.00	0.00	3.21	509,493,523	158,578,878
Oxidación Fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq (etileno)	1.06	0.33	0.00	3.21	1,064,128,203,000	331,207,853,600
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq (diclorobenzeno)	127.20	39.59	0.00	3.21	127,201,772,100,000	39,591,306,560,000

4.8.3 Anexo número 3: Productos de la investigación

EL INSTITUTO TECNOLÓGICO
Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE



Por medio del
DEPARTAMENTO DEL HÁBITAT Y DESARROLLO URBANO
otorga la presente

CONSTANCIA

a

Julio César Brito Reyna

Por haber participado como PONENTE del trabajo titulado:

**Uso de sistemas activos, pasivos para climatización y
sus impactos ambientales comparativos**

en el marco del 4° Congreso Internacional del Hábitat y Sustentabilidad.
Respuestas a los retos del siglo XXI en los entornos de vida y espacios urbanos.
Tlaquepaque, Jalisco, del 26 al 28 de abril de 2023



Dra. Sarah Alexandra Obregón Davis
Directora del Departamento del Hábitat
y Desarrollo Urbano

Xalapa, Ver., a 15 de junio de 2023

Estimado(a) Julio Cesar Brito Reyna:

Por este medio, la Asociación Latinoamericana de Desarrollo Sustentable y Energías Renovables (ALDESER) organizadora del Congreso Internacional de Desarrollo Sustentable y Energías Renovables (CIDSER 2023) hace constar que su trabajo titulado:

Análisis teórico de impactos ambientales en la producción de polines.

Cuyos autores son: *Julio Brito R., Alexis Luna S., Gabriela Hernández-Luna, Rosenberg J Romero, Juan Carlos García Castrejón*

Ha sido **ACEPTADO en MODALIDAD ORAL** para su presentación de manera **Presencial** en el CIDSER 2023. Este Congreso Internacional se llevará a cabo los días 6, 7 y 8 de Noviembre de 2023, de manera presencial en GAMMA ORIZABA Grand Hotel de France, en Orizaba, Veracruz, México, y de manera virtual a través de la plataforma de Zoom.

El *Programa Preliminar* del evento se dará a conocer una vez concluida la evaluación de los trabajos enviados. La inclusión de su trabajo en el *Programa Final* está sujeta al cumplimiento de todos los requisitos de participación en el CIDSER 2023, el envío de su presentación Oral o Cartel como [Ponente Presencial](#) o [Ponente Virtual](#) y el [Registro y Pago](#) de la cuota de participación correspondiente a un trabajo aceptado.

La ALDESER y el Comité Organizador del CIDSER 2023 agradecemos su interés en formar parte de este importante evento.

Atentamente,
Comité Organizador CIDSER 2023



Dr. Luis Carlos Sandoval Herazo
Presidente ALDESER

Av. 20 de Noviembre Oriente, No.327, Col. Centro, CP: 91000, Xalapa, Ver.

Correo: secretariat@aldeser.org

 aldeser.lat  aldeser.lat

4.9 Referencias Bibliográficas

- [1] IEA. (2020). International Agency of Energy. Recuperado de: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>
- [2] Celaya, T. N. (2018). Pronóstico de generación eléctrica de corto plazo de un parque eólico, utilizando técnicas numéricas de predicción del clima. *Pistas Educativas*, Vol. 40. Págs. 142-143.
- [3] GCA. (2021). Global Carbon Atlas. Recuperado de: <http://www.globalcarbonatlas.org/es/CO2-emissions>
- [4] OMS. (2021). Organización Mundial de la Salud. Recuperado de: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/338922/9789240018563-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [5] IEA, (2021). International Energy Agency. Recuperado de: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/cooling>
- [6] Terminology, A. (2023). Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción. Recuperado de: [ashrae.org/technical-resources/free-resources/ashrae-terminology](http://www.ashrae.org/technical-resources/free-resources/ashrae-terminology)
- [7] Omrany, H., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Raahemifar, K. y Tookey, J. (2016). Aplicación de sistemas de paredes pasivas para mejorar la eficiencia energética en edificios: una revisión exhaustiva. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 62. Págs. 1252-1269.
- [8] Cardona, R. A., Limón M. D., Coronel T., J.F and Pérez-Lombard L. (2019). Creación de casos de estudio para la gestión energética de sistemas HVAC en edificios basados en TRNSYS. *XL Jornadas de Automática*. Págs. 458-465.
- [9] Puertolas, R. F., González J.C.L., Castro S.S., Benito P.A., y Arrebola C.V. (2020). Un edificio bioclimático en Madrid: Análisis de la respuesta térmica y revisión de los índices de confort a largo plazo. *Desarrollos en el entorno construido*. Vol. 3. Págs. 1-38.
- [10] INEGI. (2017). Anuario Estadístico y Geográfico del Estado de Morelos. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825094713.pdf
- [11] Holman, J. P. (1998). *Transferencia de calor*. Madrid: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U. 1a edición en español. Pág. 1.
- [12] Kurban, A. S., Cunsulo M.E, Alvarez A.A. y Montilla E. (2015). El papel de la arquitectura bioclimática en la reducción de la emisión de CO2 en ambientes áridos. *Trade Science; environmental science*. Vol. 11. Págs. 171-178.
- [13] Crawley D. B., Jon W. H., Kummert M. and Griffith B.T. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance



- simulation programs. *Building and Environment*. Vol. 43. Págs. 661-673.
- [14] Ghisellini, P. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*. Págs. 11-32.
- [15] Green Delta. (2022). Open LCA. Recuperado de: <https://www.openlca.org/>
- [16] ISO. (2023). Recuperado de: <https://www.iso.org/search.html?q=ACV>
- [17] Commission's, E. (2023). European Commission's. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ilcd.html?>
- [18] Lira, A. C. (2019). ¿Qué es el análisis del ciclo de vida? Unidades de apoyo para el aprendizaje. CUAED/Facultad de Arquitectura-UNAM. Recuperado de: https://uapa.cuaieed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/ea610b9e-69fd-49af-acdb-fc26d05b3e6a/analisis_de_ciclo_de_vida/index.html
- [19] ISO. (2006). International Organization for Standardization. Recuperado de: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- [20] CONAGUA. (2023). [conagua.gob.mx](https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias). Recuperado de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- [21] ASHRAE. (2017). Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado. Recuperado de: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2>
- [22] Barros, V. (2004). El Cambio Climático global. Buenos Aires, Argentina: Libros del Zorzal. Págs. 7-26.
- [23] SENER. (2018). Comparativo de eficiencia energética de sistemas de aire acondicionado con tecnologías on-off e inverter. *Subsecretaría de Planeación y Transición Energética*. Págs. 1-5.
- [24] Boustani, A., Sahni S., Gutowski T., and Graves S. (2010). Refabricación de electrodomésticos y ahorro energético. Laboratorio de Manufactura Ambientalmente Benigna, Sloan School of Management, MITEL. Págs. 43-44.
- [25] CML-IA Baseline. (2016). Universiteit Leiden. Recuperado de: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterization-factors>
- [26] ReCiPe. (2011). Recuperado de: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>
- [27] Guinée, J. B. (2002). Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards, Volume 1. Annex D: Recommended Life Cycle Impact Assessment Methods. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 1. Págs. 236-240.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



- [28] Guinee, J. B. (2011). Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environmental Science & Technology*. Vol.45. Págs. 90-96.
- [29] IMPACT 2002+. (2023). Recuperado de: <https://www.impactworldplus.org/en/methodology.php>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Jefatura de Posgrado en Sustentabilidad Energética



Cuernavaca, Morelos, a 15 de agosto de 2023.

DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO
COORDINADOR DEL POSGRADO EN
SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada “Análisis de la disminución de emisiones de CO2 en el acondicionamiento de un espacio con un sistema pasivo.”, que presenta el alumno **Julio César Brito Reyna**, para obtener el título de la **Maestría en Sustentabilidad Energética**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN		
DR. JESÚS CEREZO ROMÁN		
DRA. GABRIELA HERNÁNDEZ LUNA		
DR. MOISÉS MONTIEL GONZÁLEZ		
DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ		

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

JAMS*MFB/nmc.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

GABRIELA HERNANDEZ LUNA | Fecha:2023-08-15 11:12:49 | Firmante

CDIEsgjHu/offm2b4W1Lv0TyLbwzhxlZ81RUcBx95KltvLmj+Bke/9LKUHP+puF6hAfkArNzk3TqnQzY03uQ2rRis588y325fqH+xLm3DKQZOMn48PQfKeoHujs59/03+u7GOR46r64IDEw9Yil0Egcl4HyTkG0gRTUclVX2xkg3xU630mwwzaygzlH60hDeXEoApjB8VJdmGB/tZs4W65QdnKO4yJBNMHqCkrYkCQ9/6+GoX0/mYypbl+CpoGscjdDO0p78j1MHyW+9EaLbwLk0t0/WVGd5bycuUqjclCx2rQ772gCRY6e1ALBjmlulIFjN7cfrKSDRaErg==

MOISES MONTIEL GONZALEZ | Fecha:2023-08-29 12:35:10 | Firmante

UfSbPkNGN9NDaPhzu207nmtfqlwTb1eYHasep/8Sca70kZmYjBs6HzfoscaG9T2PcKXizj+J9ZHVf6ZfXNVKw/mak+/rzpRbZDhOSxKvmByx85DjrEVeEeChszboXmJRVpKtWGBAHPRH+DLruWSVJQGmRkDxFkmzBRf60BsRjDU5mOuliwNlu0t49XT8b6sSlpxafdwbfIUqhltTnd7Vtlb7JQ+5tUgyBMLR5iKsO3q49kXVmxo/DjUedTx4tObJVW2ataRazVKslltPhffK8LtrkMGH39deE51TmoNCQ+h/6ewNx0ESnR7f824ofp+4Qn9+gRJmd1p/IQ==

JUAN CARLOS GARCIA CASTREJON | Fecha:2023-08-30 10:33:56 | Firmante

LPv4eUzskvjiTZCL0icXwdFTY4664Mmt0/tLMGFENzWpuR99WbGjOe1bQyt+PjsGV4LZMVPp3/4KNVfQYjJ9s5NdqwUSYmxwmKZUgu/QTZVnG1wVeZpZNoAIE6GlcEHWZZzQbNBFFEHj8LFIFUSQfqIBvzEb0JUo9w08VOCGqPOnxhtJFTT99Cp4c4yfGuplR1mlAvLaXVTQzL09u6risQyvwfGoU9Te0OQyX/kHuubDvttlKyM13wVZC6j6M25DUFxkvbv92uS5dak0iNXyXaXurckeTxXYC9t/islThoTdsXELcs0USTQePVkEz49w00KYI0yk2qHQ5U1ktg==

ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMINGUEZ | Fecha:2023-09-08 13:05:39 | Firmante

iUf5rvccfEcygYS+ygRVGhtg2z7n00Y4D/EDU5/uaNpFsd557TD7Z3d9F+JG0DKLzt5g3x5e0i/J9OaN3rLoG78ABPT2obAAYtlaNAfJVsBvBHkQJG6OcorXcxNT0Hq+/Ts7Sd+EnWFJ/a5N3Crz6FYTy4LewhmBFhkF7do1KTm5ccXt4kiZbbg5MfiUjh7K4WyHnkW6UvD8mDX0Uq5vDucqtJdVsXNs5mbhjl1YbhrY1DIKesuIlCVYb6rGaRrMGZwX74vPh5aDcgG+UqwbS+htwaRm1VYRhZf5sNF0odgAODUU7unP17bf9RMBowp6cmSxmqlBqkn52mmFA==

JESUS CEREZO ROMAN | Fecha:2023-09-21 10:56:27 | Firmante

oydMeT2tNZbf7gd9B6UYMqeCKAmmtP+GokrTKh3mLwbr7xglOK7+GcbKcxEk5GTF6J0V6fL9YxRoaT0W1cOOIiWPOzaaKA/blrJ+iodmMSwPIWc5dS+QI2AmZk2ckCkP2zLLH/QRyzJrfDAOMeUCH4Bha4luMXoMLA8JlzpJ9EoCivbwWf2/OY65Ke12m808Bd2Ve88MhoND/cCFW6kyawlyjEtuof6FDSPy2CRUUCMZ3ghYVNB6kNCZTfOgAZMJeyPD8xLzAHdoNA14zhqgNyduBCq8iwsMAItDGam8dWx7rCYK6reHv8XJ3LtlYpw2kLTBftU5GHFun/BQQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



BDcoxi2a7

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/Jgiwh72HLBmSTp0uaJslmhdiImNE5yw9>

