



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Implementación de techos  
verdes para el ahorro de  
energía por climatización en el  
sector residencial**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Eléctrico Electrónico**

**P R E S E N T A**

Daniel Hernández Carrillo

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Sergio Quezada García



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026**



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y  
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL  
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado IMPLEMENTACION DE TECHOS VERDES PARA EL AHORRO DE ENERGIA POR CLIMATIZACION EN EL SECTOR RESIDENCIAL que presenté para obtener el título de INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

---

**DANIÉL HERNÁNDEZ CARRILLO**  
Número de cuenta: 420052696

# **DEDICATORIA**

A mis padres, Miguel Hernández y Nora Carrillo, quienes siempre han sido fuente de apoyo, amor incondicional y fortaleza en mi vida. Gracias por confiar y creer en mí, por prepararme como persona para ser mejor cada día y por ser parte del camino durante toda mi trayectoria académica. Su esfuerzo, dedicación y sacrificios han hecho que yo llegue a este punto. Este logro es fruto de todo lo que han hecho por mí, lo logre por ustedes y también les pertenece.

# AGRADECIMIENTOS

A mis hermanos Vanessa Hernández y Miguel Hernández, por su compañerismo y amor inigualable, ustedes siempre han sido una gran pieza de mí y un gran apoyo en cada proceso.

A mis abuelos Luis Hernández, Guadalupe Estrada y Margarita Ceja, por apoyar a mis padres, apoyarme a mí en esta trayectoria y siempre estar presentes, gracias por ser parte de este logro.

A mis queridos amigos David Guzmán y Luis González, quienes fueron parte de esta trayectoria universitaria desde un principio y siempre estuvieron para escucharme, apoyarme y compartirme su conocimiento. Son personas admirables, comprometidas y muy trabajadoras, sé que llegarán muy lejos, ya que siempre han demostrado que no hay barreras.

A Estefany Muciño, quien es una persona especial, cuya compañía, amor, aliento y confianza en mí han sido una pieza elemental para concluir esta etapa.

A mi asesor Sergio Quezada García, por transmitirme su conocimiento y estar en el proceso de la realización de esta tesis.

# Resumen

El aumento global de la temperatura y el efecto de isla de calor urbano traen consigo una sensación de incomodidad térmica para las personas que habitan las ciudades. Para alcanzar una sensación de comodidad térmica se emplean equipos activos de acondicionamiento de aire que son grandes consumidores de energía eléctrica. La operación de estos equipos produce, indirectamente, gases de efecto invernadero; además, rechazan calor al ambiente y su operación en masa supone un aumento de la temperatura en las ciudades que contribuye al efecto de isla de calor urbano. Por consecuencia se requiere una mayor cantidad de energía para mantener en operación estos equipos y el rechazo de calor al ambiente aumenta, volviéndose un círculo vicioso. Para alcanzar la sensación de comodidad térmica en los edificios, se pueden emplear técnicas pasivas de refrigeración que son más amigables con el ambiente. Los techos verdes es una técnica pasiva de refrigeración que ayuda a disminuir la temperatura interna de las edificaciones al proporcionar sombra, otorga una capa de aislamiento térmico y remueve calor debido a la evapotranspiración. Sin embargo, su implementación es escasa, una manera de incentivar su implementación es conocer los beneficios energéticos derivados de la disminución de la operación de los equipos activos de acondicionamiento de aire. En este contexto, el modelado y la simulación de estos sistemas puede ser una herramienta valiosa para determinar el ahorro energético. Con este propósito, se realizó un modelo matemático de transferencia de calor con el cual se implementaron las capas constitutivas del techo verde. Los datos de entrada utilizados en el modelo fueron: radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento, - obtenidos a partir de las condiciones climáticas de Mexicali, Chihuahua, Caborca y Nogales; todas ellas ciudades pertenecientes al norte del país. En todos los casos de estudio se considera una minieficación con techo convencional y techo verde con las mismas características. Se implementó el modelo y dichas propiedades en una simulación desarrollada en Python 3.13. Los resultados muestran que, para estas ciudades, los techos verdes contribuyen significativamente en reducir el consumo de energía. En Mexicali se ahorra ~36% de la energía; mientras que, en Chihuahua es posible ahorrar ~48%; en Caborca se puede ahorrar ~50% de la energía consumida; por último, en Nogales es posible ahorrar ~63% de la energía.

# Índice

Resumen.....	3
Índice.....	4
1. Introducción.....	6
1.1 Uso de SAA en México.....	8
1.2 Técnicas pasivas de refrigeración.....	10
1.2.1 Protección térmica.....	10
1.2.2 Modulación del calor.....	11
1.2.3 Disipación de calor.....	12
1.3 Objetivo.....	12
1.3.1 Justificación.....	12
1.3.2 Objetivo.....	13
1.3.3 Contribución.....	13
1.3.4 Organización del trabajo.....	14
2. Techos verdes.....	15
2.1 Descripción de los techos verdes.....	16
2.2 Selección vegetal para techos verdes.....	18
3. SAA utilizados en el sector residencial.....	20
3.1 Tecnologías más utilizadas en el sector residencial.....	21
3.2 Funcionamiento de operación.....	23
4. Modelo de transferencia de calor para los elementos envolventes.....	25
4.1. Balance de energía para el interior de la edificación.....	27
4.2. Modelo matemático de transferencia de calor para techo verde extensivo.....	27
4.3. Sistema de aire acondicionado.....	31
4.4. Solución numérica.....	32
4.5. Validación del modelo matemático.....	34
5. Casos de estudio.....	35
5.1 Características de la miniedificación.....	35

5.2. Implementación del modelo matemático .....	38
6. Resultados y discusión.....	41
6.1 Resultados .....	42
6.2. Discusión .....	45
Conclusiones.....	50
Anexo A .....	52
Techo Convencional .....	52
Techo verde.....	61
Referencias.....	71

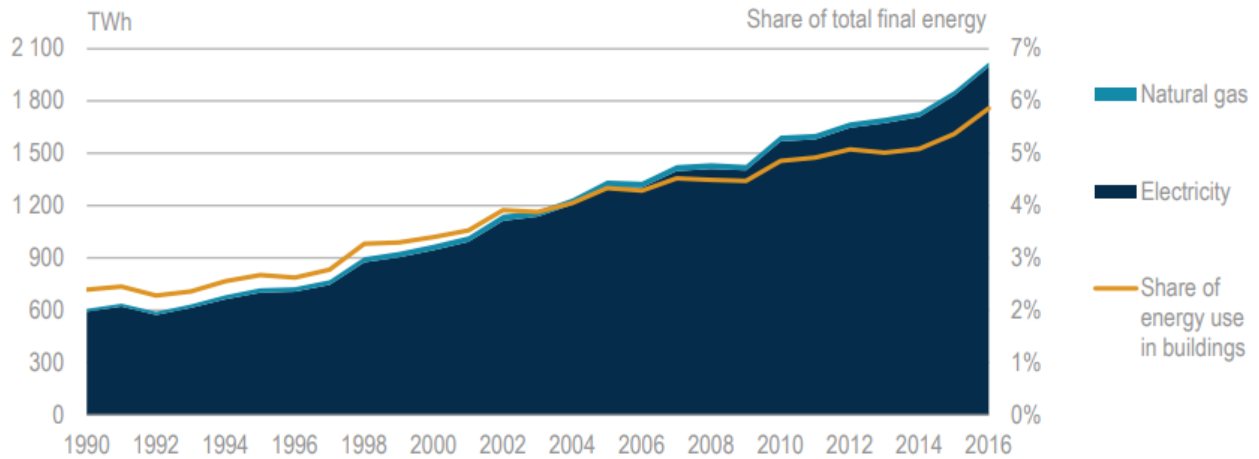
# 1. Introducción

El objetivo de los sistemas de acondicionamiento de aire (SAA) es controlar la humedad, la pureza, la temperatura y la velocidad del aire en un ambiente cerrado. Los SAA son imprescindibles para procesos de fabricación donde se requiere controlar estas variables; por ejemplo, en la fabricación de productos farmacéuticos, en ambientes quirúrgicos y en salas de cirugía. Otros ejemplos, donde se utilizan SAA, son en residencias, lugares públicos (e.g., centros comerciales) y lugares de trabajo con el fin de alcanzar la sensación de confort térmico (Gurubalan et al., 2019). Los SAA protegen a las personas a la exposición de altas temperaturas del ambiente; las cuales, están en aumento debido a fenómenos como el cambio climático y el efecto de isla urbana de calor. Otros beneficios asociados al uso de SAA son la reducción significativa de la mortalidad, mejoras en el aprendizaje, personal más productivo y resultados positivos en la salud mental (De Cian et al., 2025)

En la actualidad, la eficiencia energética asociada al uso y construcción de edificios y el acondicionamiento de aire de éstos, es un tema de interés a nivel mundial, tanto desde el punto de vista científico-técnico como desde el económico. El consumo de energía en edificios representa el 40% del consumo energético mundial, más de la mitad de éste se atribuye a los SAA (Castilla et al., 2010). La Agencia Internacional de Energía (AIE), estima que el empleo de SAA representa ~20% del consumo mundial de energía eléctrica (FIDE, 2025).

El enfriamiento de espacios en edificios ocupa la mayor demanda energética y es la que va en rápido incremento en países donde el desarrollo con crecimiento económico es significativo; como en países industrializados, de climas cálidos y húmedos, donde las expectativas de sensación de confort térmico siguen elevándose. Entre 1990 y 2016, el consumo de energía para enfriamiento en edificios residenciales y comerciales a nivel mundial se triplicó, alcanzando los 2020 TWh (ver **Figura 1.1**).



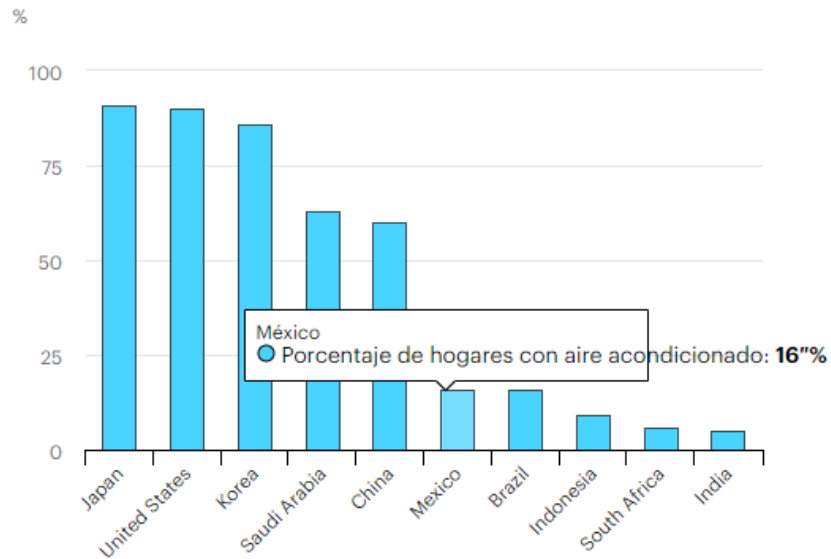


**Figura 1.1** Consumo mundial de energía para la refrigeración de espacios en edificios (IEA, 2025)

Durante ese periodo, la proporción de energía destinada a la refrigeración en los edificios aumentó del 2.5% al 6%; mientras que, en el sector comercial pasó del 6% al 11.5%; la refrigeración representó el 18.5% del consumo eléctrico en los edificios en 2016 (IEA, 2025).

El uso de SAA ha incrementado significativamente en los últimos años debido al incremento de las temperaturas globales, el crecimiento de las zonas urbanas y la alta accesibilidad a estos equipos. A medida que las olas de calor se han vuelto más frecuentes e intensas, muchas personas requieren estos equipos para mantener una sensación de confort térmico en sus hogares y lugares de trabajo. Aunque su uso se concentra en pocos países, la demanda ha ido en aumento en economías emergentes, donde muchos hogares aún no han adquirido su primer equipo. Este gran desarrollo y crecimiento ha sido impulsado por avances tecnológicos; por lo que, se han construido equipos eficientes y asequibles, pero también se ha generado un alto consumo energético.

En la **Figura 1.2** se muestra el porcentaje de hogares equipados con SAA de algunos países en el año 2018 y se puede observar que el uso de estos equipos varía ampliamente entre países, existe una mayor penetración de estos equipos en naciones desarrolladas y climas extremos; mientras que, en economías emergentes su adopción aun es limitada, pero va en crecimiento.



**Figura 1.2** Hogares equipados con SAA para 2018 (IEA, 2025)

## 1.1 Uso de SAA en México

Los SAA desempeñan un papel fundamental en la calidad de vida, especialmente en zonas donde las temperaturas suelen superar los 40°C, como ocurre en el norte de México. En situaciones de calor extremo, estos equipos brindan confort térmico y son indispensables para prevenir riesgos severos para la salud, como el golpe de calor.

En la actualidad, la demanda máxima integrada por el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) en México, es afectada por el uso de SAA. Este problema se da principalmente en el norte del país a nivel residencial en los meses de mayo a octubre.

En México, muchas de las construcciones no emplean materiales aislantes; aproximadamente el 95% de las viviendas no cuentan con aislamiento térmico. El 85% de los hogares que se encuentran en zonas con clima muy caluroso, tampoco cuentan con esta protección. En estos casos, se logra llegar al confort térmico por medio del uso de SAA, por consecuencia existe un alto consumo de energía eléctrica.

El consumo de energía por uso de SAA en México ha tenido un relevante crecimiento en las últimas décadas destinado a la refrigeración de espacios en edificios. Por lo que, uno de los principales

retos del sector energético en México es atender la creciente demanda de confort térmico en edificios residenciales.

Según los datos de la **Tabla 1.1**, en 1990 el consumo de energía para enfriamiento en México era de 7 TWh, para el año 2000 esta cifra se duplicó, alcanzando 16 TWh. Para el 2010, el consumo continuó en ascenso, llegando a los 23 TWh, durante el año 2016 se llegó a 37 TWh, que representó el 9.8% del consumo final total de energía en edificios (IEA, 2025). El uso de estos equipos se intensifica en los meses de mayor calor, llegando a representar el 40% del consumo eléctrico (IEA, 2025).

**Tabla 1.1.** Consumo de energía para la refrigeración de espacios en edificios por país (IEA, 2025).

	TWh				% total de energía en edificios
	1990	2000	2010	2016	
Estados Unidos	339	448	588	616	10.6%
Unión Europea	63	100	149	152	1.2%
Japón	48	100	119	107	9.5%
Corea	4	17	34	41	8.5%
México	7	16	23	37	9.8%
China	7	45	243	450	9.3%
India	6	22	49	91	3.4%
Indonesia	2	6	14	25	3.0%
Brasil	10	19	26	32	7.7%
Sudáfrica	4	6	6	8	2.8%
Medio Oriente	26	49	97	129	9.3%
Mundo	608	976	1602	2021	5.9%

Este crecimiento sostenido puede atribuirse a diversos factores, como el aumento de la población, el crecimiento de las ciudades, el incremento en el acceso a SAA y el cambio en las condiciones climáticas. Además, el desarrollo económico ha permitido que más edificios, hogares y negocios tengan SAA, lo que ha impulsado aún más el consumo de energía en este sector.

El aumento en el uso de SAA en México revela la importancia de implementar estrategias de eficiencia energética y tecnologías más sostenibles para reducir el impacto ambiental y a la

economía familiar. Una medida para alcanzar las condiciones de confort puede ser la implementación de técnicas pasivas de refrigeración.

## **1.2 Técnicas pasivas de refrigeración**

Los sistemas o tecnologías de acondicionamiento de aire se pueden clasificar en dos categorías: los equipos activos de acondicionamiento de aire y las técnicas pasivas de refrigeración.

Los equipos activos de acondicionamiento de aire proporcionan una sensación de confort térmico en edificios o casas, utilizan una gran cantidad de electricidad para su funcionamiento y, por ende, contribuyen a la producción de gases de efecto invernadero. Dentro de éstos se encuentran los equipos de acondicionamiento de aire de ciclo cerrado los cuales utilizan máquinas de refrigeración por absorción (e.g., enfriadores), estos equipos comúnmente utilizan un absorbente y un refrigerante.

En contraste, las técnicas pasivas de refrigeración no requieren del uso de la electricidad para su funcionamiento. Las técnicas pasivas de refrigeración utilizan fenómenos provenientes de la naturaleza como la convección, radiación y evaporación con el fin de enfriar un área sin la necesidad de utilizar electricidad o gas. Las técnicas de refrigeración pasiva se pueden clasificar en (Bhamare et al., 2019a):

- Protección térmica
- Modulación de calor
- Disipación de calor

### **1.2.1 Protección térmica**

En esta técnica el edificio se protege de las ganancias de calor solar, lo que implica el uso del paisajismo, superficies de agua, superficies de vegetación y sombreado de las superficies del edificio (Bhamare et al., 2019b).

Un claro ejemplo de esta técnica, son los techos blancos, también conocidos como techos fríos; los cuales, ofrecen importantes beneficios de protección térmica como: reducción en la temperatura interior debido a que pueden reflejar entre 55% y 80% la luz solar, lo cual ayuda a que la superficie se mantenga más fresca en días soleados mejorando la sensación de confort térmico,

disminuyendo la cantidad de calor que entra al edificio y haciendo que espacios sin SAA sean más agradables. Además, tienen un alto impacto en el ahorro de energía debido a que reducen la demanda de refrigeración interior (Abdallah, 2023; Sproul et al., 2014).

El paisajismo y vegetación es una de las estrategias más antiguas, efectivas y económicas para reducir la ganancia de calor solar de los edificios. Las plantas y árboles absorben calor por medio de la evapotranspiración, lo que contribuye al enfriamiento del entorno. La vegetación puede instalarse tanto en el exterior como al interior del edificio o vivienda. Internamente se emplean paredes verdes, balcones ajardinados y jardines interiores, los cuales contribuyen de manera significativa en mejorar la eficiencia energética. Mientras que, externamente se emplean techos verdes o incluso árboles, los cuales reducen la temperatura y actúan como barrera térmica. Estas técnicas han contribuido de manera significativa a disminuir la carga de los SAA en climas secos y húmedos (Bhamare et al., 2019b).

### **1.2.2 Modulación del calor**

Para esta técnica la ganancia de calor se debe modular con ayuda de la capacidad de almacenamiento térmico de la estructura del edificio. Esto permite retener el calor y liberarlo posteriormente, este proceso depende de la estructura y materiales utilizados. También depende de los métodos que fueron aplicados para disipar el calor acumulado (Bhamare et al., 2019b).

Un ejemplo es el uso de materiales de cambio de fase; los cuales, ofrecen importantes beneficios en la modulación del calor. Los materiales de cambio de fase (PCM) están teniendo un alto impacto en el diseño de techos por su alta capacidad de mejorar la eficiencia energética y confort térmico de los edificios. Estos materiales almacenan y liberan calor, por lo que se logra regular la temperatura interior en los edificios de forma eficiente (Jagadeeswara Reddy et al., 2024a). El funcionamiento de estos materiales está basado en que durante el día los PCM absorben el exceso de calor, y por la noche lo liberan, ayudando a mantener temperaturas estables y reduciendo la utilización de SAA. Estos materiales se pueden incluir en distintos techos (e.g., tejas, laminas metálicas, etc.); esta integración ha demostrado ser efectiva tanto en verano como en invierno (Basyouni & Mahmoud, 2024).

Diferentes estudios han revelado que los techos con PCM reducen las temperaturas superficiales en un promedio de 6.8°C; lo cual, contribuye a combatir el efecto de isla de calor urbana. Además,

también es considerado como una estrategia sostenible, ya que, mejora la eficiencia energética y beneficia en las temperaturas interiores (Basyouni & Mahmoud, 2024; Jagadeeswara Reddy et al., 2024b).

### **1.2.3 Disipación de calor**

Este proceso consiste en transferir el exceso de calor hacia un disipador ambiental de menor temperatura (e.g., aire, agua o el cielo); su eficacia depende de la disponibilidad del disipador y el acoplamiento térmico que hay con el edificio (Bhamare et al., 2019b).

Un ejemplo es la ventilación natural, la cual es un método que proporciona aire de alta calidad sin depender de sistemas mecánicos. Este método funciona por medio del aprovechamiento de los fenómenos naturales como el viento y la flotabilidad (diferencia de densidades) para intercambiar y renovar el aire interior y exterior; por lo que, mejora la calidad del ambiente interior como el confort térmico y al mismo tiempo disminuye el uso de energía y las emisiones de carbono (Zhao et al., 2024).

## **1.3 Objetivo**

En esta sección se enuncia el objetivo del trabajo, después de hacer una breve reflexión de la información presentada. Además, se presenta la principal contribución del trabajo y como se organiza para alcanzar el objetivo.

### **1.3.1 Justificación**

El manejo de los SAA ha evolucionado de ser un elemento opcional para brindar confort a convertirse en una necesidad esencial ante el incremento de las temperaturas y los desafíos derivados al cambio climático. El crecimiento económico, tanto a nivel global como en México, se ve reflejado en avances tecnológicos y en el acceso masivo a estos equipos, lo cual provoca una creciente presión sobre los sistemas eléctricos y el ambiente.

En este contexto, resulta indispensable buscar medidas que promuevan la eficiencia energética, especialmente en regiones con alta demanda como en el norte del país. Incluso, como primer punto es fundamental buscar y aprovechar áreas con potencial, en este caso los techos de las casas y edificios pueden utilizarse para implementar técnicas pasivas de refrigeración que contribuyan a reducir la carga térmica interior. De esta manera, será posible avanzar hacia un modelo de climatización más sostenible.

### **1.3.2 Objetivo**

El objetivo es determinar el ahorro energético en un SAA para la refrigeración de un edificio residencial debido a la implementación de techos verdes y determinar algunas de las variables que tienen mayor influencia. Para realizar el estudio se considera una miniedificación con techo convencional y techo verde sometida a las condiciones climáticas de Mexicali, Chihuahua, Caborca y Nogales; todas ciudades del norte del país. La miniedificación consiste en un edificio de una sola planta y solamente una zona para simplificar los fenómenos y los cálculos, en el capítulo 5 se presentan las características de la miniedificación.

### **1.3.3 Contribución**

Mediante el análisis del comportamiento térmico y energético de los techos verdes, es posible avanzar hacia modelos de edificaciones más eficientes y resistentes frente al cambio climático y a la presión en los sistemas eléctricos. En este caso, el estudio se enfoca en evaluar el potencial de los techos verdes como herramienta para disminuir el consumo energético destinado al uso de SAA en el sector residencial.

La principal contribución de este trabajo es evaluar el ahorro energético en las ciudades de Mexicali, Chihuahua, Caborca y Nogales. Las cuales no contaban con previos estudios de ahorro de energía en SAA tipo *inverter*. Este es el primer estudio que implementa un control PID para el SAA y determina el ahorro de energía debido a la implementación del techo verde.

### **1.3.4 Organización del trabajo**

El presente trabajo se organiza de la siguiente manera:

- En el capítulo uno se aborda la introducción, el uso de sistemas de aire acondicionado en México y las técnicas pasivas de refrigeración, así como los objetivos del trabajo.
- En el capítulo dos se habla de los techos verdes, los cuales son una técnica pasiva y se describe su funcionamiento, clasificación y tipo de vegetación recomendada para estos techos en México.
- En el capítulo tres se presentan los sistemas de aire acondicionado más utilizados en el sector residencial y se da una descripción general de cómo funcionan estos equipos.
- En el capítulo cuatro se aborda el modelo de transferencia de calor para los elementos envolventes; balance de energía para el interior de la miniedificación, modelo matemático de transferencia de calor para un techo verde extensivo, modelo del sistema de aire acondicionado, solución numérica y por último la validación del modelo.
- En el capítulo cinco se presenta el caso de estudio, así como las características de la miniedificación; se implementan dichas propiedades en una simulación desarrollada en Python 3.13.
- En el capítulo seis se presentan los resultados y discusión.
- Por último, aparece la conclusión de la tesis.



## 2. Techos verdes

Una de las técnicas pasivas de refrigeración basada en el paisajismo y la vegetación son los techos verdes que mejoran la absorción y reflexión del calor. Pueden absorber hasta el 60% de la radiación solar incidente y pueden llegar a reflejar entre un 20% y 30%, minimizando de manera significativa el calor que entra en el edificio. Esto se debe a que la vegetación actúa como una barrera y proporciona sombra, evitando que la radiación solar incida directamente en la superficie del techo. Los techos son la parte de la envolvente que recibe mayor radiación y son la fuente principal de calor hacia el interior del edificio.

Además, los techos verdes mantienen una temperatura constante; diversas investigaciones han evidenciado que los techos verdes disminuyen las variaciones de temperatura en los techos en un 54% y contribuyen a mejorar la resistencia térmica total en un rango del 33% hasta un 200%; en verano, la temperatura del techo verde puede estar hasta 10°C por debajo de la temperatura del aire exterior (Zhang et al., 2022). Por lo que, permiten ahorrar energía en los SAA (Anderson & Gough, 2021; Cristiano et al., 2021).

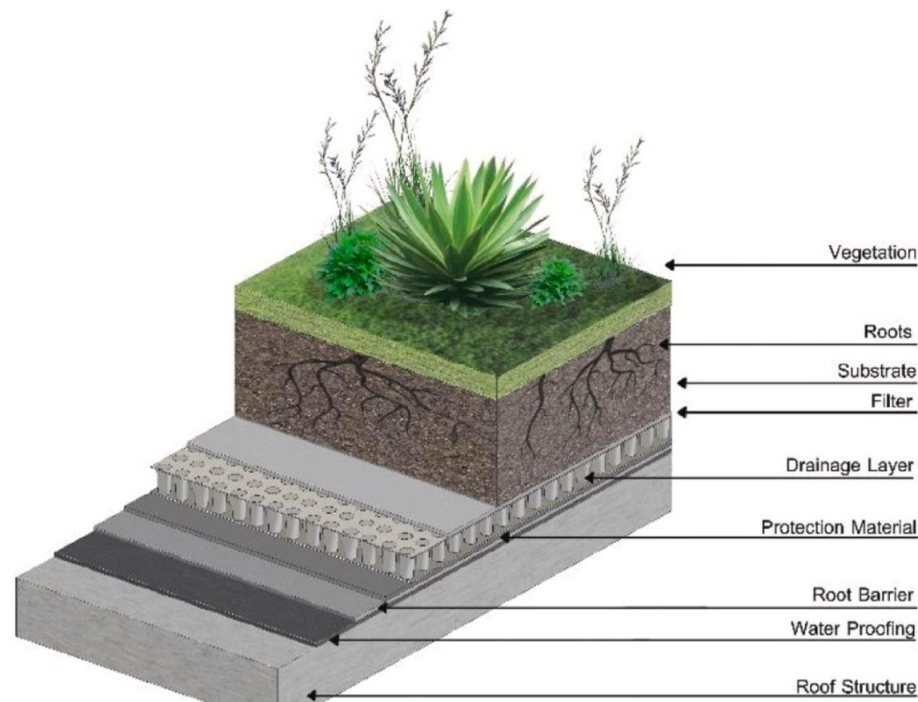
Los techos verdes también conocidos como techos ecológicos o techos con vegetación ofrecen muchos beneficios ambientales, lo que los ha convertido en una estrategia para combatir el cambio climático y mejorando el confort térmico para tener una mejor calidad de vida en las personas que habitan las ciudades.

Esta técnica pasiva de refrigeración es una alternativa sostenible debido a que no necesita electricidad para funcionar y colabora de manera significativa en el aumento en áreas verdes en las ciudades y juega un papel importante en la purificación del aire, filtrando contaminantes y mejorando su calidad. Además, los techos verdes disminuyen el efecto isla de calor urbano, absorbiendo la radiación solar y proporcionando un efecto de enfriamiento por medio de la evapotranspiración, disminuyendo la temperatura y creando ambientes más frescos; adicionalmente, contribuyen en la preservación de la biodiversidad (Morakinyo et al., 2017; Berndtsson et al., 2009).

## 2.1 Descripción de los techos verdes

Los techos verdes consisten en la instalación de una cubierta vegetal; la cual, está compuesta de sustratos, como tierra, combinados con vegetación (e.g., plantas crasas) instalados sobre un techo convencional de concreto. En la **Figura 2.1** se pueden observar las capas por las que está compuesto el techo verde más completo (intensivo). El techo verde más simple está integrado por una membrana impermeable, un sustrato para el crecimiento de plantas y una capa vegetal. La estructura situada entre el sustrato y la membrana impermeabilizante del techo puede variar, pero por lo general incluye:

- Una barrera contra las raíces
- Una capa de drenaje
- Una capa de almacenamiento
- Un sistema de riego, en caso de que sea necesario según el tipo de sistema

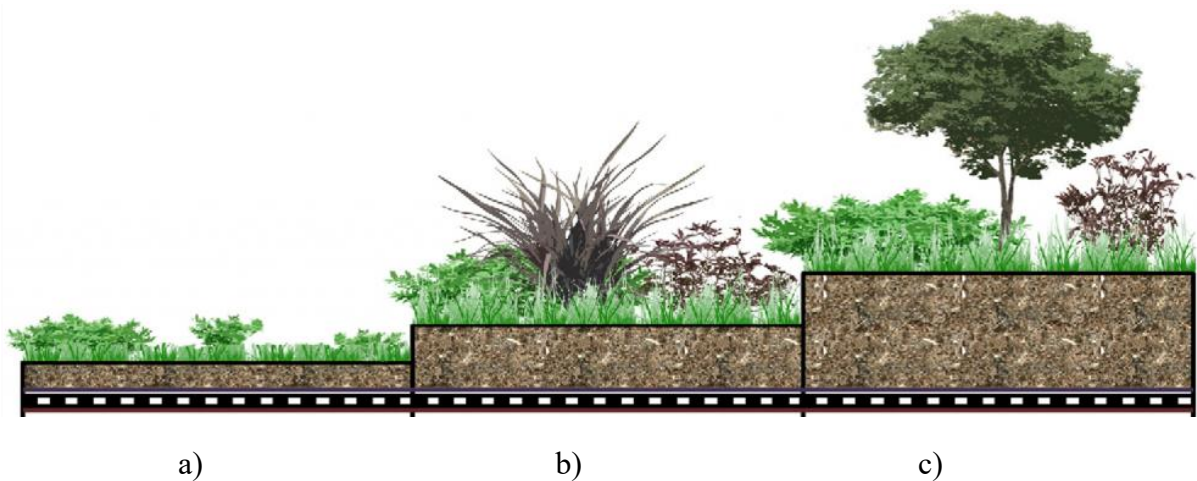


**Figura 2.1** Estructura de un techo verde intensivo (Mihalakakou et al., 2023).

En las últimas décadas se han registrado numerosos tipos de los techos verdes, los cuales, pueden agruparse en las siguientes tres categorías principales (Berardi et al., 2014):

1. **Techos verdes extensivos:** son reconocidos como una de las estrategias más efectivas para promover la sostenibilidad en su construcción. Se caracteriza por una capa de sustrato, la cual es poco profunda (menos de 15 cm) y vegetación de bajo crecimiento como hierbas, musgos y césped corto; por lo que, demandan poco mantenimiento y no requieren sistemas permanentes de riego, por lo cual son una opción económica (ver **Figura 2.2a**) (Kolokotsa et al., 2020; Mihalakakou et al., 2023).
2. **Techos verdes semi-intensivos:** estos techos de intermedia profundidad (entre 15 cm y 30 cm) incluyen el uso de plantas pequeñas como césped, pastos y arbustos pequeños, con necesidades moderadas de mantenimiento y riego ocasional (ver **Figura 2.2b**) (Berardi et al., 2014; Mihalakakou et al., 2023).
3. **Techos intensivos:** poseen capas de sustrato más profundas (hasta 1 m), son capaces de sustentar vegetación de mayor tamaño, incluyendo grandes arbustos, jardines florales, pastizales e incluso árboles, estos techos requieren de mayor mantenimiento y riego automatizado (ver **Figura 2.2c**) (Berardi et al., 2014; Mihalakakou et al., 2023).

En la **Figura 2.2** se puede observar la clasificación de los techos verdes según su agrupación.



**Figura 2.2** a) Techo verde extensivo, b) Techo verde semi-intensivo y c) Techo verde intensivo (Sachverständige Gartenbau -Landschaftsbau-Sportplatzbau eV & Gartenbau, 2018)

## 2.2 Selección vegetal para techos verdes

La selección de las especies vegetales es un factor clave en el diseño y funcionamiento de los techos verdes, ya que influye directamente en su rendimiento ecológico, su mantenimiento y su adaptabilidad a distintas condiciones climáticas. Dentro de las opciones más utilizadas destacan las especies *sedum* o *crasas* son las más populares para techos verdes a nivel mundial, debido a su buen desempeño en diversas condiciones climáticas, así como a su baja demanda de riego y mantenimiento.

En la **Figura 2.3** se presentan distintas plantas que pueden utilizarse en diferentes regiones del mundo. Una de las principales ventajas de emplear *sedum* en techos verdes es que poseen raíces muy superficiales, por lo que no requieren un medio de cultivo profundo. Además, estas plantas son altamente tolerantes a la sequía, lo cual resulta beneficioso en techos de difícil acceso. En este sentido, un techo verde con plantas tipo *sedum* representa una solución eficiente y de mantenimiento razonablemente bajo (Shafique et al., 2018).



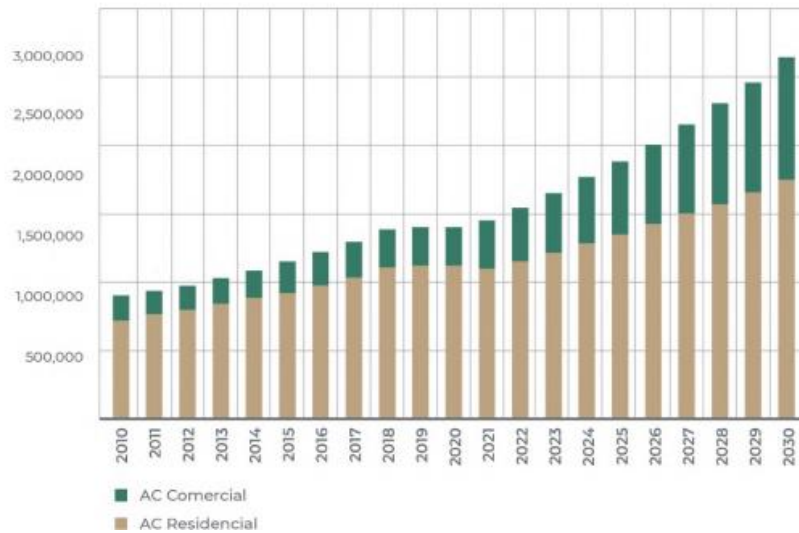
**Figura 2.3** Plantas utilizadas habitualmente en techos verdes

Los techos verdes ayudan a reducir el consumo de energía destinado a la climatización, en algunas ciudades de México este consumo puede representar un impacto importante del ingreso familiar y

de la demanda energética en la región. En el siguiente capítulo se mencionan los tipos de SAA más utilizados en el sector residencial y su evolución en el mercado, buscando el equipo más eficiente y refrigerantes más ecológicos.

### 3. SAA utilizados en el sector residencial

El 70% de todos los SAA a nivel mundial se encuentran en edificios residenciales. El número de estos sistemas aumentará aún más debido a los cambios demográficos hacia las ciudades, el alto nivel de ingresos de la clase media y las mayores expectativas de confort térmico. La mayoría de los SAA que se utilizan para uso residencial son energéticamente eficientes en comparación a sus predecesores (Pandey et al., 2021).



**Figura 3.1** Proyección de ventas de equipos de aire acondicionado (Alonso Jiménez Reyes et al., 2022)

El mercado ha evolucionado hacia el uso de sistemas *minisplit*, reemplazando a los antiguos equipos de ventana. Existen los modelos *inverter* que son muy eficientes, los cuales están ganando terreno, el crecimiento de ventas de estos equipos está ligado al aumento del PIB per cápita y al aumento de la temperatura. Incluso, también lo está con un crecimiento económico moderado, la incorporación de millones de unidades puede ser un gran problema debido a la gran presión que habría en el sistema eléctrico nacional.

En 2018, las ventas anuales superaron las 800,000 unidades y se espera que para el 2030 lleguen a 2.5 millones, con una tasa de crecimiento proyectada del 5.4% desde 2022. Entre 2010 y 2019,

las ventas de estos equipos crecieron de 700,000 a más de un millón de unidades. Durante ese periodo, los equipos de ventana perdieron participación en el mercado, cayendo del 74% al 8%, los cuales han sido reemplazados por sistemas *minisplit*, especialmente con tecnología *inverter*, que ya ocupan más del 50% del mercado.

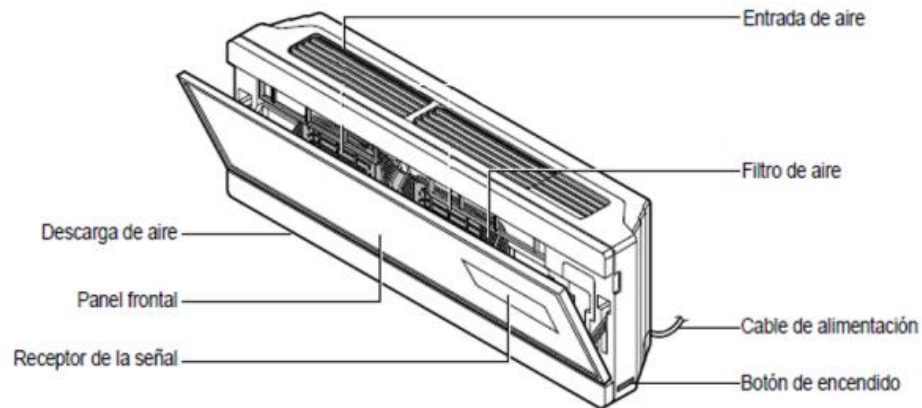
Además, los avances tecnológicos se están desplazando a implementar refrigerantes más ecológicos como el HFC-410a y el HFC-32, reemplazando al HFC-22. El crecimiento de los SAA en el sector residencial es relevante. Se considera una tasa de crecimiento del 10% para alcanzar 2.4 millones de unidades vendidas en el sector residencial (Alonso Jiménez Reyes et al., 2022).

### **3.1 Tecnologías más utilizadas en el sector residencial**

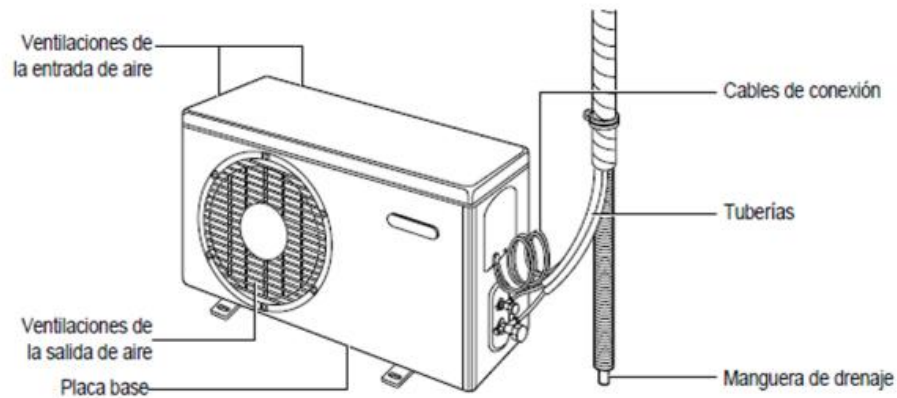
Los sistemas tipo *Split*, también llamados “fragmentados” se caracterizan por distribuir los componentes del ciclo de refrigeración en gabinetes separados. Generalmente constan de dos unidades (ver **Figura 3.2**):

- Una interna, que incluye el evaporador y el ventilador encargado de la circulación del aire.
- Una externa que contiene el condensador, el compresor y la válvula de expansión.

### Unidad interior



### Unidad exterior



**Figura 3.2** Sistemas de aire acondicionado tipo *Split* (Edgardo Brito Contreras, 2011)

Los sistemas *Split* tienen dentro de su categoría a los SAA llamados *Minisplit*; estos sistemas disponen de una unidad exterior conectada mediante tuberías de refrigerante a una unidad interior montada en la parte superior de la pared (Nestor Quadri, 2001). En la **Figura 3.3** se muestra un ejemplo representativo de este sistema.





**Figura 3.3** Sistema aire acondicionado *Minisplit* (Nestor Quadri, 2001)

### 3.2 Funcionamiento de operación

La unidad evaporadora, ubicada en el interior de la zona a climatizar, está conformada por el evaporador, válvula de expansión y un filtro un ventilador helicoidal. La unidad condensadora ubicada en el exterior, está conformada por un condensador y el sistema de control.

La unidad condensadora es la encargada de expulsar el calor al ambiente exterior, lo que hace que el aire que sale sea caliente; por esa razón, no se debe instalar en espacios cerrados, debido a que la falta de ventilación podría provocar un sobrecalentamiento en el equipo. Ambas unidades, deben estar conectadas mediante una tubería de cobre que transporta el gas refrigerante, así como por un cableado eléctrico. A la vez se hace la evacuación de los condensados mediante la unidad evaporadora por una tubería que sale al exterior, la cual forma parte del mismo sistema de conexión (Edgardo Brito Contreras, 2011).

En el siguiente capítulo se muestra el modelo de transferencia de calor para las envolventes y el balance de energía para el interior de la edificación para determinar la cantidad de energía que requiere un SAA para alcanzar las condiciones de confort. Así mismo, también se presenta el método para determinar el valor de las variables relacionadas con el control PID para el SAA tipo *inverter*.

## 4. Modelo de transferencia de calor para los elementos envolventes

El modelo dinámico de transferencia de calor para los elementos envolventes convencionales considera la conducción de calor en una sola dimensión a través del techo y las paredes; las envolventes están constituidas por un solo material opaco (cuerpo gris) uniforme; no se consideran ventanas. El concreto es el material del techo convencional más utilizado en las viviendas de México. Los flujos térmicos presentes en un techo convencional se muestran en la **Figura 4.1a**. En este estudio, se considera que las envolventes están formadas sólo por una capa de concreto. La transferencia de calor por conducción a través de las envolventes está dada por:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

donde  $\rho$  es la densidad,  $C_p$  es el calor específico,  $T$  es la temperatura de las envolventes,  $t$  es el tiempo,  $k$  es la conductividad térmica y  $x$  es la dirección de la transferencia de calor por conducción.

El punto de inicio está dado por:

$$T(t, x) = T_0(x) \quad \text{en} \quad t = 0 \quad (2)$$

La condición de frontera al exterior del edificio ( $x=0$ ) está dada por:

$$-k \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = q_{sr} - q_{em} - q_{cv} \quad (3)$$

donde  $q_{sr}$  es el flujo de calor por motivo de la radiación solar,  $q_{em}$  es el flujo de calor neto por emisión y  $q_{cv}$  es el flujo de calor por medio de la convección. Dichos flujos de calor se calculan partiendo de:

$$q_{sr} = \alpha q_{sri} \quad (4)$$

$$q_{em} = \varepsilon \sigma \left( T^4 \Big|_{x=0} - T_e^4 \right) \quad (5)$$

$$q_{cv} = h \left( T \Big|_{x=0} - T_a \right) \quad (6)$$

donde  $T|_{x=0}$  es la temperatura en el área exterior (en la pared o en el techo),  $\alpha$  es la absortancia en la superficie exterior,  $q_{sri}$  es la radiación solar que incide,  $h$  es la emisividad,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann,  $T_a$  es la temperatura ambiente,  $T_e$  es la temperatura de los alrededores y  $h$  es el

factor de transferencia de calor por convección, el cual es calculado en función del número de Nusselt:

$$\text{Nu} = \frac{hL}{k} \quad (7)$$

donde  $L$  es la longitud de la envolvente paralela al flujo de aire. El número de Nusselt para las paredes planas está dado por (S.W. Churchill & H. Ozoe, 1973):

$$\text{Nu} = \frac{0.3387 \text{Pr}^{1/3} \text{Re}^{1/2}}{\left(1 + \left(\frac{0.0468}{\text{Pr}}\right)^{2/3}\right)^{1/4}} \quad (8)$$

donde  $\text{Re}$  representa el número de Reynolds y  $\text{Pr}$  es el número de Prandtl, dados por:

$$\text{Re} = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (9)$$

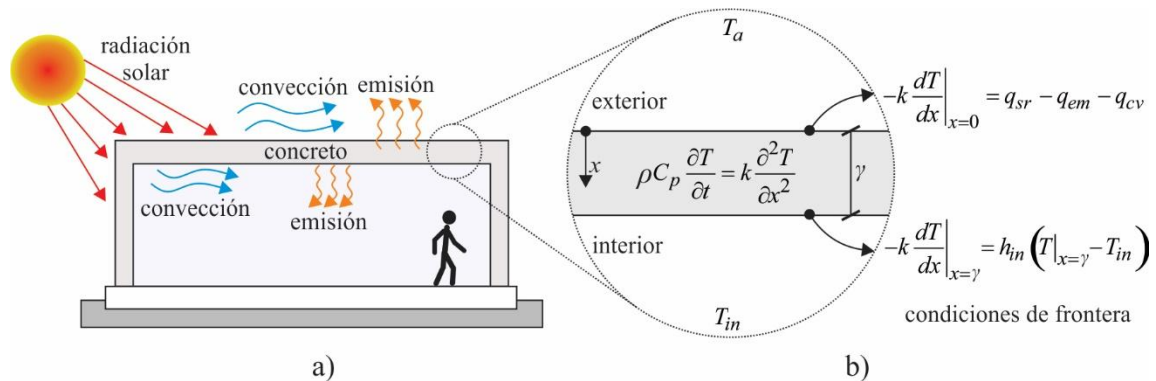
$$\text{Pr} = \frac{C_p \mu}{k} \quad (10)$$

donde  $v$  es la velocidad promedio del viento y  $\mu$  es la viscosidad dinámica del aire.

La condición de frontera para el interior del miniedificio está dada por:

$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=\gamma} = h_{in} (T|_{x=\gamma} - T_{in}) \quad (11)$$

donde  $T$  es evaluada en la superficie interior (pared o techo),  $\gamma$  es el espesor de la envolvente,  $T_{in}$  es la temperatura del aire contenida en el interior del miniedificio y  $h_{in}$  es el coeficiente combinado de transferencia de calor en el interior, tomando en cuenta que se considera la transferencia de calor por convección y radiación. Las condiciones de frontera, para el techo, se muestran en la **Figura 4.1b**. Este modelo es implementado en cada una de las envolventes de la miniedificación.



**Figura 4.1** Edificación de techo convencional a) Flujos de calor, b) Condiciones de contorno para el interior y exterior de la miniedificación

#### 4.1. Balance de energía para el interior de la edificación

El cambio de temperatura en el interior, sin transferencia de masa, está dado por:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{\dot{Q}}{(mC_p)_{in}} \quad (12)$$

donde  $m$  es la masa de aire que se encuentra en el interior de la edificación y  $\dot{Q}$  es el calor total transmitido al interior por medio de los elementos envolventes, que están dados por:

$$\dot{Q} = \sum h_{in} (T_i - T_{in}) A_i + \sum \dot{S}_k - \dot{Q}_c \quad (13)$$

donde  $T_i$  es la temperatura de la superficie y  $A_i$  el área del elemento envolvente  $i$ , mientras que  $\dot{S}$  es la fuente interna de calor  $k$ , representa a una persona o un dispositivo eléctrico transmitiendo calor y  $\dot{Q}_c$  es el calor que se remueve por refrigeración a través de un sistema de aire acondicionado.

Para dar solución a la Ec. (12), la condición inicial está dada por:

$$T_{in} = T_{in,0} \quad \text{en} \quad t = 0 \quad (14)$$

#### 4.2. Modelo matemático de transferencia de calor para techo verde extensivo

El modelo ideal de un techo verde se representa en la **Figura 4.2a**, en la que se muestran los flujos de calor por medio de las diferentes capas que lo conforman.

El flujo de calor a través de la capa verde (integrada por plantas y aire) se describe por una ecuación efectiva; la cual, considera la fase sólida (plantas) y la fase gaseosa (aire):

$$(\rho C_p)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = k_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} \quad (15)$$

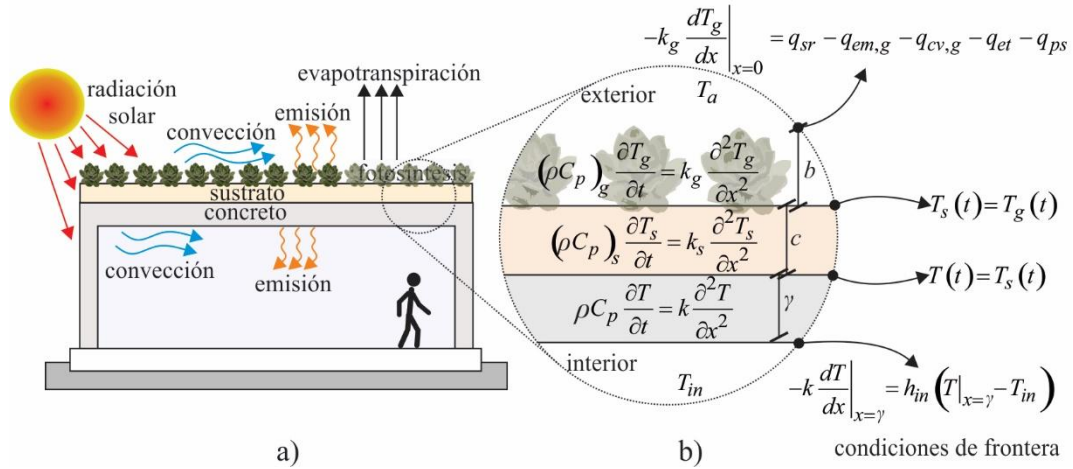
donde  $T_g$  es la temperatura en la capa verde,  $(\rho C_p)_g$  y  $k_g$  son propiedades efectivas de la capa verde que se obtienen a partir de (Quezada-García et al., 2017):

$$(\rho C_p)_{ef} = (\rho C_p)_1 (1 - \beta) + (\rho C_p)_2 \beta \quad (16)$$

$$k_{ef} = k_1 (1 - \beta) + k_2 \beta \quad (17)$$

donde el subíndice  $ef$  hace referencia a las propiedades efectivas; mientras que, los subíndices 1 y 2 corresponden a sus componentes (planta = 1 y aire = 2 para la capa verde; tierra = 1 y agua = 2 para la capa de sustrato) y  $\beta$  es la fracción volumen del componente 1 en el volumen total de la capa:

$$\beta = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad (18)$$



**Figura 4.2** Edificación con techo verde a) flujos de calor, b) condiciones de frontera en el interior y exterior de la edificación

El flujo de calor a través de la capa de sustrato (integrada por tierra y agua) está dado por:

$$(\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \quad (19)$$

donde  $T_s$  es la temperatura del sustrato,  $(\rho C_p)_s$  y  $k_s$  son propiedades efectivas para la capa de sustrato y se calculan mediante las Ecs. (16) – (18).

La Ec. (19) considera que el sustrato está compuesto por tierra y agua debido a que se ha demostrado que la conductividad térmica es función de las propiedades térmicas de los componentes minerales del sustrato (Gerzhova et al., 2019).

Las condiciones iniciales de las Ecs. (15) y (19) son:

$$T_g(0,x) = T_{g,0}(x) \quad \text{en} \quad t = 0 \quad (20)$$

$$T_s(0,x) = T_{s,0}(x) \quad \text{en} \quad t = 0 \quad (21)$$

La condición de frontera que relaciona a las Ecs. (15) y (19) es (ver la **Figura 4.2b**):

$$T_s(t) = T_g(t) \quad \text{en} \quad x = b \quad (22)$$

donde  $b$  es el grosor de la capa verde. Las Ecs. (19) y (1) están relacionadas con la condición de contorno:

$$T(t) = T_s(t) \quad \text{en} \quad x = b + c \quad (23)$$

donde  $c$  es el grosor de la capa de sustrato. La condición de contorno para la Ec. (15) fuera del edificio ( $x=0$ ) está definida por:

$$-k_g \left. \frac{dT_g}{dx} \right|_{x=0} = q_{sr} - q_{em,g} - q_{cv,g} - q_{et} - q_{ps} \quad (24)$$

donde  $q_{et}$  es el calor transferido por medio de la evapotranspiración al ambiente y  $q_{ps}$  es el calor neto que requieren las plantas para la fotosíntesis y la respiración calculado por la correlación (Feng et al., 2010a).

$$q_{ps} = \frac{6.5}{TC(1 + R_{ep}/R_{tp})} q_{et} \quad (25)$$

$TC$  es el coeficiente de transpiración,  $R_{ep}$  es la tasa de evaporación y  $R_{tp}$  es la tasa de transpiración. En este estudio se consideró que  $R_{ep}/R_{tp}=1$ , con  $TC=20$ .

La pérdida de calor asociada a la evapotranspiración se expresa por (Feng et al., 2010a):

$$q_{et} = \lambda R_{et} \quad (26)$$

donde  $\lambda$  es el calor latente de vaporización y  $R_{et}$  es la tasa de evapotranspiración.

La evapotranspiración se calcula por medio de (Hargreaves & Allen, 2023):

$$ET_0 = 0.0023 q_{sri} (T_a - 255.35) T_R^{0.5} \quad (27)$$

donde  $T_R$  es la diferencia entre la temperatura ambiente máxima y mínima alcanzada durante el día:

$$T_R = T_{\max} - T_{\min} \quad (28)$$

$R_{et}$  está dado por:

$$R_{et} = e_f ET_0 \quad (29)$$

donde  $e_f$  es un factor de conversión igual a  $5.218987 \times 10^{-7} \text{ kg día m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ .

El intercambio de calor por convección entre la capa verde y el ambiente está dado por (Meng et al., 2006):

$$q_{cv,g} = (5.7 + 3.8v)(T_g - T_a) \quad (30)$$

El intercambio de calor por emisión entre la capa verde y el ambiente está dado por:

$$q_{em,g} = \varepsilon\sigma(T_g^4 - T_{sky}^4) \quad (31)$$

$T_{sky}$  es la temperatura cielo y se determina a partir de la norma ISO 13790:

$$T_{sky} = T_a - 13 \text{ K} \quad (32)$$



### 4.3. Sistema de aire acondicionado con control PID

El consumo de energía eléctrica debido al uso del equipo de aire acondicionado está dado por:

$$E_c = \frac{1}{\eta} \int_0^{t_{ac}} \frac{\dot{Q}_c}{COP} dt \quad (33)$$

donde  $\eta$  es la eficiencia del compresor utilizado en el equipo de aire acondicionado,  $t_{ac}$  es el tiempo que opera el equipo, COP es el coeficiente de desempeño que se calcula considerando un equipo ideal,

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}} \quad (33)$$

El equipo *inverter* se modela utilizando un control PID para variar el calor removido del interior de la edificación; así esta variación está dada por,

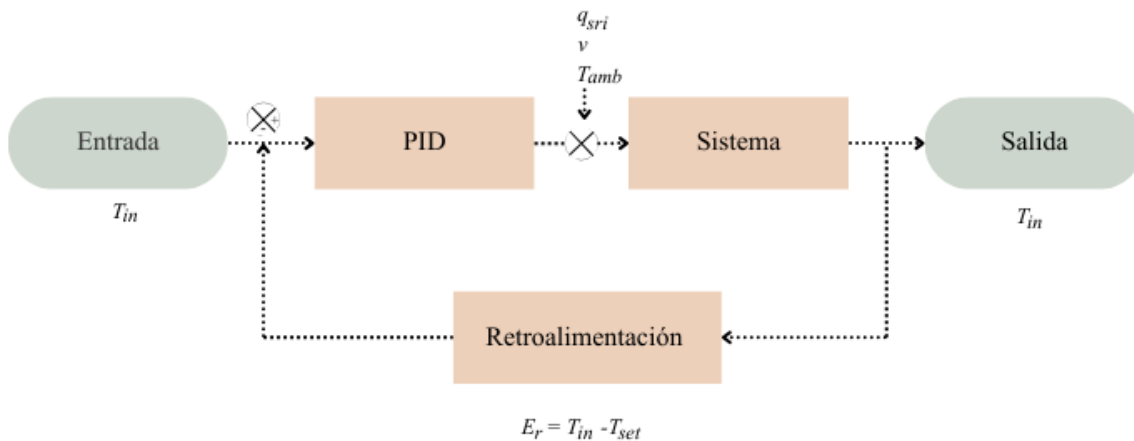
$$\Delta \dot{Q}_c = K_p \left( E_r + K_d \frac{dE_r}{dt} + \frac{1}{K_{it}} \int_t^{t+\Delta t} E_r dt \right) \quad (34)$$

donde  $E_r$  es el error, que es función del tiempo, y se define como,

$$E_r = T_{in} - T_{set} \quad (35)$$

donde  $T_{set}$  es la temperatura deseada en el interior de la edificación, y  $K$  es una constante dada por el peso de las partes proporcional, derivativo e integral (subíndices  $p$ ,  $d$  y  $it$ , respectivamente). El método de Ziegler-Nichols es utilizado para obtener el valor de estas constantes.

El diagrama de control PID para controlar la temperatura de la edificación se muestra en la **Figura 4.3**, el cual es aplicado al SAA tipo *inverter*.



**Figura 4.3.** Diagrama de control PID.

#### 4.4. Solución numérica

Las ecuaciones diferenciales se resuelven por el método de diferencias finitas. Las ecuaciones (1), (15) y (19) se pueden escribir de la siguiente manera:

$$\left(\rho C_p\right)_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{ef} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (36)$$

La forma discreta de la Ec. (36) es:

$$T_j^{t+\Delta t} = T_j^t + \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \frac{k_{ef}}{\left(\rho C_p\right)_{ef}} \left( T_{j+1}^t - 2T_j^t + T_{j-1}^t \right) \quad (37)$$

Las condiciones de frontera (Ecs. (3), (11) y (24)) pueden escribirse como:

$$-k \frac{dT}{dx} = \sum q_m \quad (38)$$

donde  $q_m$  es el  $m$ -ésimo flujo de calor, la forma discreta de la Ec. (38) es:

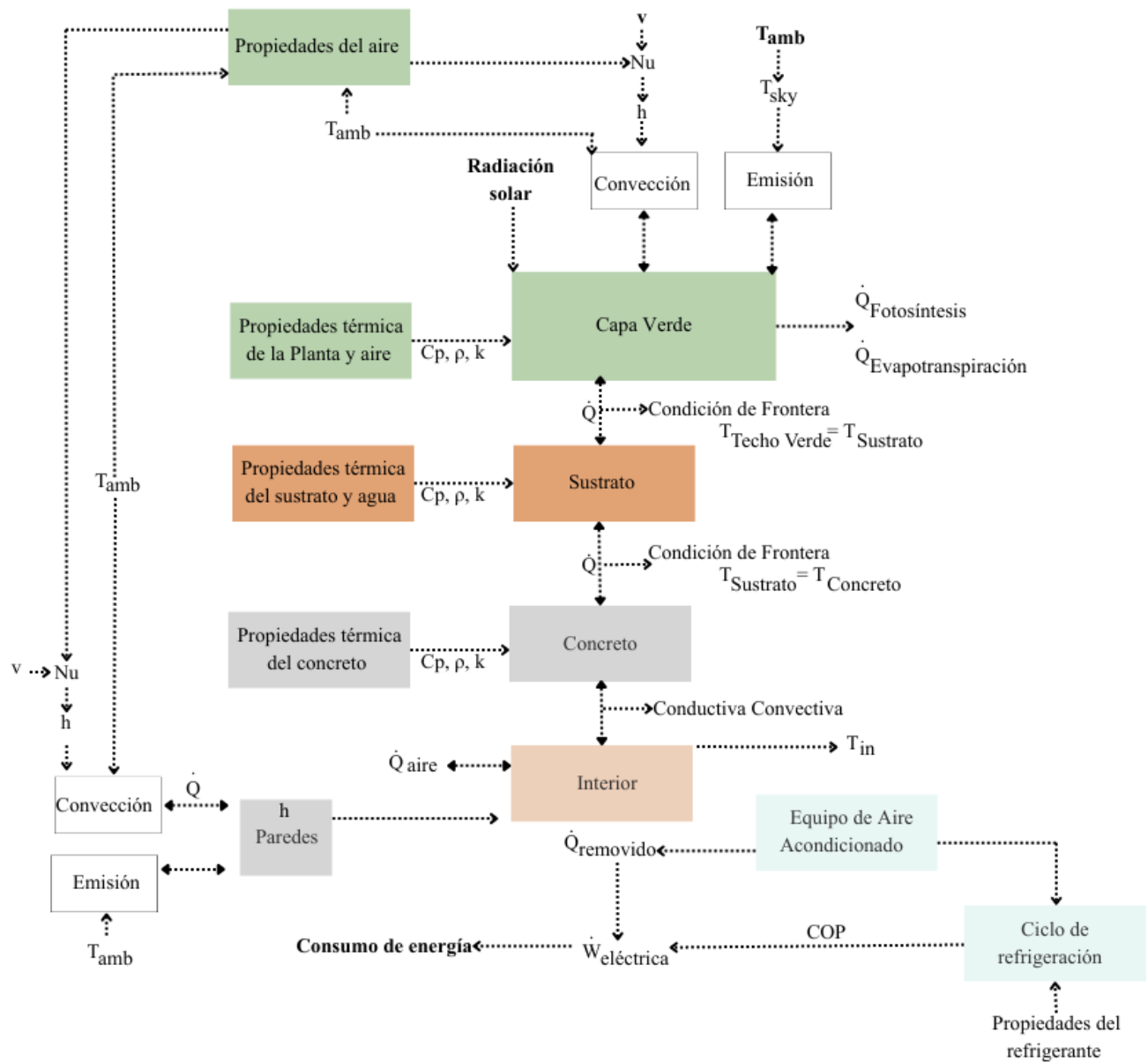
$$T_{j+1} = T_j - \frac{\Delta x}{k} \sum q_m \quad (39)$$

mientras que, la Ec. (12) se expresa en la siguiente forma discreta:

$$T_{in}^{t+\Delta t} = T_{in}^t + \Delta t \frac{\dot{Q}}{\left(m C_p\right)_{in}} \quad (40)$$

La solución numérica del modelo dinámico de transferencia de calor se implementa en Python 3.13. El tamaño de paso temporal es  $\Delta t=1.2s$  y el tamaño de paso espacial para las paredes es  $\Delta x=0.01m$  y para el techo verde es  $\Delta x=0.03m$ .

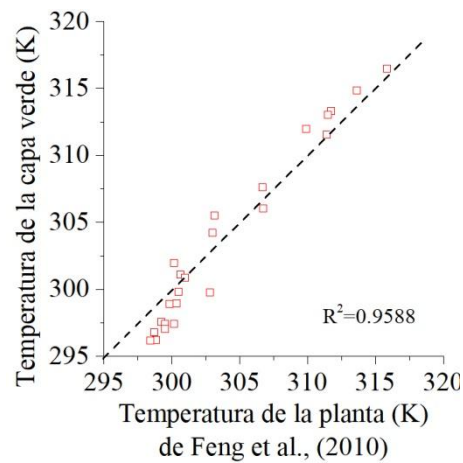
El diagrama muestra el proceso de estructuración y solución del modelo matemático de transferencia de calor de un techo verde extensivo y su interacción con el SAA para un miniedificio en el sector residencial. En la **Figura 4.4** se pueden ver los flujos de calor a través de las diferentes capas que integran el techo verde y su interacción con el interior del miniedificio.



**Figura 4.4.** Proceso de estructuraci\u00f3n y soluci\u00f3n del modelo matem\u00e1tico de transferencia de calor en un techo verde extensivo y su interacci\u00f3n con el SAA para un miniedificio.

## 4.5. Validación del modelo matemático

El modelo se valida comparando la temperatura de la capa verde con la temperatura registrada en la planta de los datos reportados (Feng et al., 2010b). Los datos utilizados se reportan en la siguiente sección, en las **Tablas 5.1-5.3**. La **Figura 4.3** muestra que los resultados simulados obtenidos y los datos de (Feng et al., 2010b) tienen una alta correlación estadística ( $R^2= 0.9588$ ), sugiriendo la validez del modelo.



**Figura 4.3** Validación del modelo matemático.

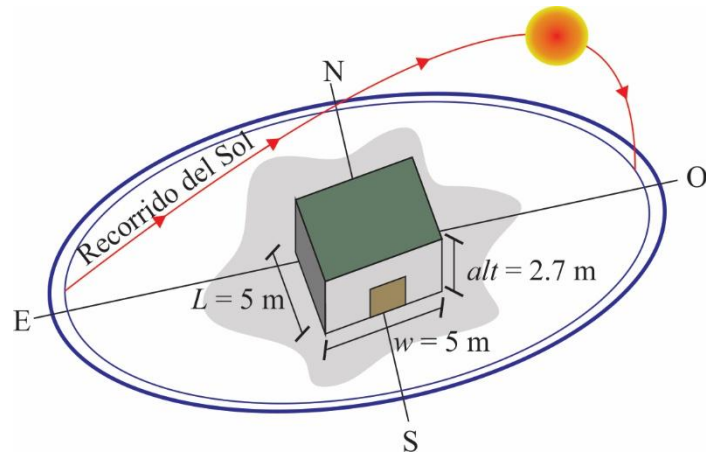
## 5. Casos de estudio

En este trabajo se evalúan el efecto térmico de los techos verdes extensivos para una miniedificación mal aislada sometida a las condiciones climáticas en verano de cuatro diferentes regiones de México: Mexicali, Chihuahua, Caborca y Nogales. En los cuatro casos de estudio se implementó el modelo con un ciclo de refrigeración, donde la temperatura interior de la miniedificación es controlada por SAA y un controlador PID, el cual modifica la acción de control hasta llegar a la temperatura deseada y mantener la temperatura de confort (en caso de requerir refrigeración).

### 5.1 Características de la miniedificación

En los cuatro casos de estudio, las simulaciones se llevan a cabo para una construcción de un solo piso, dado que el ahorro energético es más significativo en este tipo de edificaciones (Martins et al., 2008). El modelo corresponde a una miniedificación de 5 m de largo, 5 m de ancho y 2.7 m de altura, con envolventes de concreto gris de 15 cm de espesor. Una de las paredes de la miniedificación recibe radiación solar durante la mañana, la pared opuesta recibe radiación solar por la tarde y el techo recibe radiación solar durante todo el día, como se muestra en la **Figura 5.1**. Se considera que las paredes laterales no están expuestas a la radiación solar y se desprecian los efectos de sombreado.

Para este estudio, el coeficiente combinado de transferencia de calor al interior de la edificación es de  $5.0 \text{ W/m}^2\text{K}$  y el flujo másico de aire exterior que ingresa a la misma corresponde a  $0.12 \text{ kg/s}$ . Esta miniedificación se emplea para analizar el efecto térmico del techo verde en todas las ciudades consideradas.



**Figura 5.1.** Recorrido solar de la edificación durante un día.

En la **Tabla 5.1** se presentan las dimensiones y propiedades de los elementos constructivos, utilizados en las simulaciones y para obtener los parámetros relacionados con el control PID; mientras que, en la **Tabla 5.2** se enlistan las propiedades térmicas de las capas que integran al techo verde, compuestos por la capa de sustrato y la capa naturada.

En la **Tabla 5.3** se presentan el resto de los parámetros necesarios para el modelado del techo verde.

**Tabla 5.1** Valor de los parámetros utilizados para la sintonización de las variables  $K_p$ ,  $K_d$  y  $K_{it}$ , para el controlador PID.

Parámetro	Valor	Unidades
Presión atmosférica	101.3	kPa
$T_a$	32	°C
$v$	2.0	$\text{m s}^{-1}$
$\dot{m}$	0.01	$\text{kg s}^{-1}$
$\dot{q}_{sri}$	800	$\text{W m}^{-2}$
$L$	5	m
$w$	5	m
$alt$	2.7	m
$b$	0.15	m
$k$	1.4	$\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$
$\rho$	2300	$\text{kg m}^{-3}$
$C_p$	880	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\varepsilon$	0.9	Adimensional
$\alpha$	0.9	Adimensional
$T_{set}$	22	°C
$n$	15	Adimensional
$\Delta t$	0.1	s

$\Delta x$	$b/(n-1)$	m
$K_p$	0.011	$W\ ^\circ C^{-1}$
$K_d$	-	$J\ ^\circ C^{-1}$
$K_{it}$	-	$s\ ^\circ C\ W^{-1}$

**Tabla 5.2** Propiedades térmicas de los materiales que integran al techo verde.

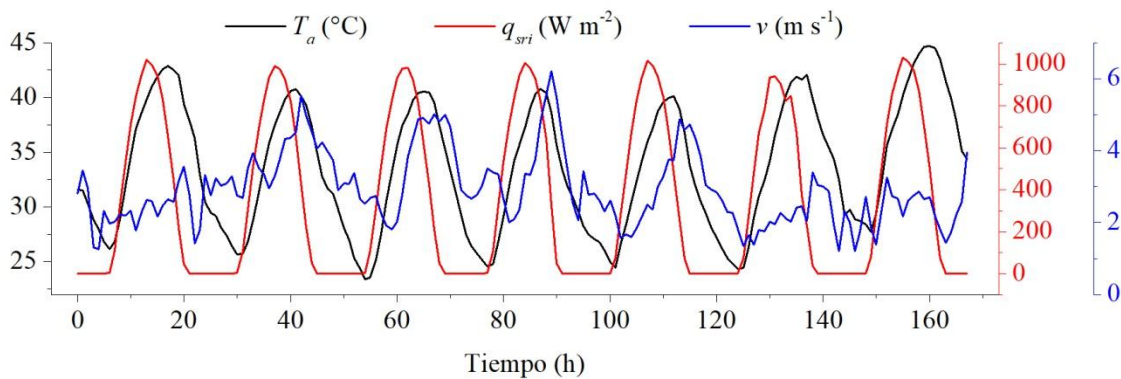
Parámetro	Valor				Unidades
	Plantas	Sustrato	Aire	Agua	
$C_p$	4800	840	1007	4186	$J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$
$\rho$	582	1200	1.184	1000	$kg\ m^{-3}$
$k$	0.35	1	0.0255	0.58	$W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$

**Tabla 5.3** Valor de los parámetros de los materiales que integran al techo verde.

Parámetro	Valor	Unidades
$\alpha$	0.85	Adimensional
$\varepsilon$	1	Adimensional
$TC$	20	Adimensional
$R_{ep}/R_{tp}$	1	Adimensional
$\beta_{agua}$	0.24	Adimensional
$\beta_{aire}$	0.5	Adimensional
$\lambda$	2430000	$J\ kg^{-1}$
$b$	0.06	m
$c$	0.09	m
$\gamma$	0.15	m

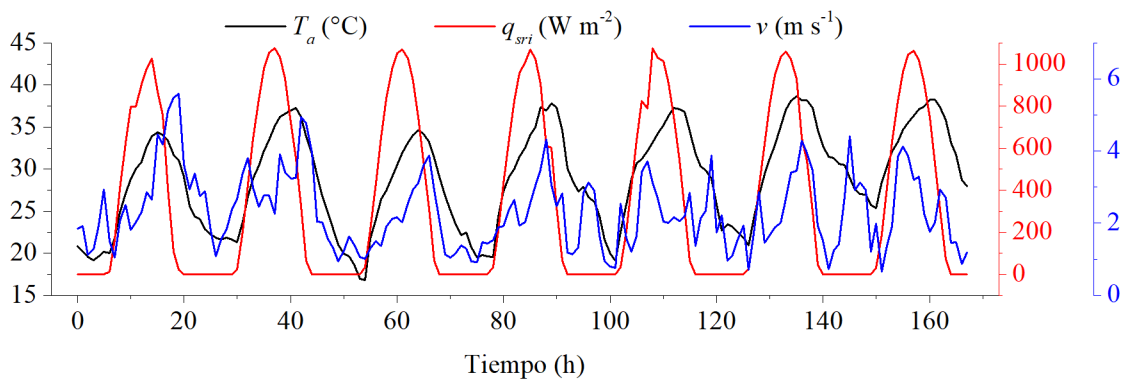
## 5.2. Implementación del modelo matemático

Se utilizan las condiciones meteorológicas registradas durante una semana para cada ciudad: Mexicali, Chihuahua, Caborca y Nogales. Los datos meteorológicos son tomados de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) de la Comisión Nacional del Agua (SMN, 2024.). Los datos de la temperatura ambiente, la velocidad del viento e irradiancia solar, se reportan en las **Figuras 5.2 – 5.5**, los datos se toman cada 10 minutos, en este trabajo se obtuvo un promedio por hora. En la **Figura 5.2**, se muestran las condiciones climáticas de la ciudad de Mexicali, (32.636, -115.4759), que tiene un clima cálido desértico.



**Figura 5.2** Datos meteorológicos de 7 días para Mexicali (fijando las 00:00 hrs del 9 de junio de 2025).

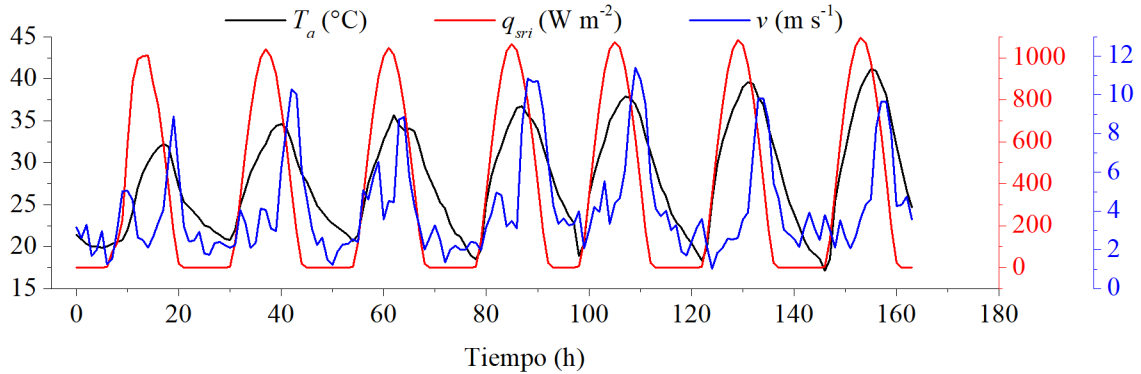
Las segundas condiciones climáticas se muestran en la **Figura 5.3**, las cuales corresponden a Chihuahua (28.63528, -106.08889) con un clima semiseco templado.





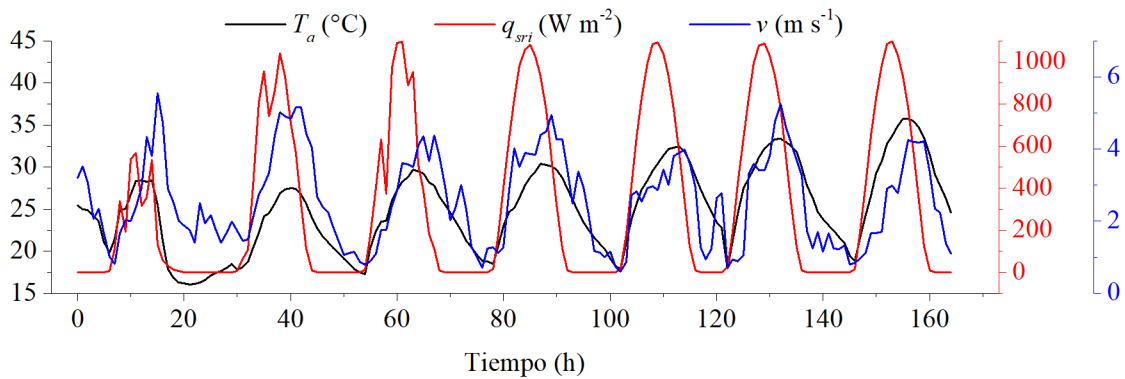
**Figura 5.3** Datos meteorológicos, de una semana, de la Ciudad de Chihuahua (fijando las 00:00 AM del 1 de junio de 2025 como hora 0) (SMN,2025).

Las terceras condiciones climáticas se muestran en la **Figura 5.4**, las cuales corresponden a la Ciudad de Caborca (30.71833, -112.1837) que tiene clima desértico cálido y extremadamente seco.



**Figura 5.4** Datos meteorológicos, de una semana, de la Ciudad de Caborca (fijando las 00:00 AM del 2 de junio de 2025 como hora 0) (SMN, 2025.).

Finalmente, en la **Figura 5.5** se toman las condiciones climáticas de la Ciudad de Nogales (31.30862, -110.94217), donde el clima es semiseco estepario templado.



**Figura 5.5** Datos meteorológicos, de una semana, de la Ciudad de Nogales (fijando las 00:00 AM del 1 de junio de 2025 como hora 0) (SMN, 2025).

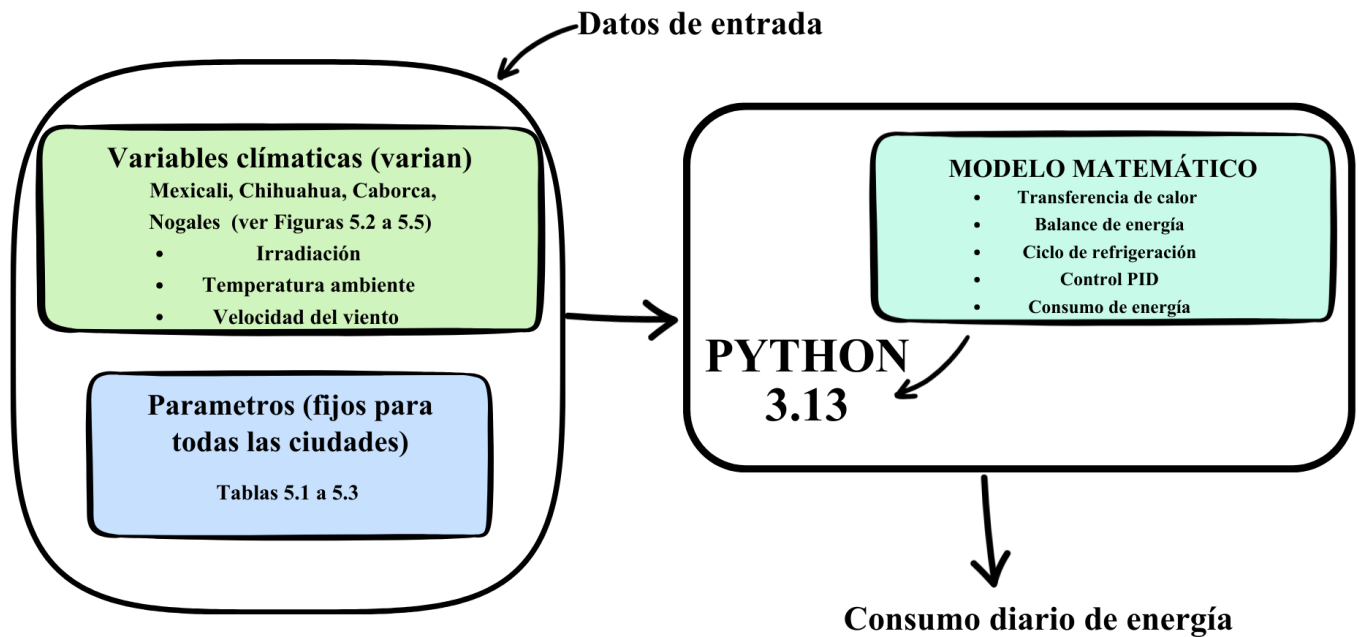
En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones. En él se analiza el consumo de energía eléctrica para la climatización del modelo de miniedificio con cubierta convencional y cubierta verde, considerando las condiciones ambientales de cada escenario en temporada de verano.

## 6. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo implementado para evaluar el comportamiento térmico y energético de un miniedificio. Se consideran dos escenarios principales: uno con techo convencional y otro con techo verde, con el propósito de comparar su desempeño.

Los resultados han sido analizados bajo distintos escenarios climáticos correspondientes a cuatro ciudades de la República Mexicana, seleccionadas por su clima desértico cálido para el caso de Mexicali y Caborca, en el caso de Chihuahua con un clima seco estepario y para el caso de la ciudad de Nogales con un clima semiseco templado, estos climas implican que sea necesario el uso de SAA para alcanzar las condiciones de confort.

Los principales datos utilizados para este análisis fueron la radiación solar, la velocidad del viento y la temperatura ambiente; los cuales fueron obtenidos de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's), dichos datos fueron tomados cada 10 minutos y se tuvo que sacar un promedio por hora durante una semana. Este proceso se desarrolló con ayuda de la herramienta *power view* de Excel. Ya obtenidos estos datos, en todos los casos de estudio las características de la edificación fueron las mismas; se implementó el modelo. El equipo *inverter* se modela utilizando un control PID para variar el calor removido del interior de la edificación y dichas propiedades en una simulación desarrollada en Python 3.13 (Anexo A). Con ayuda de la herramienta *OriginPro* se realizaron las gráficas en donde se visualiza con claridad las diferencias entre un miniedificio con techo convencional y un miniedificio con techo verde, proporcionando de manera cuantitativa los beneficios. En la **Figura 6** se presenta un diagrama sobre el proceso de la obtención de los resultados mediante las herramientas implementadas.



**Figura 6.** Diagrama sobre el proceso de la obtención de los resultados mediante las herramientas implementadas.

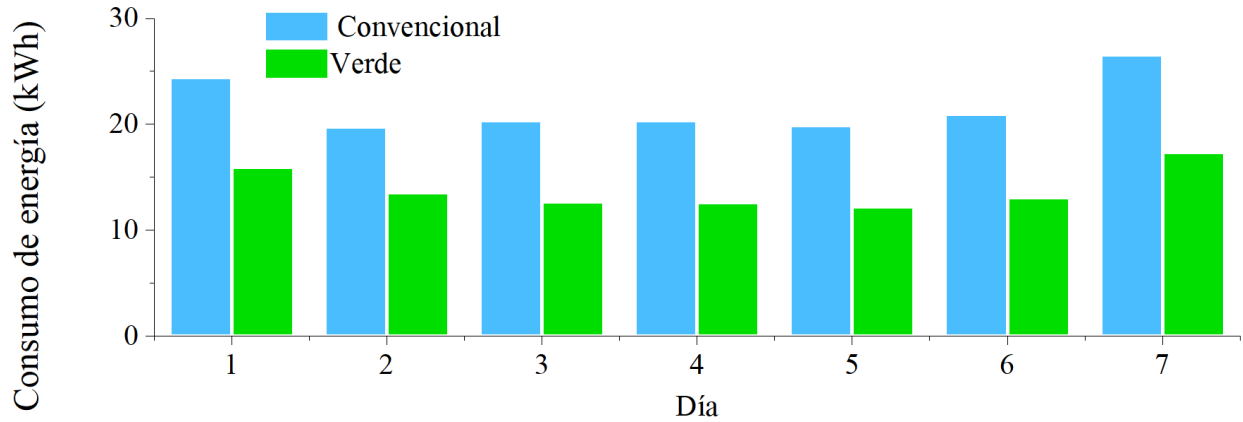
El análisis está centrado principalmente en el consumo energético debido al acondicionamiento de espacios interiores utilizando un SAA con controlador PID.

## 6.1 Resultados

En las **Figura 6.1 - 6.4** se presenta el consumo de energía eléctrica, para una semana de verano, asociado al SAA del modelo de un miniedificio con cubierta convencional (color azul) y con techo verde (color verde) en las ciudades de Mexicali, Chihuahua, Caborca y Nogales, respectivamente. Los resultados muestran que, con ambos techos, es necesario mantener siempre en operación y de manera continua el SAA durante los siete días de la semana, considerando una temperatura de confort térmico de 22 °C.

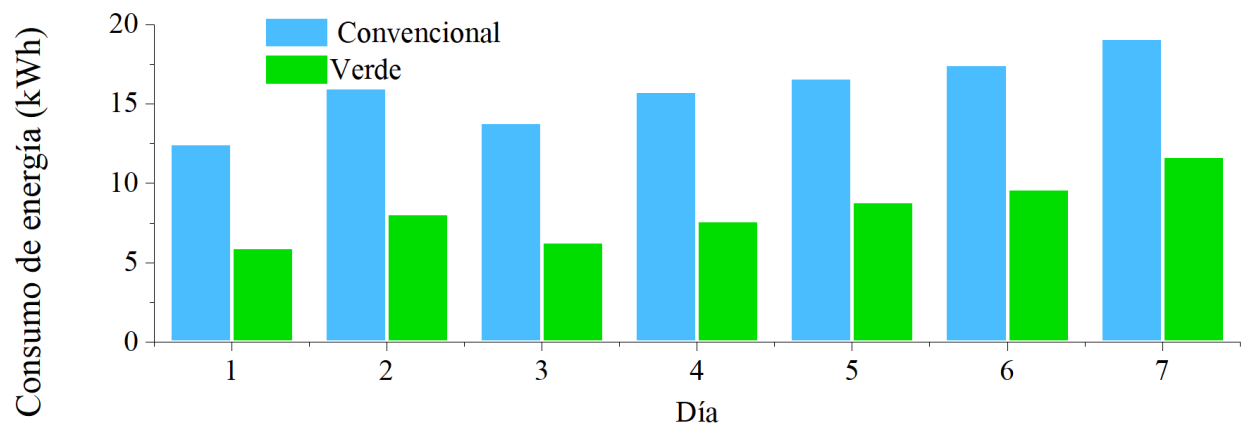
En Mexicali el modelo con techo convencional tiene un consumo promedio diario de ~21.74 kWh, mientras que con el techo verde se reduce a ~13.91 kWh (ver **Figura 6.1**). Se observa que el mayor

consumo de energía ocurre el día 1 y el día 7, debido a que en estos dos días la temperatura ambiente fue mayor que el resto de la semana (ver **Figura 5.2**).



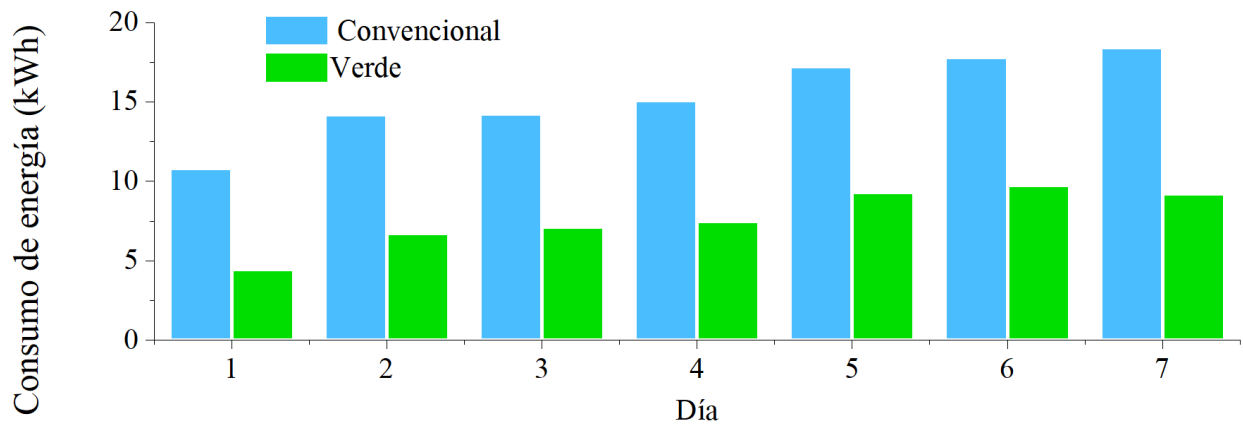
**Figura 6.1.** Consumo de energía eléctrica por climatización; para un miniedificio con cubierta convencional y cubierta verde, considerando las condiciones ambientales de Mexicali en temporada de verano.

En Chihuahua el modelo con techo convencional tiene un consumo promedio diario de  $\sim 15.90$  kWh, mientras que con el techo verde se reduce a  $\sim 8.31$  kWh (ver **Figura 6.2**). Se observa que en el día 1 el consumo de energía fue bajo con respecto a los demás debido a que la temperatura ambiente fue menor en ese día, para los demás días el consumo fue de manera creciente debido a que la temperatura ambiente estuvo en aumento, en el día 7 se presenta el mayor consumo de energía (ver **Figura 5.3**).



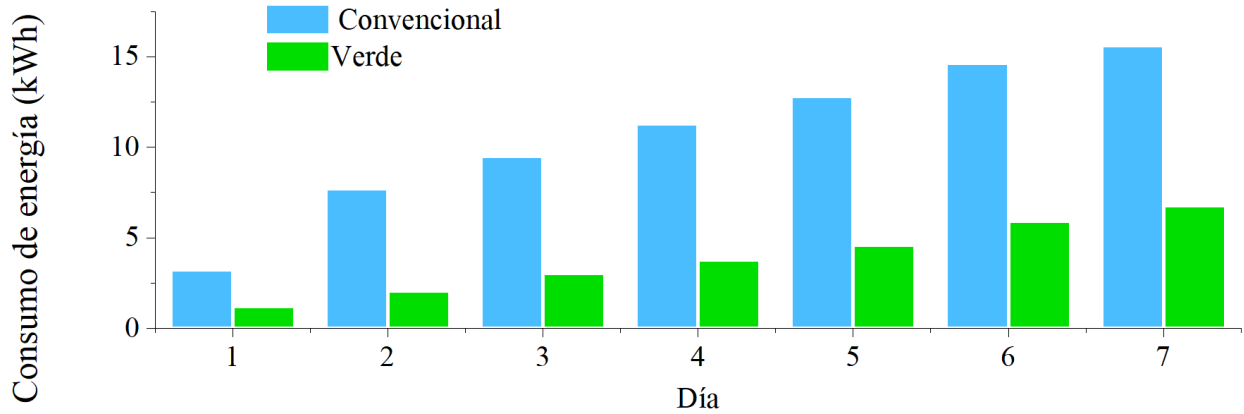
**Figura 6.2.** Consumo de energía eléctrica por climatización; para un miniedificio con cubierta convencional y cubierta verde, considerando las condiciones ambientales de Chihuahua en temporada de verano.

En Caborca el modelo con techo convencional tiene un consumo promedio diario de  $\sim 15.39$  kWh, mientras que con el techo verde se reduce a  $\sim 7.72$  kWh (ver **Figura 6.3**). Se observa que la temperatura ambiente fue incrementando por día, teniendo en el día 7 la mayor temperatura y el mayor consumo de energía (ver **Figura 5.4**).



**Figura 6.3.** Consumo de energía eléctrica por climatización; para un miniedificio con cubierta convencional y cubierta verde, considerando las condiciones ambientales de Caborca en temporada de verano.

En Nogales el modelo con techo convencional tiene un consumo promedio diario de  $\sim 10.68$  kWh, mientras que con el techo verde se reduce a  $\sim 3.91$  kWh (ver **Figura 6.4**). Se observa que la temperatura ambiente incrementó desde el día 1 hasta el día 7, teniendo en el ultimo el mayor consumo de energía (ver **Figura 5.5**).

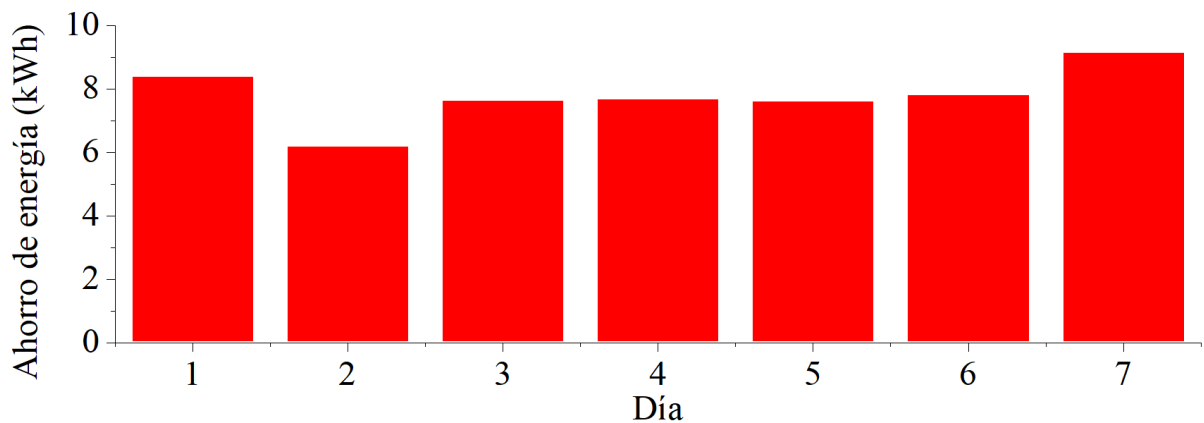


**Figura 6.4.** Análisis del consumo de energía eléctrica por climatización; para un miniedificio con cubierta convencional y cubierta verde, considerando las condiciones ambientales de Nogales en temporada de verano.

Los resultados gráficos y cuantitativos demuestran que la implementación de techos verdes impacta de manera positiva en la disminución del consumo energético destinado a la utilización de SAA.

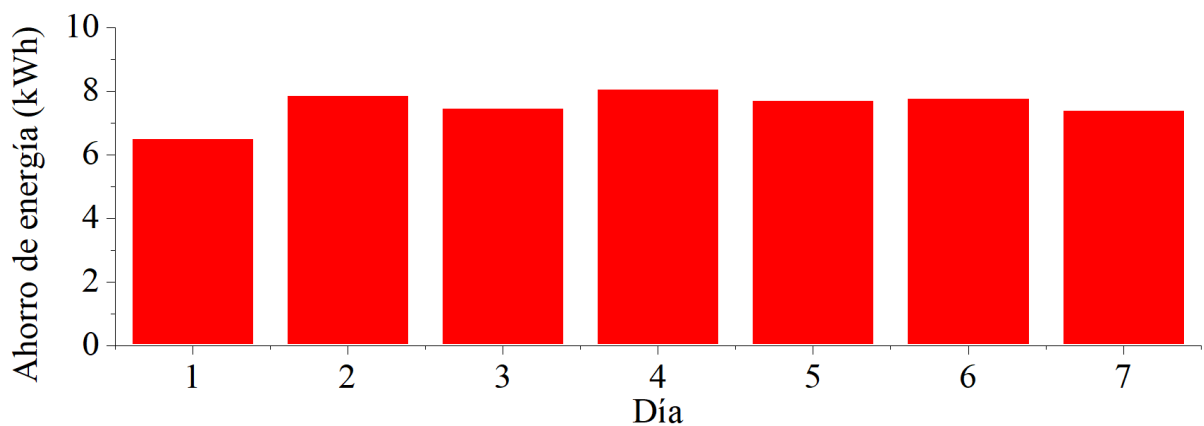
## 6.2. Discusión

La **Figura 6.1** ilustra el ahorro diario de energía eléctrica debido de la implementación del techo verde en un miniedificio en Mexicali. El valor promedio de ahorro es de aproximadamente 7.82 kWh, este valor corresponde a una reducción cercana al 36% del consumo energético. Se observa que el ahorro mínimo de energía se da en el día 2, con un valor de ~6 kWh, mientras que en el día 7 ocurrió el máximo ahorro, alcanzando alrededor de ~9 kWh.



**Figura 6.1.** Ahorro de energía diario debido a la implementación del techo verde en Mexicali.

La **Figura 6.2** ilustra el ahorro diario de energía eléctrica debido de la implementación del techo verde en un miniedificio en Chihuahua. El valor promedio de ahorro es de aproximadamente 7.58 kWh, este valor corresponde a una reducción cercana al 48% del consumo energético.

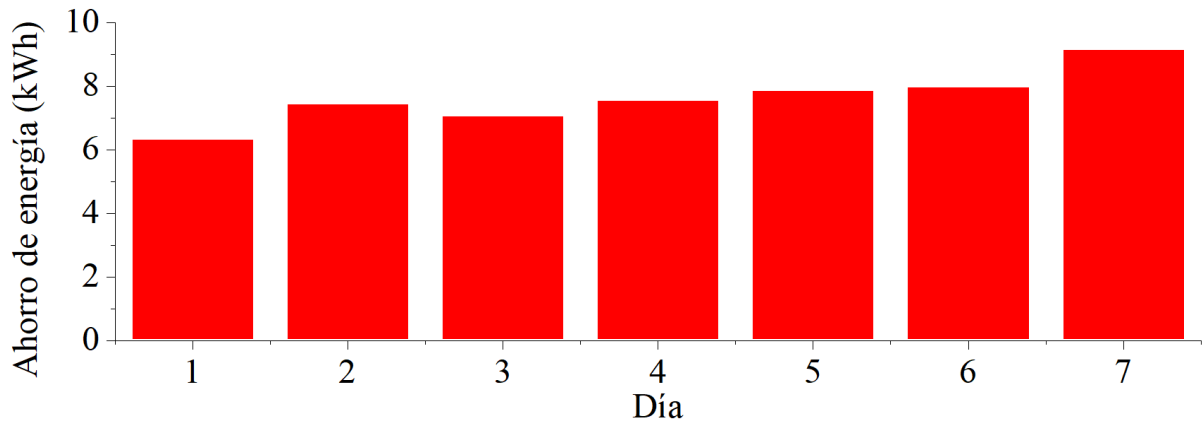


**Figura 6.2.** Ahorro de energía diario debido a la implementación del techo verde en Chihuahua.

En la **Figura 6.2** se observa que el ahorro mínimo de energía se da en el día 1, con un valor de ~6.5 kWh, mientras que en el día 4 ocurrió el ahorro máximo, alcanzando alrededor de ~8.1 kWh.



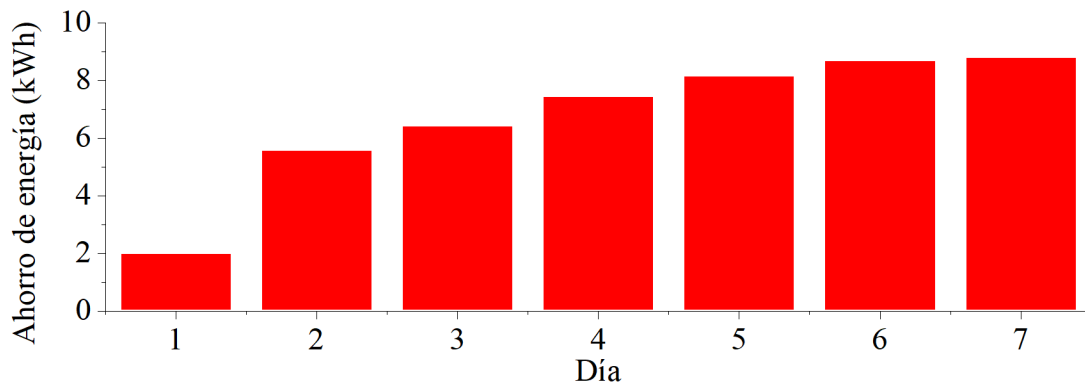
En la **Figura 6.3** ilustra el ahorro diario de energía eléctrica debido de la implementación del techo verde en un miniedificio en Caborca. El valor promedio de ahorro es de aproximadamente 7.82 kWh, este valor corresponde a una reducción cercana al 50% del consumo energético.



**Figura 6.3** Ahorro de energía diario debido a la implementación del techo verde en Caborca.

En la **Figura 6.3** se observa que el ahorro mínimo de energía se presenta en el día 1, con un valor de ~6.3 kWh, mientras que en el día 7 ocurrió el ahorro máximo, alcanzando alrededor de ~9.2 kWh.

La **Figura 6.4** ilustra el ahorro diario de energía eléctrica debido de la implementación del techo verde en un miniedificio en Nogales. El valor promedio de ahorro es de aproximadamente 6.76 kWh, este valor corresponde a una reducción cercana al 63% del consumo energético.



**Figura 6.4.** Ahorro de energía diario debido a la implementación del techo verde en Nogales.

En la **Figura 6.4** se observa que el ahorro mínimo de energía se presenta en el día 2, con un valor de ~6 kWh, mientras que en el día 7 ocurrió el ahorro máximo, alcanzando alrededor de ~9 kWh.

Las variaciones que hay entre los días podrían darse debido a los cambios en las condiciones climáticas, principalmente en la radiación solar y la temperatura ambiente, estos factores influyen directamente en la carga térmica del edificio y, por ende, en el consumo de energía para refrigeración.

En la **Tabla 6.1** se reporta el ahorro de energía debido a la implementación del techo verde, para cada caso de estudio. En Mexicali se ahorra casi el 36% de la energía, mientras que en Chihuahua es posible ahorrar alrededor del 48%, en Caborca se puede ahorrar poco más del 50% de la energía consumida, por último, en Nogales es posible ahorrar hasta un 63% de la energía destinada al uso de aire acondicionado.

**Tabla 6.1.** Ahorro de energía debido a la implementación de un techo verde.

Ciudad	Tipo de techo	Consumo de energía (kWh/semana)	Energía ahorrada con el techo verde	
			(kWh/semana)	%
Mexicali	Convencional	21.74	7.82	36
	Verde	13.91		
Chihuahua	Convencional	15.90	7.58	48
	Verde	8.31		
Caborca	Convencional	15.39	7.66	50
	Verde	7.72		
Nogales	Convencional	10.68	6.76	63
	Verde	3.91		

El análisis y comparación de las **Figuras 6.1 – 6.4** evidencia que la reducción en el consumo energético está directamente relacionado con los efectos de los techos verdes. El comportamiento que se observó en las **Figuras 5.2 – 5.5** en la temperatura ambiente y la radiación solar es que, durante las horas de mayor irradiancia, la resistencia térmica de las capas del sistema constructivo y el proceso de evapotranspiración atenúa de manera significativa las oscilaciones térmicas interiores.

Esta atenuación podemos traducirla en un menor consumo de energía para refrigeración con ahorros diarios, los cuales presentan diferentes variaciones entre las jornadas. En los 4 diferentes escenarios podemos observar que el ahorro energético diario ronda entre los 7 – 8 kWh. El techo verde actúa como una técnica pasiva, regulando el clima interior, este efecto se intensifica cuando existe mayor carga térmica exterior y por ende se demuestra el potencial que tiene esta estrategia.

# Conclusiones

En el presente trabajo se realizó un análisis que permite comprobar que la implementación de techos verdes en edificaciones del sector residencial contribuye de manera significativa al ahorro de energía destinada al uso de equipos de aire acondicionado que utilizan un controlador PID. Además, los resultados evidencian que esta técnica pasiva mejora el comportamiento térmico de los techos convencionales, reduciendo de manera significativa la ganancia de calor, por lo cual también disminuye la carga térmica interior y, por ende, la demanda energética destinada a la refrigeración.

Los casos de estudio se realizaron implementando un modelo matemático de transferencia de calor para las envolventes de un miniedificio, un balance de energía para el interior y un ciclo de refrigeración para modelar el SAA en el que se implementó un controlador PID, que tiene como finalidad modificar la acción de control hasta que la temperatura real se acerque al valor deseado (temperatura de confort). Los datos de entrada utilizados en el modelo fueron: radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento; los cuales, son fácil de obtener debido a que son medidos por instalaciones meteorológicas. En todos los casos de estudio las características de la edificación fueron las mismas y el SAA se utilizó un controlador PID; se implementó el modelo y dichas propiedades en una simulación desarrollada en Python 3.13.

La adopción de esta tecnología en el sector residencial puede generar reducciones sustanciales en la demanda energética asociada a la climatización, al disminuir la ganancia de calor a través de la envolvente del edificio bajo diferentes condiciones climáticas de operación, contribuyendo no solo al ahorro económico de los usuarios, sino también a la disminución del consumo eléctrico a nivel urbano. Los resultados obtenidos demuestran que, en las ciudades analizadas, la implementación de techos verdes reduce considerablemente el consumo de energía: en Mexicali se registró un ahorro ~36%; mientras que, en Chihuahua es posible ahorrar ~48%; en Caborca se puede ahorrar ~50% de la energía consumida; por último, en Nogales es posible ahorrar ~63% de la energía.

Durante el estudio se identificó que las variaciones entre los días podrían darse debido a cambios en las condiciones climáticas, principalmente en la radiación solar incidente y la temperatura

ambiente, factores que influyeron directamente en la carga térmica del edificio y, por ende, en el consumo de energía destinada para refrigeración.

Por último, la implementación de esta técnica es escasa y una manera de atraer e incentivar su implementación, como primer punto es conocer los beneficios energéticos que pueden proporcionar, algunas de las principales barreras para llevar a cabo estos proyectos es la falta de incentivos gubernamentales y los costos de mantenimiento y diseño.

# Anexo A

## Techo Convencional

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from CoolProp.CoolProp import PropsSI #Para el COP

##### Propiedades de aire #####
def propiedades(t):
    Pr=2.27795-0.03532*t+(3.0369E-4)*t**2+(-1.24095E-6)*t**3+(2.43578E-9)*t**4+(-1.85632E-12)*t**5
    k=0.00387+7.67E-05*t+-1.33E-08*t**2
    cp=960.625234197808+0.154573092247631*t
    rho=0.000232152997406614+352.780287653039*(1/t)
    miu=(-7.86858E-7)+(8.9293E-8)*t+(-1.05293E-10)*t**2+(7.58869E-14)*t**3
    return Pr,k,cp,rho,miu

def Re(rhoa,vel,Lo,miua):
    Re=(rhoa*vel*Lo)/miua
    return Re

def Nu(Pra,Rea):
    Nu=0.3387*(Pra**0.3333)*Rea**(0.5)/((1+(0.0468/Pra)**0.6667)**0.25)
    return Nu

def qcv(Nua,ka,Lo,tfrontera,ta):
    hout=Nua*ka/Lo
    qcv=hout*(tfrontera-ta)
    return qcv

#####
#####
def Refrigeracion(tset,ta): #nueva
    #####
    #                               Calculo del COP
    T1c=tset-3.0 #K      Temperatura del aire frio
    T2c=ta+30.# #K      Temperatura del aire caliente rechazado a los alrededores
    efis=0.9            #eficiencia isentropica del compresor

    #Estado 1
    x1c=0.9999999999
    h1c=PropsSI('H', 'T', T1c, 'Q', x1c, 'R134a')
    Plc=PropsSI('P', 'T', T1c, 'Q', x1c, 'R134a')
    slc=PropsSI('S', 'T', T1c, 'Q', x1c, 'R134a')

    #Estado 2s
    s2sc=slc
    h2sc=PropsSI('H', 'T', T2c, 'S', s2sc, 'R134a')
    T2sc=PropsSI('T', 'T', T2c, 'S', s2sc, 'R134a')
    P2c=PropsSI('P', 'T', T2c, 'S', s2sc, 'R134a')
```

```

#Estado 3
P3c=P2c
x3c=0.00000001
h3c=PropsSI('H', 'P', P3c, 'Q', x3c, 'R134a')
T3c=PropsSI('T', 'P', P3c, 'Q', x3c, 'R134a')

#Estado 4
h4c=h3c
P4c=P1c
T4c=PropsSI('T', 'P', P4c, 'H', h4c, 'R134a')

Q1c=(h1c-h4c)
Wc=(h2sc-h1c)
Wc=Wc/efis
COP=Q1c/Wc
return COP

#####
##### Dimensiones del cuarto #####
Lo=5.0 #m          longitud del cuarto
al=2.7 #m          altura
A=Lo**2 #m2
vol = al*A #m3
L=0.15 #m          espesor del techo
deltax=0.015 #m
n=L/deltax+1      #numero de nodos
n=int(n)

#Datos nuevos
P1=101300 #Pa
g=9.81 #m/s2

##### Lectura de datos #####
archivo=open('SMEXICALI1.txt','r')

grad=[0.]*24
for hora in range(24):
    grad[hora]=float(archivo.readline()) #W/m2    radiacion solar para el techo

gradp=[0.]*24
for hora in range(24):
    gradp[hora]=float(archivo.readline()) #W/m2    radiacion solar para las paredes

tamb=[0.]*24
for hora in range(24):
    tamb[hora]=float(archivo.readline()) #K    temperatura ambiente

```

```

velv=[0]*24
for hora in range (24):
    velv[hora]=float(archivo.readline()) #m/s  velocidad del viento

temp=[0.]*n
for nodo in range(n):
    temp[nodo]=float(archivo.readline()) #K  temperatura del techo

tpr=[0.]*n
for nodo in range(n):
    tpr[nodo]=float(archivo.readline()) #K  temperatura de la pared que recibe radiacion en la mañana

tsr=[0.]*n
for nodo in range(n):
    tsr[nodo]=float(archivo.readline()) #K  temperatura de la pared que no recibe radiacion

tsrc=[0.]*n
for nodo in range(n):
    tsrc[nodo]=float(archivo.readline()) #K  temperatura de la pared que recibe radiacion en la tarde

tin=float(archivo.readline()) #K  temperatura interior

archivo.close()

gradh=max(grad)
contador = 0

while grad[contador] != gradh:
    contador=contador+1

#propiedades del concreto
rhoc=1800 #kg/m3
kc=0.80 #W/mK
cpc=840 #J/kgK

#propiedades del aire
rhoa=1.184 #kg/m3
ka=0.02551 #W/mK
cpa=1007. #J/kgK

#constante de stefan boltzmann
sig=5.67e-8 #W/m2K4

#calculo de beta techo
alpha=kc/(rhoc*cpc)
deltat=1. #s
beta=alpha*deltat/(deltax**2)

```



```

####Condiciones iniciales
tsim=60. *60*1#s          ##### Tiempo de simulacion #####
time=0. #s

tsky=273.15+10 #K
#Declaracion de los arreglos de la temperatura futura
tempf=[0.]*n
tprf=[0.]*n
tsrf=[0.]*n
tsrcf=[0.]*n

h=5. #W/m2K para el interior del cuarto

#techo
emic=1.0
alphac=0.85
#pared con radiación
alphapr=0.5
epr=0.15          #m espesor de la pared
deltaxp=epr/(n-1)
betap=alpha*deltat/(deltaxp**2)
Ap=Lo*al

#####aire acondicionado#####
tconsumo=0
Qrefri=0.0
errp=0.0
tset=295.15
Qhvac=0.0 #nueva
Eele=0.0 #nueva
kcp=4.72#para México
kcd=225.#para México
kci=900.#para México
fma=0.01 #kg/s
time_vs_tin=open('time_vs_tin.txt','w')
timp=0

tinv=[0.0]*24
horav=[0.0]*24

maire=0.12 #kg/s

print('hora ttecho tprad tpsrad tsrcon tin')
for hora in range (24):|

```

```

time=0.0
qsri=qrad[hora]
qsrip=qradp[hora]
ta=tamb[hora]
vel=velv[hora]
if vel>5.0:
    vel=5.0
#calculo de temperaturas promedio
suma=0.0
for j in range(n):
    suma=suma+temp[j]
ttecho=suma/n

suma=0.0
for j in range(n):
    suma=suma+tpr[j]
tprad=suma/n

suma=0.0
for j in range(n):
    suma=suma+tsr[j]
tpsrad=suma/n

suma=0.0
for j in range(n):
    suma=suma+tsrc[j]
tsrcon=suma/n

#####
#                               Calculo del COP
T1c=tset-5.0 #K      Temperatura del aire frio
T2c=ta+40#+60 #K   Temperatura del aire caliente rechazado a los alrededores
efis=0.85          #eficiencia isentropica del compresor

#Estado 1
x1c=0.9999999999
h1c=PropsSI('H', 'T', T1c, 'Q', x1c, 'R134a')
P1c=PropsSI('P', 'T', T1c, 'Q', x1c, 'R134a')
s1c=PropsSI('S', 'T', T1c, 'Q', x1c, 'R134a')

#Estado 2s
s2sc=s1c
h2sc=PropsSI('H', 'T', T2c, 'S', s2sc, 'R134a')
T2sc=PropsSI('T', 'T', T2c, 'S', s2sc, 'R134a')
P2c=PropsSI('P', 'T', T2c, 'S', s2sc, 'R134a')

```

```

#Estado 3
P3c=P2c
x3c=0.00000001
h3c=PropsSI('H', 'P', P3c, 'Q', x3c, 'R134a')
T3c=PropsSI('T', 'P', P3c, 'Q', x3c, 'R134a')

#Estado 4
h4c=h3c
P4c=P1c
T4c=PropsSI('T', 'P', P4c, 'H', h4c, 'R134a')

Q1c=(h1c-h4c)
Wc=(h2sc-h1c)
Wc=Wc/efis
COP=Q1c/Wc
#                               Fin del COP
#####

print(hora,ttecho,tin)
#print(hora,ttecho,tprad,tprad,tsrcon,tin)
#print(temp[0],temp[n-1])
while time < tsim:
    i=0
    Erp=tin-tset
    while i <= n-1:
        if i == 0:
            ##### Techo #####
            #conveccion
            tf=(temp[i]+ta)/2
            Pra,ka,cpa,rhoa,miaa=propiedades(tf)
            Rea=Re(rhoa,vel,Lo,miaa)
            Nua=Nu(Pra,Rea)
            tfrontera=temp[i]
            qcvt=qcv(Nua,ka,Lo,tfrontera,ta)
            #radiacion techo
            qsrt=alphac*qsri
            #emision techo
            qemt=emic*sig*(temp[i]**4-tsky**4)
            #fuentes
            fuentest=qsrt-qemt-qcvt
            #tempf[i]=temp[i]+deltat*fuentest/(L*rhoc*cpc) #temperatura en la superficie del techo
            tempf[i]=temp[i]+deltax*fuentest/kc
            ##### Pared con radiacion #####
            #conveccion
            tf=(tpr[i]+ta)/2
            Pra,ka,cpa,rhoa,miaa=propiedades(tf)

```

```

Rea=Re (rhoa, vel, Lo, miua)
Nua=Nu (Pra, Rea)
tfrontera=tpr[i]
qcvpr=qcv (Nua, ka, Lo, tfrontera, ta)
#radiacion pared
qsrpr=alphapr*qsrip
if hora >=contador:
    qsrpr=0.0
#emision pared
qempr=emic*sig*(tpr[0]**4-ta**4)
#fuentes
fuentepr=qsrpr-qempr-qcvpr
#tprf[i]=tpr[i]+deltat*fuentespr/(epr*rhoc*cpc) #temperatura para la pared que recibe radiacion
tprf[i]=tpr[i]+deltaxp*fuentespr/kc
##### Pared sin radiacion #####
#conveccion pared SIN radiacion
tf=(tsr[i]+ta)/2
Pra, ka, cpa, rhoa, miua=propiedades (tf)
Rea=Re (rhoa, vel, Lo, miua)
Nua=Nu (Pra, Rea)
tfrontera=tsr[i]
qcvsr=qcv (Nua, ka, Lo, tfrontera, ta)
#emision pared SIN radiacion
qemsr=emic*sig*(tsr[i]**4-ta**4)
#fuentes pared SIN radiacion
fuentesr=-qemsr-qcvsr
#calculo de temperatura para la pared SIN radiacion
#tsrf[i]=tsr[i]+deltat*fuentesr/(epr*rhoc*cpc)
tsrf[i]=tsr[i]+deltaxp*fuentesr/kc
##### Pared con radiacion (opuesta) #####
tf=(tsrc[i]+ta)/2
Pra, ka, cpa, rhoa, miua=propiedades (tf)
Rea=Re (rhoa, vel, Lo, miua)
Nua=Nu (Pra, Rea)
tfrontera=tsrc[i]
qcvpsrc=qcv (Nua, ka, Lo, tfrontera, ta)
qsrsrc=alphapr*qsrip
if hora <= contador:          #modificar salvador
    qsrsrc=0.0
qemsrsrc=emic*sig*(tsrc[i]**4-ta**4)
fuentesrsrc=qsrsrc-qemsrsrc-qcvpsrc
#calculo de temperatura para la pared SIN radiacion
#tsrcf[i]=tsrc[i]+deltat*fuentesrsrc/(epr*rhoc*cpc)
tsrcf[i]=tsrc[i]+deltaxp*fuentesrsrc/kc
elif i >0 and i < n-1:
    tempf[i]=temp[i]+beta*(temp[i+1]-2*temp[i]+temp[i-1])    #techo
    tprf[i]=tpr[i]+betap*(tpr[i+1]-2*tpr[i]+tpr[i-1])        #pared con radiacion

```

```

    tsr[i]=tsr[i]+betap*(tsr[i+1]-2*tsr[i]+tsr[i-1])           #pared sin radiacion
    tsrcf[i]=tsrc[i]+betap*(tsrc[i+1]-2*tsrc[i]+tsrc[i-1])   #pared sin radiacion ni conveccion
else:
    tempf[i]=(deltax*h*tin+kc*tempf[i-1])/(deltax*h+kc)      #convección
    tprf[i]=(deltaxp*h*tin+kc*tprf[i-1])/(deltaxp*h+kc)     #pared con radiacion
    tsrf[i]=(deltaxp*h*tin+kc*tsrf[i-1])/(deltaxp*h+kc)     #pared sin radiacion
    tsrcf[i]=(deltaxp*h*tin+kc*tsrcf[i-1])/(deltaxp*h+kc)   #pared sin radiacion ni conveccion
    i=i+1
time=time+deltat
timp=timp+1
#Actualizacion de las temperaturas
temp=tempf           #techo
tpr=tprf             #pared con radiacion
tsr=tsrf             #pared sin radiacion
tsrc=tsrcf
#calculo del calor transferido al interior del cuarto
flux=-kc*(temp[n-1]-temp[n-2])/deltax           #techo
fluxp=-kc*(tpr[n-1]-tpr[n-2])/deltaxp          #pared con radiacion
fluxsr=-kc*(tsr[n-1]-tsr[n-2])/deltaxp         #pared sin radiacion
fluxsrc=-kc*(tsrc[n-1]-tsrc[n-2])/deltaxp      #pared sin radiacion ni conveccion

#aire acondicionado refrigeracion #####

Er=tin-tset      #error presente
Qhvac=Qhvac+kcp*(Er + kcd*(Er-Erp)/deltat + 1/kci*(Er+Erp)*deltat/2)
if Qhvac<0:
    Qhvac=0.0
#fin del control
COP=Refrigeracion(tset,ta)      #nueva
Wrefri=Qhvac/COP                #nueva
Eele=Eele+Wrefri*deltat        #nueva

#aire acondicionado refrigeracion #####
Hamb=PropsSI('H','T', ta, 'P', P1, 'air') #nueva
Hin=PropsSI('H','T', tin, 'P', P1, 'air') #nueva

Q=fma*(Hamb-Hin)+A*flux+Ap*fluxp+2*Ap*fluxsr+Ap*fluxsrc-Qhvac      #calor transferido al interior del cuarto
Pra,ka,cpa,rhoa,miaa=propiedades(tin)                               #propiedades el aire en el interior
tin = tin + deltat*Q/(vol*rhoa*cpa)                                  #temperatura interior
if timp == 30:
    print(tin,file=time_vs_tin)
    timp = 0

Rtecho=(temp[0]-temp[n-1])/flux
Rtecho1=(tamb[hora]-tin)/flux

```

```

| tinv[hora]=tin
  horav[hora]=hora
  #print(COP)

Eelet=Eele/3600.
print('la energía consumida por el aire es',round(Eelet,1),'Wh')
time_vs_tin.close()

plt.plot(horav,tinv)
plt.title('verde')
plt.xlabel('hora')
plt.ylabel('temperatura interior')
plt.show()

##### Foto #####
entrada=open('Resultados_dani.txt','w')

for hora in range(24):
    print(qrad[hora],file=entrada)
for hora in range(24):
    print(qradp[hora],file=entrada)
for hora in range(24):
    print(tamb[hora],file=entrada)
for hora in range(24):
    print(velv[hora],file=entrada)
for nodo in range(n):
    print(temp[nodo],file=entrada)
for nodo in range(n):
    print(tpr[nodo],file=entrada)
for nodo in range(n):
    print(tsr[nodo],file=entrada)
for nodo in range(n):
    print(tsrc[nodo],file=entrada)
print(tin,file=entrada)
entrada.close()

#####
#grafica=open('grafica.txt','w')
#for nodo in range(n):
#    print(nodo,temp[nodo],tpr[nodo],tsr[nodo],tsrc[nodo],file=grafica)
#grafica.close()
#####

```

## Techo verde

```
import math #nueva
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from CoolProp.CoolProp import PropsSI #nueva

##### Propiedades de aire #####
def propiedades(t):
    Pr=2.27795-0.03532*t+(3.0369E-4)*t**2+(-1.24095E-6)*t**3+(2.43578E-9)*t**4+(-1.85632E-12)*t**5
    k=0.00387+7.67E-05*t+-1.33E-08*t**2
    cp=960.625234197808+0.154573092247631*t
    rho=0.000232152997406614+352.780287653039*(1/t)
    miu=(-7.86858E-7)+(8.9293E-8)*t+(-1.05293E-10)*t**2+(7.58869E-14)*t**3
    return Pr,k,cp,rho,miu

def Re(rhoa,vel,Lo,miua):
    Re=(rhoa*vel*Lo)/miua
    return Re

def Nu(Pra,Rea):
    Nu=0.3387*(Pra**0.3333)*Rea**(0.5)/((1+(0.0468/Pra)**0.6667)**0.25)
    return Nu

def qcv(Nua,ka,Lo,tfrontera,ta):
    hout=Nua*ka/Lo
    qcv=hout*(tfrontera-ta)
    return qcv

def propiedadeseff(rho1,rho2,cp1,cp2,k1,k2,alphaeff): #green
    rhocp = rho1*cp1*(1-alphaeff)+rho2*cp2*alphaeff
    k=k1*(1-alphaeff)+k2*alphaeff
    return rhocp,k

def Ra(Tfa,P1,T1,T2): #nueva
    rhoa=PropsSI('D','T',Tfa,'P',P1,'air')
    Pra=PropsSI('PRANDTL','T',Tfa,'P',P1,'air')
    mua=PropsSI('viscosity','T',Tfa,'P',P1,'air')
    nua=mua/rhoa
    ba=1/Tfa
    if T1-T2<0.0001:
        Gra=0.0
    else:
        Gra=g*ba*(T1-T2)*Lc**3/nua**2
    Raa=Gra*Pra
    return Raa
```

```

def Refrigeracion(tset,ta): #nueva
#####
#                               Calculo del COP
T1c=tset-3.0 #K      Temperatura del aire frio
T2c=ta+30.# #K      Temperatura del aire caliente rechazado a los alrededores
efis=0.9            #eficiencia isentropica del compresor

#Estado 1
x1c=0.9999999999
h1c=PropsSI('H', 'T', T1c, 'Q', x1c, 'R134a')
P1c=PropsSI('P', 'T', T1c, 'Q', x1c, 'R134a')
s1c=PropsSI('S', 'T', T1c, 'Q', x1c, 'R134a')

#Estado 2s
s2sc=s1c
h2sc=PropsSI('H', 'T', T2c, 'S', s2sc, 'R134a')
T2sc=PropsSI('T', 'T', T2c, 'S', s2sc, 'R134a')
P2c=PropsSI('P', 'T', T2c, 'S', s2sc, 'R134a')

#Estado 3
P3c=P2c
x3c=0.00000001
h3c=PropsSI('H', 'P', P3c, 'Q', x3c, 'R134a')
T3c=PropsSI('T', 'P', P3c, 'Q', x3c, 'R134a')

#Estado 4
h4c=h3c
P4c=P1c
T4c=PropsSI('T', 'P', P4c, 'H', h4c, 'R134a')

Q1c=(h1c-h4c)
Wc=(h2sc-h1c)
Wc=Wc/efis
COP=Q1c/Wc
return COP

```



```

#####
#####

##### Dimensiones del cuarto #####
Lo=5.0 #m          longitud del cuarto
al=2.7 #m          altura
A=Lo**2 #m2
vol = al*A #m3
L=0.3 #m          espesor del techo total. Ya incluida la capa verde, la capa de sustrato y el concreto
deltax=0.03 #m
n=L/deltax+1      #numero de nodos
n=int(n)

#Datos nuevos
P1=101300 #Pa
g=9.81 #m/s2

##### Lectura de datos #####
archivo=open('VNOGALES7.txt','r')
grad=[0.]*24
for hora in range(24):
    grad[hora]=float(archivo.readline()) #W/m2 radiacion solar para el techo
gradp=[0.]*24
for hora in range(24):
    gradp[hora]=float(archivo.readline()) #W/m2 radiacion solar para las paredes
tamb=[0.]*24
for hora in range(24):
    tamb[hora]=float(archivo.readline()) #K temperatura ambiente
velv=[0.]*24
for hora in range(24):
    velv[hora]=float(archivo.readline()) #m/s velocidad del viento
temp=[0.]*n
for nodo in range(n):
    temp[nodo]=float(archivo.readline()) #K temperatura del techo
tpr=[0.]*n
for nodo in range(n):
    tpr[nodo]=float(archivo.readline()) #K temperatura de la pared que recibe radiacion en la mañana
tsr=[0.]*n
for nodo in range(n):
    tsr[nodo]=float(archivo.readline()) #K temperatura de la pared que no recibe radiacion
tsrc=[0.]*n
for nodo in range(n):
    tsrc[nodo]=float(archivo.readline()) #K temperatura de la pared que recibe radiacion en la tarde
tin=float(archivo.readline()) #K temperatura interior
archivo.close()

```

```

gradh=max(grad)
contador = 0
while grad[contador] != gradh:
    contador=contador+1

#Para el calculo de la evapotranspiracion
tmax=max(tamb)
tmin=min(tamb)
tmedia=tmax-tmin
#tmedia=tmedia

#propiedades del concreto
rhoc=1800. #kg/m3
kc=0.80 #W/mK
cpc=840 #J/kgK

#propiedades del aire
rhoa=1.184 #kg/m3
ka=0.02551 #W/mK
cpa=1007. #J/kgK

#propiedades de la planta    green
rhop=582.0    #checar
cpp=4800.0    #J/kgK
kp=0.5        #W/m2K
alphaa=0.53

#propiedades de la tierra    green
rhot=1200.0    #kg/m3
cpt=840.0      #J/kgK
kt=1.0         #W/mK

#propiedades del agua        green
rhoag=1000.0    #kg/m3
cpag=4186.0    #J/kgK
kag=0.58       #W/mK
alphaag=0.26

l=2430000.0

#llamado de las propiedades efectivas    green
rhocpcv,kcv=propiedadeseff (rhop,rhoa,cpp,cpa,kp,ka,alphaa)    #capa verde
rhocpcs,kcs=propiedadeseff (rhot,rhoag,cpt,cpag,kt,kag,alphaag)    #capa de sustrato

```

```

#constante de stefan boltzmann
sig=5.67e-8 #W/m2K4

#calculo de beta techo
alpha=kc/(rhoc*cpc)
deltat=1.0 #s
betac=alpha*deltat/(deltax**2)

#calculo de beta para las plantas      green
alphacv=kcv/rhocpcv
betacv=alphacv*deltat/(deltax**2)
#calculo de beta para el sustrato green
alphacs=kcs/rhocpcs
betacs=alphacs*deltat/(deltax**2)

#####Condiciones iniciales
tsim=60. *60.*1. #s          ##### Tiempo de simulacion #####
time=0. #s

#tsky=273.15+10 #K
#Declaracion de los arreglos de la temperatura futura
tempf=[0.]*n
tprf=[0.]*n
tsrf=[0.]*n
tsrcf=[0.]*n

h=5. #W/m2K para el interior del cuarto

#techo
emic=1.0      #emisividad del concreto
alphac=0.85   #absortividad del concreto
#pared con radiación
alphapr=0.5   #absortividad de la pared
epr=0.15     #m      espesor de la pared
#deltax para la pared
deltaxp=epr/(n-1)      #m
betap=alpha*deltat/(deltaxp**2)      #beta para la pared
Ap=Lo*a1

#####aire acondicionado#####
tconsumo=0
Qrefri=0.0
errp=0.0
tset=295.15
Qhvac=0.0 #nueva
Eele=0.0 #nueva

```

```

kcp=0.3#para México
kcd=200.#para México
kci=800.#para México
fma=0.01 #kg/s
time_vs_tin=open('time_vs_tin.txt','w')
timp=0

tinV=[0.0]*24
horav=[0.0]*24

print('hora tplanta tsustrato ttecho tprad tpsrad tsrcon tin')

for hora in range (24):
    time=0.0
    qsri=grad[hora]
    qsrip=gradp[hora]
    ta=tamb[hora]
    tsky=ta-13 #nueva
    vel=velv[hora]
    if vel > 5:
        vel=5.

    #asignacion de nodos a la capa verde y la capa de sustrato
    tge=temp[0]
    tgs=temp[2]
    tse=temp[3]
    tss=temp[5]
    tce=temp[6]
    suma=0.0

    #calculando temperaturas promedio
    tplanta=(temp[0]+temp[1]+temp[2])/3
    tsustrato=(temp[3]+temp[4]+temp[5])/3
    ttecho=(temp[6]+temp[7]+temp[8]+temp[9]+temp[10])/5

    suma=0.0
    for j in range(n):
        suma=suma+tpr[j]
    tprad=suma/n

    suma=0.0
    for j in range(n):
        suma=suma+tsr[j]
    tpsrad=suma/n

    suma=0.0
    for j in range(n):

```

```

suma=suma+tsrc[j]
tsrcon=suma/n

print(hora,round(tplanta,1),round(tsustrato,1),round(ttecho,1),round(tprad,1),round(tpsrad,1),round(tsrcon,1),round(tin,1))
while time < tsim:
i=0
Erp=tin-tset
while i <= n-1:
#seleccion del valor de beta para el material green
if i <=2:
beta=betacv
elif i>2 and i<=5:
beta=betacs
else:
beta=betac
#####
if i == 0:
#####
#
# Techo Green Roof
#####
#conveccion
qcv=(5.7+3.8*vel)*(temp[i]-ta) #green
#radiacion techo
qsrt=alphac*qsri
#emision techo
qemt=emic*sig*(temp[i]**4-tsky**4)
qemt=emic*sig*(temp[i]**4-(ta-15)**4)
#evapotranspiracion
ret=5.2189874955193E-07*0.0023*qsri*(ta-273.15+17.8)*tmedia**0.5 #se ajusta mejor Hargreaves (1985)
qet=ret*1
#fotosintesis
qps=0.16*qet
#fuentes
fuentest=qsrt-qemt-qcv-qet-qps
tempf[i]=temp[i]+deltax*fuentest/kp
#####
##### Pared con radiacion #####
#conveccion
tf=(tpr[i]+ta)/2
Pra,ka,cpa,rhoa,miaa=propiedades(tf)
Rea=Re(rhoa,vel,Lo,miaa)
Nua=Nu(Pra,Rea)
tfrontera=tpr[i]
qcvpr=qcv(Nua,ka,Lo,tfrontera,ta)
#qcvpr=0.0
#radiacion pared

```

```

qsrpr=alphapr*qsrip
if hora >=contador:
    qsrpr=0.0
#emision pared
qempr=emic*sig*(tpr[0]**4-ta**4)
#fuentes
fuentepr=qsrpr-qempr-qcvpr
#tprf[i]=tpr[i]+deltat*fuatepr/(epr*rhoc*cpc) #temperatura para la pared que recibe radiacion
tprf[i]=tpr[i]+deltaxp*fuatepr/kc
#####
##### Pared sin radiacion #####
#conveccion pared SIN radiacion
tf=(tsr[i]+ta)/2
Pra, ka, cpa, rhoa, miua=propiedades(tf)
Rea=Re(rhoa, vel, Lo, miua)
Nua=Nu(Pra, Rea)
tfrontera=tsr[i]
qcvpr=qcv(Nua, ka, Lo, tfrontera, ta)
#emision pared SIN radiacion
qemsr=emic*sig*(tsr[i]**4-ta**4)
#fuentes pared SIN radiacion
fuentesr=-qemsr-qcvpr
#calculo de temperatura para la pared SIN radiacion
#tsrf[i]=tsr[i]+deltat*fuentesr/(epr*rhoc*cpc)
tsrf[i]=tsr[i]+deltaxp*fuentesr/kc
#####
##### Pared con radiacion (opuesta) #####
tf=(tsrc[i]+ta)/2
Pra, ka, cpa, rhoa, miua=propiedades(tf)
Rea=Re(rhoa, vel, Lo, miua)
Nua=Nu(Pra, Rea)
tfrontera=tsrc[i]
qcvpsrc=qcv(Nua, ka, Lo, tfrontera, ta)
qsrsrc=alphapr*qsrip
if hora <= contador:
    qsrsrc=0.0
qemsrc=emic*sig*(tsrc[i]**4-ta**4)
fuentesrc=qsrsrc-qemsrc-qcvpsrc
#calculo de temperatura para la pared SIN radiacion
#tsrcf[i]=tsrc[i]+deltat*fuentesrc/(epr*rhoc*cpc)
tsrcf[i]=tsrc[i]+deltaxp*fuentesrc/kc
elif i >0 and i < n-1:
    tempf[i]=temp[i]+beta*(temp[i+1]-2*temp[i]+temp[i-1]) #techo
    tprf[i]=tpr[i]+betap*(tpr[i+1]-2*tpr[i]+tpr[i-1]) #pared con radiacion
    tsrf[i]=tsr[i]+betap*(tsr[i+1]-2*tsr[i]+tsr[i-1]) #pared sin radiacion
    tsrcf[i]=tsrc[i]+betap*(tsrc[i+1]-2*tsrc[i]+tsrc[i-1]) #pared sin radiacion ni conveccion

```

```

else:
    tempf[i]=(deltax*h*tin+kc*tempf[i-1])/(deltax*h+kc) #convección
    tprf[i]=(deltaxp*h*tin+kc*tprf[i-1])/(deltaxp*h+kc) #pared con radiacion
    tsrf[i]=(deltaxp*h*tin+kc*tsrf[i-1])/(deltaxp*h+kc) #pared sin radiacion
    tsrcf[i]=(deltaxp*h*tin+kc*tsrcf[i-1])/(deltaxp*h+kc) #pared sin radiacion ni conveccion
    i=i+1

time=time+deltat
timp=timp+1
#Actualizacion de las temperaturas
temp=tempf #techo
tpr=tprf #pared con radiacion
tsr=tsrf #pared sin radiacion
tsrc=tsrcf
#calculo del calor transferido al interior del cuarto
flux=-kc*(temp[n-1]-temp[n-2])/deltax #techo
fluxp=-kc*(tpr[n-1]-tpr[n-2])/deltaxp #pared con radiacion
fluxsr=-kc*(tsr[n-1]-tsr[n-2])/deltaxp #pared sin radiacion
fluxsrc=-kc*(tsrc[n-1]-tsrc[n-2])/deltaxp #pared sin radiacion ni conveccion

#aire acondicionado refrigeracion #####

Er=tin-tset #error presente
Qhvac=Qhvac+kcp*(Er + kcd*(Er-Erp)/deltat + 1/kci*(Er+Erp)*deltat/2)
if Qhvac<0:
    Qhvac=0.0
#fin del control
COP=Refrigeracion(tset,ta) #nueva
Wrefri=Qhvac/COP #nueva
Eele=Eele+Wrefri*deltat #nueva

#aire acondicionado refrigeracion #####
Hamb=PropsSI('H','T', ta, 'P', Pl, 'air') #nueva
Hin=PropsSI('H','T', tin, 'P', Pl, 'air') #nueva

Q=fma*(Hamb-Hin)+A*flux+Ap*fluxp+2*Ap*fluxsr+Ap*fluxsrc-Qhvac #calor transferido al interior del cuarto
Pra,ka,cpa,rhoa,miaa=propiedades(tin) #propiedades el aire en el interior
tin = tin + deltat*Q/(vol*rhoa*cpa) #temperatura interior
if timp == 30:
    print(tin,file=time_vs_tin)
    timp = 0

Rtecho=(temp[0]-temp[n-1])/flux
Rtecho1=(tamb[hora]-tin)/flux

```

```

    tinv[hora]=tin
    horav[hora]=hora
    #print(COP)

Eelet=Eele/3600.
print('la energia consumida por el aire es',round(Eelet,1),'Wh')
time_vs_tin.close()

plt.plot(horav,tinv)
plt.title('verde')
plt.xlabel('hora')
plt.ylabel('temperatura interior')
plt.show()

##### Foto #####
entrada=open('Resultados_VNOGALES.txt','w')

for hora in range(24):
    print(quad[hora],file=entrada)
for hora in range(24):
    print(quadp[hora],file=entrada)
for hora in range(24):
    print(tamb[hora],file=entrada)
for hora in range(24):
    print(velv[hora],file=entrada)
for nodo in range(n):
    print(temp[nodo],file=entrada)
for nodo in range(n):
    print(tpr[nodo],file=entrada)
for nodo in range(n):
    print(tsr[nodo],file=entrada)
for nodo in range(n):
    print(tsrc[nodo],file=entrada)
print(tin,file=entrada)
entrada.close()

#####
#grafica=open('grafica.txt','w')
#for nodo in range(n):
#    print(nodo,temp[nodo],tpr[nodo],tsr[nodo],tsrc[nodo],file=grafica)
#grafica.close()
#####

```



## Referencias

- Abdallah, T. (2023). Pilot sustainability initiatives in mass transit. In *Sustainable Mass Transit* (pp. 127–141). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15271-9.00001-7>
- Alonso Jiménez Reyes, Adolfo Cimadevilla Cervera, Daniel López Vicuña, Sergio Merino González, René Álvarez Gutiérrez, Teresa Zárate Romano, Claudia Cedillo, Alan Bastida Morales, Ignacio Vázquez Ramírez, & Itzel Vargas Rodríguez. (2022, August). *Plan de Acción en Enfriamiento, México*. Refrigerantes Con Bajo Potencial de Calentamiento Global y Eficiencia Energética En Equipos de Refrigeración y Aire Acondicionado.
- Anderson, V., & Gough, W. A. (2021). Form, function, and nomenclature: Deconstructing green infrastructure and its role in a changing climate. In *Climate Change and Extreme Events* (pp. 125–144). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822700-8.00005-6>
- Basyouni, Y. A., & Mahmoud, H. (2024). Affordable green materials for developed cool roof applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 202, 114722. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114722>
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., & GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411–428. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- Berndtsson, J. C., Bengtsson, L., & Jinno, K. (2009). Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering*, 35(3), 369–380. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.09.020>
- Bhamare, D. K., Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. *Energy and Buildings*, 198, 467–490. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.023>
- Cascone, S., Coma, J., Gagliano, A., & Pérez, G. (2019). The evapotranspiration process in green roofs: A review. *Building and Environment*, 147, 337–355.
- Castilla, M. M., Álvarez, J. D., Berenguel, M., Pérez, M., Rodríguez, F., & Guzmán, J. L. (2010). Técnicas de Control del Confort en Edificios. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 7(3), 5–24. <https://doi.org/10.4995/RIAI.2010.03.01>
- Cristiano, E., Deidda, R., & Viola, F. (2021). The role of green roofs in urban Water-Energy-Food-Ecosystem nexus: A review. *Science of The Total Environment*, 756, 143876. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143876>

- Edgardo Brito Contreras. (2011, August 8). Manual Básico de Sistemas de Aire Acondicionado y Extracción Mecánica de Uso Común en Arquitectura. *Sistemas de Aire Acondicionado Tipo Split*.
- Feng, C., Meng, Q., & Zhang, Y. (2010a). Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings*, 42, 959–965.
- FIDE. (2025, March 3). *Sugiere el FIDE establecer a 23°C el límite de temperatura de inicio del aire acondicionado para ahorrar energía*.
- Gerzhova, N., Cote, J., Blanchet, P., Dagenais, C., & Menard, S. (2019). A conceptual framework for modelling the thermal conductivity of dry green roof substrates. *BioResources*, 14, 8573–8599.
- Gurubalan, A., Maiya, M. P., & Tiwari, S. (2019). Experiments on a novel membrane-based liquid desiccant dehumidifier for hybrid air conditioner. *International Journal of Refrigeration*, 108, 271–282. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.09.004>
- Hargreaves, G. H., & Allen, R. G. (2023). History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129, 53–63.
- IEA. (2025, March 4). *El futuro de la refrigeración*. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>
- Jagadeeswara Reddy, V., Fairusham Ghazali, M., & Kumarasamy, S. (2024a). Innovations in phase change materials for diverse industrial applications: A comprehensive review. *Results in Chemistry*, 8, 101552. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101552>
- Jagadeeswara Reddy, V., Fairusham Ghazali, M., & Kumarasamy, S. (2024b). Innovations in phase change materials for diverse industrial applications: A comprehensive review. *Results in Chemistry*, 8, 101552. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101552>
- Kolokotsa, D., Lilli, A. A., Lilli, M. A., & Nikolaidis, N. P. (2020). On the impact of nature-based solutions on citizens' health & well being. *Energy and Buildings*, 229, 110527. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110527>
- Martins, H. R., Figueiredo, L. M., Valamiel-Silva, J. C. O., Carneiro, C. M., Machado-Coelho, G. L. L., Vitelli-Avelar, D. M., Bahia, M. T., Martins-Filho, O. A., Macedo, A. M., & Lana, M. (2008). Persistence of PCR-positive tissue in benzimidazole-treated mice with negative blood parasitological and serological tests in dual infections with *Trypanosoma cruzi* stocks from different genotypes. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 61(6), 1319–1327. <https://doi.org/10.1093/jac/dkn092>
- Meng, Q. L., Zang, Y., & Zang, L. (2006). Measurement of the equivalent thermal resistance of rooftop lawns in a hot-climate wind tunnel. *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)*, 13, 53–56.

- Mihalakakou, G., Souliotis, M., Papadaki, M., Menounou, P., Dimopoulos, P., Kolokotsa, D., Paravantis, J. A., Tsangrassoulis, A., Panaras, G., Giannakopoulos, E., & Papaefthimiou, S. (2023). Green roofs as a nature-based solution for improving urban sustainability: Progress and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 180*, 113306. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113306>
- Morakinyo, T. E., Dahanayake, K. W. D. Kalani. C., Ng, E., & Chow, C. L. (2017). Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study. *Energy and Buildings, 145*, 226–237. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.066>
- Nestor Quadri. (2001). *Sistemas de Aire Acondicionado* (1ra. Edición).
- Pandey, B., Bohara, B., Pungaliya, R., Patwardhan, S. C., & Banerjee, R. (2021). A thermal comfort-driven model predictive controller for residential split air conditioner. *Journal of Building Engineering, 42*, 102513. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102513>
- Quezada-García, S., Espinosa-Paredes, G., Escobedo-Izquierdo, M. A., Vázquez-Rodríguez, A., Vázquez-Rodríguez, R., & Ambriz-García, J. J. (2017). Heterogeneous model for heat transfer in Green Roof Systems. *Energy and Buildings, 139*, 205–213.
- Sachverständige Gartenbau -Landschaftsbau-Sportplatzbau eV, A., & Gartenbau, Z. (2018). *The following organisations have assisted FLL in developing the 'Green Roof Guidelines'*. [https://commons.bcit.ca/greenroof/files/2019/01/FLL\\_greenroofguidelines\\_2018.pdf](https://commons.bcit.ca/greenroof/files/2019/01/FLL_greenroofguidelines_2018.pdf)
- Shafique, M., Kim, R., & Rafiq, M. (2018). Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 90*, 757–773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>
- SMN, conagua. (2025). *Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's)*. Retrieved August 29, 2019, from <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>
- Sproul, J., Wan, M. P., Mandel, B. H., & Rosenfeld, A. H. (2014). Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States. *Energy and Buildings, 71*, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.058>
- S.W. Churchill, & H. Ozoe. (1973). Correlations for laminar forced convection in flow over an isothermal flat plate and in developing and fully developed flow in an isothermal tube. In *J. Heat Trasnsfer*. (Vol. 95, pp. 78–84).
- Zhang, K., Garg, A., Mei, G., Jiang, M., Wang, H., Huang, S., & Gan, L. (2022). Thermal performance and energy consumption analysis of eight types of extensive green roofs in subtropical monsoon climate. *Building and Environment, 216*, 108982. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108982>

Zhao, X., Wu, Y., Yang, H., Wang, C., Gao, N., & Zang, J. (2024). Prediction of airflow rate and analysis of driving forces for natural ventilation in underground corridors. *Energy and Buildings*, 313, 114225. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114225>