



**EDUCACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

# Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico**

## Tesis de Maestría

**Estudio teórico experimental del uso de paredes  
verdes en una vivienda y su efecto en el confort  
térmico**

presentada por

**Ing. Silvia Ríos Espinoza**

como requisito para la obtención del grado de

**Maestra en Ciencias en Ingeniería  
Mecánica**

Director de tesis

**Dr. Efraín Simá Moo**

Codirector de tesis

**M. C. Samanta López Salazar**

**Cuernavaca, Morelos, México. Mayo 2024**



Cuernavaca, Mor.,  
No. De Oficio:  
Asunto:

**02/mayo/2024**  
**SAC/148/2024**  
**Autorización de impresión de tesis**

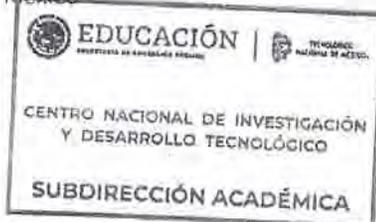
**SILVIA RÍOS ESPINOZA**  
**CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS**  
**EN INGENIERÍA MECÁNICA**  
**P R E S E N T E**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Estudio teórico experimental del uso de paredes verdes en vivienda y su efecto en el confort térmico”**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*  
*“Conocimiento y tecnología al servicio de México”*



**CARLOS MANUEL ASTORZA ZARAGOZA**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**

C. c. p. Departamento de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



Cuernavaca, Mor., 18/abril/2024

OFICIO No. DIM/0455/2024

Asunto: Aceptación de documento de tesis  
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

**DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**  
**PRESENTE**

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la C. Silvia Ríos Espinoza con número de control M22CE034, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado "Estudio teórico experimental del uso de paredes verdes en vivienda y su efecto en el confort térmico" y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

Dr. Efraín Simá Moo  
Director de tesis

M.C. Samantá López Salazar  
Codirector de tesis

Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda  
Revisor 1

Dr. Jesús Arce Landa  
Revisor 2

Dra. Yvonne Chávez Chena  
Revisor 3

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.  
Expediente / Estudiante  
Iniciales RCA/mrsr

---

# Agradecimientos

Al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT)**, por otorgarme el apoyo económico que me ha permitido desarrollar este trabajo de investigación.

Al **Tecnológico Nacional de México campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET)**, por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado y las herramientas necesarias para mi desarrollo profesional.

Al **Dr. Efraín Simá Moo** por permitirme realizar y llevar a cabo éste trabajo de investigación. Además, quiero reconocer su paciencia, sus consejos siempre acertados y su generosidad al compartir su tiempo y experiencia.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la **M.C. Samanta López Salazar** por su valiosa contribución y dedicación como codirectora de esta tesis. Su guía experta, su compromiso incansable y su profundo conocimiento en el área han sido fundamentales para el desarrollo y la conclusión exitosa de este trabajo de investigación.

A mis revisores: **Dra. Yvonne Chávez Chena**, **Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda** y al **Dr. Jesús Arce Landa** agradezco sinceramente el tiempo y esfuerzo invertido para revisar cada detalle, brindando valiosas sugerencias y comentarios que contribuyeron significativamente a la mejora de este trabajo.

A mi compañero **Manuel Alejandro Solano Maya** por el apoyo y consejos brindados.

Al **Departamento de Ingeniería Mecánica** personal docente, administrativo y de servicios, por el apoyo brindado durante mis estudios de maestría.

A las **Sra. Rocío** por la atención brindada y ayuda en mi proceso de titulación.

---

# Dedicatoria

Para mis queridos padres, **Lázaro Ríos Martínez** y **Laura Elena Espinoza Miranda**, con infinito amor y gratitud, les dedico esta tesis, símbolo de un viaje compartido lleno de apoyo incondicional, sabiduría y amor. Su constante aliento y sacrificio han sido la brújula que ha guiado mis pasos hacia la realización de este sueño. A través de este trabajo, honro su legado, su ejemplo de perseverancia y su inestimable influencia en mi vida. Gracias por ser mis pilares, mi inspiración y mi más grande motivo para alcanzar mis metas. Con todo mi cariño y eterna gratitud.

Para mi amado hijo, **Dylan Emanuel Ortiz Ríos**, esta tesis es un testimonio de los sueños compartidos, de las lecciones aprendidas juntos y del amor inquebrantable que nos une. Que estas páginas sean un recordatorio de que no hay límites para tus sueños y que siempre estaré aquí, celebrando cada logro a tu lado. Gracias por ser mi mayor motivación, mi razón de ser y mi más grande orgullo. Con todo mi amor y admiración, esta tesis es para ti.

Para mi compañero de vida **Julio Cesar Hernández Jerónimo**, que esta tesis sea un símbolo de nuestro compromiso mutuo de crecimiento y de apoyo mutuo en cada paso del camino. Te amo más allá de las palabras y espero compartir contigo muchos más triunfos en el camino que nos espera juntos. Con todo mi amor y gratitud, esta tesis es para ti.

Para mis queridos hermanos, **Ricardo** y **David**, cada logro que alcanzo es también de ustedes, porque juntos hemos superado obstáculos y celebrado triunfos. Que esta tesis sea un reflejo de nuestro vínculo único y una muestra de mi admiración y amor eterno hacia ustedes.

---

# Contenido

Lista de Figuras .....	v
Lista de Tablas .....	viii
Nomenclatura.....	ix
Resumen .....	x
Abstract.....	xi
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación.....	2
1.2. Ubicación del problema.....	3
1.3. Revisión de la literatura.....	4
1.3.1.    Estudios teóricos.....	4
1.3.2.    Estudios experimentales .....	8
1.3.3.    Estudios teóricos – experimentales.....	21
1.4. Objetivos.....	28
1.4.1.    Objetivo general .....	28
1.4.2.    Objetivos específicos.....	28
1.5. Alcances .....	29
1.6. Estructura de la tesis.....	29
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	31
2.1. Mecanismos de transferencia de calor.....	32
2.1.1.    Conducción.....	32
2.1.2.    Convección .....	33
2.1.3.    Radiación .....	34
2.2. Sistemas de vegetación vertical (VGS) .....	35

2.2.1.	Clasificación y definición.....	35
2.2.2.	Fachadas verdes.....	37
2.2.3.	Paredes vivas.....	37
2.3.	Componentes de una fachada verde.....	39
2.3.1.	Sustrato.....	39
2.3.2.	Vegetación.....	40
2.3.3.	Necesidades de riego.....	42
CAPÍTULO III. FAMILIARIZACIÓN CON EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y GENERALIDADES.....		43
3.1.	Simulación energética.....	44
3.2.	Tipos de simulación energética.....	46
3.3.	Simulación en EnergyPlus con interface de DesignBuilder.....	47
3.4.	EnergyPlus.....	49
3.4.1.	Características y especificaciones.....	52
3.5.	DesignBuilder.....	52
3.6.	Modelo físico y matemático de una fachada verde para la simulación energética por el método de balances globales de energía.....	53
3.6.1.	Balance de energía en el follaje.....	54
3.6.2.	Resistencia estomática.....	55
3.6.3.	Resistencia aerodinámica.....	56
3.6.4.	Evapotranspiración.....	57
3.7.	Familiarización con el software de simulación energética.....	58
CAPÍTULO IV. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO Y VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN.....		60
4.1.	Características del sitio experimental y disposición de los módulos de prueba.....	61
4.1.1.	Construcción de los módulos de prueba.....	61
4.1.2.	Instrumentación y monitoreo de los módulos de prueba.....	62
4.1.3.	Sistema de adquisición y registro de datos.....	64

4.2. Colocación de la vegetación seleccionada sobre la pared del módulo de prueba ....	65
4.3. Adquisición de las variables climáticas.....	68
4.4. Validación de la simulación energética de los módulos de prueba en DesignBuilder .....	69
4.4.1. Geometría de los módulos de prueba .....	69
4.4.2. Propiedades termofísicas de los materiales de construcción de los módulos de prueba.....	70
4.4.3. Resultados de la validación de la simulación energética.....	71
<b>CAPÍTULO V. SIMULACIÓN DE LA VIVIENDA CON Y SIN FACHADA VERDE.....</b>	<b>75</b>
5.1. Vivienda base o de referencia.....	76
5.2. Parámetros de simulación.....	79
5.2.1. Ajustes para la incorporación de la fachada verde a la vivienda.....	79
5.2.2. Condiciones climáticas .....	80
5.2.3. Temperatura de confort.....	81
5.2.4. Temperatura del terreno (tierra).....	83
5.2.5. Periodos de la simulación .....	84
<b>CAPÍTULO VI. RESULTADOS .....</b>	<b>87</b>
6.1. Análisis del efecto de una fachada verde sobre la temperatura superficial de la pared de análisis y la temperatura de una vivienda de referencia en evolución libre .....	88
6.1.1. Análisis del comportamiento de la temperatura promedio mensual por zonas dentro de la vivienda de referencia en evolución libre.....	91
6.1.2. Horas de confort de la vivienda de referencia en evolución libre .....	93
6.2. Análisis del efecto de una fachada verde sobre la temperatura superficial de la pared de análisis y la temperatura de una vivienda de referencia con aire acondicionado .....	94
6.2.1. Análisis del comportamiento de la temperatura promedio mensual por zonas dentro de la vivienda de referencia con aire acondicionado.....	97
6.3. Cargas de enfriamiento y emisión mensual de dióxido de carbono .....	98
6.4. Demanda energética anual y emisiones de dióxido de carbono .....	101

---

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	102
7.1. Conclusiones.....	103
7.2. Recomendaciones .....	104
REFERENCIAS .....	106
ANEXOS .....	115
Anexo A. Familiarización con el software de simulación energética.....	116
Anexo B. Proceso de simulación .....	120
Anexo C. Retribución social y producto académico.....	130

---

# Lista de Figuras

Figura 2.1. Clasificación de los sistemas de paredes verdes de acuerdo con sus características, Manso et al. (2015). .....	36
Figura 2.2. Diagrama esquemático y aplicación de las fachadas verdes directas e indirectas, Abdo et al. (2021) y Coma et al. (2017). .....	37
Figura 2.3. Diagrama esquemático y aplicación de las paredes vivas de tipo continua y modular, Abdo et al. (2021).....	38
Figura 2.4. Planta trepadora Bignonia de invierno o también conocida como llamada naranja. ....	41
Figura 3.1. Balance global de energía en una zona térmica definida para la simulación. ....	45
Figura 3.2. Diagrama esquemático de un proceso de simulación en DesignBuilder con interface en EnergyPlus. ....	51
Figura 3.3. Intercambio de energía térmica entre una fachada verde y el ambiente circundante.....	54
Figura 3.4. Representación gráfica de los estomas en una hoja [Fuente: internet]. ....	55
Figura 4.1. Diseño de los módulos de prueba, y representación gráfica de la colocación de la fachada verde sobre la pared sur del módulo de prueba. ....	62
Figura 4.2. Distribución de los sensores a) 5 TA_NTC 10K entre el aislante y la madera, b) 5 TD_DS18B20 pared interior de la fachada, c) 5 TA_NTC10K en medio de la cavidad y d) 5 TA_NTC10K pared exterior de la fachada. ....	63
Figura 4.3. Diagrama de conexión de los sensores sobre la placa Arduino Mega. ....	64
Figura 4.4. Colocación y evolución de la planta trepadora sobre la malla metálica en la pared sur del módulo experimental.....	65
Figura 4.5. Diagrama de flujo para la adquisición de datos en Arduino. ....	66
Figura 4.6. Distribución de los sensores TD_DS18B20 colocados directamente sobre la vegetación y a una posición estratégica de 30 cm distanciado de la fachada verde. ....	67
Figura 4.7. Diseño de los módulos de prueba en DesignBuilder. ....	69
Figura 4.8. Propiedades superficiales de los materiales. ....	70
Figura 4.9. Comportamiento de temperatura en las superficies de análisis de la pared sin fachada verde (a) superficie exterior, (b) superficie interior y (c) aire en la cavidad. ....	72

Figura 4.10. Comportamiento de temperatura en las superficies de análisis de la pared con fachada verde (a) superficie exterior, (b) superficie interior y (c) aire en la cavidad. ....	73
Figura 5.1. Planos de la vivienda de referencia (a) planta baja y (b) planta alta.....	77
Figura 5.2. Dimensiones y posición de las ventanas y puertas en la vivienda, (a) fachada lateral y (b) fachada frontal. ....	77
Figura 5.3. Edición de un nuevo material “Acople a fachada verde” y ajustes del acople (propiedades termofísicas y superficiales). ....	79
Figura 5.4. Ajustes para el setpoint de temperatura de confort mensual.....	81
Figura 5.5. Ajuste de la temperatura del suelo dentro del software de simulación energética.....	84
Figura 5.6. Ajuste del periodo de simulación dentro del software de simulación energética.....	84
Figura 5.7. Pasos de tiempo para la simulación energética.....	85
Figura 6.1. Tendencia de temperatura en las superficies de análisis de la superficie (a) exterior, (b) interior de la pared de análisis y (c) del aire al interior de la vivienda con y sin fachada verde en evolución libre.....	90
Figura 6.2 Comportamiento de la temperatura promedio mensual en cada zona de la vivienda, escenario: evolución libre (a) sin fachada verde y (b) con fachada verde. ....	92
Figura 6.3. Número de horas que la temperatura de la vivienda permanece dentro del intervalo de confort establecido para cada mes. ....	94
Figura 6.4. Comportamiento de temperatura en las superficies de análisis de la superficie (a) exterior, (b) interior de la pared de análisis y (c) del aire al interior de la vivienda con y sin fachada verde con aire acondicionado. ....	96
Figura 6.5 Comportamiento de la temperatura promedio mensual en cada zona de la vivienda, escenario: aire acondicionado, (a) sin fachada verde y (b) con fachada verde. ....	97
Figura 6.6. Demanda mensual de energía para enfriamiento. ....	99
Figura 6.7. Emisión mensual de dióxido de carbono al ambiente.....	100
Figura 6.8. Resultados anuales de (a) demanda energética por enfriamiento y (b) emisiones de dióxido de carbono por demanda energética. ....	101
Figura A. 1. Modelo geométrico de los casos (a) 600 y 600FF y (b) 610.....	116
Figura B. 1. Pantalla principal del Software DesignBuilder. ....	120
Figura B. 2. Pantalla de edición en DesignBuilder. ....	121
Figura B. 3. Pantalla para ingresar el archivo de clima en DesignBuilder.....	122
Figura B. 4. Modelo tridimensional del edificio. ....	123

---

Figura B. 5. Creación de aperturas: ventanas y puertas. ....	123
Figura B. 6. (a) cerramientos y (b) propiedades termofísicas. ....	124
Figura B. 7. Características de las aberturas.....	125
Figura B. 8. Pestaña de actividad en el edificio.....	126
Figura B. 9. Desglose de la pestaña HVAC en DesignBuilder. ....	126
Figura B. 10. Opciones de cálculo en DesignBuilder.....	128
Figura B. 11. Visualización de resultados y (b) exportación de resultados. ....	129

---

# Lista de Tablas

Tabla 2.1. Conductividad térmica de materiales de construcción típicos en México. ....	33
Tabla 2.2. Clasificación básica de los materiales orgánicos e inorgánicos utilizados como sustratos, Abad et al. (2004). ....	40
Tabla 4.1. Propiedades termofísicas de los materiales de construcción de los módulos de prueba.....	70
Tabla 4.2. Valores máximos y mínimos de temperatura en diferentes zonas del módulo de prueba sin fachada verde.....	72
Tabla 4.3. Valores máximos y mínimos de la temperatura en diferentes zonas del módulo de prueba con fachada verde. ....	74
Tabla 5.1. Dimensiones y propiedades termofísicas de los materiales de construcción de la vivienda de referencia. ....	78
Tabla 5.2. Propiedades del acristalamiento [EnergyPlus]. ....	78
Tabla 5.3. Variación estacional de las condiciones climáticas durante un año típico en Cuernavaca, Morelos. ....	80
Tabla 5.4. Temperatura de confort mensual para el setpoint en el software de simulación.....	82
Tabla A. 1. Datos y configuraciones para llevar a cabo el BESTEST. ....	117
Tabla A. 2. Especificaciones de los materiales de los elementos principales de la envolvente de la edificación de los casos para el BESTEST.....	117
Tabla A. 3. Dimensiones, propiedades termofísicas y ópticas de la ventana para todos los casos del BESTEST. ....	118
Tabla A. 4. Comparación de los resultados de la carga anual para los diferentes casos y diferencia porcentual promedio con respecto a la norma ANSI/ASHRAE 140 – 2011. ....	119
Tabla A. 5. Resultados de la temperatura de la zona para el caso BESTEST 600FF. ....	119

# Nomenclatura

## Simbolos

$\alpha_f$	Absortividad	$LAI_{active}$	índice de área foliar activa, $m^2$
$I_s$	Radiación total, $Wm^{-2}$	$r_l$	Resistencia estomática, $sm^{-1}$
$h_{f,out}$	Coefficiente de transferencia de calor del ambiente exterior, $Wm^{-2}K^{-1}$	$d$	Longitud característica de la hoja, m
$T_f$	Temperatura de la vegetación, K	$k_{air}$	Conductividad térmica del aire, $Wm^{-1}K^{-1}$
$T_{out}$	Temperatura ambiente, K	$\rho_{air}$	Densidad del aire, $kgm^{-3}$
$h_{f,in}$	Coefficiente de transferencia de calor entre el follaje y la cavidad de aire, $Wm^{-2}K^{-1}$	$C_{p,air}$	Calor específico del aire, $Jkg^{-1}K^{-1}$
$L_f$	Calor latente, $Wm^{-1}$	$N_u$	Numero de Nusselt
$q_{rad}$	Flujo neto infrarrojo entre la fachada y las superficies circundantes, $Wm^{-2}K^{-1}$	$w$	Agua evaporada, $gsm^{-2}$
$T_{ground}$	Temperatura del suelo, K	$\lambda$	Calor específico de la evaporación del agua, $Jkg^{-1}K^{-1}$
$T_{sky}$	Temperatura del cielo, K	$G$	Calor absorbido por el suelo, $Wm^{-2}$
$T_{w,out}$	Temperatura de la superficie exterior, K	$\gamma$	Constante psicométrica de la presión del aire, $kPa^{\circ}C^{-1}$
$\varepsilon_f \varepsilon_w$	Emisividades infrarrojas de la planta y pared	$r_a$	Resistencia aerodinámica, $sm^{-1}$
$F$	Factores de vista	$r_s$	Resistencia estomática a granel, $sm^{-1}$
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann, $Wm^{-2}K^{-4}$		

## Acrónimos

<b>UHI</b>	Isla de calor urbano	<b>HGW</b>	Hierva – arbusto mecánicamente independiente
<b>ALW</b>	Paredes vivas activas	<b>ETTV</b>	Valor de transferencia térmica envolvente
<b>LCA</b>	Evaluación del ciclo de vida	<b>VGf</b>	Fachadas verdes verticales
<b>ACV</b>	Aspectos e impactos ambientales potenciales	<b>DB</b>	DesignBuilder
<b>LCI</b>	Inventario del ciclo de vida	<b>MVE</b>	MEAN-BIAS ERROR
<b>HDPE</b>	Polietileno de alta densidad	<b>EPW</b>	EnergyPlus weather data format
<b>GCM</b>	Modelos climáticos globales	<b>LW</b>	Pared verde
<b>LWS</b>	Sistemas de paredes vivas	<b>SFV</b>	Sin fachada verde
<b>VW</b>	Pared desnuda	<b>FV</b>	Fachada verde
<b>CGW</b>	Trepadora mecánicamente dependiente		

---

# Resumen

El estudio de fachadas verdes emerge como esencial debido a sus impactos significativos en el confort térmico de las edificaciones. Estas estructuras actúan como aislantes térmicos naturales, mitigando las variaciones de temperatura. En este trabajo se presenta el análisis del efecto de una fachada verde sobre la temperatura de un módulo experimental y una vivienda de referencia en condiciones de clima cálido (Cwa) en México, mediante una combinación de experimentación y simulación energética en DesignBuilder.

La elección del software DesignBuilder con interfaz en EnergyPlus para la simulación energética se debió a su eficacia, aunque presenta limitaciones al ofrecer la función de vegetación exclusivamente para techos. Para superar esta restricción, se obtuvo una resistencia térmica equivalente de la vegetación,  $0.15 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ , a partir de datos experimentales, integrándola posteriormente al software de simulación. La validación de los resultados de la temperatura en el módulo experimental mostró un MBE promedio máximo del 2.5 % en comparación con los datos experimentales.

En la simulación de una vivienda de referencia conforme a la norma NOM-020-ENER-2011, se evaluó el impacto de la fachada verde en dos escenarios: evolución libre y con aire acondicionado. En el primer escenario, se analizó el confort térmico, mientras que en el segundo se evaluaron la demanda mensual de electricidad y las emisiones de dióxido de carbono relacionados con sistemas HVAC.

En el escenario de evolución libre, la vivienda de referencia sin fachada verde acumuló un total anual de 6129 horas de confort térmico. Por otro lado, la implementación de la fachada verde en la pared sur de la vivienda generó un aumento del 13 % en las horas de confort térmico de manera anual. Además, en el caso del uso de aire acondicionado, la fachada verde demostró una notable eficiencia al reducir la demanda de electricidad y las emisiones de dióxido de carbono relacionadas con los sistemas HVAC en un 37.5% anualmente.

---

# Abstract

The study of green facades emerges as essential due to the significant impacts on the thermal comfort of buildings. These structures act as natural thermal insulators, mitigating temperature variations. Therefore, this work presents the analysis of the effect of a green facade on the temperature of an experimental module and a reference dwelling in warm climate conditions (Cwa) in Mexico, through a combination of experimentation and energy simulation in DesignBuilder.

The choice of using the software DesignBuilder with an EnergyPlus interface for energy simulation was due to the effectiveness, although it has limitations in providing vegetation functions exclusively for roofs. To overcome this restriction, an equivalent thermal resistance of vegetation,  $0.15 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ , was obtained from experimental data and subsequently integrated into the simulation software. Validation of temperature results in the experimental module showed a maximum average Mean Bias Error (MBE) of 2.5 % compared to experimental data.

During the simulation of a reference dwelling according to the NOM-020-ENER-2011 standard, the impact of the green facade was evaluated in two scenarios: free-floating mode and with air conditioning. In the first scenario, thermal comfort was analyzed, while in the second, monthly electricity demand and carbon dioxide emissions related to HVAC systems were evaluated.

In the free-floating scenario, the reference dwelling without a green facade accumulated a total of 6129 hours of annual thermal comfort. On the other hand, the implementation of the green facade on the south wall of the dwelling allowed a 13 % increase in annual thermal comfort hours. Additionally, in the case of the air conditioning scenario, the green facade demonstrated notable efficiency by reducing annual electricity demand and carbon dioxide emissions related to HVAC systems by 37.5 %.

---

# **CAPÍTULO I.**

## **INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se describen los fundamentos que constituyen el marco inicial de este proyecto de tesis. En primera instancia, se presenta el planteamiento del problema, destacando la importancia y necesidad de este estudio en el contexto actual. A continuación, se realiza una exhaustiva revisión de la literatura asociada, explorando las contribuciones existentes, las brechas identificadas y las tendencias emergentes. La conclusión de la literatura proporciona una síntesis crítica que orienta el diseño y enfoque de la presente investigación. Asimismo, se presentan los objetivos generales y específicos que guiaron el desarrollo del trabajo, con el fin de ofrecer respuestas a las interrogantes planteadas. Se delimitan los alcances de la tesis para establecer los límites y alcances de este estudio. Finalmente, se describe la estructura de la tesis por capítulos.

# 1.Introducción

## 1.1. Motivación

En el contexto de un mundo cada vez más consciente de los desafíos ambientales, el diseño arquitectónico sostenible se ha vuelto una prioridad urgente. Las edificaciones, responsables de una parte considerable del consumo energético global, enfrentan una creciente presión para reducir su huella ambiental y contribuir a mitigar el cambio climático. En este sentido, las fachadas verdes emergen como una solución prometedora que fusiona la innovación arquitectónica con la ecoeficiencia. Estas estructuras vegetales no solo ofrecen una estética impresionante, sino que también desempeñan un papel crucial en la optimización del consumo energético de los edificios. Al combinar estrategias de diseño con sistemas activos y pasivos, las fachadas verdes se posicionan como una herramienta versátil y efectiva para enfrentar los desafíos del consumo excesivo de energía en las edificaciones, al tiempo que contribuyen a la lucha contra el cambio climático.

En regiones de clima cálido, las fachadas verdes ofrecen una serie de beneficios significativos tanto para el confort interior de los edificios como para el entorno urbano en general. Estas fachadas no solo añaden un toque estético atractivo a las estructuras, sino que también proporcionan una serie de ventajas funcionales que son particularmente relevantes en climas cálidos.

En primer lugar, las fachadas verdes actúan como un aislante natural, ayudando a mantener temperaturas más frescas en el interior de los edificios durante los meses calurosos. La vegetación y el sustrato de las paredes verdes absorben parte de la radiación solar incidente, lo que reduce la cantidad de calor que penetra en los espacios interiores. Este efecto de enfriamiento presenta beneficios en áreas urbanas donde el efecto isla de calor puede aumentar significativamente las temperaturas locales.

Además, las fachadas verdes pueden ayudar a mejorar la calidad del aire al filtrar partículas contaminantes y absorber gases nocivos como el dióxido de carbono. Esto es

particularmente importante en entornos urbanos donde la contaminación del aire es un problema común. Otro beneficio clave de las fachadas verdes en climas cálidos es su capacidad para reducir la cantidad de agua de lluvia que fluye hacia las alcantarillas y sistemas de drenaje. La vegetación y el sustrato absorben parte del agua de lluvia, lo que ayuda a mitigar el riesgo de inundaciones y alivia la presión sobre la infraestructura de drenaje urbano.

## **1.2. Ubicación del problema**

En entornos rurales, la presencia dominante de vegetación y espacios abiertos define el paisaje, donde los árboles y plantas no solo ofrecen sombra, sino también contribuyen a la reducción de la temperatura del suelo y del aire. Sin embargo, a medida que el desarrollo urbano progresa, las áreas urbanizadas presentan superficies secas e impermeables, como techos, calles y estacionamientos, donde las plantas ceden terreno a edificios y pavimentos. Este cambio drástico resulta en una reducción de sombra y humedad, generando las conocidas islas de calor urbano [Rivas, 2019] y elevando las temperaturas urbanas considerablemente en comparación con las zonas rurales.

El incremento de temperatura, además de impactar el clima local, tiene ramificaciones directas en el consumo de energía en las edificaciones. La demanda de energía eléctrica para mantener condiciones térmicas confortables impulsa un ciclo ininterrumpido entre demanda y producción de energía, involucrando la quema de combustibles fósiles y emanación de gases de efecto invernadero [Salazar, 2017], contribuyendo así al calentamiento global y al incremento de la temperatura promedio anual.

Para contrarrestar la problemática expuesta en el párrafo anterior, y disminuir el consumo de energía eléctrica en el sector residencial, se plantea la posibilidad de rediseñar la envolvente de las edificaciones. En este sentido, la integración de sistemas de vegetación en construcciones urbanas emerge como una estrategia prometedora, no solo para mejorar la calidad del escenario urbano y gestionar aguas pluviales, sino también para reducir la temperatura y las emisiones de carbono.

Además de beneficios ambientales, los sistemas de vegetación ofrecen ventajas sociales y económicas, mejoran la condición del aire y tienen un efecto positivo en la salud mental de los habitantes urbanos. La preservación de la naturaleza y la mejora de la estética urbana son complementos adicionales que refuerzan la necesidad de explorar soluciones ecológicas y rentables para adaptar las condiciones micro climáticas de los edificios existentes.

En este contexto, se destaca el papel crucial de las fachadas verdes, cuyos desarrollos más recientes se centran en eficiencia térmica y mejor rendimiento en todas las fases de construcción. La implementación a gran escala de fachadas verdes promete moderar el impacto de las islas de calor y mejorar el rendimiento térmico, especialmente en edificios altos, consolidándose como una solución relevante en el diseño urbano sostenible.

### **1.3. Revisión de la literatura**

En esta sección, se examinan tres categorías clave de investigaciones: teóricas, experimentales y teóricas-experimentales, todas centradas en la relación entre la vegetación urbana y la mitigación del calor. Los trabajos teóricos establecen principios conceptuales, mientras que los experimentales aportan evidencia práctica sobre la efectividad de la vegetación en entornos urbanos. La categoría teórico-experimental fusiona estas perspectivas para ofrecer una comprensión integral y aplicada que orienta la integración exitosa de sistemas de vegetación en el diseño urbano.

#### **1.3.1. Estudios teóricos**

En esta sección se presenta la base teórica y conceptual que respalda la implementación y el rendimiento de los sistemas de fachadas verdes. Los estudios teóricos pueden abordar aspectos como la eficiencia energética, la mitigación de la contaminación atmosférica, el impacto en el microclima urbano, la biodiversidad urbana, la gestión de aguas pluviales, entre otros. Estos análisis teóricos pueden incluir modelos matemáticos, simulaciones computacionales, revisiones de literatura y enfoques de diseño basados en principios de arquitectura sostenible y ecodiseño. Además, se pueden examinar aspectos

relacionados con la selección de materiales, la optimización del diseño y la evaluación del ciclo de vida de los sistemas de fachadas verdes para comprender mejor su funcionamiento y sus beneficios ambientales y económicos potenciales.

**Manso et al. (2015)** revisaron diversos tipos de sistemas de fachada verde con el objetivo de reconocer y organizar sus características clave y tecnologías. Se destacó la importancia de entender las diferencias fundamentales entre estos sistemas en términos de estructura y métodos de construcción. Los desarrollos más recientes en fachadas verdes se centran en diseñar soluciones más eficientes y mejorar el rendimiento en todas las etapas de construcción. No obstante, los autores subrayaron la necesidad de que los sistemas de fachada verde evolucionen hacia soluciones más sostenibles. La conclusión principal fue que la elección de la fachada adecuado para un proyecto específico debe basarse no solo en las limitaciones constructivas y relacionadas con el clima, sino también en el impacto antrópico de sus componentes y el valor económico asociado durante el ciclo de vida.

**Gunawardena et al. (2018)** centraron la investigación en revisar publicaciones de revistas y observaron que, mientras los estudios de aplicaciones exteriores destacan la mejora del rendimiento térmico debido a la incidencia de radiación y el sombreado del dosel vegetal, en condiciones interiores, la contribución menos potente de la evapotranspiración probablemente tenga un impacto más significativo en dicho rendimiento. Se subrayó la importancia de evaluar el rendimiento anual, ya que las plantas utilizadas en aplicaciones interiores suelen ser amantes de la sombra.

El estudio de literatura realizado por **Koch et al. (2020)** evidenciaron que las fachadas verdes reducen las temperaturas extremas tanto en condiciones cálidas como frías. La investigación reveló la diferencia de temperatura entre paredes desnudas y fachada verdes en verano e invierno. En situaciones estivales, los estudios de modelado tienden a sobreestimar el efecto de enfriamiento de las fachadas verdes en aproximadamente 5 °C, mientras que los estudios experimentales presentan una buena concordancia entre diferentes tipos, destacando que las fachadas verdes proporcionan un efecto de enfriamiento ligeramente mayor, especialmente las de sistema de paredes vivas (LWS por las siglas en inglés). No obstante, no se han realizado estudios de modelado térmico para condiciones invernales. Aunque las fachadas verdes pueden moderar el efecto de isla de calor urbano, su implementación

inadecuada puede agravar la situación. Por ejemplo, en climas cálidos, la vegetación puede actuar como aislante, impidiendo el enfriamiento nocturno de los edificios, y en climas fríos, la sombra de la vegetación puede obstaculizar el calentamiento del edificio. A pesar de estos posibles efectos negativos, la mayoría de las investigaciones sugieren que las ventajas de las paredes verdes superan sus inconvenientes.

**Bankas et al. (2021)** analizaron el estado actual y resaltaron las aplicaciones de las fachadas verdes. En primera instancia, los autores examinaron tipos, clasificaciones y diseños de sistemas de fachadas verdes, centrándose en sus beneficios y desempeño en el tratamiento de aguas residuales para su recuperación. Aunque la aplicación de fachadas verdes ha estado vinculada al tratamiento de aguas grises, el estudio señala que estos sistemas tienen el potencial de tratar aguas residuales orgánicas altamente concentradas. El análisis de eficiencias en la eliminación de nutrientes y contaminantes orgánicos, basado en experimentos y estudios de casos, indica que el diseño de fachadas verdes, la elección del sustrato y la selección adecuada de vegetación pueden mejorar considerablemente el rendimiento global del sistema de fachadas verdes en la recuperación de aguas residuales.

**Manso et al. (2021)** presentaron los beneficios y costos asociados a diferentes tipos de cubiertas y fachadas verdes. La investigación se dividió en beneficios a escala de edificio, beneficios a escala urbana y costos del periodo de vida, centrándose en identificar la variabilidad de los resultados y evaluar su cuantificación promedio. Los resultados destacaron una alta variabilidad en los beneficios, especialmente en aspectos como la mejora del consumo de energía, la transmisión de sonido, el tratamiento de aguas grises y la gestión del agua. Además, se señalan beneficios intangibles de cubiertas y fachadas verdes, más difíciles de cuantificar. Finalmente, los autores concluyen que son limitados los estudios que abordan la contribución de estas estructuras a la calidad de vida, el bienestar, la preservación ecológica, la promoción de la biodiversidad, la mejora estética y la promoción del uso recreativo, por lo tanto, es necesario desarrollar investigaciones centradas en estos aspectos.

**Dominici et al. (2021)** abordaron la creciente popularidad de las fachadas verdes para mejorar la condición del aire interior en viviendas. Destacaron la importancia de desarrollar técnicas de diseño de iluminación que promuevan la salud de las plantas, maximicen el potencial de fitorremediación y reduzcan los costos de mantenimiento. La simulación

realizada en este estudio evalúa las eficiencias actuales de los sistemas de fachadas verdes en la eliminación de CO<sub>2</sub>, y sugiere que estas fachadas deberían ubicarse en áreas con suficiente intensidad lumínica para garantizar la fotosíntesis. Se enfatiza que el análisis de las fachadas verdes debe considerar elementos como el diseño, el paisaje vegetal empleado y el control de la distribución de la luz a lo largo de la fachada. Estas consideraciones son esenciales para garantizar un rendimiento óptimo en la eliminación de CO<sub>2</sub> y maximizar los beneficios de las fachadas verdes en términos de condición del aire interior.

El estudio de **Susca et al. (2022)** exploró el rendimiento de las fachadas verdes en diversas zonas climáticas a nivel mundial, mediante la revisión de la literatura (SLR). Esta investigación examina los efectos directos del montaje de fachadas verdes en el uso de energía de los edificios y en el fenómeno de isla de calor urbano (UHI). La evaluación del despliegue de fachadas verdes considera la temporada de refrigeración y calefacción, las condiciones ambientales, durante el día, la tipología de la fachada verde, la orientación y la escala de aplicación. Los resultados destacan que las fachadas verdes tienen la capacidad de reducir el requerimiento de energía para calefacción y refrigeración en hasta un 16.5 % y aproximadamente un 51 %, respectivamente. Además, logran mitigar el UHI en hasta 5 °C en todas las zonas climáticas investigadas.

**Cardinali et al. (2023)** realizaron una revisión de la literatura y encontraron pruebas sólidas y consistentes de que las fachadas verdes pueden moderar los efectos de la isla de calor urbana (temperatura de la superficie durante el día: -0.3 °C a -31.9°C, temperatura del aire durante el día: -0 °C a -8.7 °C), la contaminación del aire (PM2.5: -25% a -99%, PM10: -23% a -60%) y la contaminación acústica (nivel de presión acústica: -1dBA a -5dBA). No obstante, no obtuvieron resultados sobre la vía de instauración o los resultados directos sobre la salud. Por lo tanto, los autores concluyeron que se necesitan más investigaciones de campo que aborden diferentes perspectivas para comprender mejor la relación entre las fachadas verdes y la salud.

**Ávila et al. (2023)** presentaron una recopilación de estudios realizados en México sobre infraestructura verde, analizando los beneficios energéticos, térmicos y ambientales según la configuración de vegetación, sustrato, clima y sistemas. Además, se analizó el desarrollo de políticas, leyes, reglamentos e incentivos en materia de techos verdes en

México. Los resultados de dicha investigación indicaron que el uso de infraestructura verde puede ayudar a mitigar los gases de efecto invernadero, ya que un techo verde puede disminuir la temperatura interior hasta 19.9 °C, ahorrar un 28 % anual en el consumo de electricidad y eliminar el 80% de los contaminantes del agua de lluvia.

**Luque & Arpon (2024)** realizaron una revisión de la literatura sobre la mejora térmica de las ciudades, la mejora térmica de los edificios, la salud, la condición de vida y los beneficios fisiológicos, así como la mejora de los sistemas de construcción, de diferentes sistemas verdes verticales. Estos temas se refieren a los servicios ecosistémicos que proporcionan las cubiertas y las fachadas verdes, tanto a escala de edificio como de ciudad. Los investigadores concluyeron que existe una escasez de literatura sobre fachadas verdes que aborde temas críticos como el mantenimiento, el seguimiento y la evolución del impacto, los estudios de coste-beneficio y la integración en las políticas municipales y nacionales.

### **1.3.2. Estudios experimentales**

Esta sección se centra en la recopilación y análisis de datos empíricos obtenidos a través de experimentos y pruebas realizadas en entornos reales o de laboratorio. Estos estudios pueden incluir mediciones de parámetros como temperatura ambiental, humedad, calidad del aire, consumo energético, comportamiento hidrológico y rendimiento estructural de los sistemas de fachadas verdes. Los experimentos pueden llevarse a cabo en laboratorios especializados, edificios piloto o proyectos de investigación a gran escala en entornos urbanos reales. La finalidad de estos estudios experimentales es validar y complementar la información teórica existente, así como proporcionar datos concretos sobre el funcionamiento y los beneficios de los sistemas de fachadas verdes en condiciones prácticas y variadas.

**Wong et al. (2010)** evaluaron ocho sistemas de vegetación vertical con el objetivo de analizar los impactos térmicos en el rendimiento de los edificios y su entorno inmediato con respecto a la temperatura ambiente y de la superficie. Los resultados revelaron que en climas húmedos como el de Hong Kong, los sistemas de vegetación vertical pueden generar beneficios significativos, logrando una disminución máxima de la temperatura de hasta 8.4 °C en un cañón urbano. Se destacó que la vegetación puede aliviar el fenómeno de isla de

calor urbano al proporcionar sombra a las superficies que absorben calor y mediante el enfriamiento por evapotranspiración. La presencia de vegetación protege las paredes del sol, reduciendo drásticamente las temperaturas máximas del edificio y disminuyendo hasta en un 50 % la fluctuación diaria de la temperatura. Además, por medio de la evapotranspiración, la radiación solar se convierte en calor latente, evitando un incremento de la temperatura. De igual manera, una envolvente completamente revestida de plantas tiene la capacidad de reflejar o absorber entre el 40 % y el 80 % de la radiación solar incidente, variando según la cantidad y el tipo de vegetación presente.

**Jim & He (2011)** realizaron un experimento para monitorear la radiación solar y las condiciones climáticas, utilizando un modelo de transmisión termodinámica (TTM) para simular la dinámica del flujo de calor y los cambios de temperatura en el ecosistema de vegetación vertical. El modelo fue calibrado y probado a través de observaciones en un montaje experimental en el techo del edificio Runme Shaw en la Universidad de Hong Kong. El experimento incluyó cuatro escenarios: una fachada verde en el lado sur, otro en el lado norte, una pared sur de hormigón sin blindaje y una pared norte de hormigón sin blindaje. Los resultados mostraron que los flujos de calor estacionales en la fachada verde variaban con las fluctuaciones de las condiciones meteorológicas subyacentes. Por otro lado, la transmisión de radiación se correlacionó fuertemente con la transmitancia y la reflectancia del dosel, mientras la eficacia protectora de la vegetación en la fachada verde absorbió la energía radiante, evitando que llegara a la superficie del edificio. Por otro lado, durante el ciclo diurno, se observó que la fachada verde podía transferir más flujo de calor a través de la vegetación vertical debido al efecto de evapotranspiración del dosel.

El objetivo de **Koyama et al. (2013)** fue identificar los rasgos clave que contribuyen a los efectos refrescantes de las fachadas verdes que utilizan muros autoportantes. Realizaron una comparación entre cinco especies de plantas de vid, las cuales fueron entrenadas para escalar una red de plástico adherida a paredes independientes en condiciones al aire libre. Una pared no estaba cubierta de plantas, sirviendo como control. Se midieron la longitud de la vid más larga, el número de hojas, el porcentaje de cobertura, la tasa de transpiración de la hoja, la transmitancia solar de la hoja, las temperaturas de la pared, la radiación solar global en una superficie vertical sur (GSR) y la temperatura ambiente. Los resultados señalaron que

la diferencia de temperatura en la superficie de la pared entre la pared descubierta y la fachada verde superó los 0.1 kW/m<sup>2</sup>.

**Saifi et al. (2013)** evaluaron el impacto de una fachada verde vertical sobre el desempeño térmico de módulos de prueba en climas semiáridos. El objetivo principal fue investigar cómo la vegetación plantada en la superficie exterior de un módulo afecta el confort térmico en Ouargla, Argelia. El enfoque se centró en comprender el papel de este sistema de fachada verde en el microclima de los edificios, con el potencial de reducir el consumo de energía. Los resultados revelaron que las enredaderas en la pared no solo presentaban beneficios en el entorno térmico cercano al edificio, sino que también influían en las condiciones térmicas internas. Además, destacaron la importancia de la densidad del follaje, su espesor, la relación de cobertura y la tipología vegetal en el comportamiento higrotérmico de los efectos de las enredaderas en las edificaciones.

**Hunter et al. (2014)** realizaron un análisis comparativo enfocado en evaluar el rendimiento térmico de las fachadas verdes considerando diversos factores, tales como la zona climática, el diseño y la orientación de cañones urbanos, los materiales de construcción, aspectos estéticos, costos, ventilación del edificio, estructuras de sombreado ingenieriles, otros sistemas de vegetación vertical y la densidad del dosel. La revisión plantea que, si bien las fachadas verdes poseen un potencial significativo, es poco probable que puedan regular las temperaturas internas de los edificios de manera uniforme en todas las ciudades y climas, considerando diversos aspectos de la construcción y alturas sobre el suelo. Asimismo, se destaca la importancia de realizar investigaciones más detalladas sobre las características fisiológicas y morfológicas que posibiliten a las plantas trepadoras mantener su desarrollo y desempeño en entornos urbanos desafiantes. Esto se hace con el propósito de orientar la elección de nuevas especies para su implementación en fachadas verdes.

**Jim (2015a)** examinó el desarrollo de plantas trepadoras capaces de alcanzar alturas superiores a 10 metros, llevando a cabo el experimento en Shatin, Hong Kong, mediante dos métodos de fijación: grupos de trepadores en mallas y trepadores en superficies de hormigón. El monitoreo del crecimiento de las plantas se realizó desde la etapa de plántulas en parcelas experimentales, optimizando las condiciones a través de una mezcla de suelo de alta calidad y riego. Para recopilar datos sistemáticos sobre indicadores de rendimiento y síntomas de

deficiencia, se implementaron métodos de evaluación de campo. Se identificaron atributos clave para calcular el Índice de Rendimiento de Escaladores (CPI) y el Índice de Deficiencia de Escaladores (CDI), sirviendo como indicadores integrales de la idoneidad de las aplicaciones de fachadas verdes. Los trepadores en mallas destacaron notablemente sobre aquellos en superficies de hormigón en todos los indicadores clave de rendimiento, exhibiendo un CPI significativamente superior. Estos trepadores demostraron tasas de establecimiento y crecimiento más rápidas, así como una mayor floración ornamental. Ambos grupos presentaron un CDI similar, principalmente atribuible a la insuficiente densidad y pérdida de follaje. Entre los trepadores en mallas, *Quisqualis indica* y *Wisteria sinensis* destacaron con un rendimiento excelente, mientras que otras especies fueron calificadas como buenas a regulares. Por otro lado, en el grupo de trepadores en superficies de hormigón, solo *Parthenocissus dalzielii* obtuvo una calificación de bueno, *Campsis grandiflora* fue clasificada como regular y las demás fueron consideradas de pobre a muy pobre.

**Jim (2015b)** construyó parcelas experimentales de plantas trepadoras y fachadas verdes, orientadas en las cuatro direcciones cardinales, en la zona tropical húmeda de Hong Kong. El experimento se realizó para escenarios climáticos típicos de verano: soleado, nublado y lluvioso. Utilizando un tanque circular de concreto, se colocaron sensores de temperatura superficial del aire y radiómetro infrarrojo en diferentes posiciones de paredes verdes: aire ambiente (control), superficie de concreto desnudo (control), superficie de vegetación, espacio de aire detrás de la malla y superficie de concreto detrás de la malla. Además, se instalaron piranómetros en las cuatro orientaciones verticales y horizontalmente en la parte superior del tanque (control) para monitorear la entrada de energía solar. En días nublados y períodos de lluvia, se observó una reducción de las diferencias de enfriamiento por orientación. Se destacó que la superficie de concreto detrás de la malla mantuvo una temperatura consistentemente más baja que la superficie de concreto de control en los tres escenarios de clima de verano. El aire detrás de la malla mostró ser más cálido que el aire ambiente pero más fresco que las superficies adyacentes (vegetación y concreto detrás de la malla), indicando un efecto de barrera de aire y un intercambio de aire restringido entre el ambiente y el espacio posterior de aire. Este hallazgo sugiere que la fachada verde puede generar un enfriamiento bidireccional.

**Jim (2015c)** clasificó y realizó evaluaciones críticas de gestión de diseño de fachadas verdes. Además, estableció un marco analítico basado en la forma de crecimiento de la planta como criterio general, distinguiendo dos tipos principales: las paredes trepadoras mecánicamente dependientes (CGW) y las paredes hierba-arbusto mecánicamente independientes (HGW). El hábitat vertical para recibir vegetación se determinó a través de factores intrínsecos y extrínsecos, como estructura, superficie, dimensión, geometría, ubicación y entorno de la pared. La evaluación estructurada de los factores integrales de diseño se llevó a cabo considerando cuatro factores para CGW, que abarcaron escalada, espacio de aire, sustrato y vegetación, mientras que el HGW más complejo comprendió cinco factores, que incluyeron sustrato, contenedor, espacio de aire, nutrientes de agua y vegetación. Este método ofreció una perspectiva minuciosa de los elementos que influyen en la eficacia y administración de las fachadas verdes, subrayando la relevancia de tener en cuenta tanto los factores internos como externos al diseñar e implementar estos sistemas.

**Jim (2015d)** evaluó el comportamiento térmico invernal de las paredes con plantas trepadoras en la zona subtropical húmeda de Hong Kong. La orientación y los factores climáticos desempeñaron un papel crucial en los regímenes de radiación solar, teniendo un impacto significativo en las respuestas térmicas de la vegetación. La fachada verde orientada al sur, especialmente en días soleados, recibió la mayor entrada de energía solar, generando temperaturas superficiales divergentes en tres especies de plantas trepadoras. El efecto del disipador de calor, relacionado con el espesor del follaje y el contenido de humedad, influyó en las respuestas térmicas de las trepadoras. Superar un umbral de irradiancia solar de 500 W/m<sup>2</sup> fue crucial para el calentamiento solar y el enfriamiento por transpiración, resultando en temperaturas superficiales diferenciadas en los escaladores.

En el estudio realizado por **Othman & Sahidin (2016)**, se evaluaron las condiciones de temperatura y humedad en un edificio de oficinas que emplea un sistema de vegetación vertical. Los resultados demostraron que los sistemas de vegetación pueden implementarse de manera efectiva en países de clima tropical como el clima en Indonesia. Se observó el consumo de energía de ambos edificios (con y sin vegetación vegetal) durante el período de horas de trabajo. La evaluación de los datos reveló que la incorporación de una fachada verde vertical en un edificio de oficinas resulta en una notable disminución de la temperatura y la

humedad, en contraste con un edificio que carece de dicho sistema. Se concluyó que el edificio con fachada verde vertical mostró una mayor capacidad para regular la temperatura en comparación con su contraparte sin este sistema. Este estudio confirma que la fachada verde vertical actúa de manera efectiva como un enfoque pasivo en el diseño de edificios sostenibles en áreas urbanas de países con climas tropicales; es importante señalar que la efectividad de este enfoque está fuertemente influenciada por el diseño específico de la fachada verde y la orientación de la fachada.

En el estudio llevado a cabo por **Musy et al. (2017)**, se realizaron comparaciones entre los efectos directos e indirectos de tres configuraciones de enverdecimiento: césped, cubiertas y fachadas verdes. Esta investigación se realizó mediante un estudio de caso en Francia. Para la evaluación de la insolación urbana, se utilizó el modelo SOLENE-microclima. Los resultados obtenidos revelaron que, para el tipo específico de edificios analizados, la intervención en el entorno puede representar una mejora significativa en el confort durante la temporada estival. Asimismo, se observó que las cubiertas verdes son especialmente efectivos en los pisos superiores donde están instalados. Por otro lado, las fachadas verdes demostraron tener impactos tanto directos como indirectos en el microclima del entorno. En cuanto al césped, su efecto se limita a un impacto indirecto, lo que sugiere que este aspecto merece ser considerado, especialmente en edificios sin áreas verdes y sin aislamiento. Este estudio resalta la importancia de seleccionar estrategias específicas de enverdecimiento en función de la tipología y características del edificio.

El estudio realizado por **Sánchez et al. (2018)**, tuvo el objetivo de presentar el comportamiento de las fachadas verdes y sus beneficios en ambientes semiáridos en el centro de México. La investigación se realizó monitoreando dos cabañas experimentales en la Ciudad de Querétaro, construidas con materiales comunes utilizados en viviendas en México. En una de las cabañas, se instaló una fachada verde en la pared sur, mientras que la otra sirvió como pared descubierta de control. Se colocó un sensor de temperatura en el punto medio de las paredes descubierta y la fachada verde, entre el aislamiento interior y la pared de ladrillo. Los resultados obtenidos indicaron que el sistema de pared viva contribuye a mejorar el tiempo y el porcentaje de pérdida/ganancia de calor en comparación con la pared descubierta hasta en 2.5 °C para condiciones frías y cálidas. Aunque la fachada verde no se presenta como

una solución para aumentar la temperatura interior de las viviendas, sí ayuda a mantener la temperatura por más tiempo. Sin embargo, se destaca la necesidad de investigaciones adicionales sobre los efectos combinados de las fachadas verdes y otros materiales de construcción, especialmente en condiciones de confort durante el período más frío.

**Abdó et al. (2021)** analizaron el impacto de las fachadas verdes pasivas y de los módulos de pared descubierta en la temperatura y la humedad, considerando diferentes especies de plantas y variaciones en las condiciones ambientales. Para llevar a cabo este experimento, utilizaron una cámara cerrada construida con láminas acrílicas, donde colocaron un módulo de fachada verde en el centro para monitorear la variación de temperatura y humedad. Se distribuyeron seis sensores BME280 (Presión, Temperatura y Humedad) en la cámara para registrar las variaciones. Los resultados obtenidos para las fachadas verdes indicaron temperaturas más bajas que las registradas en el ambiente, con una diferencia promedio de 1.0 a 1.5 °C durante el día y de 2.5 a 3.0 °C durante la noche. En cuanto a la humedad, todos los sensores mostraron lecturas más altas en comparación con el ambiente, con una diferencia promedio de aproximadamente el 25 % durante el día y la noche. En relación con las fachadas verdes pasivas, los resultados indicaron temperaturas más bajas que las del ambiente, con una diferencia promedio de 0.5 a 1.5 °C durante el día y de 2.0 a 2.5 °C durante la noche. Los sensores de humedad también registraron lecturas más altas en comparación con el ambiente, con una diferencia promedio de alrededor del 20 % al 25 % durante el día y la noche. Además, observaron que, en términos de preferencia, ninguna de las especies de plantas mostró diferencias significativas, salvo algunas ligeras variaciones en la temperatura y la humedad, probablemente atribuibles al contenido de humedad del sustrato.

**Blanco et al. (2021)** evaluaron el impacto ambiental de una fachada verde, comparándola con otros sistemas de fachadas exteriores de edificios. Para este propósito, emplearon un enfoque de análisis del periodo de vida y utilizaron un prototipo de sistema de fachada verde con vegetación trepadora sobre un marco de acero. La comparación se realizó con muros exteriores que incorporaban materiales aislantes convencionales, como poliestireno expandido, corcho expandido y fibra de madera, así como una pared doble con un espacio de aire sin ventilación. Los resultados indicaron que el mejor desempeño

ambiental se registró para la pared con corcho como material aislante y para la pared doble. Un hallazgo destacado fue que la adopción de un marco de madera en lugar de uno de acero como estructura de soporte de la planta redujo la huella de carbono de la fachada verde en 58 %. Además, compararon la fachada verde con sistemas de protección solar en aluminio o PVC, y la fachada verde mostró un mejor rendimiento ambiental.

**Dedé et al. (2021)** evaluaron los efectos de diferentes medios de cultivo en sistemas de fachadas verdes, con un enfoque particular en el aislamiento térmico. Los autores construyeron un modelo de prueba de edificio que incorporaba un sistema de fachada verde instalado, y se realizaron pruebas utilizando varios sustratos de cultivo, incluyendo composta de desechos sólidos municipales, turba, cáscara de arroz y perlita, con diferentes proporciones de mezcla. El sitio de estudio se ubicó en la Universidad de Sakarya, Turquía, una región de clima templado. Los resultados mostraron que la utilización de sustratos de cultivo mediante mezcla mejoró significativamente algunas propiedades físicas de los medios, como el incremento de la densidad aparente, porosidad y capacidad de retención de agua. Estas mejoras en las propiedades físicas sugieren beneficios prácticos para sistemas de fachadas verdes reales, como la reducción del peso total y la disminución de la necesidad de riego. Además, el estudio destaca que el uso de composta de desechos sólidos municipales, cáscara de arroz y perlita no solo mejoró las propiedades físicas, sino que también redujo significativamente los costos asociados con estos sistemas.

**Nan et al. (2021)** evaluaron el impacto de los sistemas de paredes verdes exteriores (LWS) en los ambientes térmicos interiores durante inviernos caracterizados por bajas temperaturas y elevados niveles de humedad. Este trabajo se desarrolló en la ciudad de Hangzhou, donde se instalaron cuatro contenedores con distintas fachadas exteriores, permitiendo así un análisis comparativo de las variaciones en los ambientes térmicos internos y externos de estos contenedores. Los resultados obtenidos revelan que tanto las macetas llenas de tierra como las plantas ubicadas en los LWS desempeñan un papel crucial en el aislamiento interior. Un rendimiento térmico efectivo de las paredes verdes contribuye a mejorar la eficiencia energética de los edificios, logrando diferencias de hasta 1.7 °C y 1 °C más elevadas durante el período de aislamiento. No obstante, se observó que el beneficio

térmico de los LWS orientados al norte y al sur fue más tenue en comparación con las orientaciones este y oeste.

**Pérez et al. (2021)** cuantificaron el consumo de agua en fachadas verdes basadas en fieltro y en evaluar las variables que influyen en este consumo. Para llevar a cabo esta investigación, se monitorearon 16 fachadas verdes, ubicadas en diversas ciudades españolas durante un período que varió de 1 a 4 años. Los resultados obtenidos revelaron que los consumos anuales de agua oscilaron entre 2,5 y 9 Lm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>. La medición del agua consumida se realizó a través de la evaluación del caudal total proporcionado por los goteros, probados in situ para todas las fachadas verdes. Los resultados mostraron que los niveles de consumo de agua observados son proporcionales con la cantidad de agua necesaria para regar otras infraestructuras verdes. Aunque las condiciones climáticas y las especies de plantas seleccionadas influyeron en el consumo de agua, se identificaron la orientación y exposición a la radiación incidente, así como la densidad de plantas, como factores clave que afectan este consumo.

**Shrestha & Shimizu (2021)** examinaron la contribución de la fachada verde directa de las paredes exteriores al efecto de la radiación solar en el valle de Katmandú. Para ello, se realizaron mediciones de campo comparativas entre fachadas verdes y paredes descubiertas con el objetivo de evaluar las diferencias de temperatura tanto dentro como alrededor del edificio. Los resultados obtenidos revelaron un efecto notable en la capacidad calorífica de una pared de ladrillos desnudos durante el verano en Nepal. Además, al realizar una evaluación del efecto de la absorción solar y considerar la temperatura sol-aire, se concluyó que el almacenamiento de calor de la pared podría reducirse significativamente mediante el enverdecimiento directo de la fachada exterior.

**Sousa et al. (2021)** investigaron el fenómeno del crecimiento helicoidal en plantas trepadoras. Los esfuerzos de investigación se centraron en la identificación de variables de transcripción (TF) que desempeñan un papel crucial en la iniciación y/o identidad del zarcillo, un órgano clave en el proceso de trepado. Los autores concluyeron que el inicio del crecimiento helicoidal en las plantas trepadoras suele desencadenarse por el contacto con un soporte, y este proceso parece estar habilitado por un mecanismo universal de formación de

células. Además, los investigadores observaron cambios morfológicos y anatómicos a medida que la planta trepadora se desarrollaba enroscándose alrededor de un soporte.

**Paull et al. (2021)** analizaron la salud de especies vegetales comúnmente utilizadas en fachadas verdes y su tolerancia a la contaminación del aire en entornos urbanos. Para ello, se recolectaron muestras de 11 especies de plantas provenientes de 15 fachadas verdes en diferentes sitios dentro de la región urbana de Sydney, Australia. La selección de los sitios se basó en la presencia de paredes verdes pasivas al aire libre con diseños modulares similares instalados por una empresa privada. Durante un periodo de observación de 6 meses, se llevaron a cabo análisis de diversos parámetros, incluyendo la clorofila de las hojas, el pH, el contenido relativo de agua y el contenido de carbono. Los resultados revelaron que no se detectaron diferencias significativas en el pH de las hojas ni en el contenido relativo de agua entre los sitios. No obstante, se observaron variaciones en el contenido de clorofila de las hojas de ciertas especies, como *N. doméstica*, *N. exaltata bostoniensis*, *N. glabra*, *P. glabellay* y *P. xanadú*. Además, se identificaron disparidades en el contenido de carbono entre los sitios para *C. comosum variegatum*, *P. xanadú* y *S. Wallisii*.

**Mannan et al. (2022)** investigaron la sustentabilidad ambiental de dos sistemas de fachadas verdes a lo largo de su ciclo de vida completo en condiciones climáticas áridas. Se adoptó un enfoque de Evaluación del Ciclo de Vida (LCA) para analizar los sistemas instalados en un instituto educativo en Qatar. Se evaluaron dos sistemas: uno basado en fieltro con varias capas, y otro con jardineras fabricadas con módulos de polietileno de alta densidad (HDPE). El estudio abarcó las fases de producción, construcción, uso, mantenimiento y eliminación durante un periodo de 10 años. El sistema basado en fieltro utilizó capas de polipropileno, poliamida y polietileno como sustrato, soportadas por una lámina de PVC. El sistema con jardineras estaba compuesto por módulos de HDPE. La comparación de ambos sistemas reveló patrones de impacto ambiental casi similares durante la vida útil de 10 años, considerando todas las etapas del ciclo de vida. La fase de eliminación tuvo un impacto insignificante (<0,7% en todas las categorías) en comparación con las fases de producción, uso y mantenimiento. El consumo eléctrico en la operación de los sistemas de fachadas verdes fue responsable de importantes impactos ambientales, especialmente en las categorías de cambio climático y acidificación terrestre. Para abordar esto, se exploró el uso de un

porcentaje de electricidad proveniente de energía solar térmica para reducir las cargas ambientales. La incorporación de un 15 % y 25 % de energía solar para el sistema basado en fieltro mostró una reducción prometedora de los impactos en esas dos categorías, aunque con un aumento en otras categorías de evaluación del ciclo de vida.

**Reyhani et al. (2022)** evaluaron el desempeño ambiental de dos tipos de fachadas verdes en un enfoque de ciclo de vida, considerando la energía incorporada, las emanaciones de gases de efecto invernadero, los materiales, el consumo de electricidad y el carbono incorporado. Recopilaron datos de inventario relacionados con todos los componentes y procesos de cada sistema. Los resultados indicaron que el sistema de fieltro mostró el mayor impacto general, destacando la influencia significativa de los fertilizantes y los componentes de aluminio en este resultado. Para el sistema a base de plástico, el polipropileno utilizado en la producción de paneles, el agua utilizada para el riego de las plantas y la composición de la tierra para macetas fueron los principales contribuyentes al impacto ambiental.

**Kumar et al. (2023)** analizaron el potencial de aislamiento de la fibra de coco y una fachada verde para mitigar la adición de calor en una habitación en climas cálidos y húmedos, específicamente en la costa sur de la India. Se evaluaron diversas opciones de aislamiento, incluyendo esteras de coco seco, esteras de coco húmedo, fachada verde y una combinación de estera de coco con fachada verde, construyendo muros en dos cubículos de ensayo. Los resultados indicaron que la estera de fibra de coco seca presentó un potencial de mitigación de calor del 41.45 %, mientras que la estera de fibra de coco húmeda mostró un 36.3 %. Además, la fachada verde sola demostró un aumento significativo del 40.3 % en el potencial de mitigación de calor. Notablemente, al combinar la fachada verde con la estera de fibra de coco, se logró un efecto sinérgico, mejorando aún más la capacidad de mitigación de calor (24.47 %) al reducir la adición de calor a la pared y rechazar el calor al ambiente debido a la naturaleza porosa de la estera de coco.

**Nagdeve et al. (2023)** realizaron un estudio en tiempo real para estimar el efecto de los sistemas de fachada verde indirecta aplicados a una fachada acristalada para evaluar el confort térmico en la India. Se analizaron dos escenarios: una fachada de referencia sin fachada verde y otro con fachada verde, en diferentes orientaciones. En la orientación sureste la temperatura de la cubierta acristalada fue hasta 8.1 °C más bajas, en específico entre las

14:00 a las 18:00 h. No obstante, aunque la fachada verde contribuyó a reducir las temperaturas del edificio, también elevó la humedad relativa, lo que creó un ambiente térmico interior incómodo. Bajo condiciones de clima BSh, el espesor óptimo para instalar una fachada verde es a 15 cm de la pared acristalada.

**Ramadhan et al. (2023)** estudiaron el impacto en la refrigeración de tres tipos de fachadas verdes en Egipto utilizando el software de simulación DesignBuilder. Para estimar las tasas de consumo energético del edificio del caso base (sin fachada verde), se utilizó el programa de simulación DesignBuilder junto con el motor EnergyPlus. Los resultados mostraron que la fachada verde disminuye el consumo eléctrico, aumenta el confort térmico y reduce la emisión de dióxido de carbono hasta en 75 %.

**Su & Hsu (2023)** examinaron cómo diferentes proporciones de fachadas y cubiertas verdes afectan el medio ambiente, utilizando como referencia edificios de gran altura en una ciudad ideal. Emplearon el software FLUENT para simular las condiciones climáticas medias de la estación de Taipéi durante los últimos diez años. Dado que el edificio real cuenta con aberturas que no permiten alcanzar el 100% de cobertura vegetal vertical, la cobertura se calcula en función de la proporción entre la superficie de cobertura verde y la superficie de paredes desnudas y cubiertas de tejado. Se consideraron cuatro opciones: el caso 1 sin ajardinamiento, el caso 2 (pared verde 25% + cubierta verde 75%), el caso 3 (pared verde 50% + cubierta verde 50%) y el caso 4 (pared verde 75% + cubierta verde 25%). Los resultados mostraron que la instalación de vegetación en las paredes reduce la velocidad del viento y la temperatura ambiente cuando la proporción de ajardinamiento se encuentra entre 50 – 75 % para paredes y 25 – 50 % para techos.

**Cojocariu et al. (2024)** analizaron la progresión y desarrollo de dos variedades de *Ipomoea batatas* (Margarita y Blackie) cultivadas en sistemas verticales, con el fin de proporcionar directrices para su uso en el diseño de fachadas verdes. Durante la temporada de crecimiento, se analizaron tres parámetros biométricos (diámetro, altura y recuento de hojas), la transpiración (tasa de deshidratación) y el proceso de fotosíntesis (contenido de pigmentos fotosintéticos) para las variantes tratadas y de control, en cuatro orientaciones cardinales. Los resultados mostraron que, en relación con el control y la orientación oeste, la orientación norte y el tratamiento parecían ser las opciones más adecuadas para las dos

variedades analizadas. Además, se observó que el contenido de sustancias orgánicas fue más intenso en la variedad 'Blackie' tratada con Cropmax, especialmente en la fachada norte, con las mayores cantidades de clorofila a (17.1%), clorofila b (9.1%) y pigmentos carotenoides (7.5%). Por otro lado, la tasa de deshidratación de la hoja y la cantidad de pérdida de agua libre se redujeron en la fachada norte de 'Blackie'. En conclusión, 'Blackie' se recomienda como una variedad que se distingue por su mayor resistencia a condiciones ambientales difíciles, especialmente la sequía.

**Convertino et al. (2024)** investigaron la influencia de una fachada verde durante las noches de invierno en una zona mediterránea. Los efectos sobre el microclima y la transferencia de calor se evaluaron a partir de datos experimentales. Estos datos se utilizaron para calcular la transferencia de calor radiativa y convectiva mediante fórmulas disponibles en la literatura. Se compararon los comportamientos de la fachada verde y de una pared descubierta. La vegetación permitió mantener la velocidad del aire cerca de la pared por debajo de  $0.9 \text{ ms}^{-1}$ . La superficie exterior de la pared cubierta y el aire cercano registraron un calentamiento de hasta  $3.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $3.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Los muros perdieron energía radiativa y convectiva, pero en el caso de la fachada verde estas pérdidas fueron un 60 % y un 38 % menores, respectivamente. Al actuar como barrera térmica y contra el viento, la fachada verde redujo las pérdidas globales de calor en 57 %, lo que mejoró el rendimiento de la envolvente del edificio.

**Hadba et al., (2024)** exploraron el uso de vegetación para satisfacer las necesidades de los edificios, en particular el confort térmico exterior, la demanda de agua y el fomento de la sostenibilidad, proponiendo un nuevo sistema arquitectónico de muro verde-azul. El estudio se dividió en dos secciones: en la primera se explican las fachadas verdes, haciendo referencia a su efecto en el entorno urbano, incluido el confort térmico, la absorción de la contaminación, la contaminación acústica y el bienestar, así como los tipos de plantas que se pueden aplicar en las fachadas verdes; la segunda parte se centra en un colector de agua de niebla como sistema de riego para fachadas verdes, analizando sus componentes, estructura y tejido, para identificar sus márgenes de desarrollo en la industria de construcción. Las iniciativas de captación de niebla se centran predominantemente en las regiones rurales para atender las demandas agrícolas. No obstante, los autores concluyeron que limitar la captación

de niebla a los entornos agrícolas se considera insuficiente, ya que representa una solución crucial para abordar los retos hídricos en entornos urbanos específicos.

**Lotfi & Hassan (2024)** realizaron una simulación medioambiental de la implantación de cubiertas y fachadas verdes como estrategia ecológica aplicada a la envolvente de los edificios, teniendo en cuenta la relación ventana-pared (WWR) para contribuir a mejorar el ahorro energético y el confort térmico del entorno construido. Se seleccionaron datos climáticos de zonas áridas y calurosas por sus recientes desafíos medioambientales, y el diseño de la envolvente del edificio. Los casos planteados en este trabajo se simularon utilizando el software DesignBuilder. La optimización multi-objetivo mostró un impacto positivo al implementar una cubierta verde en un edificio ubicado en un clima árido cálido, en comparación con la aplicación de una fachada verde. Este hallazgo subraya la importancia de utilizar muros verdes para fomentar el desarrollo sostenible, tanto desde el punto de vista ambiental como económico, en entornos áridos.

### **1.3.3. Estudios teóricos – experimentales**

En esta sección se presentan estudios que combinan los enfoques teóricos y experimentales para profundizar en la comprensión y evaluación de las fachadas verdes. Estos estudios implican la formulación de modelos teóricos basados en principios científicos y luego validar estos modelos mediante experimentos en entornos controlados o reales. Además, se realizan análisis comparativos entre los resultados teóricos y experimentales para identificar posibles discrepancias o áreas de mejora en la comprensión de los sistemas de fachadas verdes. Esta subsección busca integrar el conocimiento teórico con la evidencia empírica para proporcionar una comprensión más completa y sólida de los aspectos técnicos, ambientales y funcionales de los sistemas de fachadas verdes.

**Wong et al. (2009)** llevaron a cabo una simulación para investigar el impacto de los sistemas de vegetación vertical en la temperatura y el consumo de energía de edificios en Singapur. Utilizando el software de simulación TAS, se realizaron comparaciones entre tres escenarios en un edificio hipotético de 10 pisos. El escenario A involucró el edificio con paredes opacas, sin vegetación y con vegetación en posición vertical. El escenario B presentó un edificio con siete ventanas en cada fachada y nivel, mientras que el escenario C tenía una

fachada completamente de vidrio transparente. Se evaluaron dos parámetros: la temperatura radiante media interior (TRM) a media altura del quinto nivel y la carga energética de refrigeración de todo el edificio. Los resultados indicaron una correlación lineal entre el coeficiente de sombra y el índice de área foliar; un coeficiente de sombra bajo proporciona un mejor aislamiento térmico. Con una cobertura del 50 % en los sistemas de vegetación vertical y un coeficiente de sombreado de 0.041, se logró reducir el valor de la transferencia térmica envolvente (ETTV) en un 40.68 % en un edificio con fachada de vidrio.

**Tudiwer et al. (2019)** analizaron los puentes térmicos en una fachada verde mediante la instalación de dos sistemas de paredes vivas en tres tipos de fachada diferentes. Uno de los sistemas fue aislado térmicamente, mientras que los otros dos no contaban con aislamiento. Durante más de dos años, se realizaron mediciones del coeficiente global de transferencia de calor,  $U$ , para calcular los coeficientes de pérdida de puente térmico puntual de las fijaciones de los elementos de fachada de cortina verde. Los resultados muestran que el impacto de los puentes térmicos está influenciado por dos parámetros principales: los dispositivos de fijación y la propia fachada.

**Ávila – Hernández (2019)** realizaron un análisis experimental para evaluar el impacto de una cubierta verde en la temperatura de un módulo experimental en un entorno de clima cálido. Asimismo, se examinó el comportamiento térmico y energético de dos viviendas de interés social: una con una cubierta tradicional de concreto y otra con un sistema de cubierta verde. La predicción del comportamiento térmico-energético durante un año de modelación se realizó mediante simulaciones con los programas EnergyPlus y DesignBuilder. Los resultados revelaron que la implementación de la cubierta verde logró reducir la temperatura en promedio anual en 1.6 y 2.3 °C para la vivienda de referencia y la vivienda particular, respectivamente. Esta disminución fue más notable durante los meses cálidos, especialmente en abril, mayo y junio. En cuanto a las cargas térmicas, la vivienda de referencia presentó mayores demandas de enfriamiento en comparación con la vivienda particular, debido a sus dimensiones y configuración. Sin embargo, se observó una disminución del 65 % en las cargas térmicas para la vivienda de referencia y del 69 % para la vivienda particular.

**Andric et al. (2020)** evaluaron el potencial de las cubiertas y fachadas verdes como una medida de mitigación para contrarrestar el incremento del consumo energético en edificaciones, en el contexto climático extremadamente cálido de Qatar. Los datos meteorológicos para la ubicación del estudio se proyectaron utilizando la herramienta CCWorldWeatherGen, que emplea un enfoque de reducción de escala de transformación estadística y aplica algoritmos de transformación a valores por hora, basándose en las tendencias mensuales y las variaciones de los resultados de modelos climáticos globales. Los resultados del modelado climático indican un aumento futuro en la frecuencia de olas de calor, con temperaturas máximas más altas, lo que se traduciría en un aumento del 9%, 17%, y 30% en el consumo anual de energía de los edificios en 2020, 2050 y 2080, respectivamente. Además, señalan la importancia de considerar el impacto ambiental específico de Qatar en el mantenimiento de cubiertas y fachadas verdes. A pesar de estos desafíos, los autores concluyen que los efectos positivos del soporte verde, como la mejora de la condición del aire, la reducción del efecto isla de calor y los beneficios para la salud de los habitantes, deben tenerse en cuenta en la evaluación general. Este enfoque holístico destaca la importancia de considerar no solo el consumo de energía sino también los beneficios ambientales y de salud al implementar soluciones de infraestructura verde en entornos urbanos afectados por el calentamiento global.

**Shafiee et al. (2020)** analizaron el impacto de una fachada verde compuesta por paneles en la temperatura del aire ambiente y la capacidad para mitigar las fluctuaciones térmicas diurnas y nocturnas en Shiraz, Irán. En el experimento, se aplicó una fachada verde al cuerpo de una cámara controlable, y se utilizaron dos registradores de datos de temperatura y humedad. Se realizaron dos experimentos; el primero comparó tres tipos de paredes durante tres días consecutivos, incluyendo una pared sin plantas, una pared con paneles y una fachada verde. En el segundo experimento, se colocaron dispositivos, uno junto a la fachada verde y otro en una parte de la pared descubierta, bajo las mismas condiciones. Los resultados obtenidos se validaron mediante simulaciones realizadas en el programa ENVI-met. Los resultados revelaron que el sistema de fachadas verdes compuestas por paneles logró reducir la temperatura del aire ambiente hasta 8.7 °C. Específicamente, durante las horas de radiación solar, se observó una disminución promedio de 2.5 °C.

**Daemei et al. (2021)** examinaron el rendimiento térmico de una fachada verde en comparación con una pared descubierta en la fachada norte de un inmueble residencial de dos pisos en la ciudad de Rasht, Irán. Dado el clima húmedo de la región, con fluctuaciones diurnas de temperatura mínimas durante el verano debido a altos niveles de humedad, este estudio aborda la capacidad de la fachada verde para mitigar estos efectos. Para la adquisición de datos en tiempo real, se utilizaron medidores de datos de temperatura y humedad, y se modeló el edificio en EnergyPlus con fines de validación. Los resultados experimentales demostraron que la fachada verde redujo la temperatura interior en un 9 % y disminuyó la humedad relativa en un 32 %. Además, se empleó el software ENVI-met para estimar el impacto de la fachada verde en el ambiente circundante, revelando que la temperatura frente a la fachada verde era ligeramente menor que en la parte de la pared sin vegetación, con una reducción máxima de 0.36 °C.

**De Lucia et al. (2021)** evaluaron la eficiencia térmica de dos fachadas verdes que emplean un sustrato alternativo compuesto por suelo franco y cascarilla de arroz. La evaluación se dividió en dos etapas; en la primera etapa, se llevaron a cabo experimentos de campo con tres especies de plantas (Clorofito, Dieffenbachia y Spathiphyllum) para evaluar la eficacia de estos sustratos en el cultivo de plantas. La eficacia se determinó mediante la medición de la concentración de clorofila, la determinación del índice de crecimiento de las plantas y una observación cualitativa del desarrollo radicular. En la segunda etapa, se diseñaron y probaron dos fachadas verdes con diferentes sustratos y plantas desde la perspectiva del confort térmico, utilizando el software TerMus-G. Después de obtener la transmitancia térmica como salida para cada módulo de fachada verde, se calcularon el flujo de calor y la variación relativa, comparándolos con las paredes de soporte interiores. Los resultados mostraron que el uso de cascarilla de arroz mezclada con suelo franco como sustrato proporciona un rendimiento superior en términos de confort térmico y tasa de crecimiento de las plantas en relación con la arcilla expandida. Además, el sustrato utilizado no solo mejora el rendimiento de las estructuras verdes verticales, sino que también contribuye a reducir los costos y la huella ecológica asociada.

**Karimi et al. (2022)** analizaron la disminución del consumo energético a través de fachadas verdes en un edificio educativo ubicado en Gorgan. El enfoque se centró en simular

los efectos de dos métodos de construcción de fachadas verdes utilizando tres especies de plantas diferentes (*Sedum*, *Parthenocissus tricuspidata*, *Hedera helix*). Para llevar a cabo la investigación, se recopilaron datos térmicos de un edificio con una fachada verde directa que compartía el mismo clima que la muestra experimental. Estos datos se utilizaron en simulaciones para evaluar los impactos térmicos de las fachadas verdes en comparación con edificios sin cubierta verde. Los resultados indicaron que la presencia de fachadas verdes contribuye al aumento del calor latente del edificio, generando menos calor en el entorno circundante en comparación con los edificios sin cobertura verde. Además, la transmitancia térmica de la pared se redujo en los edificios con fachada verde, ya que estos incorporan más capas de material en comparación con los edificios con fachadas verdes directas. Se destacó que las fachadas verdes tuvieron un efecto más eficiente en los edificios con formas simples y un número limitado de espacios interiores. Los resultados indican que el efecto del empleo de fachadas verdes con especies vegetales puede fluctuar dependiendo de las características particulares de cada edificio.

**Zhang et al. (2022)** examinaron la disparidad de temperatura entre las superficies externa e interna, así como la temperatura del aire ambiente en paredes con y sin fachada verde (VGF). Es estudio se llevó a cabo en Guangzhou, una ciudad típica del sur de China con veranos cálidos e inviernos suaves. Se empleó el programa de simulación EnergyPlus para evaluar los impactos de un VGF en la carga de refrigeración y calefacción de un edificio. Los resultados revelaron que la presencia de VGF redujo la carga de enfriamiento de la habitación en un rango del 11.7 % al 18.4 %, dependiendo de la orientación de la habitación y las condiciones meteorológicas. Específicamente, las fachadas orientadas al oeste mostraron los máximos efectos de enfriamiento durante el verano en comparación con otras orientaciones. Además, se observó que mejorar el aislamiento de las paredes condujo a una reducción adicional del 0.3 % al 8.4 % en la carga de refrigeración de la habitación.

**Solano – Maya (2022)** investigó teórica y experimentalmente el rendimiento térmico de un techo verde ventilado. El autor llevó a cabo simulaciones del comportamiento térmico utilizando DesignBuilder en un módulo de prueba y una vivienda de interés social, tanto con techo verde ventilado como sin él. El análisis térmico de la vivienda abarcó un año típico en Cuernavaca, Morelos. Los resultados indicaron que la incorporación del techo verde

ventilado condujo a una disminución del 47 % en la carga anual de enfriamiento en comparación con una vivienda que cuenta con una losa de concreto convencional. Además, se observó una reducción del 24 % en la ganancia térmica anual.

**Thomas et al. (2023)** evaluaron la efectividad de las fachadas verdes en diferentes estaciones en un campus académico ubicado en un clima tropical húmedo. Para este propósito, utilizaron el modelo ENVI-met para simular la modificación del microclima urbano en diversas superficies subyacentes, que incluyeron asfalto (ASP), tejas entrelazadas (ILT), tejas entrelazadas con cubierta vegetal (ITLV) y terreno abierto (OG). Los resultados señalaron que la temperatura del aire sobre la superficie del ITLV exhibió temperaturas comparativamente más bajas en relación con otros sustratos tanto en las temporadas de invierno ( $0.2 - 1.4$  °C) como en las de verano ( $0.1 - 0.5$  °C). Estos descubrimientos sugieren que la integración de fachadas verdes puede contribuir a disminuir la temperatura del aire ambiente, logrando reducciones de hasta  $1.4$  °C en invierno y  $0.5$  °C en verano. A pesar de resaltar el potencial positivo de las fachadas verdes para mitigar la temperatura en climas tropicales húmedos, el estudio señala preocupaciones específicas sobre la elección de especies de plantas en regiones con estacionalidad significativa.

**Lin et al. (2024)** realizaron una investigación detallada sobre diversas estrategias de ecologización (copas de los árboles, fachadas verdes, cubiertas verdes y sus combinaciones) en un barrio residencial de la Universidad de Guangzhou, empleando mediciones in situ y simulaciones numéricas con el modelo ENVI-met. Utilizaron la temperatura fisiológicamente equivalente (PET) y el índice de temperatura y humedad (THI) para evaluar el confort térmico exterior. Los resultados destacaron que la plantación de árboles tuvo un impacto más significativo en la mejora del ambiente térmico exterior que las fachadas y cubiertas verdes. Este efecto se intensificó con la anchura de la copa de los árboles, logrando una reducción potencial máxima de  $4.8$  °C ( $0.2$  °C) en la PET (THI). Las fachadas verdes pueden contribuir a un cambio de hasta  $101.9$  Wm<sup>-2</sup> en el flujo de calor sensible, lo que se traduce en una reducción de hasta  $1.8$  °C en la temperatura del aire interior. Por otro lado, las cubiertas verdes compuestas de césped mostraron efectos mínimos tanto en el exterior como en el interior. Finalmente, se ofrecen recomendaciones para la construcción y renovación de proyectos en zonas residenciales, con especial atención a las zonas cálidas y húmedas.

En conclusión, el análisis de la literatura indica que las investigaciones sobre eficiencia energética en edificaciones han abordado diversas aproximaciones, tanto teóricas como experimentales, y en algunos casos, han combinado ambas perspectivas. Un enfoque destacado ha sido el estudio de las fachadas verdes, que, además de proporcionar sombreado, han demostrado ofrecer efectos refrescantes mediante la transpiración de las plantas. Los resultados teóricos y experimentales respaldan la idea de que estas fachadas mejoran el confort térmico en viviendas, destacando su potencial en la gestión de la temperatura interna.

Se ha subrayado la necesidad de investigaciones adicionales que exploren la sinergia entre las fachadas verdes y otros materiales de construcción, sugiriendo que esta integración podría potenciar aún más su eficacia. EnergyPlus emerge como la herramienta principal para la simulación de fachadas verdes, evidenciando la importancia de la modelación para comprender y prever su desempeño. Por otro lado, la preferencia por experimentos a escala de modelos de fachadas verdes sugiere una tendencia hacia la investigación práctica, permitiendo resultados más aplicables y específicos. Los parámetros clave considerados en estos estudios incluyen temperaturas superficiales, velocidad del viento, temperatura ambiente y humedad relativa, revelando un enfoque integral en el análisis del rendimiento de las fachadas verdes.

Un hallazgo significativo es la capacidad de las fachadas verdes para reducir la temperatura del aire interior hasta en 5 °C durante las horas pico, subrayando su capacidad para mitigar el calor en climas cálidos. Además, se destaca que las fachadas verdes verticales pueden prevenir el sobrecalentamiento de la envolvente del edificio al interceptar la radiación solar y disminuir la temperatura de la superficie externa. Además, en la comparación entre paredes vivas y fachadas verdes, se evidencia una preferencia por estas últimas debido a su composición más simple, facilidad de instalación y mantenimiento, así como una inversión inicial y costos operativos más bajos. En consecuencia, las fachadas verdes generan menor carga ambiental y ofrecen un rendimiento más rentable en comparación con las paredes vivas.

En este estudio, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva del impacto de las fachadas verdes en el confort térmico de edificaciones en condiciones de clima cálido, específicamente en el contexto mexicano. Las fachadas verdes han surgido como una solución prometedora para mitigar los efectos del calor en las construcciones, gracias a su capacidad para actuar

como aislantes térmicos naturales. Sin embargo, su efectividad precisa en entornos específicos como el clima cálido de México aún no se ha explorado completamente.

Para abordar esta cuestión, se llevó a cabo una combinación de experimentación y simulación energética utilizando el software DesignBuilder. Esta herramienta, aunque eficaz, presentó limitaciones al no incluir directamente la vegetación en sus funciones. Para superar esta restricción, se desarrolló una metodología para integrar la influencia de la fachada verde mediante la introducción de una resistencia térmica equivalente basada en datos experimentales.

El propósito fundamental de este estudio fue comprender cómo la implementación de fachadas verdes podría influir en el confort térmico en edificaciones en climas cálidos como el de México. Esto se enmarca en un interés más amplio en promover soluciones sustentables en el sector de la construcción, buscando mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental de los edificios.

Además de la evaluación del confort térmico, también se analizó el impacto potencial de las fachadas verdes en el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono relacionadas con sistemas de climatización, como el aire acondicionado. Estos aspectos son cruciales para comprender el beneficio integral que estas soluciones pueden ofrecer en términos de sostenibilidad y eficiencia energética.

## **1.4. Objetivos**

Los objetivos de este trabajo se enlistan a continuación:

### **1.4.1. Objetivo general**

Estudiar el comportamiento térmico en evolución libre de una fachada verde en una vivienda.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

Determinar las propiedades de una fachada verde con base en datos experimentales y la simulación de dos módulos de prueba con y sin fachada verde.

Simular el comportamiento térmico en evolución libre de una vivienda residencial con y sin fachada verde.

## **1.5. Alcances**

Simular los módulos de prueba con y sin fachada verde durante 15 días fríos y 15 días cálidos, para determinar las propiedades de la fachada verde.

Simular la vivienda residencial de la NOM-020-ENER-2011 con y sin fachada verde en evolución libre, para datos de clima de un año típico en la Ciudad de Cuernavaca, Morelos. Utilizando DesignBuilder y EnergyPlus.

Analizar el comportamiento térmico de la vivienda con fachada verde, colocada sobre la pared sur con vistas al acceso principal, sin tomar en cuenta el efecto de sombra de las viviendas a los costados en la dirección este – oeste, es decir, el efecto de la fachada verde sobre el confort térmico no toma en cuenta el efecto de las obstrucciones circundantes.

## **1.6. Estructura de la tesis**

En el capítulo 2, se abordan los conceptos asociados a la transferencia de calor, así como los antecedentes de las fachadas verdes y su clasificación. Se detalla la elección de la especie vegetal *Pyrostegia venusta*, respaldada por la revisión de la literatura y considerando factores clave como la exposición solar en la ubicación del prototipo de fachada verde. Además, se justifica la elección basándose en la disponibilidad local de estas plantas, su facilidad de adquisición en la región, así como en las consideraciones prácticas relacionadas con el riego y la recopilación de datos. Posteriormente, en el capítulo 3, se describen las características del software a utilizar, así como la descripción del modelo matemático que permite representar con precisión el comportamiento físico de la fachada verde. Además, se valida la eficacia del software de simulación mediante un BESTEST, ofreciendo una corroboración sólida de su capacidad para reflejar con precisión las condiciones de la vida real. Este enfoque asegura la fiabilidad de los resultados obtenidos y respalda la utilidad de las simulaciones en la toma de decisiones relativas al diseño y rendimiento de las fachadas verdes en entornos edificados. En el cuarto capítulo, se expone la instrumentación llevada a cabo en los módulos de prueba, describiendo en detalle los sensores empleados y sus ubicaciones respectivas. Concluyendo, se aborda la validación de las simulaciones, incluyendo escenarios tanto con fachada verde como sin ella. En este proceso, se contrastan los datos experimentales con los resultados simulados, proporcionando así la confirmación de los parámetros necesarios para simular adecuadamente una vivienda con fachada verde. En el capítulo 5, se presenta la

descripción de la edificación utilizada: la vivienda base, la cual se extrajo de la NOM-020. Se detallan las zonas térmicas de la vivienda, junto con los criterios de simulación asociados. Finalmente, en el capítulo 6, se exponen los resultados de la simulación energética para un año típico para la vivienda base en la Ciudad de Cuernavaca, Morelos. Se analiza el comportamiento de la pared orientada al sur de la vivienda, tanto con fachada verde como sin ella, en condiciones de evolución libre.

---

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

En este capítulo, se abordan los fundamentos esenciales de la transferencia de calor, estableciendo la base conceptual necesaria para comprender los mecanismos térmicos inherentes a las fachadas verdes. Se exploran los principios clave que rigen la transferencia de calor en el contexto de edificaciones, destacando su relevancia en el diseño de sistemas eficientes y sostenibles. Además, se profundiza en el concepto de fachadas verdes, resaltando su distinción respecto a las paredes vivas y evidenciando las características que las convierten en una alternativa destacada para mejorar el rendimiento térmico de las estructuras arquitectónicas. Se discute la clasificación de las fachadas verdes, considerando las diversas tipologías existentes y sus aplicaciones específicas. Asimismo, se exploran conceptos relacionados, proporcionando una visión integral de estos sistemas y sentando las bases teóricas necesarias para la comprensión detallada de su funcionamiento y beneficios

## 2.Marco teórico

### 2.1. Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de energía térmica es un proceso recurrente en sistemas que involucra un intercambio de calor con su entorno. De acuerdo con los principios fundamentales de la termodinámica, este fenómeno se manifiesta cuando existen disparidades de temperatura entre el sistema y sus alrededores. En conformidad con esta ley, el calor fluye naturalmente desde regiones de mayor temperatura hacia aquellas de menor temperatura. Este intercambio de energía térmica se lleva a cabo mediante tres mecanismos distintos: conducción, convección y radiación, los cuales definen cómo se transfiere la energía térmica en diversos contextos.

#### 2.1.1. Conducción

La conducción de calor es un fenómeno que ocurre en sólidos, líquidos y gases, donde se transfiere energía térmica mediante el movimiento de electrones y la vibración de átomos en un material. Durante este proceso, la energía térmica se desplaza de partícula a partícula a lo largo del material, sin que haya un movimiento macroscópico del material en sí, moviéndose desde zonas de mayor temperatura hacia zonas de menor temperatura. La velocidad de conducción de calor está influenciada por la conductividad térmica del material y la diferencia de temperatura a lo largo de la dirección de transferencia. Este fenómeno puede ser modelado matemáticamente mediante la ley de Fourier, que establece la relación entre la tasa de transferencia de calor, el área de sección transversal y el gradiente de temperatura [Incropera, 1999].

$$q_{cond} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

En este contexto, el flujo de calor por conducción, simbolizado por  $q_{cond}$ , se produce debido a un gradiente de temperatura  $\frac{dT}{dx}$ , moviéndose desde la región de mayor temperatura

hacia la de menor temperatura. La conductividad térmica del material, identificada como  $\lambda$ , representa la capacidad de la sustancia para conducir calor. Se define como la cantidad de calor que atraviesa un material en un segundo, a lo largo de un metro de espesor, cuando existe una diferencia de temperatura de un grado Kelvin entre sus superficies.

Es importante tener en cuenta que la Ley de Fourier es una relación empírica desarrollada a partir de observaciones experimentales, y aunque proporciona un marco útil para entender el fenómeno de la conducción de calor, no tiene un fundamento matemático sólido

Tabla 2.1. Conductividad térmica de materiales de construcción típicos en México.

Elemento	Material	$\lambda, \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Muros	Yeso	0.372
	Block hueco	0.510
	Concreto	1.740
Techo	Pintura	0.037
	Impermeabilizante	0.17
	Yeso	0.372
Acabados	Azulejo	1.136
	Revestimiento de madera	0.140

### 2.1.2. Convección

La convección de calor es un mecanismo de transferencia de energía térmica que ocurre principalmente entre un sólido y un fluido, e implica el desplazamiento macroscópico de las partículas del fluido. Este proceso se produce cuando una región del fluido se calienta, las partículas se vuelven más energéticas, disminuyendo su densidad y generando una corriente ascendente. Al mismo tiempo, en la región más fría, las partículas se enfrían, aumentando su densidad y generando una corriente descendente. Este ciclo de corrientes ascendentes y descendentes establece un flujo de calor a través del fluido, participando activamente en la distribución y transferencia de energía térmica en el sistema. La Ley de Enfriamiento de Newton, Ec. (2.2) establece la relación entre la tasa del flujo de calor convectivo y la diferencia de temperaturas entre el fluido circundante y la superficie del objeto, todo ello multiplicado por un coeficiente convectivo. En su forma general, se expresa como: "La tasa de cambio de calor con respecto al tiempo es igual al producto del coeficiente

de transferencia de calor por convección, el área de transferencia de calor y la diferencia de temperaturas entre la superficie del objeto y el fluido circundante". Esta relación describe cómo la tasa de cambio de calor del objeto se ve afectada por la diferencia de temperatura entre el objeto y su entorno, multiplicado por el coeficiente convectivo y el área de transferencia de calor. [Incropera, 1999].

$$q_{conv} = h_{conv}A(T_s - T_{\infty}) \quad (2.2)$$

Existen tres tipos principales de convección térmica, cada uno con sus propias características y modelos matemáticos asociados:

- Convección Natural (o libre): surge por variaciones de densidad generadas a causa de gradientes de temperatura en el fluido y no depende de la necesidad de dispositivos externos para provocar el movimiento de este.
- Convección Forzada: ocurre cuando un fluido es movido por una fuerza externa, como un ventilador o una bomba, generando un flujo forzado a través de una superficie.
- Convección Mixta: combina elementos de la convección natural y forzada, siendo común en situaciones donde ambas contribuciones son significativas.

Las ecuaciones de Navier-Stokes se utilizan para describir el movimiento o dinámica del fluido, y la transferencia de calor se modela mediante la ecuación de conservación de la energía. Las formulaciones matemáticas para estos tipos de convección involucran ecuaciones diferenciales parciales que detallan la variación en el espacio y el tiempo de variables cruciales, tales como velocidad y temperatura, en el fluido. Estas representaciones son fundamentales para la comprensión y la anticipación de los fenómenos de transferencia de calor vinculados a la convección térmica en distintas aplicaciones.

### 2.1.3. Radiación

La radiación térmica se presenta como un método de transferencia de energía en el cual el calor se transmite mediante ondas electromagnéticas en la región del infrarrojo sin requerir un medio material para su propagación. En contraste con la conducción y la convección, la radiación puede tener lugar incluso en el vacío y no está condicionada por la presencia de un material conductor. Los cuerpos emiten radiación térmica conforme a su temperatura y propiedades radiativas [Incropera, 1999].

- Radiación Superficial: ocurre entre superficies sólidas que intercambian energía radiante.
- Radiación No Superficial: involucra intercambio radiante entre superficies y medios. La emisividad y la transmitancia son consideraciones clave.
- Radiación con Medio Participante: se produce en presencia de un medio que puede absorber y reemitir radiación. La ecuación de transferencia radiativa describe este fenómeno.

## **2.2. Sistemas de vegetación vertical (VGS)**

La implementación de sistemas de vegetación vertical (VGS por las siglas en inglés) ha despertado un creciente interés en los últimos años. Este término se refiere al crecimiento de plantas en superficies verticales, ya sea de manera natural o mediante intervención urbana. Los VGS ofrecen una serie de beneficios tanto a nivel económico, ecológico y social. La clasificación de los VGS se divide generalmente en sistemas extensivos y sistemas intensivos, dependiendo de los requisitos de costo de implementación y mantenimiento. Estos sistemas se subdividen en dos grupos principales: fachadas verdes o jardines verticales, y paredes verdes o paredes vivas [Pérez et al., 2014].

### **2.2.1. Clasificación y definición**

Dada la evolución reciente en la tecnología de paredes verdes, es crucial identificar y clasificar todos los sistemas existentes, considerando sus técnicas de construcción y características principales [Manso et al., 2015]. Los autores emplean diferentes términos para referirse a estos sistemas, como “jardín vertical”, “sistemas verdes verticales” [Perini et al., 2011a], o “sistemas de vegetación vertical (VGS)” [Wong et al., 2010]. Al hablar de fachadas verdes directas o indirectas, Ottelé et al. (2011) y Perini et al. (2011b) utilizan los términos “sistemas ecológicos directos” y “sistemas ecológicos indirectos”, respectivamente.

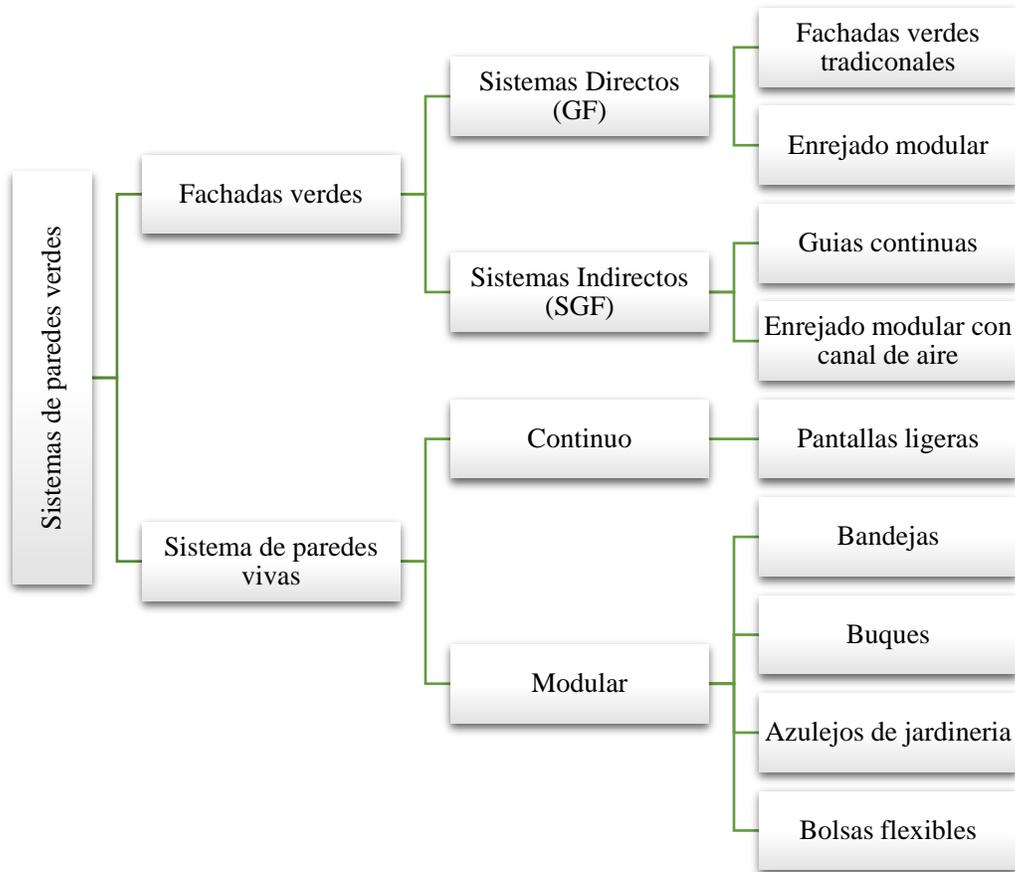


Figura 2.1. Clasificación de los sistemas de paredes verdes de acuerdo con sus características, Manso et al. (2015).

El término de "paredes verdes" engloba todos los sistemas que posibilitan la vegetación de una superficie vertical, incluyendo fachadas, muros, tabiques, entre otros, mediante la elección de especies vegetales. Esto incluye todas las soluciones para cultivar plantas sobre, arriba o dentro de la pared de un edificio [Newton et al., 2007]. Como se muestra en la Figura 2.1, las paredes verdes se dividen en dos sistemas principales: fachadas verdes y sistema de paredes vivas [Köhler y Dunnett, 2008]. Las fachadas verdes suelen tener plantas trepadoras a lo largo del muro que las cubre, mientras que las paredes vivas, un concepto más reciente, incluyen los materiales y la tecnología necesarios para soportar una variedad más amplia de plantas, creando un crecimiento uniforme a lo largo de la superficie.

### 2.2.2. Fachadas verdes

Las fachadas verdes implican la utilización de plantas trepadoras o colgantes que se adhieren directamente a la pared o mediante el respaldo de un sistema de soporte a lo largo de la misma. En estos sistemas, las plantas pueden desarrollarse de manera natural cubriendo las paredes, extendiéndose hacia abajo o hacia arriba de la superficie vertical. La efectividad de este de pared verde depende de la elección adecuada de las plantas. Aquellas que conservan su verdor durante todo el año, denominadas vegetación perenne, tienden a ser más apropiadas para mantener la integridad y el aspecto visual de la pared verde durante las estaciones invernales [Perini et al., 2011b]. Las clasificaciones adicionales de las paredes verdes incluyen las categorías directas e indirectas, ilustradas en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Diagrama esquemático y aplicación de las fachadas verdes directas e indirectas, Abdo et al. (2021) y Coma et al. (2017).

### 2.2.3. Paredes vivas

Las paredes vivas pueden ser clasificadas en dos categorías principales: modulares y continuas. La tipología de paredes vivas varía en función del método de aplicación seleccionado. En el caso de las paredes vivas continuas, se emplean pantallas permeables como espuma o capas de fieltro, las cuales actúan como sustrato para la inserción individual de las plantas. Estas paredes no cuentan con sustrato de suelo y han demostrado cierta susceptibilidad a la obstrucción, lo que reduce su preferencia en determinados diseños de tratamiento de aguas residuales [Prodanovic et al., 2018].

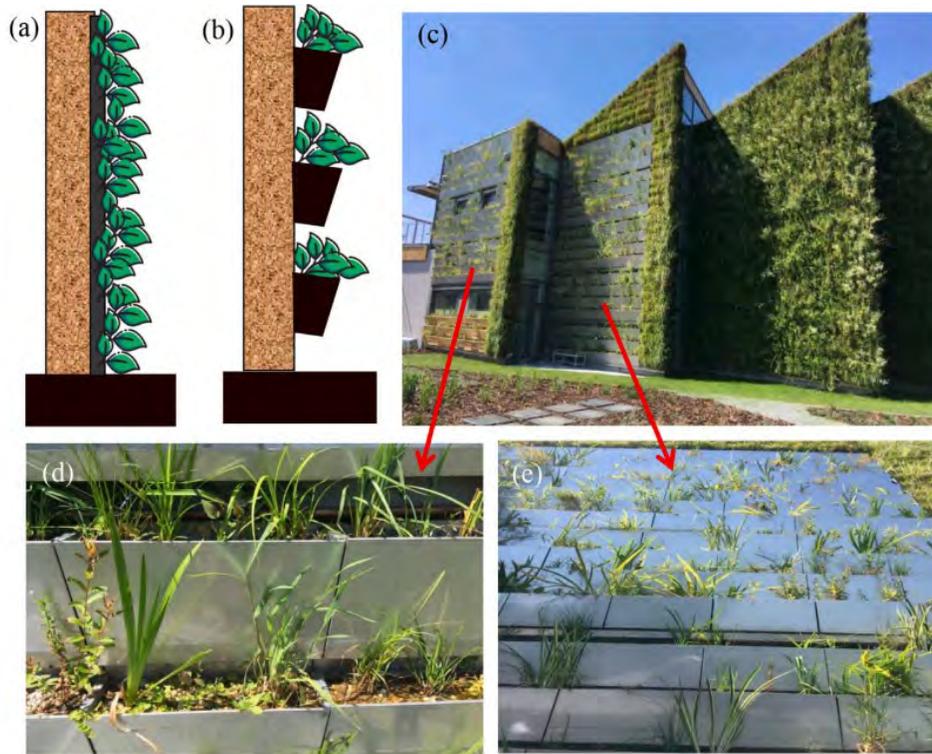


Figura 2.3. Diagrama esquemático y aplicación de las paredes vivas de tipo continua y modular, Abdo et al. (2021).

Por otro lado, en las paredes vivas modulares, se utilizan contenedores que transportan material de sustrato, como tierra o gránulos minerales, los cuales son colocados uno sobre otro en una estructura de soporte o se fijan directamente a la superficie vertical. Las paredes vivas modulares pueden componerse de diversos tipos de contenedores para plantas y sustratos, como bandejas, recipientes, macetas o bolsas flexibles. Dichas estructuras se caracterizan por el cultivo de vegetación en un sistema estructural independiente, el cual puede estar conectado o independiente de la pared. La principal distinción entre las fachadas verdes y las paredes vivas radica en que estas últimas son estructuras autosuficientes que se adhieren tanto al exterior como al interior de un edificio. En cambio, las fachadas verdes tienen las raíces de las plantas en un soporte estructural que se fija directamente a la pared o con la asistencia de un sistema de soporte [Ascione et al., 2020].

## **2.3. Componentes de una fachada verde**

Las estructuras de soporte, los sistemas de riego, la vegetación y los sustratos para apoyar el crecimiento de las plantas son los componentes principales de los sistemas de fachada verde. Estos elementos se combinan para crear una pared viva que no solo embellece el entorno, sino que también proporciona beneficios ambientales y de bienestar.

### **2.3.1. Sustrato**

Los sustratos son un componente crucial en las paredes verdes, y la elección del sustrato puede influir en el diseño de un sistema de pared verde. Varios estudios han destacado el papel fundamental de los sustratos en la eliminación de contaminantes y en la mejora de la condición del aire. Representan los actores fundamentales en el proceso de eliminación de excesos de nutrientes tales como el nitrógeno, el fósforo y metales, mediante intervenciones físicas, químicas y biológicas que incluyen la filtración, adsorción, precipitación y la formación de biopelículas. Estas acciones ayudan a mantener un equilibrio saludable en el ambiente y a mejorar la condición del agua y del suelo. En consecuencia, la mayoría de los diseños de paredes verdes incorporan sustratos ligeros, entre los que destacan la perlita, el agregado ligero de arcilla expandida (LECA), el bonote, y la lana de roca, entre otros [Prodanovic et al., 2017]. Las propiedades físicas, tales como la porosidad, área superficial, capacidad de absorción y retención de agua de estos sustratos, representan aspectos cruciales a tener en cuenta. Estas características ejercen un impacto significativo en la capacidad del sustrato para retener tanto nutrientes como agua, desempeñando un papel crucial en la creación de un entorno propicio para el crecimiento de las plantas. Según Abad et al. (2004), la elección de materiales para sustratos se clasifica considerando diversos criterios, entre ellos, la distinción entre materiales orgánicos e inorgánicos, como se presenta en la Tabla 2.2. Los materiales orgánicos incluyen compost, turba, estiércol, y otros materiales de origen vegetal o animal. Los materiales inorgánicos incluyen perlita, vermiculita, arcilla expandida, arena, entre otros. Estos materiales pueden ser utilizados solos o en combinación para crear sustratos que cumplan con los requisitos específicos de las plantas y del entorno en el que se encuentran.

Tabla 2.2. Clasificación básica de los materiales orgánicos e inorgánicos utilizados como sustratos, Abad et al. (2004).

<b>Materiales Inorgánicos</b>		
De origen natural	Transformados o tratados	Residuos industriales
Arenas, rocas volcánicas	Arcilla expandida, perlita	Escorias de carbón, ladrillo
Grava, etc.	Lana de roca, vermiculita	molido etc.
<b>Materiales orgánicos</b>		
De origen natural	De síntesis	De residuos de actividades productivas
Turbas	Espuma de poliuretano, poliestireno expandido, etc.	Residuos sólidos urbanos, cascarilla de arroz, fibra de coco etc.

La cascarilla de arroz, empleada para incrementar la porosidad en los sustratos, puede presentar una capacidad de retención de humedad relativamente baja. Sin embargo, esta limitación se aborda de manera cuidadosa mediante la elección precisa de su granulometría y su combinación con materiales como la fibra de coco y otros ricos en nitrógeno [Genevini, 1997]. Este enfoque meticuloso en la selección de sustratos desempeña un papel fundamental en el éxito y la sostenibilidad de los muros verdes modulares. La fibra de coco ha demostrado poseer características físicas, químicas y biológicas apropiadas para su utilización como medio de cultivo. No obstante, podrían ser necesarios ajustes en los programas de riego, fertilización y mezcla con otros materiales para aumentar su porosidad [García et al., 2001]. Estas consideraciones resultan cruciales para garantizar el éxito y la sostenibilidad de los muros verdes modulares.

### 2.3.2. Vegetación

La elección cuidadosa de la vegetación constituye un aspecto fundamental para asegurar la supervivencia y el rendimiento eficiente de los sistemas de fachadas verdes. Un análisis exhaustivo de la fenología, el crecimiento y la adaptabilidad al entorno resulta esencial para determinar qué tipos de plantas son apropiados para condiciones climáticas específicas.



Figura 2.4. Planta trepadora Bignonia de invierno o también conocida como llamarada naranja.

En contextos al aire libre, la capacidad de algunas plantas para florecer está estrechamente vinculada a condiciones climáticas específicas. Aspectos como el sistema de riego, el mantenimiento y las técnicas de instalación son cruciales para el rendimiento global de los sistemas de fachadas verdes, como indicado por Ávila (2004). El índice de área foliar, un parámetro biológico fundamental, se considera esencial al elegir una especie, junto con la distancia de plantación. Resulta pertinente destacar que los criterios utilizados para evaluar la calidad de las plantas en sistemas de vegetación vertical varían según las especies, tipos de muros verdes, sustratos y otros factores, según Laurence y Sabin (2011).

En el caso específico abordado, se ha optado por la especie Bignonia de Invierno o Llamarada Naranja, científicamente conocida como *Pyrostegia venusta*, ver Figura 2.4. Este género, perteneciente a la familia de las Bignoniaceae, engloba más de 15 especies de plantas trepadoras originarias de Brasil y el hemisferio sur. La selección de esta especie se basa en su capacidad de adaptación al entorno, resistencia climática y otras características que la hacen idónea para cumplir con los objetivos del sistema de muros verdes en estudio. Esta decisión destaca la importancia de considerar minuciosamente las características específicas de las plantas en la planeación y ejecución de proyectos de muros verdes, subrayando la necesidad de una selección consciente para optimizar el éxito del sistema.

La *Pyrostegia venusta*, conocida como Bignonia de Invierno, destaca como un arbusto trepador de crecimiento veloz, con la capacidad de alcanzar alturas de hasta 20 metros en condiciones climáticas favorables. Este ejemplar se distingue por su follaje perenne, conformado por tres folíolos, incluyendo un zarcillo. Sus llamativas flores naranjas,

presentadas en grupos terminales con forma tubular y pétalos arqueados, embellecen el entorno desde el otoño hasta los primeros días de la primavera.

Esta especie es ampliamente utilizada en exteriores para cubrir muros, pérgolas, grandes macetas en terrazas, invernaderos y jardines acristalados, la Bignonia de Invierno prospera en exposiciones soleadas o de semisombra, aunque puede tolerar la sombra con una ligera reducción en la producción de flores. Esta especie requiere apoyo para trepar, preferiblemente proporcionado por estructuras que permitan su agarre. El suelo óptimo debe ser ligero y ligeramente ácido, con la posibilidad de enriquecerse mediante mantillo de hojas u otras materias orgánicas. En términos de riego, presenta necesidades moderadas de agua; además, su resistencia y robustez la hacen raramente susceptible a plagas y enfermedades comunes en jardines, destacándose por su versatilidad y habilidad para aportar color y vitalidad a diversos entornos. Estas características la convierten en una elección popular para proyectos de jardinería y diseño paisajístico, aportando no solo belleza estética sino también durabilidad y fácil mantenimiento.

### **2.3.3. Necesidades de riego**

La eficiencia del riego en una fachada verde está estrechamente vinculada al tipo de sistema empleado, las especies vegetales seleccionadas y las condiciones climáticas circundantes. Estos elementos adquieren importancia crucial en la configuración del sistema de irrigación de la fachada verde, con el objetivo principal de lograr una distribución homogénea del agua a lo largo de toda la estructura y minimizar las pérdidas de este recurso [Köhler, 2008]. Investigaciones adicionales subrayan la importancia de considerar variables de diseño, como el tipo de goteros, el espaciado de las líneas de goteo y el flujo de cada gotero, al momento de construir una fachada verde. Asimismo, factores operacionales como la frecuencia y duración del riego son críticos y deben ajustarse según el tipo específico de fachada verde y su ubicación. La comprensión y la atención detallada a estas variables durante el diseño e implementación del sistema de riego son esenciales para asegurar un suministro eficaz de agua, fomentar el crecimiento saludable de las plantas y minimizar el desperdicio de recursos hídricos. En este caso, las necesidades de riego de la fachada verde utilizada para este trabajo son 2 L de agua por cada planta en un periodo de riego de 72 horas.

---

# **CAPÍTULO III.**

## **FAMILIARIZACIÓN CON EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y GENERALIDADES**

En esta sección, se abordarán conceptos fundamentales de la simulación energética aplicada a edificaciones, destacando los diferentes tipos de simulación, incluyendo los modos mecánico, pasivo y mixto. La simulación energética constituye una herramienta crucial para evaluar y optimizar el rendimiento térmico de estructuras, permitiendo un análisis detallado de las interacciones entre los sistemas de construcción y su entorno climático. En este contexto, se utilizaron plataformas de simulación destacadas, como EnergyPlus, detallando sus características y especificaciones clave. Además, se introduce DesignBuilder, una herramienta que facilita la creación de modelos energéticos y la evaluación de estrategias de diseño sostenible. Se aborda el modelo físico y matemático específico para simular el comportamiento de una fachada verde, considerando sus interacciones térmicas con el entorno. La sección también incluye un enfoque práctico mediante la familiarización con el software de simulación a través de BESTEST (Building Energy Simulation Test), una iniciativa reconocida para evaluar la exactitud y fiabilidad de los programas de simulación energética.

---

## 3. Familiarización con el software de simulación y generalidades

### 3.1. Simulación energética

La simulación energética es un proceso esencial que implica calcular los flujos de calor entre las diversas zonas térmicas de una vivienda. Para realizar este análisis, es crucial ingresar variables que definan la estructura del edificio, como las características de las paredes, la presencia de equipos climáticos y los materiales que componen cada fachada. Las variables y los resultados obtenidos pueden variar según el programa de simulación utilizado [Casal, 2019]. Actualmente, el término "simulación energética" ha evolucionado, y su significado va más allá del cálculo de demandas o consumos energéticos. En la práctica moderna, el alcance de la simulación energética se extiende hacia un análisis integral del desempeño de los edificios. Esta perspectiva tiene en cuenta factores tales como los niveles de confort, las repercusiones medioambientales y los costos asociados. Plataformas de simulación avanzadas, como EnergyPlus, LIDER, CALENER, TRNSYS, entre otros, permiten llevar a cabo este análisis más completo, brindando una evaluación integral del rendimiento de los edificios [Smith, 2020].

En particular, EnergyPlus se destaca como una herramienta versátil que permite evaluar no solo los aspectos energéticos, sino también el confort térmico, la calidad del aire interior y otros factores importantes en el análisis integral del desempeño de los edificios [EnergyPlus, 2023]. Este enfoque más amplio y completo proporciona una visión más holística de la eficiencia y sostenibilidad de las estructuras arquitectónicas.

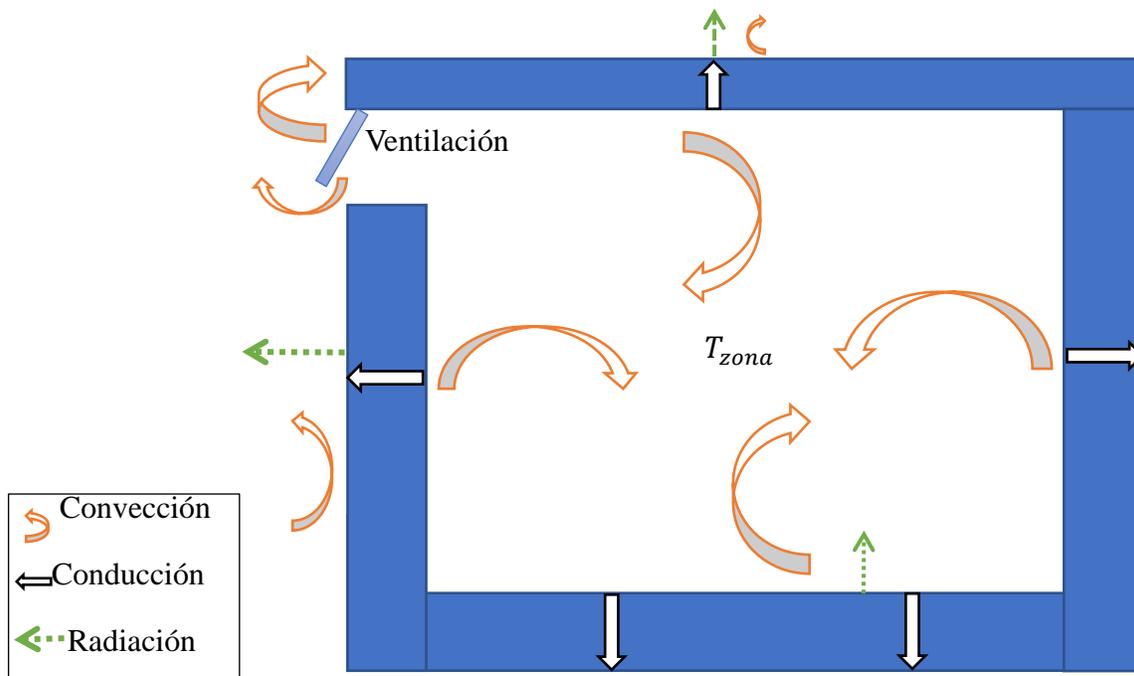


Figura 3.1. Balance global de energía en una zona térmica definida para la simulación.

En el ámbito del comportamiento térmico de una edificación, se considera cada espacio térmico como un nodo de aire, representando la capacidad térmica del volumen de aire contenido en dicho espacio. La temperatura del nodo de aire se convierte en un parámetro crítico en el análisis, ya que ejerce una influencia significativa en el rendimiento global de la construcción y en los sistemas de acondicionamiento de aire asociados. El software utiliza un método que implica la formulación de balances de energía y humedad para calcular la temperatura de la zona. Posteriormente, se resuelven las ecuaciones diferenciales ordinarias resultantes mediante un enfoque predictor-corrector.

La disposición convencional de un edificio conlleva la subdivisión en múltiples espacios interconectados mediante puertas, ventanas u aberturas, lo que origina la transferencia de energía entre estas áreas, tal como se muestra en la Figura 3.1. Este intercambio térmico se produce principalmente por la mezcla de aire entre las distintas zonas, impulsada por las cargas de calefacción y refrigeración de los sistemas de aire acondicionado. La energía suministrada por el sistema de aire acondicionado a una zona específica puede expresarse mediante la diferencia de entalpías entre el aire suministrado y el presente en la zona. En simulaciones a lo largo de periodos extensos, la integración numérica puede inducir

---

errores de truncamiento debido a la acumulación de numerosos pasos de tiempo. Sin embargo, en simulaciones cíclicas de energía en edificaciones, los errores tienden a anularse en cada ciclo, evitando la acumulación a lo largo de varios días de simulación. En este contexto, el software recurre a la fórmula de Euler para reemplazar el término derivado asociado con la temperatura media del aire en la zona. Dado que los términos restantes son desconocidos en el momento actual, se postergan un paso de tiempo y se incorporan en el lado derecho de la ecuación, facilitando así la actualización de la temperatura media del aire en la zona.

Con el propósito de optimizar el proceso de simulación, se han desarrollado expresiones de orden superior acompañadas de sus correspondientes errores de truncamiento de orden superior. Este enfoque busca principalmente posibilitar el uso de pasos de tiempo más amplios en la simulación, superando las limitaciones inherentes a la forma de Euler de primer orden. La propuesta de Taylor (1990) para la aproximación de diferencias finitas de tercer orden se destaca como la alternativa más eficiente en términos de precisión y rendimiento.

### **3.2. Tipos de simulación energética**

El análisis del rendimiento de los edificios puede abordarse de tres maneras distintas, dependiendo principalmente de su funcionalidad. En el modo mecánico, se asume que los sistemas mecánicos de climatización están presentes en el edificio y se examinan la demanda y el consumo de energía, las emisiones de carbono y los costos relacionados. Por otro lado, el modo pasivo considera que el edificio carece de sistemas mecánicos de climatización, confiando en sus características arquitectónicas y en el aprovechamiento de recursos naturales para mantener el confort. La evaluación se centra en los niveles de confort logrados mediante estrategias pasivas, sin consumos energéticos asociados. En un enfoque mixto, se alternan los modos mecánico y pasivo, activando los sistemas de climatización solo cuando son indispensables, optimizando la eficiencia energética al aprovechar condiciones ambientales favorables. Este último enfoque busca una combinación equilibrada entre la eficacia de sistemas mecánicos y las ventajas de estrategias pasivas para mejorar el rendimiento global del edificio.

---

Realizar una evaluación energética en modo pasivo ofrece numerosas ventajas y resulta favorable por varias razones. En primer lugar, este enfoque busca maximizar la eficiencia energética al depender principalmente de las características arquitectónicas y el aprovechamiento de recursos naturales para proporcionar condiciones ambientales confortables. Al prescindir de sistemas mecánicos de climatización, se reduce significativamente el consumo de energía asociado, lo que contribuye a la sostenibilidad ambiental y a la mitigación de efectos adversos en el cambio climático. Además, la evaluación en modo pasivo promueve la integración del edificio con su entorno, aprovechando la ventilación natural, el calentamiento solar y otros recursos disponibles. Este enfoque no solo minimiza el impacto ambiental, sino que también crea espacios interiores más saludables y cómodos al proporcionar condiciones térmicas más estables y menos dependientes de sistemas artificiales.

Desde una perspectiva económica, la evaluación en modo pasivo puede resultar más rentable a largo plazo al reducir los costos operativos asociados con la climatización mecánica y otros sistemas activos. La inversión inicial en características arquitectónicas y diseño eficiente puede traducirse en ahorros sustanciales en el consumo de energía y los costos asociados con el mantenimiento de equipos mecánicos

### **3.3. Simulación en EnergyPlus con interface de DesignBuilder**

El índice de eficiencia energética es una medida crucial en la evaluación del rendimiento energético de un sistema, proceso o dispositivo. Su importancia radica en varios aspectos como la evaluación del consumo de energía, identificación de oportunidades de mejora, ahorro de costos, sostenibilidad ambiental y el cumplimiento normativo. El índice de eficiencia energética proporciona una métrica clara y cuantificable para evaluar la cantidad de energía utilizada conforme a la producción o el rendimiento deseado. Permite identificar áreas de consumo excesivo de energía y establecer objetivos para reducirlo. Al calcular el índice de eficiencia energética, se pueden identificar áreas donde se pueden implementar mejoras para disminuir el consumo de energía y mejorar el rendimiento. Esto puede implicar la actualización de equipos obsoletos, la adopción de tecnologías más eficientes o el ajuste

---

de prácticas operativas. Al disminuir el consumo de energía, se reducen los costos vinculados a la adquisición y el uso de combustibles o electricidad a largo plazo, lo cual puede tener un impacto positivo en la rentabilidad y competitividad de una organización o sistema. También esto contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes asociados con la generación de energía. Al minimizar el consumo de recursos energéticos, se reduce el impacto ambiental negativo y se promueve un desarrollo más sostenible y responsable. En muchos casos, existen regulaciones y estándares que establecen requisitos mínimos de eficiencia energética para ciertos sistemas o equipos. El cálculo y el cumplimiento del índice de eficiencia energética son fundamentales para asegurar la conformidad con estas normativas y evitar posibles sanciones legales o financieras. En resumen, el índice de eficiencia energética es una herramienta fundamental para evaluar, mejorar y gestionar el uso de la energía de manera efectiva, lo que conduce a beneficios económicos, ambientales y sociales significativos.

El método para calcular el Índice de Eficiencia Energética (EE) se fundamenta en un modelo de balance de calor global unidimensional. En este enfoque, se representa en el modelo a los elementos de la envolvente (paredes, suelos, techo, puertas y ventanas) y al aire interior, considerando una temperatura uniforme. El balance de calor en las superficies aborda fenómenos como la conducción, convección, radiación, transferencia de masa y condiciones de frontera. La simulación implica pasos de tiempo personalizables, archivos de entrada con datos climatológicos, resolución simultánea de balances de calor internos y externos, así como modelos de confort térmico.

- La interfaz entre EnergyPlus y DesignBuilder es importante por varias razones, que se describen a continuación:
- Facilidad de uso: DesignBuilder proporciona una interfaz gráfica intuitiva que simplifica la entrada de datos y la configuración de simulaciones en EnergyPlus. Esto hace que sea más accesible para usuarios con menos experiencia en el uso directo de EnergyPlus.
- Modelado detallado: DesignBuilder permite a los usuarios crear modelos de edificios detallados con geometría compleja y características específicas, como sistemas de

---

climatización, iluminación y fachadas. Esta información se puede transferir fácilmente a EnergyPlus para simulaciones energéticas detalladas.

- Optimización del rendimiento energético: al permitir a los usuarios realizar análisis energéticos avanzados con EnergyPlus a través de una interfaz fácil de usar, DesingBuilder facilita la identificación de áreas de mejora en el diseño de edificios para maximizar la eficiencia energética y reducir los costos operativos.
- Comparación de escenarios: La interfaz entre DesingBuilder y EnergyPlus permite a los usuarios comparara fácilmente diferentes escenarios de diseño, sistemas de construcción y estrategias de eficiencia energética. Esto es útil para evaluar el impacto de diferentes opciones de diseño en el rendimiento energético y tomar decisiones informadas.
- Visualización de resultados: DesingBuilder ofrece capacidades de visualización de datos que facilitan la interpretación de los resultados de las simulaciones realizadas en EnergyPlus esto ayuda a los usuarios a comprender mejor el rendimiento energético de sus diseños y a comunicar los hallazgos de manera efectiva a otras partes interesadas

En resumen, la interfaz entre EnergyPlus y DesingBuilder es importante porque simplifica el proceso de modelado y simulación energética de edificios lo que permite a los usuarios realizar análisis detallados y tomar decisiones informadas para mejorar la eficiencia energética de los edificios. EnergyPlus, un software de libre acceso y ampliamente adoptado para la simulación térmica de edificaciones, se elige en su versión 8.9, utilizando la interfaz DesignBuilder versión 6.1 debido a la disponibilidad de licencia.

### **3.4. EnergyPlus**

EnergyPlus se configura como un programa completo y resistente diseñado para llevar a cabo simulaciones energéticas detalladas, modelando el consumo de energía en edificaciones y abordando aspectos fundamentales como calefacción, aire acondicionado, ventilación, iluminación y cargas térmicas. Iniciado por el Departamento de Energía de Estados Unidos en 1996, este software ha evolucionado a partir de programas anteriores

---

como BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) y DOE-2 (Department of Energy Building Energy Analysis Tool), cuyo desarrollo inicial se remonta a principios de la década de 1970 bajo la supervisión del Departamento de Defensa (DOD) de Estados Unidos.

Lo que distingue a EnergyPlus es su capacidad para realizar simulaciones detalladas mediante la integración de cientos de subrutinas, las cuales trabajan en conjunto para modelar con precisión los flujos de masa y energía a lo largo de la edificación. Su enfoque exhaustivo permite la evaluación minuciosa de diversos aspectos del rendimiento de la edificación, convirtiéndolo en una herramienta valiosa para diseñadores, arquitectos e ingenieros comprometidos con la eficiencia energética y la sostenibilidad en la construcción.

El módulo de Simulación de EnergyPlus ofrece una amplia gama de funciones, permitiendo la evaluación del rendimiento ambiental y energético de edificaciones mediante simulaciones dinámicas en tiempo real basadas en archivos de datos climáticos por hora. También habilita el cálculo de las demandas y consumos energéticos, así como las emisiones de carbono, vinculadas a sistemas esenciales como climatización, iluminación y agua caliente sanitaria. Adicionalmente, facilita la evaluación de estrategias de climatización pasiva, el dimensionamiento de sistemas de calefacción y refrigeración, y el análisis del aprovechamiento de la iluminación natural en la edificación para reducir el uso de iluminación artificial.

En la Figura 3.2 se presenta el diagrama detallado del proceso de simulación en DesignBuilder, con una interfaz directa con EnergyPlus. Esta representación gráfica ilustra la integración fluida entre ambos programas, destacando las etapas clave del proceso de simulación.

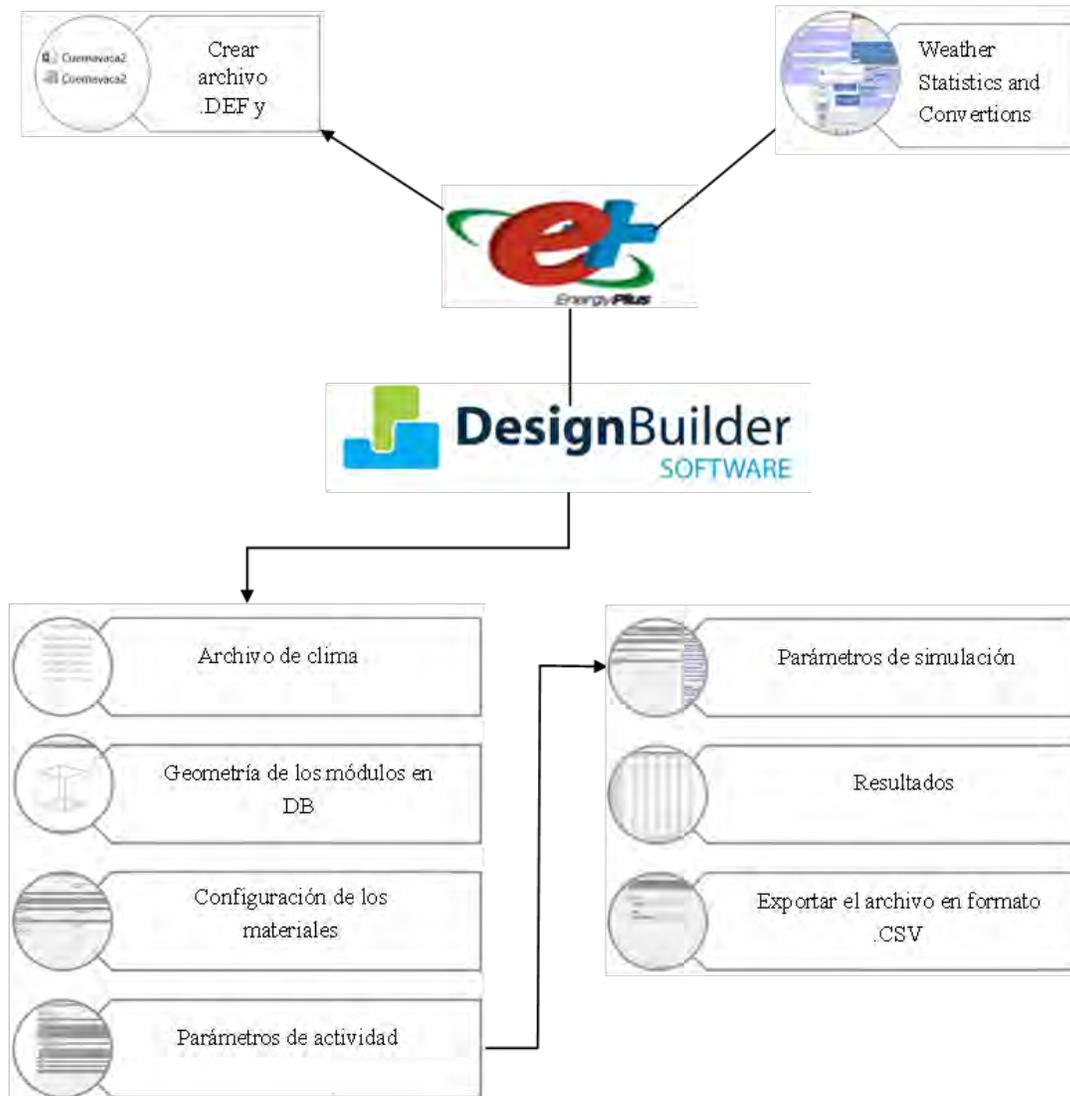


Figura 3.2. Diagrama esquemático de un proceso de simulación en DesignBuilder con interface en EnergyPlus.

DesignBuilder actúa como una interfaz de usuario intuitiva que facilita la creación del modelo del edificio y la definición de sus características arquitectónicas. A través de esta interfaz, se introducen parámetros específicos del edificio, como la geometría, materiales de construcción, sistemas de HVAC y aperturas, entre otros. Luego, DesignBuilder utiliza EnergyPlus como motor de simulación energética para llevar a cabo cálculos detallados y precisos del rendimiento térmico del edificio. EnergyPlus, como motor de simulación robusto, realiza cálculos detallados teniendo en cuenta variables como la radiación solar, la transferencia de calor y la dinámica térmica del edificio. Los resultados de EnergyPlus son

---

luego integrados de manera transparente en DesignBuilder, lo que permite al usuario analizar de manera efectiva el rendimiento energético del edificio y realizar ajustes según sea necesario.

### **3.4.1. Características y especificaciones**

Junto con la ejecución de simulaciones dinámicas, EnergyPlus presenta la capacidad de llevar a cabo cálculos pormenorizados para el dimensionamiento de sistemas de calefacción y refrigeración mediante el método Heat Balance de ASHRAE, basado en condiciones climáticas de diseño. El programa incorpora modelos detallados de confort, aplicando enfoques reconocidos como ASHRAE 55, Voto Medio Previsto de Fanger y confort adaptativo, entre otros. Los resultados ofrecidos por EnergyPlus son completos, brindando detalles para cada superficie del modelo, tales como radiación solar incidente, temperaturas superficiales e intercambios radiantes convectivos.

La capacidad de EnergyPlus para simular estrategias y dispositivos específicos para ahorrar energía, como cubiertas verdes, fachadas ventiladas, materiales de cambio de fase, vidrios dinámicos e intercambiadores de calor es una característica destacada. Este enfoque avanzado permite una evaluación completa de medidas innovadoras para la eficiencia energética en edificaciones. Además, los resultados derivados de las simulaciones ejecutadas con EnergyPlus pueden ser exportados como condiciones de frontera, permitiendo la realización de análisis suplementarios a través del módulo CFD (Dinámica de Fluidos Computacional). Esta capacidad de exportación permite una integración más completa y avanzada de los resultados en otras herramientas o plataformas de análisis, fomentando un enfoque integral en la evaluación del rendimiento energético y ambiental de edificaciones.

## **3.5. DesignBuilder**

DesignBuilder se distingue por su enfoque modular, incorporando un modelador 3D avanzado como el núcleo central y un conjunto de 9 módulos de análisis interconectados. Estos módulos están diseñados para abordar tareas específicas y brindan una amplia gama de funcionalidades. Entre los usos comunes, el software permite evaluar opciones de fachada,

---

considerando aspectos clave como sobrecalentamiento, consumo de energía y sombreado. Además, posibilita la optimización del aprovechamiento de la luz natural al modelar sistemas de control de iluminación, permitiendo determinar los ahorros eléctricos asociados. Para análisis más detallados, el módulo CFD permite calcular la distribución de temperatura, velocidad y presión en edificios.

DesignBuilder también facilita la visualización del plano del sitio y la realización de simulaciones térmicas en edificios ventilados de forma natural. Es una herramienta valiosa para determinar la capacidad de equipos HVAC y resolver problemas de diseño en este ámbito. Además, el software contribuye a la comunicación interdisciplinaria en reuniones de diseño al proporcionar material visual y datos analíticos. Por último, su flexibilidad abarca el ámbito académico, donde se emplea en cursos universitarios de modelado y simulación de energía para respaldar la formación e investigación en esta disciplina.

### **3.6. Modelo físico y matemático de una fachada verde para la simulación energética por el método de balances globales de energía**

En la evaluación del balance de energía, la fachada verde se considera como una entidad única de gran tamaño, caracterizada por propiedades específicas como densidad, calor específico, espesor y área efectiva. El área efectiva representa la dimensión de la superficie vertical cubierta por las hojas de la fachada. Bajo este enfoque, una porción de la energía incidente se absorbe, generando calor latente y activando la transpiración en las hojas, mientras que otra parte se convierte en calor sensible, provocando un aumento de la temperatura sobre el follaje [Larsen, 2015].

El modelo matemático, describe el proceso de transferencia de calor por convección desde ambos lados de la vegetación hacia el aire circundante, identificado por los coeficientes de transferencia de calor  $h_{out}$  y  $h_{in}$ . Además, integra la representación matemática del intercambio radiativo entre el follaje y su entorno circundante (suelo, cielo y superficie de vidrio/pared) mediante radiación infrarroja. Este enfoque matemático exhaustivo permite una representación más precisa y cuantitativa de los procesos térmicos involucrados en el rendimiento de la fachada verde en términos de transferencia de calor y energía.

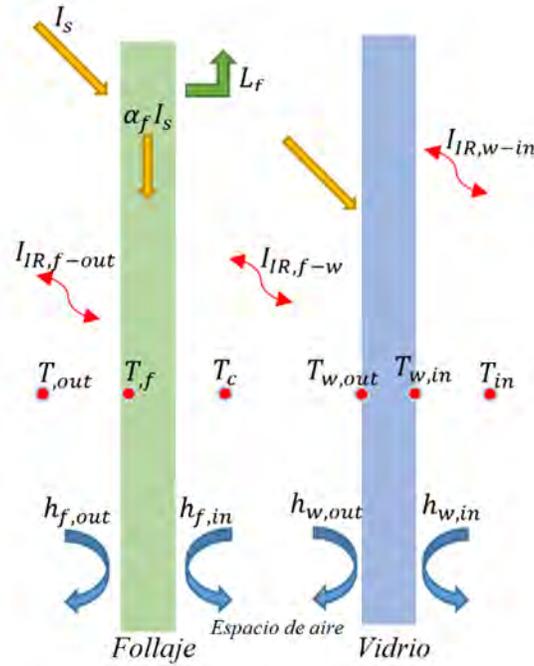


Figura 3.3. Intercambio de energía térmica entre una fachada verde y el ambiente circundante.

### 3.6.1. Balance de energía en el follaje

En la Ec. (3.1), el término de la derecha representa la energía almacenada en la fachada verde, generalmente pasada por alto, mientras que el término de la izquierda corresponde al calor sensible. Existe una correlación intrínseca entre la absorptividad, radiación total, coeficiente de transferencia de calor y el entorno exterior. Asimismo, se establece una relación entre la temperatura de la vegetación, la temperatura ambiente y el coeficiente de transferencia de calor entre el follaje y la cavidad del aire, como se muestra en la Figura 3.3.

$$\alpha_f I_s - h_{f,out}(T_f - T_{out}) - h_{f,in}(T_f - T_c) - q_{rad} - L_f = (\rho c_p)_f e_f \frac{dT_f}{dt} \quad (3.1)$$

Además, se considera el calor latente y el flujo neto infrarrojo entre la fachada y las superficies circundantes, como se define en la Ec. 3.2.

$$q_{rad} = \sigma \varepsilon_f F_{ground} (T_f^4 - T_{ground}^4) + \sigma \varepsilon_f F_{sky} (T_f^4 - T_{sky}^4) + \sigma \frac{\varepsilon_f \varepsilon_w}{\varepsilon_f + \varepsilon_w - \varepsilon_f \varepsilon_w} (T_f^4 - T_{w,in}^4) \quad (3.2)$$

Para derivar el término de calor latente, se requiere llevar a cabo diversas correlaciones entre la resistencia estomática, la resistencia aerodinámica y la evapotranspiración.

### 3.6.2. Resistencia estomática

La transpiración se lleva a cabo a través de pequeñas aberturas, conocidas como estomas, que funcionan como válvulas reguladoras para el paso del vapor de agua desde los tejidos foliares al aire circundante. La resistencia a la difusión del vapor de agua desde las estomas de una hoja hacia la atmósfera se conoce como resistencia estomática y se mide en segundos por metro (s/m). Esta resistencia, que varía a lo largo del día, juega un papel crucial en el proceso de transpiración, que es la liberación de vapor de agua desde una planta, ver Figura 3.4.

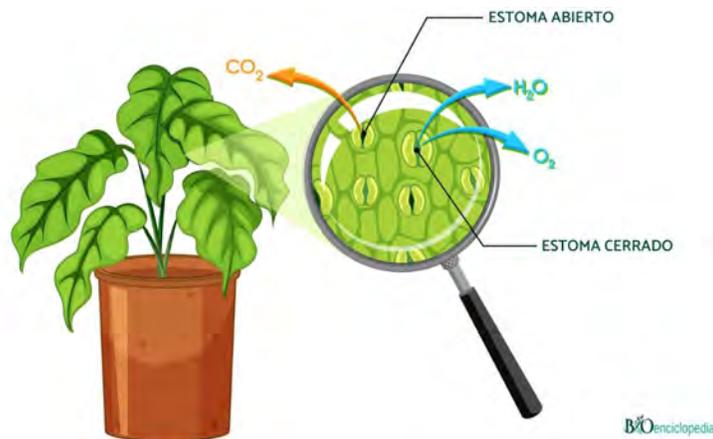


Figura 3.4. Representación gráfica de los estomas en una hoja [Fuente: internet].

La apertura de estos poros, conocidos como estomas, está influenciada por varios factores, como la especie de la planta, su edad, la humedad del suelo, la humedad atmosférica y la concentración de dióxido de carbono en el entorno. Es crucial comprender la ecuación que describe esta resistencia estomática para evaluar y comprender el proceso de transpiración en las plantas, ya que esto tiene implicaciones significativas en el balance hídrico y térmico de la vegetación.

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{active}} \quad (3.3)$$

En el contexto de una fachada verde vertical, es necesario calcular el Índice de Área de Hojas ( $LAI$ ) como la proyección del área de las hojas por unidad de superficie de la pared vertical. La ecuación utiliza dos parámetros fundamentales: el índice de área foliar activa ( $LAI_{active}$ ), expresado en metros cuadrados, y la resistencia estomática ( $rl$ ), medida en segundos por metro (s/m). El  $LAI_{active}$  representa la extensión total del área foliar disponible para la fotosíntesis, mientras que la resistencia estomática ( $rl$ ) indica la capacidad de las estomas para regular el intercambio de vapor de agua con la atmósfera. Esta relación es esencial para comprender y modelar adecuadamente los procesos de intercambio de calor y humedad en una fachada verde vertical.

### 3.6.3. Resistencia aerodinámica

La resistencia aerodinámica, esencial para comprender la transferencia de humedad y calor entre las plantas y la atmósfera, hace referencia a la resistencia generada por la capa límite en la superficie de la hoja, siendo influenciada por la velocidad del viento y la rugosidad de la superficie. Medida en segundos por metro (s/m), se define mediante la ecuación 3.4, donde diversos parámetros, como la longitud característica de la hoja ( $d$ ), la conductividad del aire ( $k_{air}$ ), la densidad del aire ( $\rho_{air}$ ), el calor específico del aire ( $C_{p,air}$ ), y el número de Nusselt ( $N_u$ ), juegan un papel determinante.

$$r_{a,leaf} = 0.5 \frac{\rho_{air} C_{p,air} L}{(k_{air} Nu_L)} \quad (3.4)$$

La conexión inherente entre la resistencia aerodinámica, la velocidad del viento y la rugosidad de la superficie es crucial para analizar cómo las condiciones atmosféricas afectan la transferencia de humedad y calor. El factor de reducción de la capa límite (representado por "0.5" en la ecuación 3.4) considera ambos lados de la hoja transfiriendo calor al ambiente. En el caso de plantas con bajos valores de Índice de Área de Hojas ( $LAI < 3$ ), la Resistencia Aerodinámica ( $AR$ ) es inversamente proporcional a la Intensidad de Área Transpirada ( $IAT$ ), y su estimación puede seguir una relación análoga a la ecuación 3.5.

$$r_a = \frac{r_{a,leaf}}{LAI_{active}} \quad (3.5)$$

### 3.6.4. Evapotranspiración

La evapotranspiración, derivada de procesos simultáneos como la evaporación desde el suelo o vegetación húmeda y la transpiración de la vegetación, implica la vaporización del agua presente en los tejidos vegetales, donde el calor latente desempeña un papel crucial (Ec. 3.6). Este fenómeno es fundamental para comprender el ciclo hidrológico y el intercambio de energía entre la superficie terrestre y la atmósfera.

$$L_f = w \cdot \lambda \quad (3.6)$$

En el contexto de las ecuaciones relacionadas con la evapotranspiración, se emplean diversas variables esenciales. La tasa de evaporación/transpiración se denota como  $w$ , expresada en unidades de evaporación por transpiración por unidad de área ( $\text{g}/\text{sm}^2$ ). Además, se utiliza la pendiente de la curva de temperatura de presión de vapor de saturación ( $\Lambda$ ), medida en unidades de  $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ , la fracción de radiación neta disponible para la evaporación ( $\sigma_f$ ), la radiación solar incidente ( $I_s$ ), el flujo neto de radiación ( $q_{rad}$ ), el flujo de calor del suelo ( $G$ ), el calor latente de vaporización ( $\lambda$  con un valor de  $249 \text{ kJ}/\text{kg}$ ), el factor psicométrico ( $\gamma$ ), la resistencia estomática ( $r_s$ ), la resistencia aerodinámica ( $r_a$ ), la densidad del aire ( $\rho_{air}$ ), la capacidad calorífica del aire ( $C_{p,air}$ ), la presión de vapor de saturación ( $e_0$ ), y la presión de vapor actual ( $e_{air}$ ). Estas variables son esenciales para modelar y comprender el intercambio de agua y energía entre la superficie terrestre y la atmósfera, particularmente en el proceso de evaporación desde la vegetación y el suelo hacia la atmósfera. Por otro lado,  $t$  es la temperatura del aire.

La ecuación de Penman-Monteith (Ec. 3.7) se utiliza para estimar la tasa de evapotranspiración y considera propiedades del aire y la planta, como temperatura, humedad, resistencias aerodinámica y estomática, radiación solar y flujo de calor del suelo.

$$w = \frac{\Lambda(\sigma_f I_s - q_{rad} - G)}{\lambda[\Lambda + \gamma(1 + r_s/r_a)]} + \frac{\rho_{air} C_{p,air} (e_0 - e_{air})/r_a}{\lambda[\Lambda + \gamma(1 + r_s/r_a)]} \quad (3.7)$$

Las ecuaciones adicionales (Ecs. 3.8, 3.9, 3.10) definen la pendiente de la curva de temperatura de presión de vapor de saturación y el cálculo de la presión de vapor de saturación y vapor real. La Ec. 3.11, propuesta por [Stec, 2015], proporciona una estimación

simplificada del calor latente expulsado por la planta basándose en la radiación absorbida y otros términos relevantes. La relación fija entre la radiación absorbida y el calor latente expulsado ( $x$ ) se establece en la Ec. 3.12.

$$\Lambda = \frac{4098[0.61 \text{Exp}\left(\frac{17.27t}{t+237.3}\right)]}{(t+237.3)^2} \quad (3.8)$$

$$e_0(t) = 610.78 \exp\left(\frac{17.27 t}{t+237.3}\right) \quad (3.9)$$

$$e_{air}(t) = \left(\frac{RH}{100}\right)e_0(t) \quad (3.10)$$

$$L_f = x(\alpha_f I_s - q_{rad} - G) \quad (3.11)$$

$$x = \frac{L_f}{(\alpha_f I_s - q_{rad} - G)} = \frac{\Lambda}{[\Lambda + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)]} \quad (3.12)$$

Estas ecuaciones, clave en el método de Penman-Monteith, presentan similitudes en condiciones de presión de vapor cercana a la saturación o resistencia aerodinámica elevada, donde el segundo término de la ecuación se vuelve despreciable. La estimación de  $x$ , que fija la relación entre radiación absorbida y calor latente, se simplifica bajo estas condiciones.

### 3.7. Familiarización con el software de simulación energética

El desarrollo de este proyecto de investigación implica la implementación y evaluación del software DesignBuilder. Para asegurar su desempeño y confiabilidad, se llevó a cabo una fase inicial de familiarización y verificación utilizando el método BESTEST (Prueba de Simulación Energética de Edificios). Este enfoque, conforme a la norma ANSI/ASHRAE 140-2011, fue concebido por miembros de la Agencia Internacional de Energía (IEA) con el propósito de proporcionar una metodología sistemática para evaluar simulaciones realizadas por diferentes programas de software.

En específico, el proyecto BESTEST clasificó los casos de estudio según la masa térmica de los edificios. Los casos 600 a 650 se centran en evaluar las cargas térmicas anuales de edificios con baja masa térmica, mientras que los ejercicios 900 a 990 están destinados a analizar las cargas térmicas anuales de edificios con gran masa térmica. Asimismo, se incluyeron casos específicos para edificios sin sistemas mecánicos de calefacción y

---

refrigeración, identificados con las letras FF. Esta fase de verificación inicial, basada en los casos de estudio del BESTEST, proporciona una evaluación integral de la capacidad y precisión del software DesignBuilder en el contexto de simulaciones energéticas de edificios. Este enfoque garantiza la confiabilidad de los resultados obtenidos y respalda la validez de las conclusiones derivadas en el marco de este proyecto de investigación. El proceso detallado de simulación para el BESTEST se presenta en el Anexo A.

Los resultados obtenidos en los casos BESTEST (600, 610 y 600FF) evidencian diferencias dentro de un rango aceptable, situándose entre el 3.2% y el 4.9% en comparación con los valores de referencia del informe BESTEST. Estas discrepancias, consideradas aceptables, sugieren una introducción adecuada de los datos en el programa DesignBuilder. En consecuencia, se concluye que el usuario tiene la capacidad para realizar evaluaciones para diversos tipos de edificios con confianza en la capacidad del software para generar resultados precisos y coherentes con las normas de referencia. La coherencia entre los resultados simulados y los valores establecidos por BESTEST respalda la validez y fiabilidad de las simulaciones en este proyecto.

---

# **CAPÍTULO IV.**

## **DESARROLLO DEL EXPERIMENTO Y VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN**

En esta sección, se abordan las generalidades del sitio donde se ubicaron los módulos de prueba, detallando el entorno experimental en el cual se desarrolló el estudio. Se realiza una descripción exhaustiva del montaje del experimento, incluyendo la disposición de los módulos y la instrumentación empleada para monitorear las variables clave. La información proporcionada sirve como guía sobre las condiciones específicas del entorno experimental. Además, se destacan las variables climáticas que ejercen un papel importante en la validación de las simulaciones realizadas de los módulos experimentales, comparando los resultados obtenidos con los obtenidos del módulo de control, tanto sin como con la implementación de una fachada verde. La sección proporciona una visión completa del diseño experimental y la metodología utilizada para certificar la fiabilidad y relevancia de los resultados.

## **4.Desarrollo del experimento y validación de la simulación**

### **4.1. Características del sitio experimental y disposición de los módulos de prueba**

El estudio se desarrolló en la Ciudad de Cuernavaca, Morelos, México, donde se instalaron los módulos experimentales en el techo del edificio principal del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), campus mecánica. Cuernavaca, con una población de 378,476 habitantes según datos del INEGI para el año 2021, se sitúa a una altitud de 1540 metros sobre el nivel del mar, con coordenadas geográficas 18°52'46''N 99°13'17'' O. Este municipio ocupa una superficie de 151.20 km<sup>2</sup>, representando el 2.95 % de la extensión total de Morelos y se encuentra en la zona noroeste del estado. El clima predominante en la ciudad es cálido subhúmedo, caracterizado por una temperatura media anual de 21.5°C, una pluviosidad de 900 mm y una humedad relativa del 56.4 %. En específico para este trabajo, el periodo de monitoreo de los módulos experimentales fue de cuatro meses, de marzo a junio 2023.

#### **4.1.1. Construcción de los módulos de prueba**

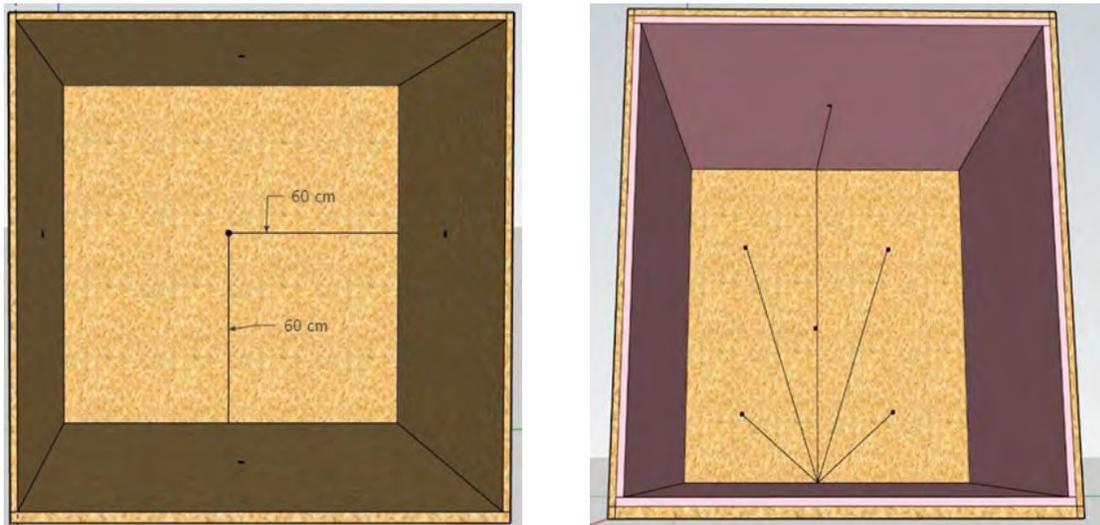
El montaje experimental comprendió la disposición de dos módulos idénticos, cada uno con dimensiones de 1.2 m<sup>3</sup>, diferenciándose únicamente por la presencia o ausencia de una fachada verde, tal como se ilustra en la Figura 4.1. Estos módulos fueron fabricados utilizando madera OSB (Oriented Strand Board) de 0.018 m de espesor, recubierta con una capa de pintura blanca a base de aceite y esmalte para madera. A excepción de la cara de la fachada, todas las demás superficies fueron provistas con una capa de aislante térmico (Foamular) de 0.025 m de espesor, diseñada para reducir la pérdida de calor. Este diseño garantiza la uniformidad estructural de los módulos, permitiendo así realizar comparaciones precisas entre los resultados obtenidos con y sin la presencia de la fachada verde.



Figura 4.1. Diseño de los módulos de prueba, y representación gráfica de la colocación de la fachada verde sobre la pared sur del módulo de prueba.

#### 4.1.2. Instrumentación y monitoreo de los módulos de prueba

En el transcurso del proceso de monitoreo térmico, se llevó a cabo la instrumentación de ambos módulos experimentales, asignando el primero como la pared con fachada verde directa y el segundo como una pared desnuda de referencia. Para llevar a cabo esta instrumentación con precisión, se emplearon 11 sensores de temperatura de tipo DS18B20 y 15 NTC 10K, los cuales fueron conectados a una placa de Arduino Mega. La distribución de los sensores de temperatura, en el interior como en el exterior de ambas cavidades, se presenta de manera detallada en la Figura 4.2.



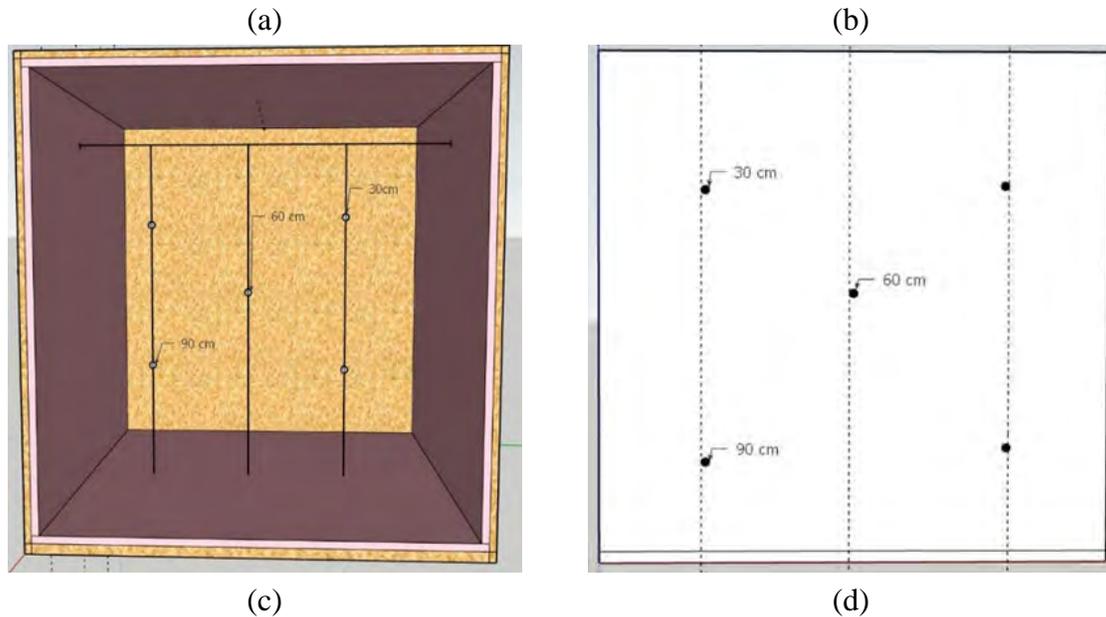


Figura 4.2. Distribución de los sensores a) 5 TA\_NTC 10K entre el aislante y la madera, b) 5 TD\_DS18B20 pared interior de la fachada, c) 5 TA\_NTC10K en medio de la cavidad y d) 5 TA\_NTC10K pared exterior de la fachada.

Los sensores de temperatura DS18B20 y NTC 10K son dispositivos ampliamente utilizados para medir la temperatura en entornos diversos. El DS18B20 es un sensor digital de temperatura de precisión con una interfaz de un solo cable, proporcionando lecturas precisas y estables. Por otro lado, el NTC 10K es un termistor negativo de coeficiente de temperatura con una resistencia que varía con la temperatura. Ambos sensores son eficientes y ofrecen precisión en sus mediciones, siendo comúnmente utilizados en aplicaciones de monitoreo térmico.

En cuanto al Arduino Mega, es una placa de desarrollo de microcontrolador de código abierto que se utiliza para integrar y controlar diversos componentes electrónicos, incluyendo sensores. Equipado con múltiples puertos de entrada/salida, el Arduino Mega es capaz de recibir datos de los sensores y procesarlos para su posterior análisis. Su versatilidad y capacidad para conectarse con una variedad de dispositivos lo convierten en una herramienta eficaz para la instrumentación en proyectos de monitoreo. La programación del Arduino Mega permite configurar la adquisición de datos y la comunicación con otros sistemas, contribuyendo así a la recopilación precisa de información en tiempo real.



En este estudio, se implementó el microcontrolador Arduino, una plataforma informática diseñada para desarrollar objetos interactivos independientes o conectados a un ordenador. Tanto el hardware como el software de Arduino son de código abierto, lo que facilita la adaptabilidad y la colaboración en el desarrollo de proyectos tecnológicos [Banzi y Shiloh, 2016; Ray, 2016]. Este enfoque proporciona flexibilidad y accesibilidad, permitiendo a los usuarios personalizar y mejorar sus sistemas de manera eficiente. La elección de Arduino como plataforma se fundamenta en su robustez, versatilidad y la amplia comunidad de desarrolladores que respaldan su continua evolución, en la Figura 4.3 se presenta el diagrama de la distribución de los sensores utilizados en el arduino y en la Figura 4.5 se muestra el diagrama de flujo del código desarrollado en la plataforma Arduino para la adquisición de datos.

## 4.2. Colocación de la vegetación seleccionada sobre la pared del módulo de prueba

En el transcurso de la fase de monitoreo, se realizó la instalación de la especie de planta trepadora en el módulo de prueba. Este proceso implicó la disposición de cinco macetas a lo largo de la parte inferior de la pared sur, aseguradas mediante un soporte metálico cuadrangular con dimensiones de 1.2 m<sup>2</sup>, como se ilustra en la Figura 4.4. Este diseño fue concebido para lograr una distribución uniforme de las plantas a lo largo de la pared, garantizando así una cobertura eficiente y homogénea.



Figura 4.4. Colocación y evolución de la planta trepadora sobre la malla metálica en la pared sur del módulo experimental.

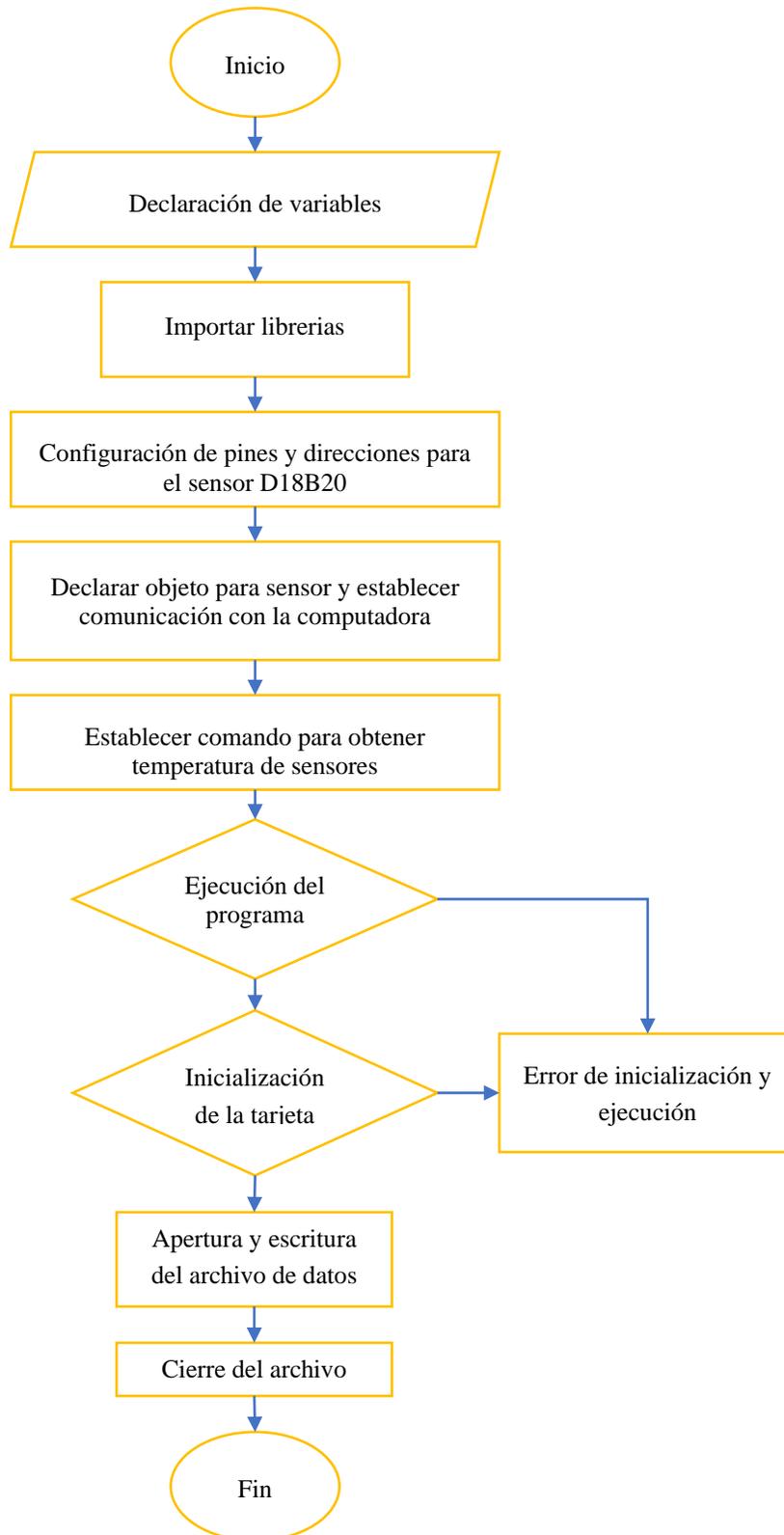


Figura 4.5. Diagrama de flujo para la adquisición de datos en Arduino.

---

La disposición meticulosa de las macetas y el soporte metálico no solo contribuyen a la estabilidad del sistema de muros verdes, sino que también fomentan la sostenibilidad al proporcionar un entorno propicio para el crecimiento y desarrollo óptimos de la vegetación trepadora.

En la etapa final de la instrumentación, se dispusieron seis sensores de temperatura DS18B20 encapsulados. sensor de temperatura DS18B20 es un dispositivo digital de precisión diseñado con una interfaz de un solo cable que facilita su conexión, este sensor ofrece lecturas precisas y estables. Su encapsulado impermeable permite su uso en condiciones adversas, siendo resistente al agua y a la corrosión. Además, el DS18B20 utiliza un protocolo de comunicación único, lo que simplifica su integración en sistemas electrónicos. Su rango de temperatura operativa abarca desde  $-55^{\circ}\text{C}$  hasta  $+125^{\circ}\text{C}$ , lo que lo hace adecuado para una amplia variedad de aplicaciones. En este sentido, cinco de estos sensores fueron colocados directamente sobre la vegetación, mientras que uno se posicionó a una distancia de 30 cm de la fachada, como se ilustra en la Figura 4.6.



Figura 4.6. Distribución de los sensores TD\_DS18B20 colocados directamente sobre la vegetación y a una posición estratégica de 30 cm distanciado de la fachada verde.

Esta disposición estratégica de los sensores ha sido cuidadosamente planificada para permitir un monitoreo preciso de las variaciones térmicas tanto sobre la vegetación como en la proximidad de la pared. La inclusión de un sensor a cierta distancia de la fachada

---

proporciona una perspectiva adicional sobre las condiciones térmicas en el entorno circundante del sistema de muros verdes. Esta instrumentación detallada no solo ofrece datos valiosos para evaluar el impacto térmico de la vegetación trepadora en la fachada, sino que también contribuye al análisis integral del rendimiento del sistema, como ya se describió en la sección anterior.

### **4.3. Adquisición de las variables climáticas**

Con el propósito de cuantificar la radiación absorbida por la vegetación, se posicionó un piranómetro de la marca Kipp & Zonen en posición vertical a un lado de la fachada verde. El piranómetro Kipp & Zonen es ampliamente utilizado en estudios climáticos, investigación ambiental y aplicaciones meteorológicas. Su alta precisión y respuesta espectral lo convierten en una herramienta confiable para evaluar la disponibilidad de la radiación solar en diversas ubicaciones y condiciones climáticas. Este dispositivo se basa en el principio de detección de la radiación térmica emitida por el Sol. La tecnología empleada en el piranómetro permite una respuesta sensible a la radiación en un amplio rango espectral, abarcando desde la radiación ultravioleta hasta la radiación infrarroja cercana. Este dispositivo estaba conectado a un sistema de adquisición de datos en tiempo real de Agilent, registrando mediciones en intervalos de 60 segundos.

Por otro lado, la información relacionada con la radiación solar, temperatura ambiente, humedad, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica y precipitación se recopiló cada 10 minutos a través de la estación meteorológica Vaisala Maws100, ubicada a 20 metros del área experimental. La estación meteorológica Vaisala Maws100 es un sistema avanzado diseñado para recopilar datos meteorológicos precisos en tiempo real. Equipada con sensores integrados para medir parámetros clave como temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica y precipitación, la estación ofrece mediciones precisas y confiables. Su capacidad de transmisión de datos en tiempo real facilita la supervisión remota y actualizaciones continuas, siendo ideal para aplicaciones científicas y de investigación. Además, la Vaisala Maws100 es resistente y duradera, diseñada para operar en diversas condiciones climáticas. Puede integrarse con otros dispositivos y

---

sistemas de monitoreo, y suele venir con software de análisis para visualizar y analizar datos, contribuyendo así a la comprensión y monitoreo detallado de las condiciones atmosféricas.

#### 4.4. Validación de la simulación energética de los módulos de prueba en DesignBuilder

Se utilizó el software DesignBuilder para modelar y simular los módulos experimentales con y sin vegetación, validando así su comportamiento térmico. En este apartado, se presenta la geometría de los módulos de prueba y las propiedades térmicas de los materiales empleados en su construcción. La elección de DesignBuilder se basa en su capacidad avanzada de modelado 3D y en sus módulos interconectados, que permiten abordar tareas específicas de manera eficiente. Este software destaca por su versatilidad al evaluar diversas estrategias de diseño, incluida la integración de vegetación, y ofrece resultados detallados para una toma de decisiones informada en el diseño de edificaciones sostenibles. Su interfaz intuitiva y la capacidad de exportar resultados para análisis adicionales respaldan su preferencia sobre otros programas de simulación disponibles en el mercado.

##### 4.4.1. Geometría de los módulos de prueba

En la Figura 4.7 se ilustra las representaciones en DesignBuilder de las cavidades simuladas. Ambos módulos están alineados con la pared considerada, ya sea con o sin vegetación, orientada hacia el sur. Es relevante destacar que se mantuvieron las dimensiones y el color de la fase experimental, siendo estas de 1.2 m<sup>2</sup>, con una separación de 50 cm respecto al suelo.

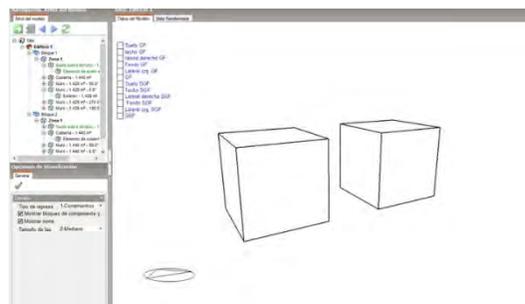


Figura 4.7. Diseño de los módulos de prueba en DesignBuilder.

#### 4.4.2. Propiedades termofísicas de los materiales de construcción de los módulos de prueba

Es crucial incluir las propiedades exactas de los materiales de construcción en la simulación para validar con precisión los resultados obtenidos en comparación con el experimento. La correcta especificación de las propiedades termofísicas garantiza que el software considere de manera adecuada las características térmicas de cada componente, permitiendo una simulación más precisa y una validación más efectiva del comportamiento térmico de los módulos experimentales. La Tabla 4.1 proporciona un desglose detallado de las propiedades termofísicas de los materiales utilizados en el modelo experimental.

Tabla 4.1. Propiedades termofísicas de los materiales de construcción de los módulos de prueba.

Material	Espesor m	$\lambda$ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	$\rho$ $\text{kgm}^{-3}$	$Cp$ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Madera OSB	1.8	0.13	650	1880
Foamular	2.5	0.0288	10	1470

Por otro lado, en la Figura 4.8 se muestran las propiedades superficiales que se utilizaron en el software. En cada módulo, se implementaron cinco de las seis caras con una estructura que consta de dos capas: una capa de madera y, en el interior, una capa de aislante térmico. La sexta cara se mantuvo sin aislante para comparar la transferencia de calor entre ambos módulos.

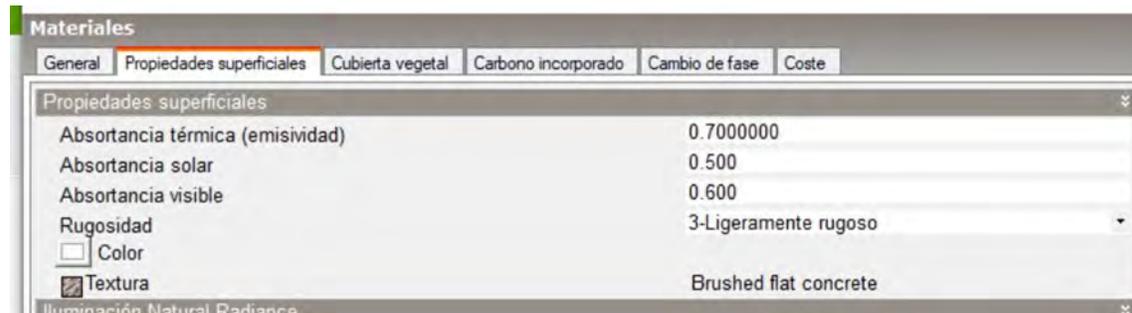


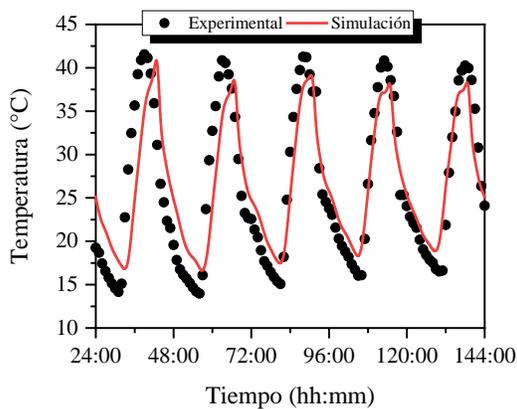
Figura 4.8. Propiedades superficiales de los materiales.

### 4.4.3. Resultados de la validación de la simulación energética

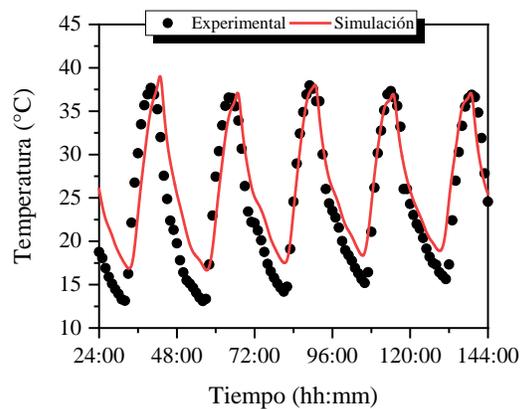
En esta sección, se examina el rendimiento térmico de la envolvente en diferentes áreas del módulo experimental, tomando en cuenta la superficie externa como las capas intermedias e internas. La observación se llevó a cabo durante un período continuo de 120 horas, equivalente a aproximadamente cinco días, durante la temporada de primavera (03 a 08 de marzo). Para realizar una comparación precisa entre los datos obtenidos experimentalmente y los datos simulados, se decidió utilizar el error MBE (Mean Bias Error), una técnica previamente empleada por [Zeng et al., 2017]. La elección de MBE (Ec. 4.1) se sustenta en su capacidad para proporcionar una medida cuantitativa de la diferencia promedio entre los valores simulados y experimentales, brindando así una evaluación más precisa del rendimiento del modelo en términos de sesgo medio.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y - x}{x} \quad (4.1)$$

La Figura 4.9a ilustra la temperatura registrada en la superficie externa de la pared sin vegetación, exhibiendo un valor máximo de temperatura registrada de 42.3 °C y una simulada de 41.2 °C. Asimismo, en la Figura 4.9b se presenta la temperatura al interior de la pared del módulo sin fachada verde, con un valor máximo de temperatura medida de 38 °C y una simulada de 38.6 °C. Por último, la Figura 4.9c presenta la temperatura del aire dentro de la cavidad, revelando una temperatura máxima registrada de 37.5 °C y una temperatura simulada 1.5 °C por debajo. Se observa una discrepancia promedio de 0.6 °C entre los datos experimentales y simulados.



(a)



(b)

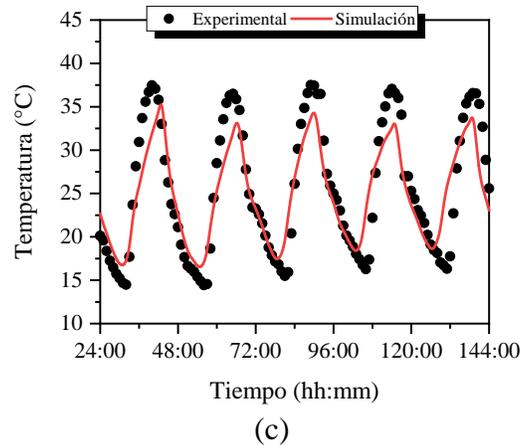


Figura 4.9. Comportamiento de temperatura en las superficies de análisis de la pared sin fachada verde (a) superficie exterior, (b) superficie interior y (c) aire en la cavidad.

La Tabla 4.2 presenta el Mean Bias Error (MBE), acompañado de los extremos superior e inferior de la temperatura de la superficie externa e interna de la pared en el módulo sin vegetación y del aire al interior de la cavidad. Tras la simulación de la cavidad sin la presencia de una fachada verde, se realizaron comparaciones que revelaron una discrepancia del 0.19 % en la temperatura de la superficie exterior de la pared, un 1.71 % para la superficie interna de la pared y un 0.58 % en la temperatura del aire en el interior.

Tabla 4.2. Valores máximos y mínimos de temperatura en diferentes zonas del módulo de prueba sin fachada verde.

Variable	Datos	Máximo	Mínimo	Promedio	MBE(%)
$T_{s,e}$	Experimental	42.3	14.0	26.4	0.19
	Simulados	41.2	16.4	26.6	
$T_{s,i}$	Experimental	38.0	13.1	24.5	1.71
	Simulados	40.2	16.5	26.2	
$T_{s,ic}$	Experimental	37.5	14.4	25.4	0.58
	Simulados	36.0	16.5	24.9	

Por otro lado, es importante destacar que el procedimiento de simulación de la fachada verde será abordado de manera detallada en el siguiente capítulo. En esta sección, se presentan exclusivamente los resultados obtenidos durante la validación de dicha simulación. Así, se proporciona un resumen de los resultados validados, evitando entrar en los aspectos técnicos del proceso de simulación.

En Figura 4.10a se representa el comportamiento de la temperatura en la superficie exterior de la fachada verde durante la etapa de validación. Es notable que la temperatura no excede los 38 °C en los cinco días analizados, atribuido a la presencia de la capa de vegetación actuando como una barrera solar, evitando la incidencia directa de la radiación en la pared. La máxima discrepancia entre los datos experimentales y simulados es 1.1 °C, mientras la mínima es 0.8 °C. En la Figura 4.10b se ilustra la temperatura en la superficie interior de la fachada verde, con una temperatura máxima experimental de 37.9 °C y una simulada de 35 °C. Además, se evaluó la temperatura del aire interior, mostrando en la Figura 4.10c que la diferencia máxima entre los dos conjuntos de datos es 2.2 °C, con un promedio de 1.2 °C. A lo largo del periodo de validación, la temperatura se mantiene por debajo de los 37 °C, alcanzando su punto más bajo el 03 de marzo entre las 6:00 y las 7:00 h.

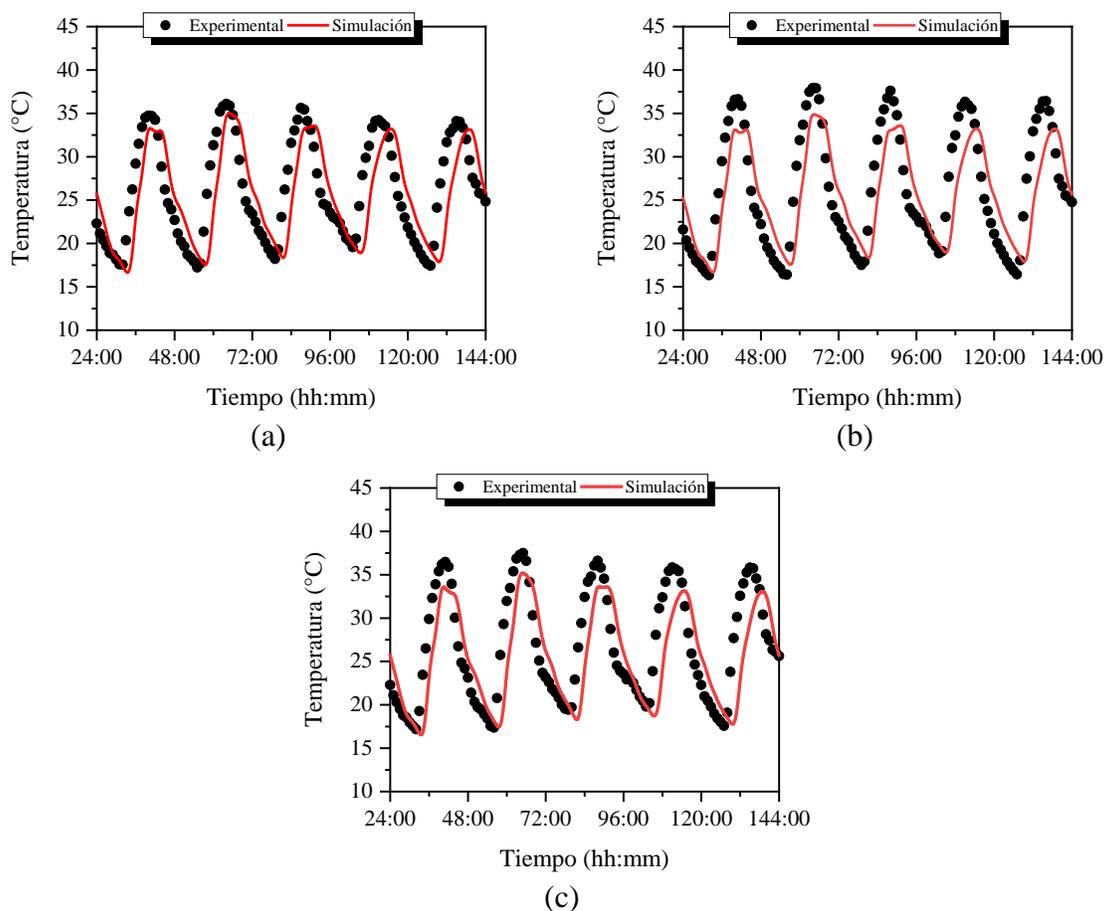


Figura 4.10. Comportamiento de temperatura en las superficies de análisis de la pared con fachada verde (a) superficie exterior, (b) superficie interior y (c) aire en la cavidad.

En la Tabla 4.3 se detallan el Mean Bias Error (MBE), así como los valores mínimos y máximos de la temperatura en la superficie exterior e interior del módulo con fachada verde y del aire interior. Los resultados de las simulaciones revelan un error del 0.45 % para la temperatura en la superficie exterior, 1.08 % para la superficie interior y 2.05 % para la temperatura del aire dentro de la cavidad en comparación con los datos experimentales, confirmando la robustez y validez del enfoque de simulación térmica utilizado

Tabla 4.3. Valores máximos y mínimos de la temperatura en diferentes zonas del módulo de prueba con fachada verde.

<b>Variable</b>	<b>Datos</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Promedio</b>	<b>MBE(%)</b>
$T_{s,e}$	Experimental	36.1	17.2	26.1	0.45
	Simulados	35.0	16.5	26.7	
$T_{s,i}$	Experimental	37.9	16.3	26.2	1.08
	Simulados	35.0	16.5	25.7	
$T_{s,ic}$	Experimental	37.5	17.2	26.7	2.05
	Simulados	36.0	16.3	25.6	

Es importante destacar que estas variaciones pueden deberse a múltiples factores, como las condiciones ambientales específicas durante el experimento, posibles variaciones en las propiedades térmicas reales de los materiales y limitaciones en la precisión del modelo de simulación. Estas diferencias resaltan la complejidad de la interacción entre los factores experimentales y los resultados simulados, subrayando la necesidad de considerar cuidadosamente todos los parámetros involucrados en la simulación para mejorar la concordancia entre los datos medidos y simulados.

Un análisis detallado de estas fuentes potenciales de variabilidad es esencial para mejorar la precisión y la representatividad del modelo de simulación térmica. Sin embargo, es relevante destacar que, a pesar de las diferencias observadas entre los datos experimentales y simulados en cuanto a la temperatura de la superficie exterior de la pared, el interior de la pared sin fachada verde y el aire al interior de la cavidad, el Mean Bias Error (MBE) se encuentra dentro del rango esperado. Esta métrica de evaluación indica que, en promedio, las simulaciones presentan una discrepancia aceptable con respecto a los datos experimentales, lo cual sugiere que el modelo de simulación empleado es consistente y proporciona resultados coherentes dentro de las condiciones establecidas.

---

# **CAPÍTULO V.**

## **SIMULACIÓN DE LA VIVIENDA CON Y SIN FACHADA VERDE**

En este capítulo, se presenta de manera detallada el proceso de simulación aplicado a la vivienda seleccionada, considerando tanto las condiciones con y sin la presencia de una fachada verde. Se describen con detalle las dimensiones, características y materiales de construcción específicos de este tipo de vivienda, todos ellos esenciales para la simulación energética. Además, se presentan los parámetros clave de la simulación, incluyendo aspectos críticos como las temperaturas de confort y las temperaturas mensuales del suelo. Este análisis se amplía con ajustes particulares realizados en la simulación para incorporar las propiedades de la fachada verde, utilizando como base los resultados experimentales obtenidos.

## **5.Simulación de la vivienda con y sin fachada verde**

### **5.1. Vivienda base o de referencia**

La construcción de viviendas conforme a la NOM-020-ENER-2011, en México se guía por rigurosos estándares de eficiencia energética. Según esta normativa, las edificaciones residenciales deben seguir criterios específicos para optimizar el uso de la energía. En el diseño y edificación de viviendas, se consideran aspectos como el aislamiento térmico, asegurando el uso apropiado de materiales que reduzcan la pérdida o ganancia de calor. Además, se promueve la implementación de sistemas de ventilación eficientes que contribuyan al confort interior sin comprometer el consumo energético. Asimismo, se incentiva el uso de iluminación artificial y natural eficiente, junto con la adopción de tecnologías de climatización que cumplan con estándares de eficiencia.

La estructura específica de la edificación se detalla en la Figura 5.1, donde se muestra que consta de dos plantas, cada una con una altura de 2.5 m. La envolvente del edificio abarca una superficie de 160 m<sup>2</sup>, mientras que el techo tiene una extensión de 54.3 m<sup>2</sup>. La orientación de la fachada principal es hacia el sur, y las dimensiones, así como la disposición de las ventanas, se describen con detalle en la Figura 5.2. La decisión de ubicar la fachada verde en la orientación sur se basó en el análisis del comportamiento de la radiación solar a lo largo del año en esta dirección.

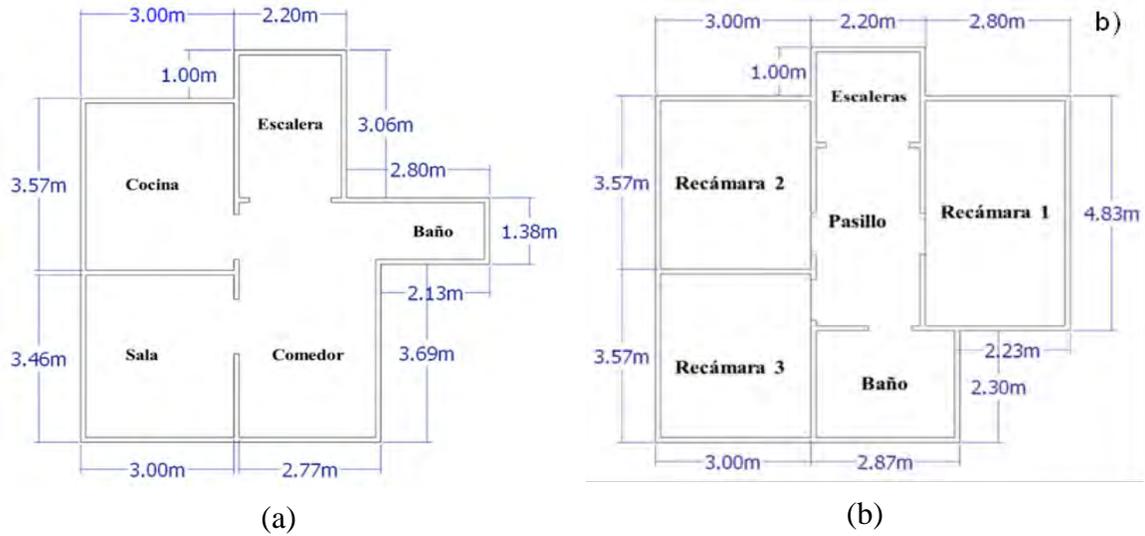


Figura 5.1. Planos de la vivienda de referencia (a) planta baja y (b) planta alta.

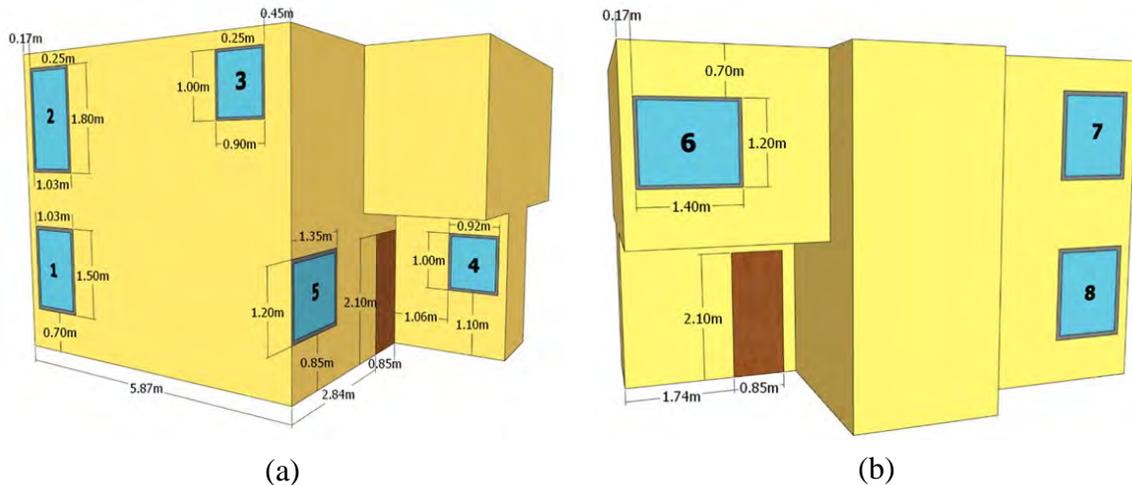


Figura 5.2. Dimensiones y posición de las ventanas y puertas en la vivienda, (a) fachada lateral y (b) fachada frontal.

Además, es importante resaltar que, para este estudio, no se consideró el impacto de las sombras proyectadas por las viviendas circundantes, a pesar de conocerse que la vivienda de estudio es de tipo adosado y forma parte de un conjunto de viviendas idénticas. La exclusión del efecto sombra de las viviendas en el eje este-oeste permite una evaluación completa de la transferencia de calor en toda la envolvente de la vivienda. Este enfoque no solo es aplicable a viviendas adosadas, sino que también se extiende a viviendas unifamiliares con construcción similar. De esta manera, se ha evaluado tanto el efecto de la transferencia de calor en toda la envolvente como la capacidad atenuante de la fachada verde sobre la ganancia de calor en la vivienda.

Tabla 5.1. Dimensiones y propiedades termofísicas de los materiales de construcción de la vivienda de referencia.

Elemento	Material	Espesor m	$C_p$ $Jkg^{-1}K^{-1}$	$\lambda$ $Wm^{-1}K^{-1}$	$\rho$ $kgm^{-3}$
Piso a nivel del suelo	Mosaico	0.010	795	1.136	2600
	Concreto	0.100	840	1.740	2300
Piso superior	Mosaico	0.010	795	1.136	2600
	Concreto	0.100	840	1.740	2300
	Yeso	0.015	1000	0.372	800
Muros	Yeso	0.015	1000	0.372	800
	Ladrillo	0.014	800	0.810	1600
	Mortero	0.015	837	0.720	1890
Techo	Yeso	0.015	1000	0.372	800
	Concreto	0.100	840	1.740	2300
	Impermeable	0.200	800	0.170	1127

Las propiedades de los materiales de construcción, detalladas en la Tabla 5.1, desempeñan un papel fundamental en la simulación energética conforme a la normatividad vigente. Estas propiedades termofísicas son esenciales para evaluar de manera precisa el comportamiento térmico del edificio, asegurando así la integridad y eficiencia de la simulación energética realizada. En la Tabla 5.2 se presentan, de manera complementaria, las propiedades específicas de las ventanas, otro elemento clave que contribuye significativamente a la eficiencia energética.

Tabla 5.2. Propiedades del acristalamiento [EnergyPlus].

Espesor	4mm
Conductividad térmica, $Wm^{-1}K^{-1}$	1
Transmitancia (solar)	0.816
Reflectancia interior(solar)	0.075
Reflectancia exterior (solar)	0.075
Transmitancia (visible)	0.892
Reflectancia interior(visible)	0.081
Reflectancia exterior (visible)	0.081
Transmitancia (infrarrojo)	0
Reflectancia interior(infrarrojo)	0.84
Reflectancia exterior (infrarrojo)	0.84

## 5.2. Parámetros de simulación

En esta sección, se detallan las consideraciones clave para la simulación energética de la vivienda. Se destacan los ajustes específicos realizados para incorporar la fachada verde al modelo, ya que DesignBuilder solo permite cubiertas vegetales en lugar de fachadas. Por consiguiente, se realizaron ajustes específicos a la fachada verde utilizada en la simulación para adaptar sus propiedades a la pared, los cuales se detallan a continuación.

### 5.2.1. Ajustes para la incorporación de la fachada verde a la vivienda

El proceso inicial implicó la creación y modificación de un nuevo material al que se le asignaron propiedades térmicas y superficiales específicas. La Figura 5.3a ilustra la edición de este material, mientras que la Figura 5.3b ofrece detalles de las propiedades del material denominado 'Acople de fachada verde'.

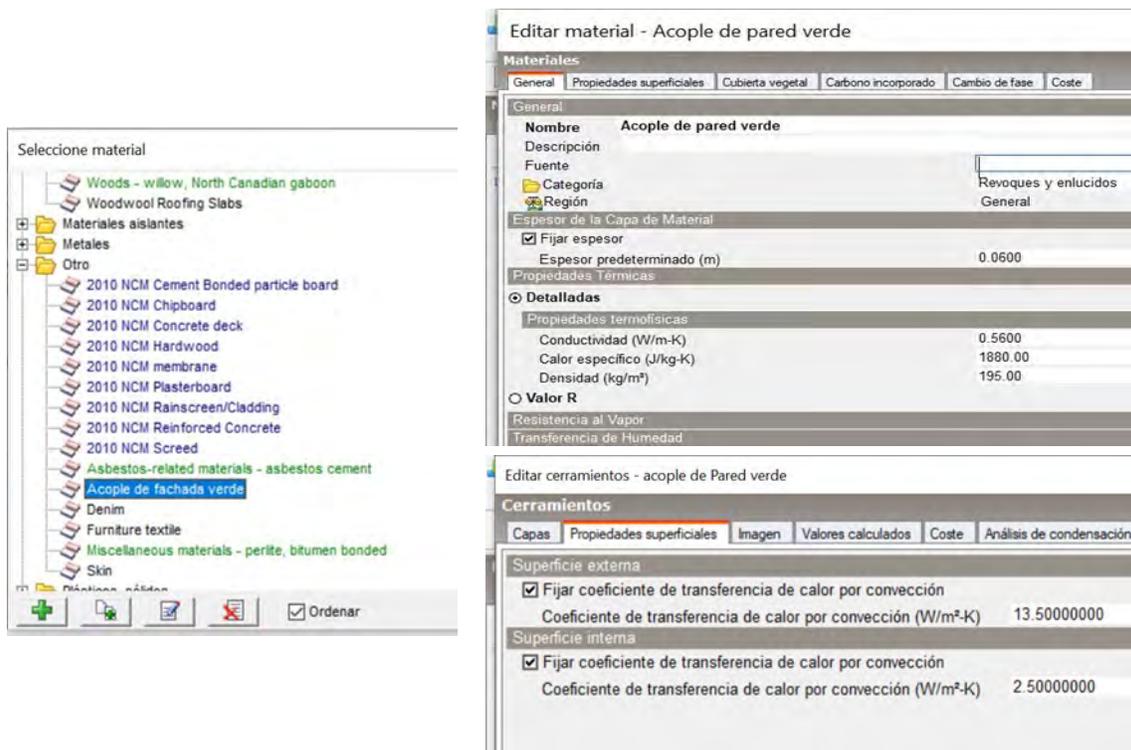


Figura 5.3. Edición de un nuevo material “Acople a fachada verde” y ajustes del acople (propiedades termofísicas y superficiales).

Los ajustes necesarios para integrar la fachada verde en las simulaciones se realizaron mediante la introducción de un equivalente de la resistencia térmica ( $R$ ). La resistencia térmica ( $R$ ) representa la capacidad de un material para resistir el flujo de calor, y asignar un valor equivalente a la fachada verde permite modelar su comportamiento térmico de manera efectiva durante las simulaciones. Este enfoque, que utiliza la resistencia térmica como equivalente, simplifica, pero efectivamente representa las propiedades térmicas de la fachada verde en el software de simulación. Este método facilita la incorporación de características específicas, como el espesor, conductividad y densidad de la fachada verde en el modelo, permitiendo al software considerar su impacto en el comportamiento térmico de la vivienda.

### 5.2.2. Condiciones climáticas

En esta sección se presentan los datos correspondientes a un año típico en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, clasificada bajo el sistema de clasificación climática de Köppen como Cwb (subtropical con invierno seco). Cuernavaca, conocida como la "Ciudad de la Eterna Primavera", disfruta de un clima cálido subtropical con temperaturas moderadas a lo largo del año. Este entorno climático se refleja en los valores mensuales proporcionados en la Tabla 5.3, donde se destacan las variaciones estacionales.

Tabla 5.3. Variación estacional de las condiciones climáticas durante un año típico en Cuernavaca, Morelos.

Mes	$V_{aire}$ ms <sup>-1</sup>	$T_{amb}$ °C	$T_{suelo}$ °C	$G_{solar}$ Wm <sup>-2</sup>
Enero	0.8	18.5	16.5	900.0
Febrero	0.8	20.7	18.7	946.0
Marzo	1.7	22.0	20.0	998.0
Abril	1.6	25.1	23.1	967.0
Mayo	1.4	25.7	23.7	940.0
Junio	1.6	22.1	20.1	970.0
Julio	1.9	22.0	20.0	975.0
Agosto	1.8	21.7	19.7	996.0
Septiembre	1.1	21.1	19.1	992.0
Octubre	0.7	21.4	19.4	976.0
Noviembre	0.7	19.9	17.9	866.0
Diciembre	0.6	20.7	18.7	815.0

A lo largo de los meses invernales, como diciembre y enero, las temperaturas ambientales tienden a ser frescas, mientras que, en los meses estivales, como junio y julio, experimentan un notable aumento. La velocidad del viento presenta variaciones a lo largo del año, siendo más pronunciada en los meses de marzo y agosto. En marzo, la radiación solar alcanza su punto máximo con  $998 \text{ Wm}^{-2}$ , mientras que en diciembre experimenta una disminución a  $815 \text{ Wm}^{-2}$ . Estas fluctuaciones mensuales reflejan el cambio en la posición del sol durante el año y su impacto en la intensidad de la radiación solar. Un mayor valor de radiación solar puede incidir en la ganancia de calor en la superficie de la vivienda y afectar las condiciones térmicas internas.

### 5.2.3. Temperatura de confort

En la Figura 5.4, se muestran las configuraciones implementadas en el software para integrar la temperatura de confort calculada para cada mes. La temperatura de confort refleja el nivel en el cual el cuerpo humano experimenta una sensación agradable, sin sentir ni calor ni frío. Se busca mantener esta temperatura deseada a lo largo del día y durante todo el año para facilitar las actividades diarias de los habitantes de manera cómoda. La relevancia de este concepto destaca en el diseño de edificaciones y en la aplicación de sistemas pasivos de climatización.

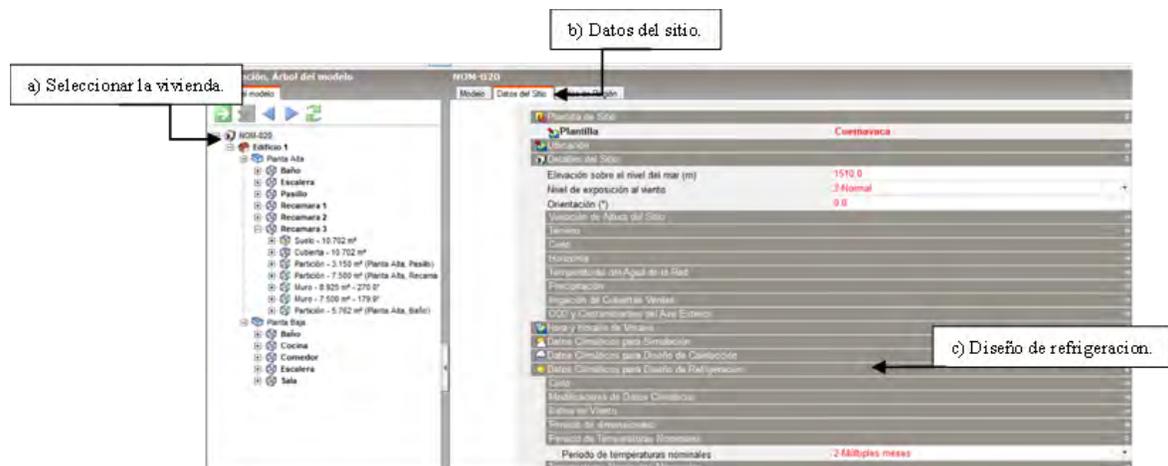


Figura 5.4. Ajustes para el setpoint de temperatura de confort mensual.

y la humedad relativa del entorno. El método adaptativo emerge como una estrategia fundamental para definir la zona de confort, al tener en cuenta directamente la temperatura

ambiente. Este método incorpora variables como el tipo de vestimenta, el calor metabólico, acciones como abrir ventanas, el uso de cortinas, la ventilación o la utilización de abanicos, lo que posibilita que el individuo se adapte a una zona específica, contribuyendo así a un ambiente más confortable.

En la Tabla 5.3, se presenta el intervalo de temperatura de confort mensual, obtenido mediante la correlación reportada por [Nicol, 2004]. Esta correlación se deriva de la ecuación (5.1). Estos valores representan las temperaturas consideradas óptimas para proporcionar condiciones térmicas confortables en un espacio habitable. Cada mes, se establece un intervalo que abarca desde la temperatura mínima hasta la máxima, reflejando así la variabilidad estacional en las preferencias de confort térmico.

$$T_{conf} = 0.534 (T_{ave,m}) + 12.9 \quad (5.1)$$

La consideración de la temperatura de confort es esencial para optimizar el diseño de sistemas de climatización y estrategias arquitectónicas, con el objetivo de mantener ambientes interiores que sean tanto energéticamente eficientes como agradables para los ocupantes.

Tabla 5.4. Temperatura de confort mensual para el setpoint en el software de simulación.

Mes	$T_{conf,min}$ °C	$T_{conf}$ °C	$T_{conf,max}$ °C
Enero	20.8	22.8	24.8
Febrero	22.0	24.0	26.0
Marzo	22.7	24.7	25.7
Abril	24.3	26.3	28.3
Mayo	24.6	26.6	28.6
Junio	22.7	24.7	26.7
Julio	22.6	24.6	26.6
Agosto	22.5	24.5	26.5
Septiembre	22.2	24.2	26.2
Octubre	22.3	24.3	26.3
Noviembre	21.6	23.6	25.6
Diciembre	22.0	24.0	26.0

Por otro lado, la utilización de la temperatura de confort se realizó con el objetivo de determinar si las condiciones térmicas de la vivienda se encuentran dentro del rango

considerado confortable para los ocupantes. Este análisis es importante, ya que la comodidad térmica tiene un impacto directo en la comodidad y el rendimiento de las personas que habitan o trabajan en un espacio.

Mantener la temperatura interna dentro del rango de confort contribuye significativamente a la calidad de vida, el rendimiento laboral y la satisfacción general de los ocupantes. Por ende, la integración de la temperatura de confort en el análisis refuerza la importancia de diseñar espacios que no solo sean eficientes desde el punto de vista energético, sino que también promuevan el bienestar y la comodidad de sus habitantes.

#### **5.2.4. Temperatura del terreno (tierra)**

En la Figura 5.5, se ilustran los pasos para ajustar la temperatura mensual del suelo, un proceso de gran importancia en simulaciones energéticas como las realizadas con el software DesignBuilder. Este software, al modelar el comportamiento térmico de edificaciones, considera la temperatura del suelo como un parámetro clave. La temperatura del suelo influye directamente en el intercambio de calor entre el suelo y la vivienda, así como en las condiciones térmicas internas. Indicar al software la variación mensual de la temperatura del suelo es fundamental, ya que esto permite simular con mayor precisión cómo los cambios estacionales afectan el rendimiento térmico de la edificación.

Es importante destacar que la temperatura del terreno mensual se presenta en la Tabla 5.3. Esta temperatura se calculó con base en la temperatura promedio mensual, reducida en 2 °C. Este ajuste se realiza para reflejar de manera más precisa las condiciones subterráneas, ya que la temperatura del suelo tiende a ser ligeramente más fresca que la temperatura ambiente. Integrar esta corrección en la simulación permite una representación más realista de la interacción entre la edificación y su entorno subterráneo, mejorando así la precisión de las simulaciones térmicas realizadas con el software DesignBuilder.

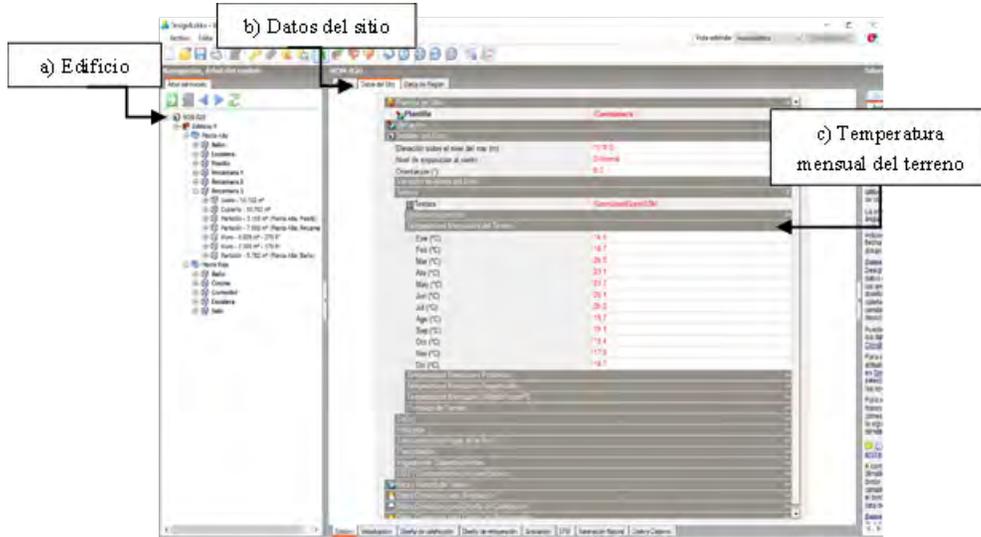


Figura 5.5. Ajuste de la temperatura del suelo dentro del software de simulación energética.

### 5.2.5. Periodos de la simulación

Las simulaciones se llevaron a cabo utilizando las condiciones climáticas representativas de un año normal (2016) en la Ciudad de Cuernavaca, Morelos, como se observa en la Figura 5.6. En este contexto, se omitieron sistemas de calefacción debido al clima predominante en la zona de estudio y se excluyeron factores como el índice de lluvias, cargas internas por iluminación, presencia de personas, equipos eléctricos y otras fuentes de energía, siendo consideraciones fundamentales en las simulaciones de la vivienda, tanto con la incorporación de la fachada verde como sin ella.

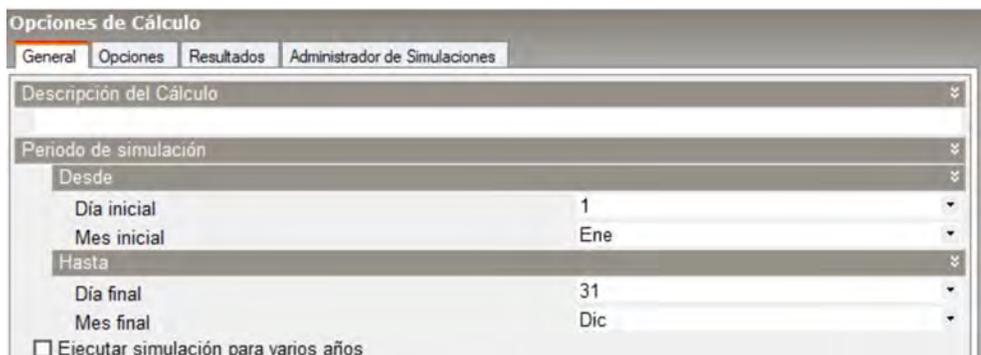


Figura 5.6. Ajuste del periodo de simulación dentro del software de simulación energética.

La evaluación energética anual de la fachada verde se vuelve esencial en este escenario, ya que permite analizar de manera integral su desempeño a lo largo de todo el año, considerando variaciones estacionales y condiciones climáticas diversas. La elección de un año completo, en este caso el 2016, garantiza una evaluación exhaustiva que abarca diferentes situaciones climáticas y períodos del año. Además, la exclusión de sistemas de calefacción y otros factores específicos resalta la contribución directa de la fachada verde en la regulación térmica de la vivienda, proporcionando así información precisa sobre su impacto en la eficiencia energética.

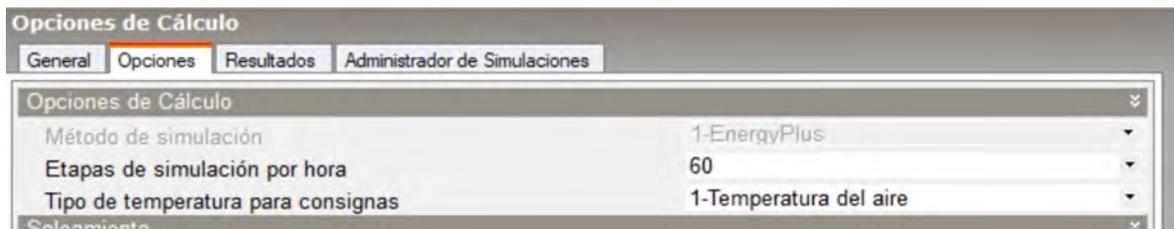


Figura 5.7. Pasos de tiempo para la simulación energética.

Los pasos de tiempo empleados en las simulaciones fueron establecidos en intervalos de 60 s tal como se ilustra en la Figura 5.7, evidenciando así una alta resolución temporal. Esta elección de intervalos breves es crucial para capturar cambios dinámicos y rápidos en las condiciones ambientales y de comportamiento térmico de la edificación. La importancia de utilizar pasos de tiempo más cortos radica en la capacidad de modelar con mayor precisión fenómenos transitorios que podrían pasar desapercibidos con intervalos más extensos.

En términos prácticos, emplear pasos de tiempo más cortos permite una representación más detallada de las fluctuaciones térmicas y eventos específicos a lo largo del tiempo, mejorando así la precisión de las simulaciones. Esto es particularmente significativo en situaciones donde se esperan cambios rápidos en las condiciones climáticas o en la respuesta térmica de la edificación, como en eventos meteorológicos extremos o ajustes bruscos en el uso del espacio. La selección de pasos de tiempo más cortos, por lo tanto, optimiza la capacidad del modelo para reflejar de manera fiel la dinámica realista de las condiciones evaluadas, brindando resultados más precisos y confiables en la evaluación del rendimiento energético y térmico de la vivienda.

Además, realizar simulaciones en software comerciales como DesignBuilder no implica un alto costo computacional en comparación con el desarrollo de código personalizado. Estos programas están diseñados para facilitar la modelación de edificaciones de manera eficiente, aprovechando la capacidad de procesamiento de las computadoras modernas. El uso de software comercial no solo agiliza el proceso de simulación, sino que también reduce la carga de trabajo asociada con el desarrollo y mantenimiento de código personalizado, permitiendo un enfoque más efectivo en la interpretación y aplicación de los resultados.

---

# CAPÍTULO VI.

## RESULTADOS

En este capítulo, se examinan las temperaturas promedio mensuales de la pared con y sin fachada verde en evolución libre, así como con la incorporación de un sistema de aire acondicionado. También se presentan las temperaturas promedio al interior de la vivienda, destacando el efecto de la fachada verde en el confort térmico. Este análisis se complementa con las cargas de enfriamiento mensual bajo el esquema de aire acondicionado, evidenciando el comportamiento del sistema en ambas condiciones de fachada. Un aspecto fundamental abordado en esta sección es el cálculo de las emisiones de dióxido de carbono al ambiente derivadas de la implementación del sistema de aire acondicionado en la vivienda. Este enfoque no solo considera la eficacia térmica del sistema, sino también su impacto ambiental. Al presentar estos resultados, se busca proporcionar información detallada sobre cómo la fachada verde y el sistema de aire acondicionado, sistema con un coeficiente de desempeño (COP, por las siglas en inglés) igual a 1, influyen en las condiciones térmicas internas y las emisiones de CO<sub>2</sub>, facilitando así una toma de decisiones informada en la búsqueda de soluciones sostenibles y eficientes en el diseño y gestión energética de las edificaciones.

## 6.Resultados

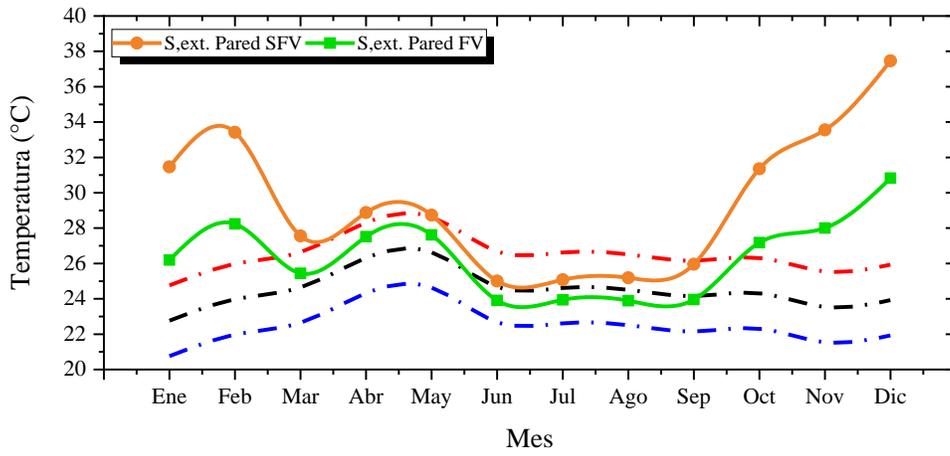
### 6.1. Análisis del efecto de una fachada verde sobre la temperatura superficial de la pared de análisis y la temperatura de una vivienda de referencia en evolución libre

La Figura 6.1 presenta de manera gráfica los resultados que respaldan el análisis de la temperatura promedio mensual en la superficie externa e interna de la pared de estudio, así como la temperatura promedio mensual del aire al interior de la vivienda, considerando dos escenarios distintos: con fachada verde (pared FV) y sin fachada verde (pared SFV), en evolución libre.

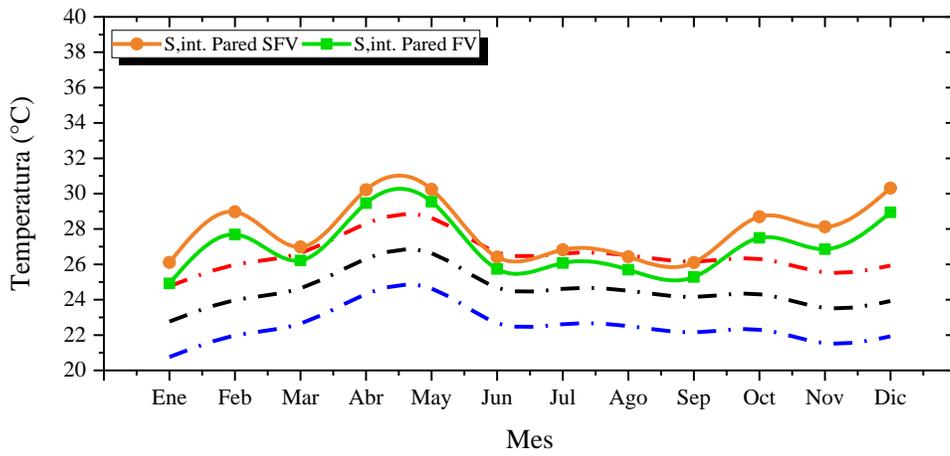
En el análisis de la superficie exterior de la pared, se observa una clara reducción de las temperaturas mensuales en el escenario con fachada verde (pared FV) en comparación con el escenario sin fachada verde (pared SFV). Por ejemplo, en enero, la temperatura promedio mensual en la superficie exterior disminuye de 31.5 °C (pared SFV) a 26.2 °C (pared FV). La reducción de la temperatura de superficie externa es una consecuencia de la reducción de la ganancia de calor por radiación solar, debido al efecto de sombreado que produce la vegetación, esta atenuación de temperatura se destaca más en los meses de otoño e invierno, cuando la radiación solar sobre la orientación sur es más alta, con respecto a los meses de verano. Asimismo, en la superficie interna de la pared, se aprecia una tendencia similar, donde la fachada verde contribuye a mantener temperaturas más bajas con respecto al caso sin fachada verde. Por ejemplo, en enero, la temperatura promedio mensual en la superficie interna disminuye de 26.1 °C (pared SFV) a 24.9 °C (pared FV). Estos resultados sugieren que la fachada verde actúa como un elemento de aislamiento térmico, influyendo positivamente en las condiciones internas de la vivienda. En cuanto a la temperatura del aire al interior de la vivienda, se observa una disminución en el escenario con fachada verde (pared FV) en comparación con el escenario sin fachada verde (pared SFV). Esta reducción es evidente a lo largo de los meses, siendo más significativa en los periodos más cálidos.

Las temperaturas promedio mensuales en la superficie exterior e interior de la pared, así como la temperatura del aire al interior de la vivienda, muestran variaciones consistentes con las condiciones climáticas y los valores de temperatura de confort mensual proporcionados, franja entre las líneas punteadas de color rojo y azul, ver Figuras 6.1a y 6.1b. En junio, julio y agosto, donde las condiciones climáticas presentan velocidades de aire ( $V_{aire}$ ) más altas y radiación solar ( $G_{solar}$ ) considerable,  $\approx 1000 \text{ Wm}^{-2}$ , ver Tabla 5.3, se observa que la fachada verde reduce significativamente las temperaturas en la superficie exterior e interior de la pared, así como en el aire interior de la vivienda. Por ejemplo, en agosto, la temperatura promedio mensual del aire interior disminuye de  $26.6 \text{ }^\circ\text{C}$  (pared SFV) a  $23.9 \text{ }^\circ\text{C}$  (pared FV), lo que muestra una reducción de la temperatura ambiente y la radiación solar en el interior. En contraste, en los meses más con temperatura ambiente más baja, la fachada verde también contribuye a mantener temperaturas más altas en la superficie exterior e interior de la pared, así como en el aire interior de la vivienda, con respecto a los resultados que se presentan con el caso de referencia. Al comparar estas temperaturas con los valores de temperatura de confort mensual, se evidencia que la fachada verde ayuda a mantener las condiciones internas dentro del intervalo de confort deseado, incluso en situaciones donde las condiciones climáticas podrían provocar temperaturas extremas, temperatura ambiente y radiación solar moderada a alta.

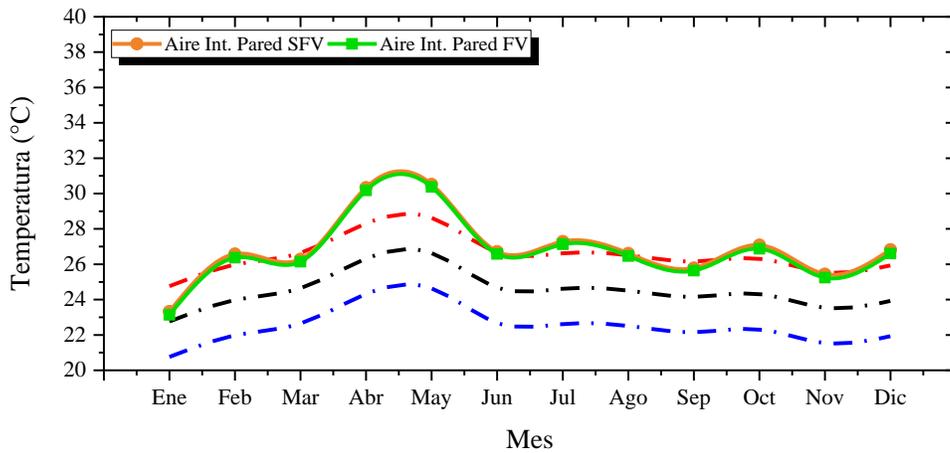
En lo concerniente a la temperatura promedio mensual del aire al interior de la vivienda, Figura 6.1c, durante los meses de invierno, como enero y diciembre, se observa que la temperatura promedio de la pared FV es ligeramente más baja que la de la pared SFV, ( $< 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ), indicando una mayor eficiencia en la reducción de la ganancia de calor. Esta diferencia, aunque sutil, sugiere que la fachada verde contribuye a mantener una temperatura superficial más cercana a la de confort durante los periodos más fríos, lo que indica una menor pérdida de calor, debido a una menor diferencia de temperaturas. En contraste, durante los meses de verano, la temperatura promedio de la pared FV es significativamente más baja que la de la pared SFV ( $23.1 \text{ }^\circ\text{C}$   $30.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Esta diferencia cuantitativa destaca la capacidad de la fachada verde para mitigar el calentamiento de la superficie exterior de la pared, proporcionando un beneficio adicional en términos de confort térmico. La magnitud de estas diferencias ( $7.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ) demuestra la eficacia de la fachada verde en reducir las variaciones térmicas estacionales y mantener condiciones más cómodas en el interior de la vivienda.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.1. Tendencia de temperatura en las superficies de análisis de la superficie (a) exterior, (b) interior de la pared de análisis y (c) del aire al interior de la vivienda con y sin fachada verde en evolución libre.

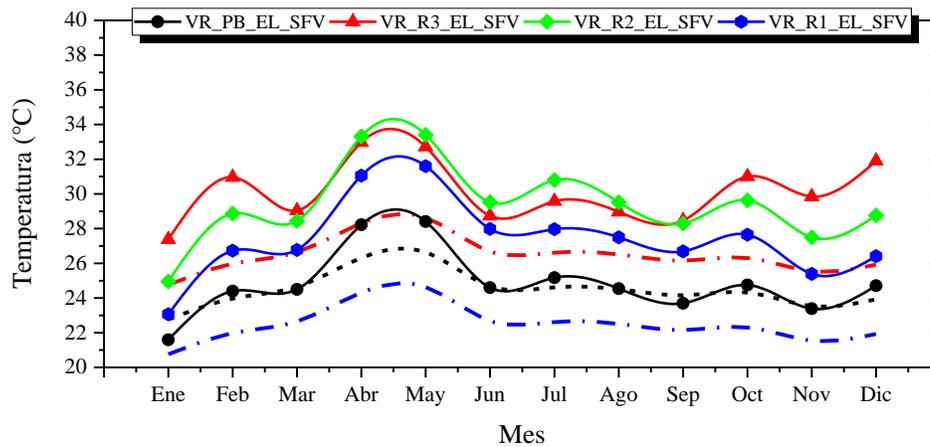
Al considerar la temperatura de confort mensual, se aprecia que, en general, la temperatura de la pared FV se mantiene más cercana al intervalo deseado, especialmente durante los meses cálidos, resaltando la contribución positiva de la fachada verde en la regulación térmica. La fachada verde actuó como un eficiente amortiguador térmico, manteniendo la temperatura de la superficie interior dentro de los límites del rango de confort durante una mayor parte del año, particularmente durante los meses más cálidos. Este comportamiento contrasta con la variabilidad observada en la pared sin fachada verde, donde las temperaturas extremas, tanto máximas como mínimas, se registraron fuera de los umbrales de confort durante varios meses. Además, el análisis detallado de la radiación solar muestra que la fachada verde logró absorber y reducir significativamente la radiación incidente en la superficie de la pared externa, evidenciando su capacidad para mitigar el impacto directo de la radiación solar hasta en 80 %.

Por otro lado, la fachada verde tuvo un impacto más significativo en la regulación térmica de la superficie exterior que en la pared interna. Sin embargo, es crucial destacar que la presencia de la fachada verde contribuyó a mantener temperaturas más cercanas al intervalo de confort en la pared interior durante los meses de verano, lo que respalda su influencia positiva en el confort térmico del ambiente interior al reducir el intercambio de calor considerablemente por la diferencia de temperaturas que se presenta. Por otro lado, en cuanto a la temperatura del aire interior, ambas configuraciones exhibieron comportamientos similares, con diferencias menores a 0.2 °C, esto se debe a que la fachada verde se incorpora únicamente a una pared de la vivienda, sin embargo, otros elementos de la envolvente que presentan una ganancia térmica significativa como el techo y las ventanas no fueron modificados de tal manera que el intercambio de calor entre la envolvente y el ambiente interior es similar para el caso sin fachada verde y con fachada verde.

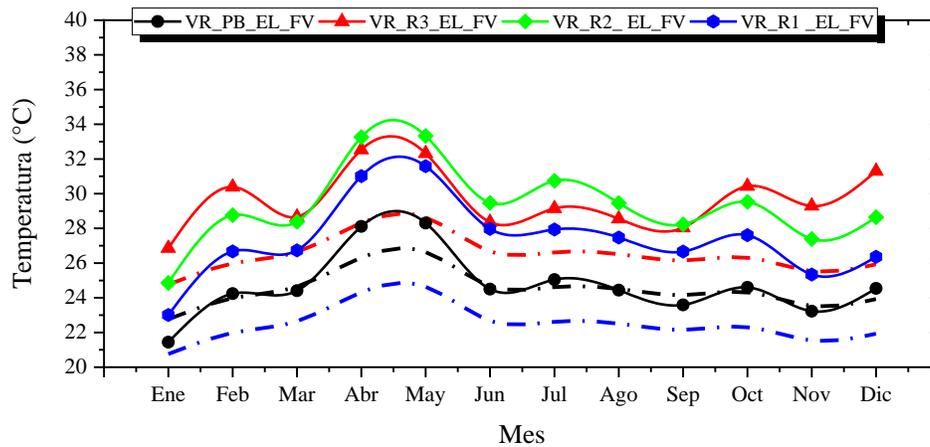
### **6.1.1. Análisis del comportamiento de la temperatura promedio mensual por zonas dentro de la vivienda de referencia en evolución libre**

La Figura 6.2 muestra el comportamiento de las temperaturas mensuales con valores mínimos, máximos y de confort, franja entre las líneas punteadas color rojo y azul, para

diferentes zonas específicas, incluyendo "Vivienda de Referencia en Planta Baja en Evolución Libre y Sin Fachada Verde (VR\_PB\_EL\_SFV)," "Recamara 3 en Vivienda de Referencia en Evolución Libre y Sin Fachada Verde (VR\_R3\_EL\_SFV)," "Recamara 2 en Vivienda de Referencia en Evolución Libre y Sin Fachada Verde (VR\_R2\_EL\_SFV)," y "Recamara 1 en Vivienda de Referencia en Evolución Libre y Sin Fachada Verde (VR\_R1\_EL\_SFV)", la distribución de la vivienda se presenta en el capítulo previo, Figura 5.1.



(a)



(b)

Figura 6.2 Comportamiento de la temperatura promedio mensual en cada zona de la vivienda, escenario: evolución libre (a) sin fachada verde y (b) con fachada verde.

Durante el período de enero a diciembre, la temperatura de confort se mantiene en un intervalo de 22.8 °C a 28.6 °C. Las temperaturas de la "Vivienda de Referencia en Planta Baja con Evolución Libre y Sin Fachada Verde" oscilan entre 21.6°C y 33 °C, siendo la más

baja en enero y la más alta en abril. Las "Recamaras 2 y 3" muestran variaciones, con temperaturas que alcanzan su punto máximo entre abril y mayo. Por otro lado, la presencia de la fachada verde sobre la pared orientada al sur influye positivamente sobre el confort térmico de las diferentes zonas, ya que la "Vivienda de Referencia" con fachada verde mantiene temperaturas más bajas. En promedio, las temperaturas con fachada verde son aproximadamente 1.5°C más bajas que las temperaturas sin fachada verde durante los meses de primavera y verano. En junio, por ejemplo, la temperatura en la "Recamara 2 (VR\_R2\_EL\_SFV)" es 1.3 °C más baja con fachada verde, alcanzando 23.3 °C en comparación con los 24.5 °C sin fachada verde. Además, la "Vivienda de Referencia en Planta Baja con Evolución Libre y Fachada Verde (VR\_PB\_EL\_FV)" mantiene temperaturas inferiores, con una diferencia de hasta 2.5 °C en julio. Las variaciones estacionales son evidentes, y la fachada verde demuestra tener un impacto positivo en la regulación térmica, contribuyendo a mantener ambientes más frescos en los meses de mayor temperatura. Aunque las diferencias son menos pronunciadas en los meses más frescos, se observa una tendencia favorable en la temperatura de la vivienda con fachada verde.

### **6.1.2. Horas de confort de la vivienda de referencia en evolución libre**

La Figura 6.3 muestra cómo la incorporación de una fachada verde impacta en el equilibrio de las horas de confort a lo largo de distintas estaciones. Estas horas se determinaron mediante la comparación de las temperaturas del aire dentro de la vivienda con el intervalo de confort establecido para cada mes.

La menor diferencia en el número de horas de confort entre con y sin fachada verde en enero se atribuye principalmente a las condiciones de temperatura ambiental de dicho mes. Durante enero, las temperaturas suelen ser más suaves y cercanas al rango de confort térmico, lo que reduce la necesidad de mecanismos adicionales como la fachada verde para moderar la temperatura. Aunque la radiación solar también es un factor importante, en este caso, la similitud en las horas de confort no se puede atribuir exclusivamente a la radiación solar, ya que, a pesar de la elevada intensidad solar en la orientación sur durante otoño e invierno, las temperaturas ambientales más moderadas en enero desempeñan un papel crucial en mantener

el confort térmico de manera más equilibrada. De hecho, la fachada verde muestra un efecto atenuante en el aislamiento térmico en octubre, aumentando las horas de confort en un 39 %.

A lo largo del año, la vivienda sin fachada verde registró un total de 6129 horas de confort térmico. En contraste, la introducción de la fachada verde resultó en un aumento anual del 13 % en las horas de confort, evidenciando así el impacto positivo de esta implementación en la vivienda.

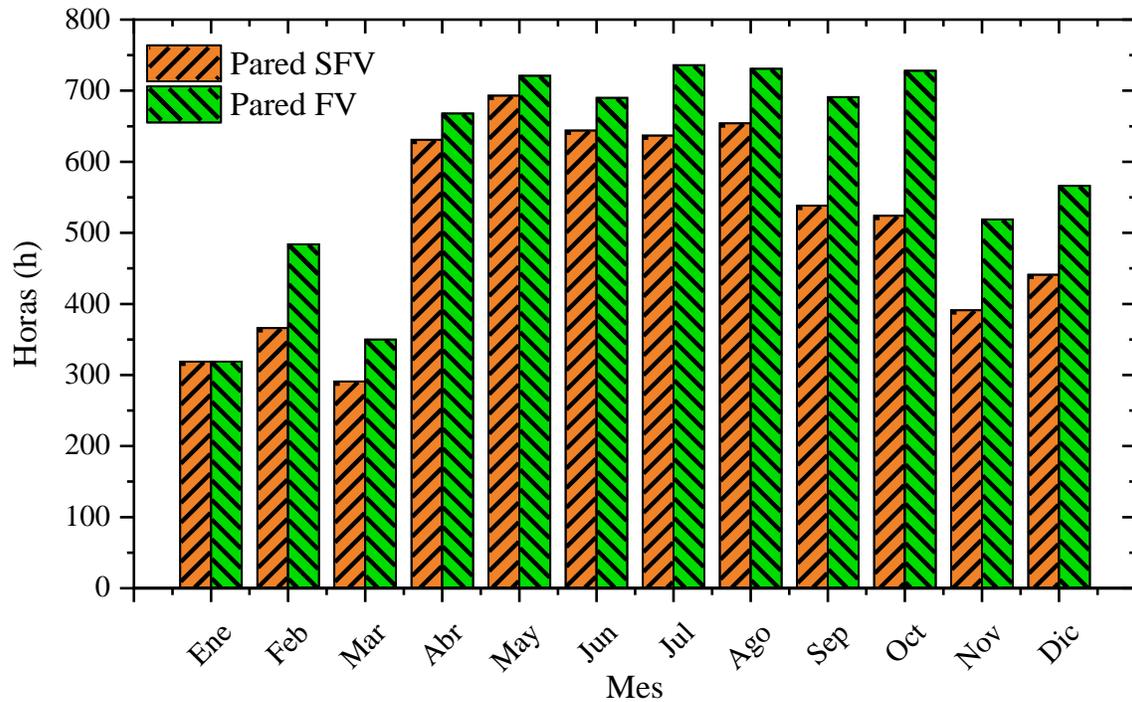


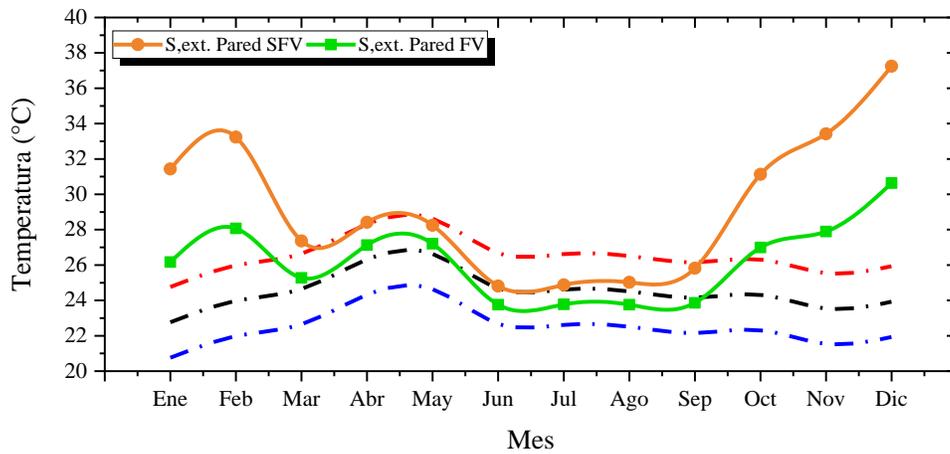
Figura 6.3. Número de horas que la temperatura de la vivienda permanece dentro del intervalo de confort establecido para cada mes.

## 6.2. Análisis del efecto de una fachada verde sobre la temperatura superficial de la pared de análisis y la temperatura de una vivienda de referencia con aire acondicionado

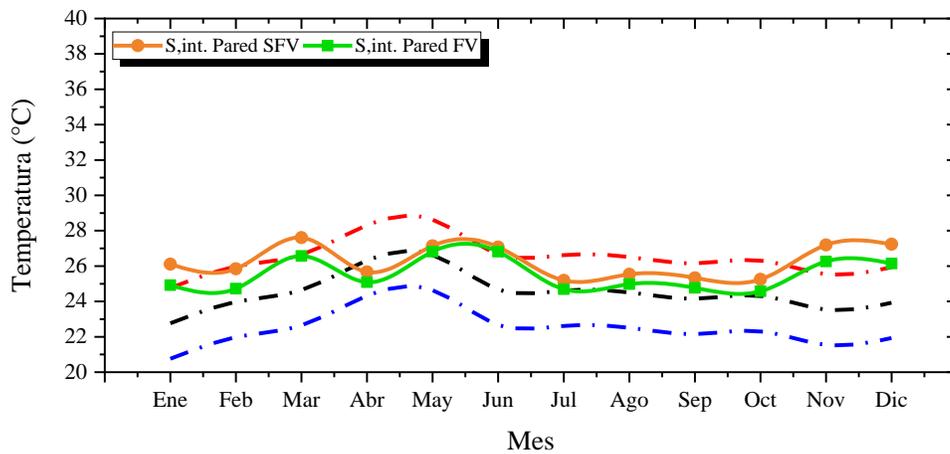
La temperatura en la vivienda en evolución libre se encuentra por encima de la franja de confort, instigando la exploración de medidas para su reducción. En este contexto, se llevó a cabo la simulación de una fachada verde como una estrategia para mitigar las elevadas temperaturas a lo largo del año. A pesar de la utilidad de esta tecnología, se observó que, para

la vivienda de referencia, esta aproximación resultó insuficiente para alcanzar la temperatura neutra, sin lograr una reducción adecuada. En respuesta a esta situación, se implementó un sistema de aire acondicionado, con la especificación de una temperatura de confort. Esto conlleva a que la vivienda sea simulada con un sistema de climatización diseñado para satisfacer la demanda necesaria y mantener las áreas dentro del intervalo de confort, con una capacidad de cobertura del 95 %.

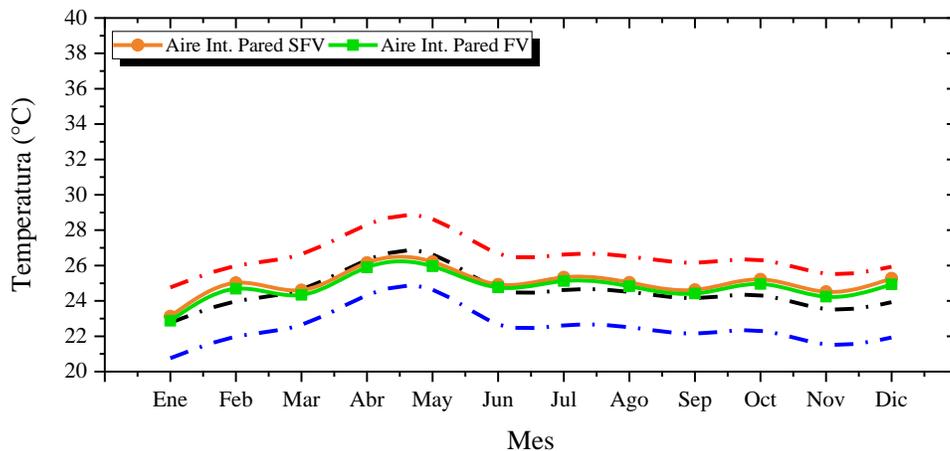
La Figura 6.4 presenta de manera gráfica los resultados que respaldan el análisis de la temperatura promedio mensual en la superficie externa e interna de la pared de estudio, así como la temperatura promedio mensual del aire al interior de la vivienda, considerando dos escenarios distintos: con fachada verde (pared FV) y sin fachada verde (pared SFV), con aire acondicionado.



(a)



(b)



(c)

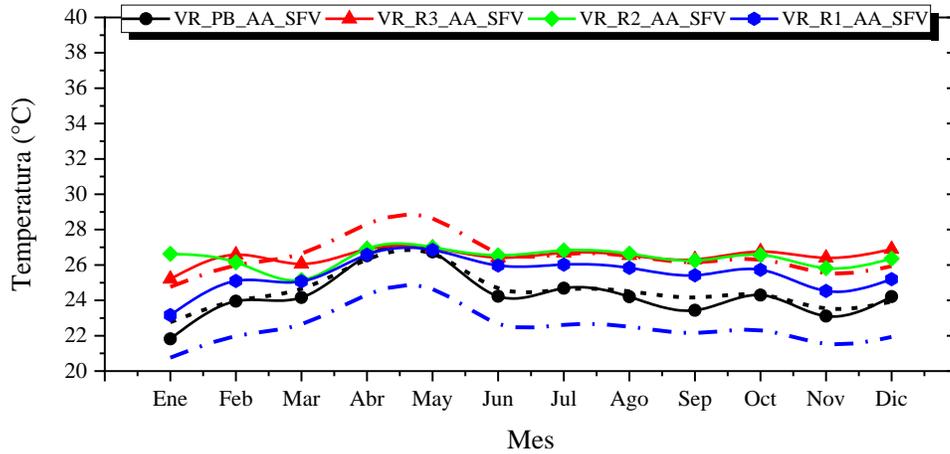
Figura 6.4. Comportamiento de temperatura en las superficies de análisis de la superficie (a) exterior, (b) interior de la pared de análisis y (c) del aire al interior de la vivienda con y sin fachada verde con aire acondicionado.

Los resultados evidencian que la combinación de una fachada verde y un sistema de aire acondicionado tiene un impacto significativo en las condiciones térmicas de la vivienda. En términos generales, la temperatura de la superficie exterior de la pared con fachada verde (FV) es considerablemente más baja que la configuración sin fachada verde (SFV), especialmente durante los meses más fríos del año, como enero, febrero y diciembre, donde las diferencias superan los 6 °C. Esta reducción se atribuye a un efecto de sombreado eficaz proporcionado por la vegetación, limitando la acumulación de calor en la pared exterior. En contraste, las temperaturas interiores de la pared y del aire muestran diferencias más moderadas pero consistentes. La fachada verde contribuye a mantener temperaturas internas más frescas, siendo más evidente durante los meses cálidos y ayudando a mitigar la necesidad de refrigeración mediante el sistema de aire acondicionado.

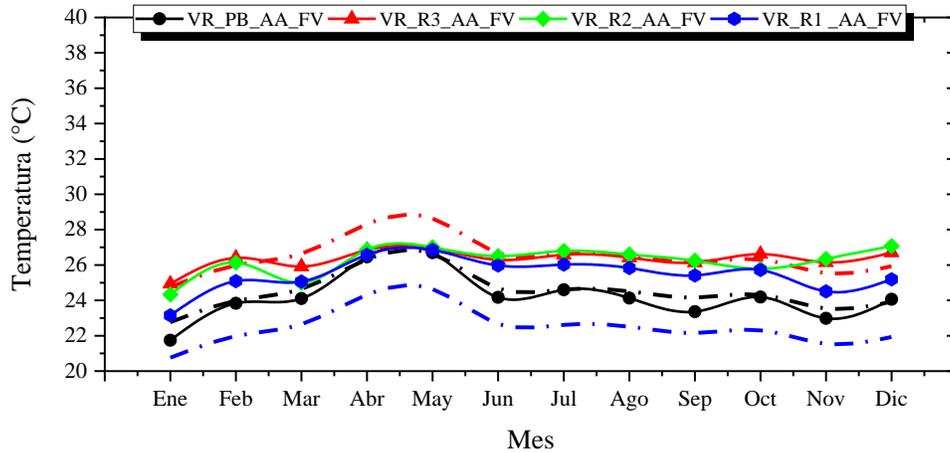
En general, la temperatura del aire al interior de la vivienda, considerando tanto la Pared FV como la Pared SFV, tiende a estar por encima de la temperatura de confort mensual a lo largo del año. En promedio, la diferencia entre la temperatura promedio del aire en la vivienda y la temperatura de confort es de aproximadamente 1 a 2 °C, siendo más notoria en los meses más cálidos, como junio, julio, y agosto. Esta tendencia sugiere que las condiciones térmicas internas no cumplen completamente con los estándares de confort establecidos. Esta situación podría influir en una mayor demanda de energía para el sistema de aire acondicionado, ya que los ocupantes podrían buscar compensar la falta de confort ajustando la temperatura interior a través del uso del sistema de climatización.

### 6.2.1. Análisis del comportamiento de la temperatura promedio mensual por zonas dentro de la vivienda de referencia con aire acondicionado

En la Figura 6.5 se muestra el comportamiento de la temperatura promedio mensual en diferentes zonas de la vivienda en el escenario con aire acondicionado.



(a)



(b)

Figura 6.5 Comportamiento de la temperatura promedio mensual en cada zona de la vivienda, escenario: aire acondicionado, (a) sin fachada verde y (b) con fachada verde.

Se observa una tendencia sistemática de reducción de las temperaturas en presencia de fachada verde. Por ejemplo, en enero, la "Vivienda de Referencia en Planta Baja con Aire Acondicionado y Fachada Verde (VR\_PB\_AA\_FV)" exhibe una temperatura de 21.7 °C, mientras que sin fachada verde es de 21.8 °C. La diferencia se amplifica en noviembre, donde

la "Recamara 1 (VR\_R1\_AA\_FV)" registra 24.5 °C con fachada verde, en comparación con los 25.5 °C sin fachada verde.

La diferencia estacional en las temperaturas, evaluada en el escenario con aire acondicionado y fachada verde, se manifiesta como un factor distintivo en la capacidad de esta estrategia para modular el confort térmico a lo largo del año. Durante los meses más cálidos, como junio, julio y agosto, se observa una tendencia consistente de reducción en las temperaturas en las zonas con fachada verde en comparación con las áreas sin esta característica. Por ejemplo, la "Recamara 2 (VR\_R2\_AA\_FV)" muestra una disminución significativa de hasta 1.6 °C en junio, evidenciando el impacto positivo de la fachada verde en la mitigación del calor.

### **6.3. Cargas de enfriamiento y emisión mensual de dióxido de carbono**

El desempeño energético de un edificio está influenciado por diversos factores, como la ubicación geográfica, los materiales de construcción y el diseño arquitectónico. En este contexto, los sistemas de climatización, particularmente los de calefacción y refrigeración, juegan un papel esencial para mantener un ambiente interior confortable. En este estudio específico, donde la calefacción no es necesaria debido al clima seleccionado, resalta la importancia de adaptar estos sistemas a las condiciones climáticas regionales para optimizar el consumo de energía y garantizar el confort.

La Figura 6.6 muestra la demanda de energía para refrigeración en la vivienda, estos resultados se derivan de la carga térmica y la conversión a demanda eléctrica para un coeficiente de desempeño (COP) equivalente a una unidad, comparando configuraciones con y sin fachada verde. Se destaca que abril presenta la mayor demanda de energía en la configuración sin fachada verde (pared SFV), alcanzando los 551.7 kWh, mientras que enero registra la demanda más baja con 185.6 kWh. Durante abril y mayo, los meses más cálidos, se genera la mayor carga de enfriamiento. Las fachadas verdes, al aprovechar la evapotranspiración, sombreado y mejor aislamiento térmico, emergen como una tecnología pasiva valiosa para mejorar la eficiencia energética en diferentes estaciones. En verano, reducen la temperatura del aire y la superficie, disminuyendo la necesidad de refrigeración.

En invierno, proporcionan aislamiento adicional y protección contra el viento. La demanda de energía para refrigerar la vivienda con fachada verde (pared FV) muestra que mayo es el mes de mayor consumo con 407.0 kWh, mientras que enero requiere la menor cantidad de energía, con 87 kWh.

La implementación de la fachada verde muestra impactos significativos en la demanda de energía para refrigeración. Comparando la configuración con fachada verde (pared FV) y sin fachada verde (pared SFV), se observa una reducción sustancial en la demanda de energía durante los meses más cálidos. En particular, durante abril, la demanda de energía disminuye en un 26.4 %, pasando de 551.7 kWh (pared SFV) a 407.0 kWh (pared FV). En mayo, se mantiene una reducción notable del 25.5 %, con 551.7 kWh (pared SFV) comparado con 407.0 kWh (pared FV). En general, la presencia de la fachada verde contribuye consistentemente a disminuir la necesidad de enfriamiento, proporcionando ahorros sustanciales de energía y reduciendo las emisiones asociadas al uso de sistemas de climatización.

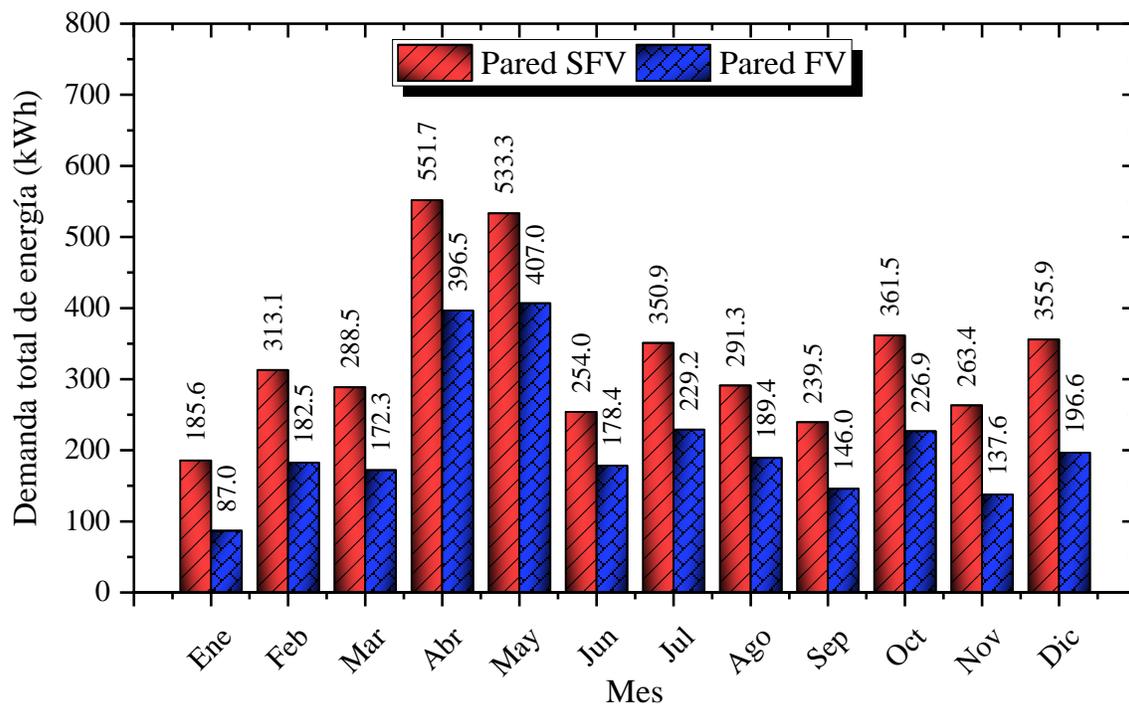


Figura 6.6. Demanda mensual de energía para enfriamiento.

Las emisiones mensuales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que se presentan en la Figura 6.7 muestran una clara correlación cuantitativa con la demanda de energía en las

configuraciones de pared sin fachada verde (SFV) y con fachada verde (FV), la conversión de energía eléctrica a emisiones de dióxido de carbono está basada en el factor de conversión de  $0.435 \text{ teCO}_2\text{m}^{-2}$  del año 2023 proporcionado por la Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente en México y está relacionado únicamente con la demanda de energía para sistemas HVAC. Durante los meses de mayor demanda de enfriamiento, como abril y mayo, las emisiones de  $\text{CO}_2$  alcanzan sus valores máximos en ambas configuraciones. En la configuración SFV, la demanda de energía y las emisiones de  $\text{CO}_2$  son más elevadas, con 334.3 y 323.2  $\text{kgeCO}_2$  en abril y mayo, respectivamente. Por otro lado, la configuración FV, a pesar de experimentar una disminución en las emisiones de  $\text{CO}_2$ , presenta también un aumento en la demanda de energía durante estos meses, con valores de 240.3 y 246.6  $\text{kgeCO}_2$  en abril y mayo, respectivamente. En contraste, enero, el mes con la temperatura ambiente más baja, exhibe las emisiones más bajas en ambas configuraciones. Estos datos cuantitativos destacan la estrecha relación entre la demanda de energía y las emisiones de  $\text{CO}_2$ , subrayando la importancia de estrategias sostenibles, como las fachadas verdes, para mitigar tanto la demanda de energía como las emisiones de gases de efecto invernadero.

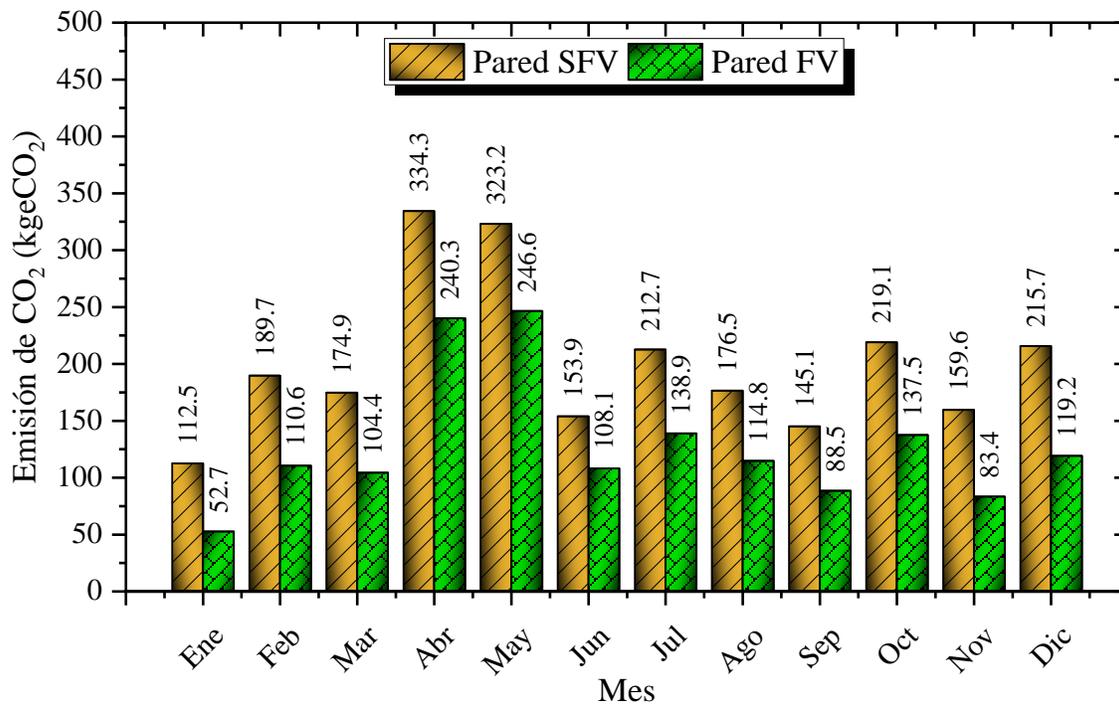


Figura 6.7. Emisión mensual de dióxido de carbono al ambiente.

## 6.4. Demanda energética anual y emisiones de dióxido de carbono

En términos de emisiones de CO<sub>2</sub> anuales, la configuración sin fachada verde (SFV) libera al ambiente un total de 2.4 toneladas. En contraste, la configuración de la vivienda con fachada verde (FV), con una demanda anual de 2549.6 kWh, emite solo 1.5 toneladas de CO<sub>2</sub> al año. Esto representa una notable reducción del 37.5% en la demanda eléctrica y en las emisiones de dióxido de carbono en comparación con la configuración sin fachada verde. El análisis resalta el impacto positivo de la fachada verde al mitigar tanto la demanda de energía como las emisiones de CO<sub>2</sub>, como se muestra la Figura 6.8.

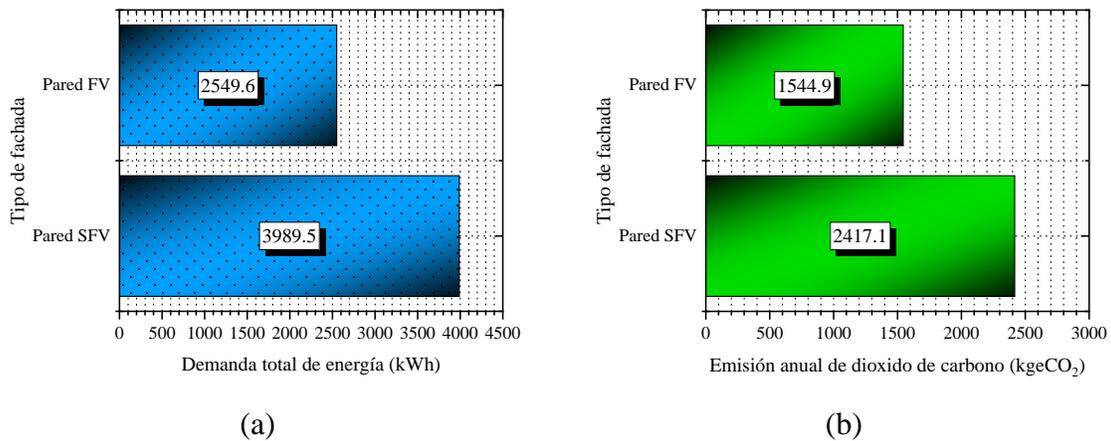


Figura 6.8. Resultados anuales de (a) demanda energética por enfriamiento y (b) emisiones de dióxido de carbono por demanda energética.

---

# **CAPÍTULO VII.**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En esta sección, se extraen los resultados más significativos derivados de este estudio sobre el impacto de la implementación de una fachada verde en la eficiencia energética y las condiciones térmicas de una vivienda. Los análisis detallados de las temperaturas, la demanda de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> revelan que la fachada verde desempeña un papel crucial en la reducción de la demanda de energía para enfriamiento, contribuyendo así a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero. La variación mensual de estas variables resalta la influencia estacional y sugiere la importancia de considerar factores climáticos al diseñar soluciones arquitectónicas sostenibles.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

### 7.1. Conclusiones

La ejecución del experimento con un módulo de prueba que presenta una fachada verde se mostró como un paso crucial para la obtención de información sobre las propiedades térmicas de la vegetación. Debido a que en el contexto actual el software de simulación energética utilizado está diseñado exclusivamente para considerar la función de vegetación en techos, sin abordar adecuadamente las propiedades térmicas específicas de las fachadas verdes. Por lo tanto, a través de la recopilación de las temperaturas en diferentes posiciones de la pared de análisis, se obtuvo una resistencia térmica equivalente de  $0.15 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ ; este valor se utilizó para validar la simulación energética del módulo de prueba; de este proceso se obtuvo un MBE de 2.5 %.

La fachada verde (pared FV) demostró una reducción significativa en las temperaturas promedio mensuales en comparación con la pared sin fachada verde (pared SFV). En enero, las temperaturas en la superficie exterior e interior disminuyeron en  $5.3 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $1.2 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente. En agosto, la temperatura del aire interior se redujo en  $2.7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Estos resultados destacan el papel de la fachada verde como aislante térmico, atenuando variaciones térmicas externas y mejorando el confort interno. Además, durante los meses más cálidos, la fachada verde contribuyó a mantener un rango de confort deseado, actuando como un eficiente amortiguador térmico y mitigando las variaciones estacionales.

En evolución libre, la vivienda de referencia sin fachada verde presentó un total anual de horas de confort de 6129 h, mientras que la incorporación de la fachada verde a la pared sur de la vivienda de referencia aumentó las horas de confort térmico en 13 %.

En el caso de la simulación de la vivienda con aire acondicionado, se encontró que la combinación de una fachada verde y un sistema de climatización impacta significativamente en las condiciones térmicas. Aunque las temperaturas interiores aún superan los límites de confort en algunos casos, hasta en  $3.8 \text{ }^\circ\text{C}$ , la fachada verde contribuyó a mantener

temperaturas más frescas, especialmente en los meses de primavera, lo que podría reducir la necesidad de refrigeración mediante el sistema de aire acondicionado.

La combinación de la fachada verde y el aire acondicionado demostró ser efectiva, especialmente en los meses más fríos, con diferencias de más de 6 °C en la superficie exterior de la pared. Aunque las temperaturas internas mostraron mejoras, la vivienda aún no cumplió completamente con los estándares de confort, sugiriendo una posible mayor demanda de energía para el sistema de aire acondicionado en busca de compensar la falta de confort, particularmente en los meses más cálidos.

En términos de carga de enfriamiento y emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), la fachada verde mostró reducir la demanda de energía para refrigeración en hasta 26.4 % en los meses con mayor demanda. Además, anualmente se presentó una reducción de la demanda total de enfriamiento y emisión de dióxido de carbono de 37.5 %.

Finalmente, el análisis detallado de la implementación de la fachada verde revela que esta estrategia resulta efectiva en reducir las temperaturas externas e internas de la pared, así como en mejorar el confort térmico en la vivienda. Durante los meses más cálidos, la fachada verde actúa como un amortiguador térmico eficiente, mitigando el impacto de la radiación solar y manteniendo condiciones más frescas en el interior. Sin embargo, para lograr una temperatura de confort, especialmente en verano, la combinación de una fachada verde con un sistema de aire acondicionado se presenta como la solución más efectiva. Aunque esta estrategia mejora significativamente el confort, persisten desafíos para cumplir completamente con los estándares de confort, indicando la posible necesidad de enfoques adicionales para optimizar las condiciones térmicas en la vivienda.

## **7.2. Recomendaciones**

Como recomendación para trabajos futuros, se sugiere explorar aún más la influencia de otros parámetros ambientales, como la humedad, en la eficacia de las fachadas verdes. Además, la implementación de tecnologías complementarias, como sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia, podría ofrecer una visión más completa de la sostenibilidad de dichas soluciones.

Para futuros trabajos, se recomienda tomar en cuenta el efecto de las sombras proyectadas por las viviendas circundantes sobre la vivienda de referencia. Además, se sugiere evaluar el efecto de la fachada verde en otras orientaciones. Este análisis adicional puede revelar beneficios adicionales o posibles desventajas que podrían no haber sido considerados previamente. Al comprender mejor cómo la orientación de la fachada verde afecta el rendimiento térmico de la vivienda, se pueden optimizar los diseños para maximizar los beneficios y minimizar las limitaciones.

Este estudio sienta las bases para futuras investigaciones centradas en la optimización y adaptación de fachadas verdes para diversos contextos climáticos y geográficos, promoviendo así prácticas arquitectónicas más respetuosas con el medio ambiente.

---

# **REFERENCIAS**

## Referencias

Abad, M., Noguera, P., & Burés, S. (2001). National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain. *Bioresource Technology*, 77(2), 197-200. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(00\)00152-8](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(00)00152-8).

Abad, B. M., P. Noguera M. y C. Carrión B. 2004. Los sustratos en el cultivo sin suelo. En: M. Urrestarazu G. Tratado de cultivo sin suelo. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. pp. 113-158.

Addo-Bankas, O., Zhao, Y., Vymazal, J., Yuan, Y., Fu, J., & Wei, T. (2021). Green walls: a form of constructed Wetland in green buildings. *Ecological Engineering*, 169, 106321. [doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106321](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106321)

Anderson, V., Žgela, M., & Gough, W. A. (2023). Building Urban Resilience with Nature-Based Solutions: A Multi-Scale Case Study of the Atmospheric Cleansing Potential of Green Infrastructure in Southern Ontario, Canada. *Sustainability*, 15(19), 14146. [doi.org/10.3390/su151914146](https://doi.org/10.3390/su151914146)

Andrić, I., Kamal, A., & Al-Ghamdi, S. G. (2020). Efficiency of green roofs and green walls as climate change mitigation measures in extremely hot and dry climate: case study of Qatar. *Energy Reports*, 6, 2476-2489. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.09.006>

ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests.

Ascione, F., De Masi, R. F., Mastellone, M., Ruggiero, S., & Vanoli, G. P. (2020). Green Walls, a Critical Review: Knowledge Gaps, Design Parameters, Thermal Performances and Multi-Criteria Design Approaches. *Energies*, 13(9), 2296. [doi.org/10.3390/en13092296](https://doi.org/10.3390/en13092296)

Ávila Alabarces, R. Tesis de Licenciatura, (2004). Manual de Riego de Jardines. E. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca.

Ávila Hernández, A. (2019). Simulación de una vivienda con techo verde y su efecto en el confort térmico. [Tesis de maestría en ciencias de la ingeniería mecánica, Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico]. <http://187.188.90.136:8880/file.php?code=rY5H1sH0nMeq>.

Ávila-Hernández, A., Sima, E., & Ché-Pan, M. (2023). Research and development of green roofs and green walls in Mexico: A review. *Science of The Total Environment*, 856, 158978. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158978>

- Blanc, P., Nouvel, J., Lalot, V., & Bruhn, G. P. (2008). The vertical garden: from nature to the city. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BB09710527>
- Blanco, I., Vox, G., Schettini, E., & Russo, G. F. (2021). Assessment of the environmental loads of green façades in buildings: A comparison with un-vegetated exterior walls. *Journal of Environmental Management*, 294, 112927. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112927>
- Banzi, M.; Shiloh, M. *Introducción a Arduino*; O'Reilly media-Grupo Anaya s.a.: Madrid, Spain, 2016; p. 128.
- Benassi, A. H. (2019). El paisaje de la cultura, fundamentos ecológicos en el diseño paisajista. <https://doi.org/10.35537/10915/30755>
- Bribach C. 2011. Vertical garden panel. US 2011/0059518 A1; 10 March 2011.
- Cardinali, M., Balderram, A., Arzmann, D., & Pottgiesser, U. (2023). Green walls and health: An umbrella review. *Nature-Based Solutions*, 3, 100070. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100070>
- Casal, A. G. (2019). Análisis comparativo de la eficiencia energética en edificios existentes con diferentes herramientas de simulación energética. <https://doi.org/10.35376/10324/16311>
- Cojocariu, M., Marta, A. E., Jităreanu, C. D., Chelariu, E. L., Căpșună, S., Cara, I. G., Amișculesei, P., Istrate, A., & Chiruță, C. (2024). A Study on the Development of Two Ornamental Varieties of Ipomoea batatas Cultivated in Vertical Systems in the Northeastern Region of Europe. *Horticulturae*, 10(2), 133. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10020133>
- Convertino, F., Blanco, I., Vox, G., & Schettini, E. (2023). Natural passive system for reducing winter night-time energy loss in buildings. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 1-15. <https://doi.org/10.1080/23789689.2023.2219182>
- Daemei, A. B., Shafiee, E., Chitgar, A. A., & Asadi, S. (2021). Investigating the thermal performance of Green Wall: experimental analysis, deep learning model, and simulation studies in a humid climate. *Building and Environment*, 205, 108201. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108201>
- De Lucia, M., Treves, A., & Comino, E. (2021). Rice husk and thermal Comfort: Design and evaluation of indoor modular green walls. *Developments in the Built Environment*, 6, 100043. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100043>
- Dede, Ö. H., Mercan, N., Özer, H., Dede, G., Pekarchuk, O., & Mercan, B. (2021). Thermal insulation characteristics of green wall systems using different growing media. *Energy and Buildings*, 240, 110872. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110872>

- Dominici, L., Fleck, R., Gill, R. L., Pettit, T., Irga, P. J., Comino, E., & Torpy, F. R. (2021). Analysis of lighting conditions of indoor living walls: Effects on CO<sub>2</sub> removal. *Journal of Building Engineering*, 44, 102961. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102961>
- Dunnett, N., & Kingsbury, N. (2004). Planting Green Roofs and Living Walls. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA76165351>
- Elgizawy, E. M. (2016). The effect of green facades in landscape ecology. *Procedia environmental sciences*, 34, 119-130. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.012>
- EnergyPlus, Version 6.0 Documentation, 2010, Engineering Reference, 26-35 y 58 – 103.
- Fisher, D.K. 2012. Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research. *Modern Instrumentation*, 1, 8–20.
- García C. O.; Alcántar G., G.; Cabrera, R. I.; Gavi R., F.; Volke H., V. 2001, Evaluación de sustratos para la producción de *Epipremnum aureum* y *Spathiphyllum wallisii* cultivadas en maceta, *Terra Latinoamericana*, vol. 19, núm. 3, pp. 249-258.
- Genevini, P., Adani, F., & Villa, C. (1997). Rice hull degradation by co-composting with dairy cattle slurry. *Soil Science and Plant Nutrition*, 43(1), 135-147. <https://doi.org/10.1080/00380768.1997.10414722>
- Gunawardena, K., & Steemers, K. (2019). Living walls in indoor environments. *Building and Environment*, 148, 478-487. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.014>
- Hadba, L., Di Bitonto, M. G., Oliveira, M., Mendonça, P., Zanelli, A., & Silva, L. T. (2024). A Nature-Inspired Green–Blue Solution: Incorporating a Fog Harvesting Technique into Urban Green Wall Design. *Sustainability*, 16(2), 792. <https://doi.org/10.3390/su16020792>
- Hunter, A. M., Williams, N. S. G., Rayner, J. P., Aye, L., Hes, D., & Livesley, S. J. (2014). Quantifying the thermal performance of green façades: A Critical review. *Ecological Engineering*, 63, 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.021>
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). *Información por entidad, Climatología*. México.
- Jim, C. Y. (2015a). Greenwall classification and critical design-management assessments. *Ecological Engineering*, 77, 348-362. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.021>

- Jim, C. Y. (2015b). Assessing growth performance and deficiency of climber species on tropical Greenwalls. *Landscape and Urban Planning*, 137, 107-121. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.01.001>
- Jim, C. Y. (2015c). Thermal performance of climber greenwalls: Effects of solar irradiance and orientation. *Applied Energy*, 154, 631-643. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.077>
- Jim, C. Y. (2015d). Cold-season solar input and ambivalent thermal behavior brought by Climber Greenwalls. *Energy*, 90, 926-938. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.127>
- Jim, C. Y., & He, H. (2011). Estimating heat flux transmission of vertical greenery ecosystem. *Ecological Engineering*, 37(8), 1112-1122. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.005>
- Karimi, K., Farrokhzad, M., Roshan, G., & Aghdasi, M. (2022). Evaluation of effects of a green wall as a sustainable approach on reducing energy use in temperate and humid areas. *Energy and Buildings*, 262, 112014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112014>
- Koch, K., Ysebaert, T., Denys, S., & Samson, R. (2020). Urban Heat Stress Mitigation Potential of Green Walls: A Review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 55, 126843. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126843>
- Köhler, M. (2008). Green facades—a view back and some visions. *Urban Ecosystems*, 11(4), 423-436. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0063-x>
- Koyama, T., Yoshinaga, M., Hayashi, H., Maeda, K., & Yamauchi, A. (2013). Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls. *Building and Environment*, 66, 96-103. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.020>
- Kumar, T. S., Shafi, K., Thomas, R. J., & Mohammed, J. (2023). Experimental evaluation of the thermal performance of coir mat and green facade as wall insulation in a tropical climate. *Thermal Science and Engineering Progress*, 40, 101757. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101757>
- Larsen, S. F., Filippín, C., & Lesino, G. (2015). Modeling double skin green façades with traditional thermal simulation software. *Solar Energy*, 121, 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.08.033>
- Lee A, Sian G, Greaves H. (2010). Green Wall System. WO 2010/009505 A1; 28 January.
- Lin, C., Wu, Z., Li, H., Huang, J., & Huang, Q. (2024). Comprehensive Analysis on the Thermal Comfort of Various Greening Forms: A Study in Hot-humid Areas. *Environmental Research Communications*. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad277e>

- Luque, G. P., & Arpon, J. C. (2024). Newly created ecosystems for a green built environment: Green roofs and green walls/facades. *Nature-Based Solutions*, 100111. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2024.100111>
- Mannan, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2022). Investigating environmental life cycle impacts of active living wall for improved indoor air quality. *Building and Environment*, 208, 108595. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108595>
- Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). Green Wall Systems: A review of Their Characteristics. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 41, 863-871. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>
- Mir, M. (2011). Green facades and Building structures. TU Delft Repositories. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:f262c218-8801-4425-818f-08726dde5a6c>
- Musy, M., Malys, L., & Inard, C. (2017). Assessment of direct and indirect impacts of vegetation on building comfort: A comparative study of lawns, green walls and green roofs. *Procedia environmental sciences*, 38, 603-610. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.134>
- Nagdeve, S. S., Manchanda, S., & Dewan, A. (2023). Thermal performance of indirect green façade in composite climate of India. *Building and Environment*, 230, 109998. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.109998>
- Nan, X., Yan, H., Wu, R., Shi, Y., & Bao, Z. (2020). Assessing the thermal performance of living wall systems in wet and cold climates during the winter. *Energy and Buildings*, 208, 109680. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109680>
- Newton, J. G. (2007). *Building Greener: Guidance on the Use of Green Roofs, Green Walls and Complementary Features on Buildings*. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA87572812>
- Nicol F. (2004). Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. *Energy and Buildings*. 36, 628–637.
- Othman, A. R., & Sahidin, N. (2016). Vertical greening façade as passive approach in sustainable design. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 222, 845-854. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.185>
- Ottel , M., Perini, K., Fraaij, A., Haas, E., & Raiteri, R. (2011). Comparative life cycle analysis for green facades and living wall systems. *Energy and Buildings*, 43(12), 3419-3429. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.010>
- Paull, N. J., Krix, D. W., Irga, P. J., & Torpy, F. R. (2021). Green Wall Plant Tolerance to ambient urban air pollution. *Urban Forestry & Urban Greening*, 63, 127201. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127201>

- Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2014). Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 39, 139-165. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.055>
- Pérez-Urrestarazu, L. (2021). Water consumption of felt-based outdoor living walls in warm climates. *Urban Forestry & Urban Greening*, 59, 127025. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127025>
- Perini, K., Ottel , M., Fraaij, A., Haas, E., & Raiteri, R. (2011a). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment*, 46(11), 2287-2294. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>
- Perini, K., Ottel , M., Haas, E., & Raiteri, R. (2011b). Greening the building envelope, facade greening and living wall systems. *Open Journal of Ecology*, 01(01), 1-8. <https://doi.org/10.4236/oje.2011.11001>
- Perini, K., & Rosasco, P. (2013). Cost–benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment*, 70, 110-121. [doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.012](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.012)
- Prodanovic, V., Hatt, B. E., McCarthy, D. T., Zhang, K., & Deletic, A. (2017). Green walls for greywater reuse: Understanding the role of media on pollutant removal. *Ecological Engineering*, 102, 625-635. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.045>
- Prodanovic, V., Zhang, K., Hatt, B. E., McCarthy, D. T., & Deletic, A. (2018). Optimisation of lightweight green wall media for greywater treatment and reuse. *Building and Environment*, 131, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.015>
- Ramadhan, A. M., & Mahmoud, A. A. (2023). Evaluating the efficiency of a living wall facade as a sustainable energy-saving alternative in hot arid regions. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70(1). <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00259-9>
- Reyhani, M., Santolini, E., Torreggiani, D., & Tassinari, P. (2022). Assessing the environmental performance of plastic-based and felt-based green wall systems in a life-cycle perspective. *Science of The Total Environment*, 822, 153648. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153648>
- Rivas, Y. A. (2019). Eficiencia del uso de muros verdes para disminuir los efectos negativos de la perdida de areas vderdes en las ciudades con el uso de materiales reciclados [Tesis de doctorado]. Universidad de Córdoba.
- Saifi, N., Settou, N., Necib, H., & Djamilia, D. (2013). Experimental study of thermal performance and the contribution of Plant-Covered walls to the thermal behavior of building. *Energy Procedia*, 36, 995-1001. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.113>

- Salazar, D.E. (2017). Diseño de jardines verticales en el interior de viviendas y la calidad de vida de los habitantes de la parroquia La Merced, [Tesis de licenciatura]. Universidad técnica de Ambato facultad de diseño, arquitectura y artes carrera de diseño de espacios arquitectónicos
- Sánchez-Reséndiz, J. A., Ruiz-García, L., Olivieri, F., & Ventura-Ramos, E. (2018). Experimental assessment of the thermal behavior of a living wall system in semi-arid environments of Central Mexico. *Energy and Buildings*, 174, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.060>
- Shafiee, E., Faizi, M., Yazdanfar, S. A., & Khanmohammadi, M. (2020). Assessment of the effect of living wall systems on the improvement of the urban heat island phenomenon. *Building and Environment*, 181, 106923. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106923>
- Shrestha, A., & Shimizu, T. (2021). Evaluation of the suppressive effects on solar radiation for a building façade covered with green layers in the Kathmandu Valley. *Environmental Challenges*, 5, 100246. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100246>
- Smith, P., & Romero, H. (2016). Factores explicativos de la distribución espacial de la temperatura del aire de verano en Santiago de Chile. *Norte Grande Geography Journal*, 63, 45-62. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022016000100004>
- Solano Maya, M. (2022). Estudio experimental y simulación numérica del comportamiento térmico de una vivienda residencial con techo verde ventilado [Tesis de maestría en ciencias de la ingeniería mecánica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico]. <http://187.188.90.136:8880/file.php?code=1jQJsdOvujv8>
- Sousa-Baena, M. S., Hernandez-Lopes, J., & Van Sluys, M. (2021). Reaching the top through a tortuous path: helical growth in climbing plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 59, 101982. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2020.101982>
- Stec, W., Van Paassen, A., & Maziarz, A. (2005). Modelling the double skin façade with plants. *Energy and Buildings*, 37(5), 419-427. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.008>
- Su, Y., & Hsu, Y. (2023). Computer-Aided simulation on the impact of the combination of High-Rise Building Wall and Roof Green Coverage ratio on urban microclimate. *Engineering Proceedings*, 55. <https://doi.org/10.3390/engproc2023055083>
- Susca, T., Zanghirella, F., Colasuonno, L., & Del Fatto, V. (2022). Effect of green wall installation on urban heat Island and building energy use: A climate-informed Systematic Literature review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 159, 112100. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112100>

- Susorova, I. (2015). Green facades and living walls. En Elsevier eBooks (pp. 127-153). <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-380-5.00005-4>
- Thomas, G. J., Thomas, J., Mathews, G. M., Alexander, S. P., & Jose, J. (2023). Assessment of the potential of Green Wall on modification of local urban microclimate in humid tropical climate using ENVI-MET model. *Ecological Engineering*, 187, 106868. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106868>
- Tudiwer, D., Teichmann, F., & Korjenić, A. (2019). Thermal bridges of living wall systems. *Energy and Buildings*, 205, 109522. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109522>
- Verdouw, C., Beulens, A., Verwaart, T., & Wolfert, J. (2011). Agile information systems for mastering supply chain uncertainty. En InTech eBooks. <https://doi.org/10.5772/24887>
- Wong, N. H., Tan, A. Y. K., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P. Y., Chan, D. J. C., Chiang, K., & Wong, N. C. (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 45(3), 663-672. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.005>
- Wong, N. H., Tan, A. Y. K., Tan, P. Y., & Wong, N. C. (2009). Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy and Buildings*, 41(12), 1401-1408. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.010>
- Zeng, C., Bai, X., Sun, L., Zhang, Y., & Yuan, Y. (2017). Optimal parameters of green roofs in representative cities of four climate zones in China: a simulation study. *Energy and Buildings*, 150, 118-131. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.079>
- Zhang, Y., Zhang, L., & Meng, Q. (2022). Dynamic heat transfer model of vertical green façades and its co-simulation with a building energy modelling program in hot-summer/warm-winter zones. *Journal of Building Engineering*, 58, 105008. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105008>



# **ANEXOS**

## Anexo A. Familiarización con el software de simulación energética

Durante la fase de verificación, se emplearon los casos 600, 610 y 600FF. En la Figura A.1a, se muestra el modelo geométrico correspondiente a los casos 600 y 600FF. Mientras el caso 600 se centra en evaluar las cargas térmicas anuales, el 600FF se enfoca en la temperatura de la zona. Por otro lado, la Figura A.1b presenta el modelo geométrico del caso 610, diseñado para analizar las cargas térmicas anuales bajo condiciones específicas de sombreado. Estas representaciones geométricas son esenciales para comprender la configuración de los casos de estudio y contribuyen a la validación de las simulaciones realizadas con el software DesignBuilder.

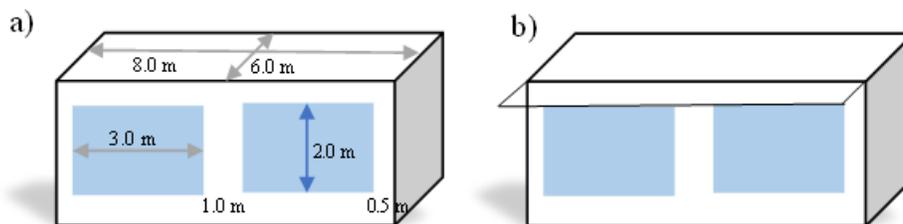


Figura A. 1. Modelo geométrico de los casos (a) 600 y 600FF y (b) 610.

Estas representaciones gráficas proporcionan una visión detallada del entorno simulado en cada caso de estudio. El caso 600 se concentra en analizar las cargas térmicas anuales, el 600FF evalúa la temperatura de la zona, y el caso 610 considera las cargas térmicas anuales bajo condiciones específicas de sombreado. Es relevante destacar que la configuración particular del Caso 600FF excluye la presencia de un sistema de climatización. La información suministrada establece las condiciones y parámetros clave para los casos de estudio en la ciudad de Denver, Colorado. A continuación, se presenta la Tabla A.1, que detalla los datos y configuraciones utilizados.

Tabla A. 1. Datos y configuraciones para llevar a cabo el BESTEST.

<b>Ubicación y Clima</b>	
Ciudad	Denver, Colorado, USA
Datos climáticos	Según la norma ANSI/ASHRAE 140-2011, en formato TMY (año meteorológico típico).
<b>Condiciones de Construcción</b>	
Infiltración	0.5 ACH
Ganancias internas	200 W por equipo, persona e iluminación.
Cargas térmicas calculadas para un período de un año.	Setpoints: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Calefacción: 20.0 °C.</li> <li>▪ Refrigeración: 27.0 °C.</li> </ul>

Por otro lado, las propiedades termofísicas de los materiales se reportan en la Tabla A.2. Estos datos proporcionan un marco integral para la simulación y el análisis de las cargas térmicas en los casos de estudio.

Tabla A. 2. Especificaciones de los materiales de los elementos principales de la envolvente de la edificación de los casos para el BESTEST.

Componente	Elemento	$\lambda$ Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	$\rho$ kgm <sup>-3</sup>	$C_p$ Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	e m
Paredes	Yeso	0.160	950	840	0.012
	Fibra de vidrio	0.040	12	840	0.066
	Madera	0.140	530	900	0.009
Techo	Yeso	0.160	950	840	0.010
	Fibra de vidrio	0.040	12	840	0.1118
	Cubierta	0.140	530	900	0.019
Piso	0.140	650	1200	0.025	0.140
	0.140	0.040	12	1.003	0.140

La coherencia en las condiciones climáticas, las características constructivas y los parámetros de simulación es crucial para obtener resultados confiables y comparables entre los diferentes escenarios. Cabe mencionar que es importante tener acceso a las tablas

anteriores para obtener detalles sobre las propiedades termofísicas de los materiales utilizados en las paredes, el techo y el suelo. La precisión en la representación de estas propiedades contribuirá significativamente a la validez y relevancia de los resultados obtenidos durante la investigación. Es relevante señalar que las ventanas de ambos casos están orientadas al sur. En la Tabla A.3 se detallan las propiedades térmicas y ópticas solares, visibles e infrarrojas de las ventanas, ofreciendo información adicional sobre los elementos clave que impactan en la dinámica térmica de los edificios estudiados.

Tabla A. 3. Dimensiones, propiedades termofísicas y ópticas de la ventana para todos los casos del BESTEST.

<b>Elemento</b>	<b>Valor</b>
Espesor de los vidrios	3.175 mm
Espesor del espacio de aire	13.0 mm
Coefficiente radiactivo/convectivo en el espacio de aire	$6.297 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
Densidad del vidrio	$2500 \text{ kgm}^{-3}$
Calor específico del vidrio	$750 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Conductividad térmica	$1.060 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Reflectancia solar exterior	0.07846
Reflectancia solar interior	0.07846
Transmitancia solar	0.86156
Transmitancia visible	0.91325
Reflectancia visible exterior	0.08200
Reflectancia visible interior	0.08200
Emisividad exterior	0.84000
Emisividad interior	0.84000

En la Tabla A.4 se presentan los resultados detallados obtenidos mediante el BESTEST para los casos 600 y 610. Estos datos específicos abarcan aspectos clave relacionados con las cargas térmicas anuales bajo condiciones particulares de sombreado. La información presentada en la tabla destaca las variaciones y similitudes entre los resultados de ambos casos, permitiendo una evaluación minuciosa de la capacidad del software DesignBuilder para abordar diferentes escenarios. Este análisis comparativo es esencial para comprender la eficacia del programa en la simulación de cargas térmicas en diversas condiciones y respalda la fiabilidad de los resultados obtenidos durante la fase de verificación del proyecto de investigación.

Tabla A. 4. Comparación de los resultados de la carga anual para los diferentes casos y diferencia porcentual promedio con respecto a la norma ANSI/ASHRAE 140 – 2011.

<b>Caso</b>	<b>Cargas de enfriamiento</b> MWh	<b>Cargas de calentamiento</b> MWh	<b>Diferencia porcentual promedio</b> %
600	6.613	4.728	4.9
610	4.618	4.767	4.6

Estas comparaciones demuestran la concordancia de los resultados obtenidos en este estudio con los valores definidos por la norma ANSI/ASHRAE 140-2011, revelando diferencias porcentuales promedio del 4.9% para el caso 600 y del 4.6% para el caso 610. La consistencia entre los resultados obtenidos y los estándares de referencia refuerza la validez y la precisión de las simulaciones realizadas en este proyecto.

En la Tabla A.5 se muestran los resultados correspondientes a la temperatura de la zona en el escenario de evolución libre del caso 600FF, revelando una discrepancia porcentual del 3.2% en comparación con la norma ANSI/ASHRAE 140-2011. Este análisis exhaustivo de las discrepancias porcentuales proporciona una comprensión más profunda de la fiabilidad de las simulaciones, asegurando que los resultados obtenidos sean coherentes y representativos de las condiciones establecidas por los estándares de la industria.

Tabla A. 5. Resultados de la temperatura de la zona para el caso BESTEST 600FF.

<b>Caso 600FF</b>	<b>Presente trabajo</b>	<b>ANSI/ASHRAE 140-2011</b>	<b>Diferencia (%)</b>
Temperatura de la zona, °C	25.0	25.8	3.2

## Anexo B. Proceso de simulación

DesignBuilder es una aplicación informática empleada para simular el rendimiento de los edificios en términos de energía y medio ambiente. Permite evaluar diversos aspectos como el consumo energético y el confort, entre otros, mediante sus herramientas. Al acceder a DesignBuilder, se accede a la pantalla inicial del programa. Desde allí, los usuarios pueden elegir un archivo de sesiones de trabajo anterior o realizar uno nuevo (consulte la Figura B.1).

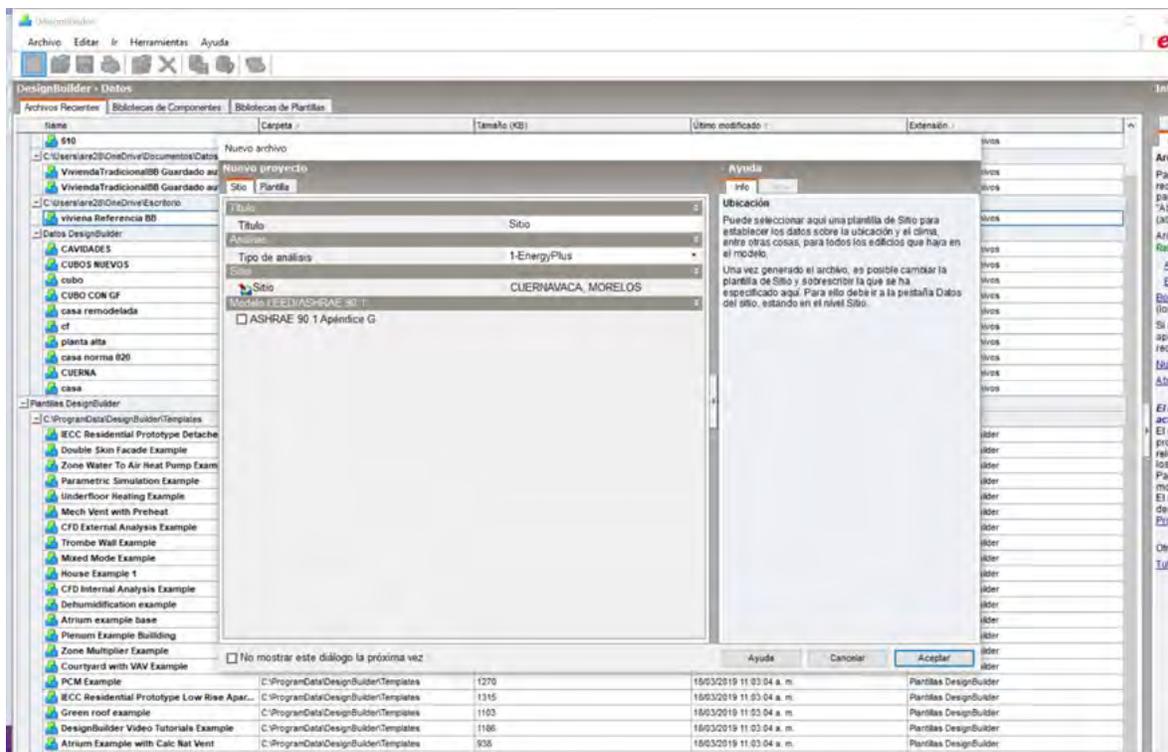


Figura B. 1. Pantalla principal del Software DesignBuilder.

La construcción del modelo 3D del edificio se lleva a cabo en la sección "Modelo" de la interfaz de edición, como se ilustra en la Figura B.2. Posteriormente, se asignan tablas del edificio, como "Actividad", "Cerramientos", "Aberturas", "Iluminación" y "HVAC". Además, en la etiqueta "CFD", se pueden establecer parámetros personalizados para el análisis CFD. En la etiqueta "Opciones de resultados" se especifican los resultados deseados para las simulaciones. Una vez que se ha creado el edificio, se puede visualizar la trayectoria

de la sombra según la posición del sol en la categoría "Visualización". Las secciones "Diseño de calefacción", "Diseño de refrigeración", "Simulación", "CFD", "Iluminación natural", "Coste" y "Carbono" concluyen el análisis del edificio con sistemas de calefacción y refrigeración.

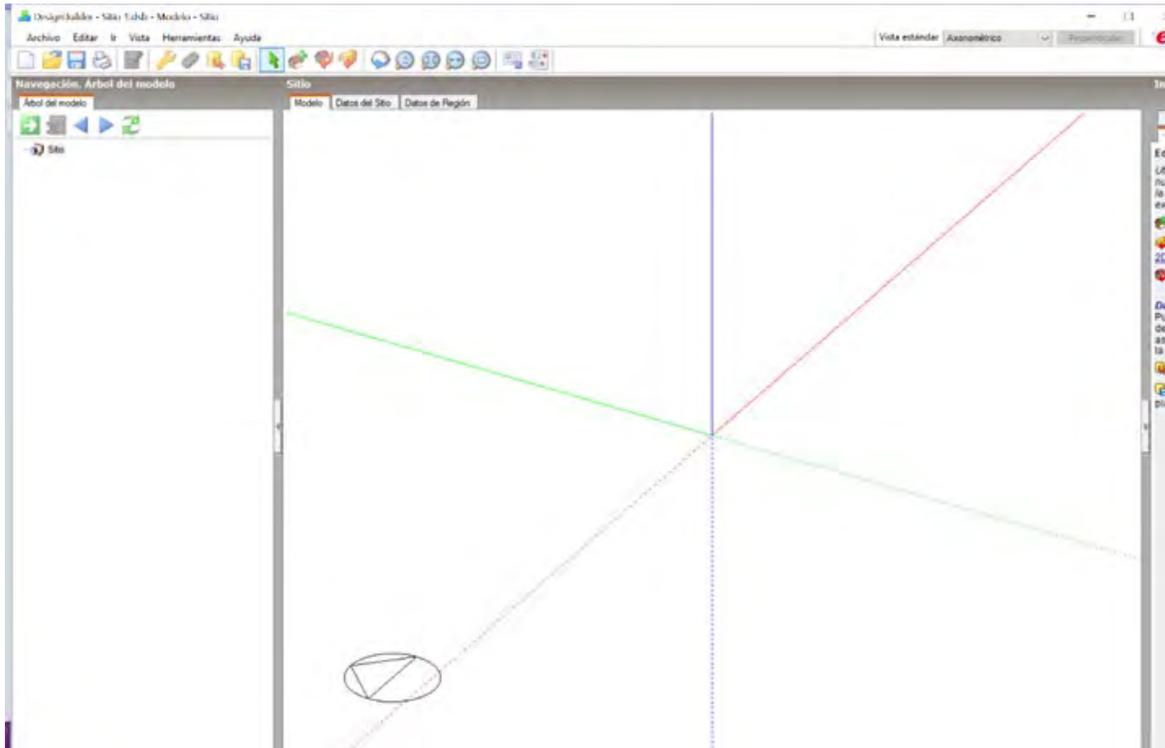


Figura B. 2. Pantalla de edición en DesignBuilder.

Por medio de la interconexión gráfica de usuario, DesignBuilder facilita la creación de modelos realistas de edificaciones en tercera dimensión para la modelización energética. El proceso inicia con la creación de un archivo "nuevo" y la selección de los datos climáticos preestablecidos o con la importación de un archivo EPW (EnergyPlus Weather); archivo de datos meteorológicos que contiene la información detallada sobre las condiciones locales, como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar, entre otros, que son esenciales para realizar simulaciones precisas. El proceso descrito anteriormente se muestra en la Figura B. 3.

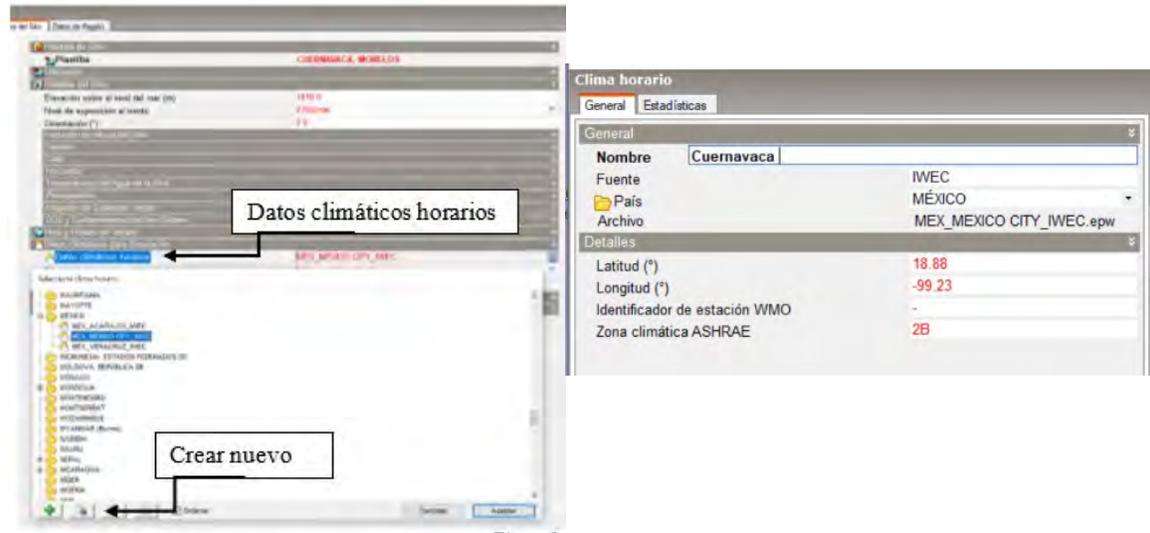


Figura B. 3. Pantalla para ingresar el archivo de clima en DesignBuilder.

Una vez seleccionado o creado el archivo climático, se procede a diseñar la geometría del edificio. En el contexto de DesignBuilder, la piedra angular del modelado reside en la creación de bloques, representados por formas geométricas básicas que pueden ensamblarse, moverse y transformarse según las necesidades del diseño. Estos bloques se generan al trazar perímetros en dos dimensiones sobre planos horizontales, verticales o inclinados, los cuales se extruyen para adquirir una configuración tridimensional, como se ejemplifica en la Figura B.4. Adicionalmente, el software facilita la importación de planos en formato DXF y archivos de dibujo Bitmap (PDF, BMP, JPG, PNG, GIF o TIFF). Esto amplía las opciones de diseño al permitir la integración de elementos provenientes de fuentes externas en el entorno de DesignBuilder.

Una vez establecida la geometría en DesignBuilder, el siguiente paso implica la creación de aberturas, interiores como exteriores, como puertas y ventanas. Este proceso puede llevarse a cabo de manera automática o de forma personalizada, permitiendo la elección de la pared específica donde se ubicarán. Utilizando trazos de perímetros sobre planos de dibujo activo, las aberturas se definen de manera clara y precisa, como se muestra en la Figura B.5. DesignBuilder proporciona herramientas especializadas que permiten la creación de aberturas con diversas formas y ángulos, brindando flexibilidad en el diseño.

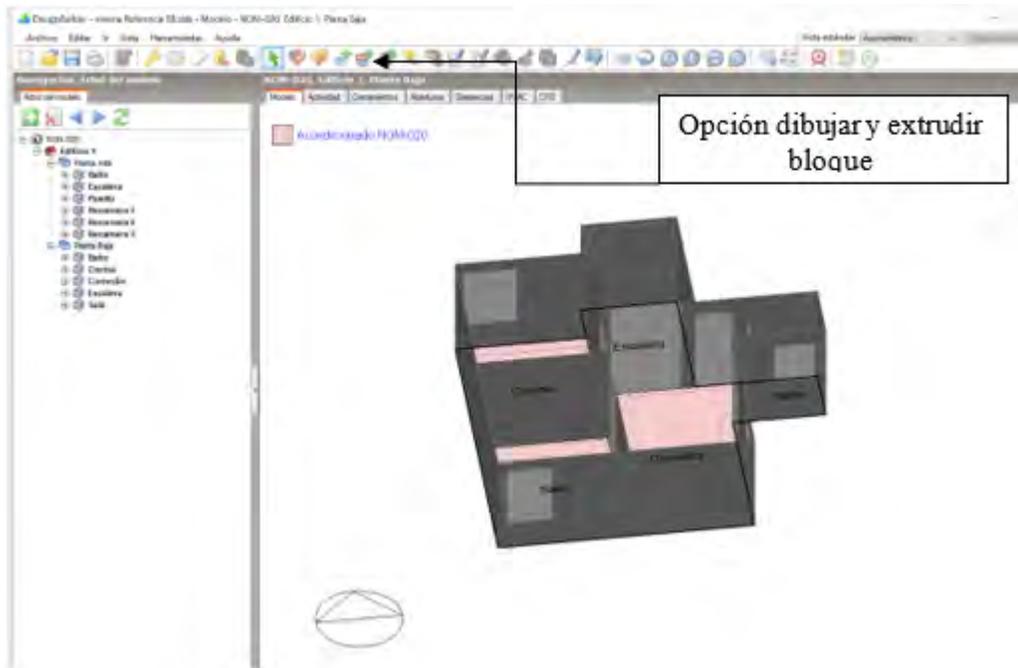


Figura B. 4. Modelo tridimensional del edificio.

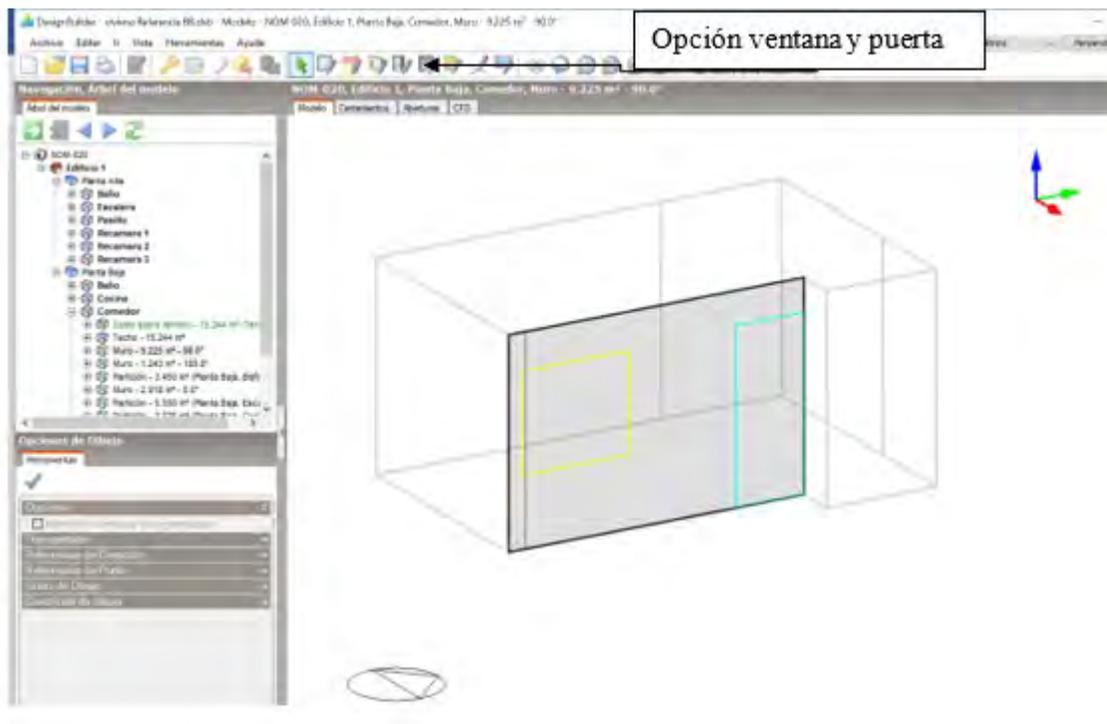


Figura B. 5. Creación de aperturas: ventanas y puertas.

Una vez dibujado el edificio y las aberturas como puertas y ventanas, se procede a introducir los materiales que conforman la construcción según el tipo de edificio y sus

propiedades termofísicas. Entre otras cosas, DesignBuilder utiliza "Cerramientos" para simular los elementos estructurales del edificio, como las paredes, los suelos y los techos. Estos elementos se ubican en la sección de "cerramiento", dentro de la interfaz principal de edición. Es posible configurarlos utilizando las plantillas predefinidas de "cerramientos" que el software maneja automáticamente, se puede crear, copiar o editar uno nuevo con las características que nosotros ocupemos como se observa en la Figura B. 6a. Por otro lado, la absorción y la reflexión de la radiación solar por parte de los cerramientos depende de las características físicas y térmicas de los materiales que los componen, así como de su comportamiento frente al calor. Es fundamental analizar la constitución de la envolvente del edificio, prestando atención especial al aislamiento térmico, la masa térmica y las propiedades fundamentales de los materiales, tanto en la superficie exterior como interior. La envolvente puede estar compuesta por una o varias secciones de materiales diversos o idénticos, cada una con las características específicas como la conductividad, la densidad y el calor específico, ver Figura B. 6b.

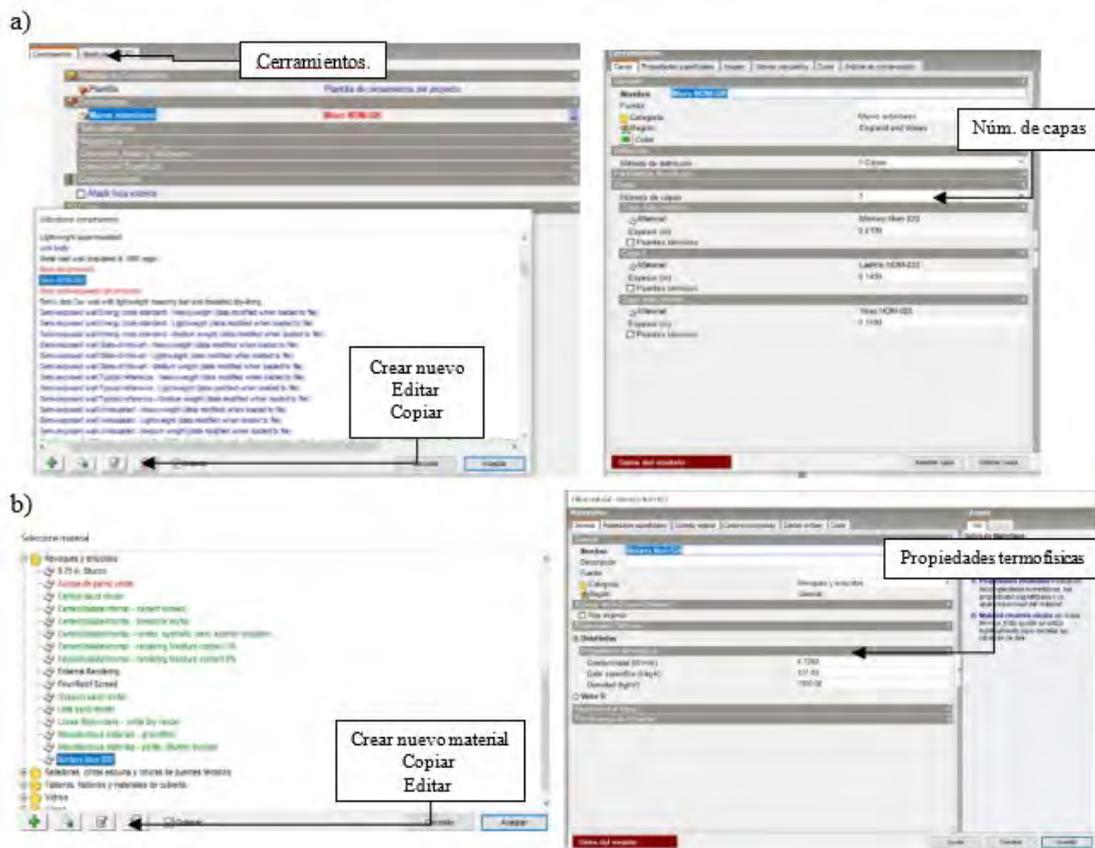


Figura B. 6. (a) cerramientos y (b) propiedades termofísicas.

En secuencia, se describen las funciones de las aberturas, como los marcos, divisores, puertas y ventanas. En la Figura B. 7 se especifica el tipo de cristal utilizado, su tamaño, los marcos de las ventanas, si se trata de un cristal sencillo o doble, y las propiedades ópticas correspondientes.



Figura B. 7. Características de las aberturas.

A continuación, se añade la actividad en la que se encuentra el edificio, la cual es crucial ya que influye en su comportamiento térmico. Deben tomarse en cuenta diversos elementos que impactan el consumo energético del edificio, como el perfil de ocupación (cantidad de personas, vestimenta y días festivos), cargas térmicas internas provenientes de aparatos y equipos (oficina, cocina, computadoras, etc.), la demanda de agua, las condiciones ambientales necesarias e iluminación, entre otros se detallan en la pestaña de “Actividad”. En la Figura B. 8 se muestra cada campo que conforman esta pestaña.

DesignBuilder utiliza sistemas HVAC para controlar los niveles de confort en los edificios, garantizando el cumplimiento de las normas ASHRAE, permitiendo sistemas eficientes de calefacción, refrigeración y ventilación. Esto se logra cambiando cada uno de sus componentes, a través de la pestaña “HVAC”, como se presenta en la Figura B. 9.



Figura B. 8. Pestaña de actividad en el edificio.

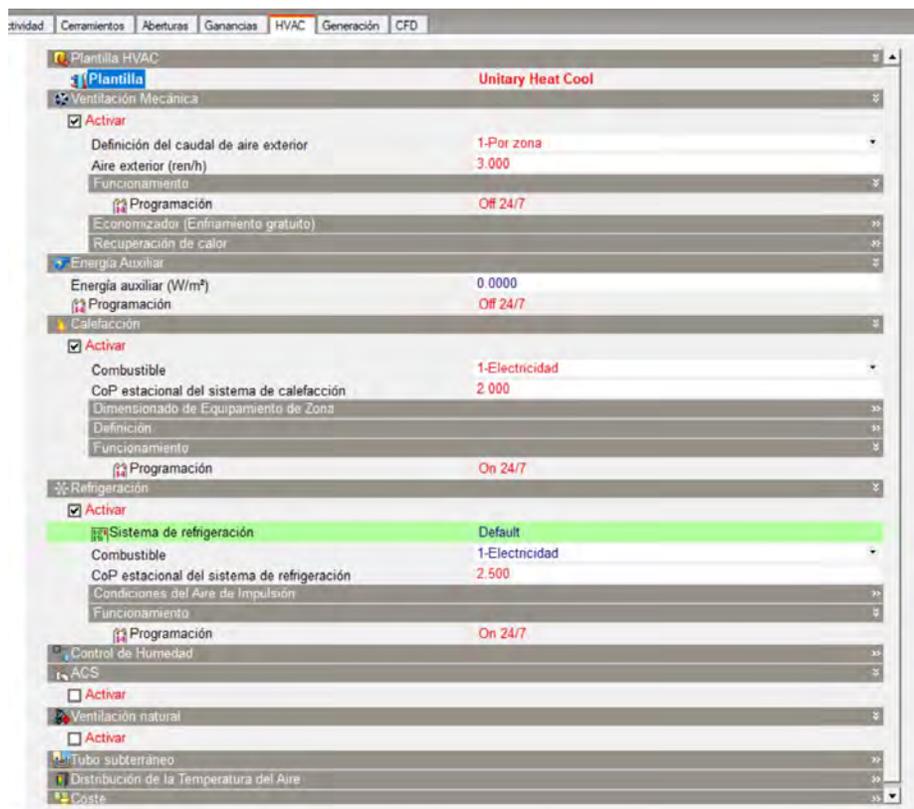


Figura B. 9. Desglose de la pestaña HVAC en DesignBuilder.

El plazo de simulación se ajusta una vez finalizada la construcción. La página de opciones de cálculo especifica el tiempo requerido para las simulaciones, que puede oscilar entre 2 y 60 por hora. En la pestaña de opciones de cálculo se detallan el periodo de simulación esta puede ser semanal, mensual y anual. Todos los edificios están incluidos en el cálculo del soleamiento. En el panel de Configuración de Resultados, elija variables de un conjunto predefinido de resultados. Esta función posibilita la producción de resultados promedio y totales para las áreas en el Edificio y el Bloque. Los resultados abarcan transferencias térmicas en superficies, balances energéticos (incluyendo transferencia de calor en superficies, energía interna y solar, sistemas HVAC y consumo de energía latente), aspectos de confort y medio ambiente (calidad del aire y aire acondicionado), así como detalles relacionados con las superficies y cerramientos, como se muestra en la Figura B.10.

Una vez finalizada la simulación, DesignBuilder muestra los resultados por defecto en forma de celdas. Sin embargo, esta opción se puede modificar en la lista de opciones de visualización (generales), situada en la parte izquierda del software. El desglose de las pestañas se parece al de la Figura B. 11a. Una vez que se haya seleccionado el formato en el que se desean visualizar los resultados, estos se pueden guardar utilizando la pestaña de exportar datos, ya sea en formato .CSV o .PNG, como se muestra en la Figura B. 11b.

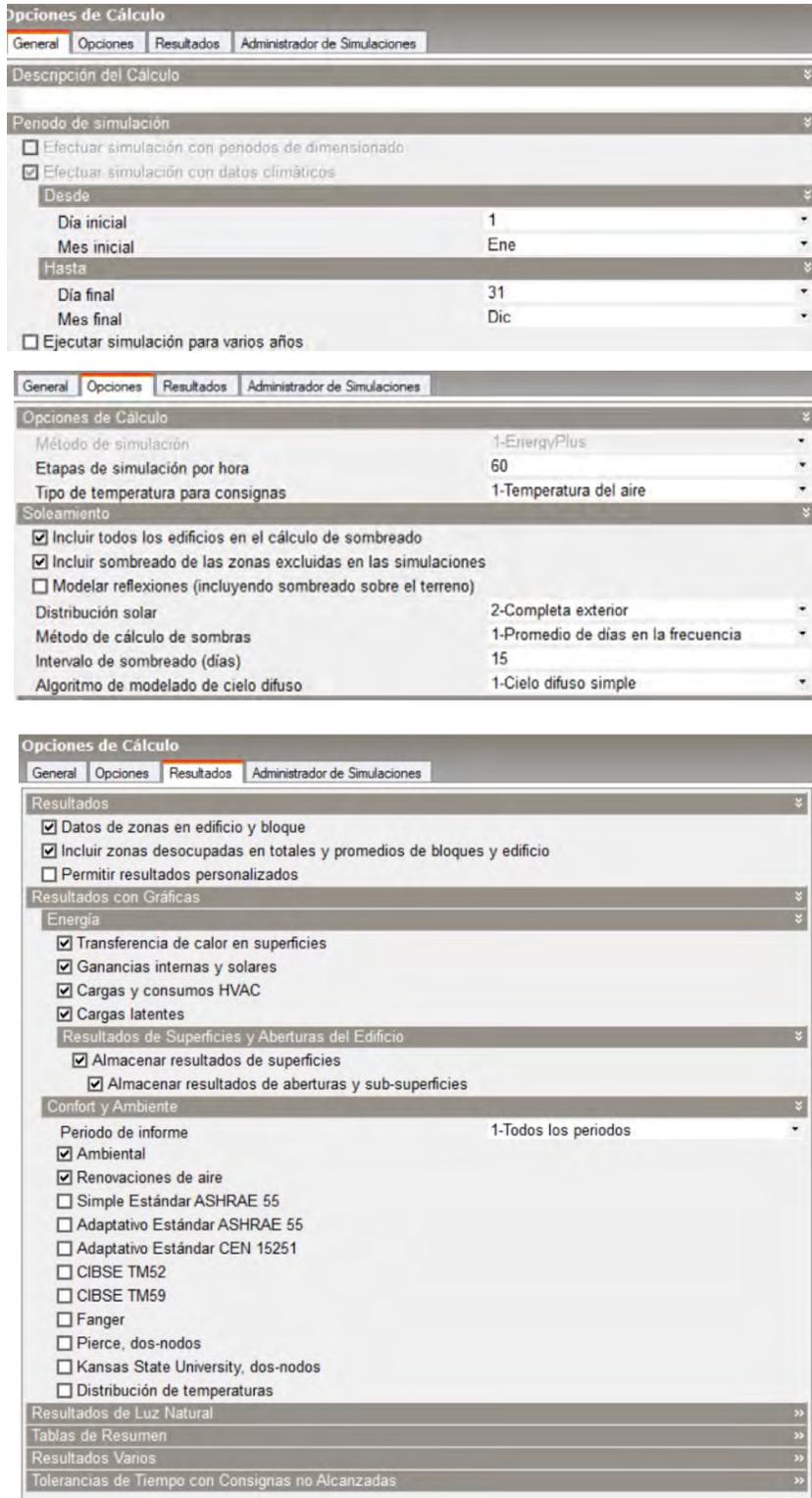
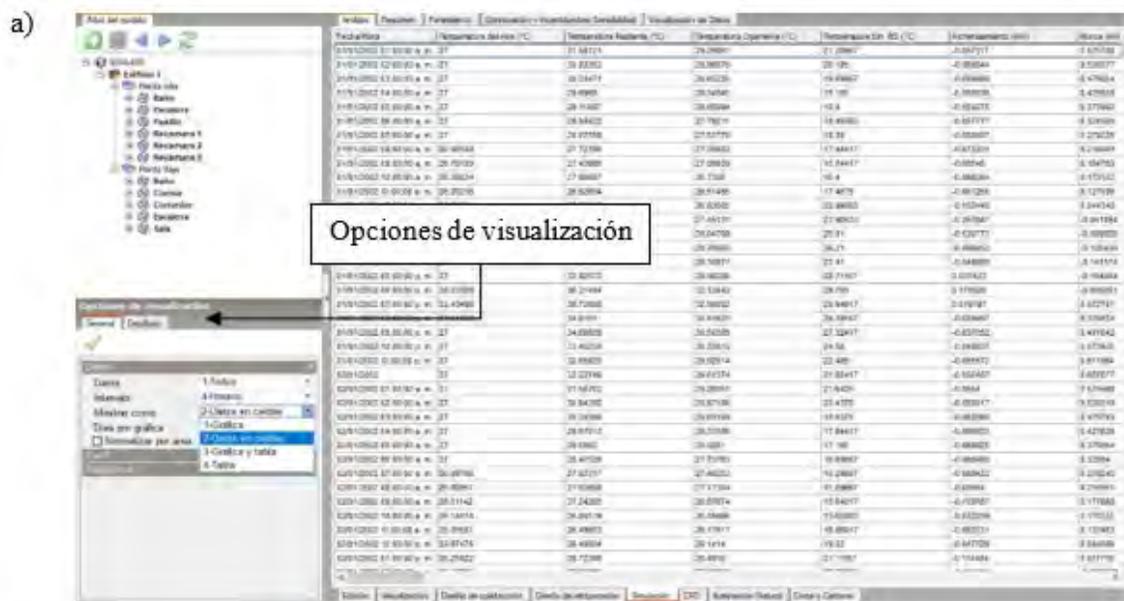


Figura B. 10. Opciones de cálculo en DesignBuilder.



# Anexo C. Retribución social y producto académico



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

## EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

OTORGA EL PRESENTE

### RECONOCIMIENTO

A

**Silvia Ríos Espinoza, E. Simá, M. A. Chagolla-Aranda, M. A. Solano-Maya, Samanta López Salazar**

Por su invaluable presentación del artículo Experimental study of the effect of a green façade on the interior temperature of a module under Cwa climate conditions en el 1er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada, desarrollado en el Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, TecNM/CENIDET, del 15 al 17 de noviembre de 2023.

Cuernavaca, Morelos, Noviembre de 2023



S0237323

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

**DR. ARTURO ERNESTO MARES GARDEA**  
DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Sello Digital:

z t O 1 5 R G W H 4 4 8 d 4 w e 7 1 1 1 p z 3 C s e 1 F y M E y e e R 5 Q C U L 3 L q 8 m V 5 + 6 j p + 5 a I A E X T o g V 7 + s R / S B K X 2 6 X N X 0 4 f 1 E 6 A F V D  
o B 1 F w 3 e o G y H D R o I g k U T q D z F R G u 1 4 e U 3 q q 4 R 0 M U w z L E F D / A 4 o r x + p O F I / F 6 g c G m 3 X E 1 5 f 4 t n H o j 1 T Y E / N r p c h  
+ c t N r D 9 + b s 5 H + L G 1 q R c + E S F 3 8 o m Y V k x j s X x 7 3 C C d N 1 A j p p U b x e k F U o K G m 3 s w T Q I j Y 8 1 H 7 d C 7 O S G / T M e I z t 6 1 o z  
w a T E L x y b z e F R 4 3 C e 1 b N 1 P F o 4 4 M c + 1 X J d 6 6 F z R Q Q 2 X N H 2 O Z B L k + H K A 4 B U T u P z j g t E X i 4 r 8 M y 1 H n t P s 9 E k 5 H 8 v =

**cenidet**<sup>®</sup>  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico



## Experimental study of the effect of a green façade on the interior temperature of a module under Cwa climate conditions

Silvia Ríos Espinoza\*, E. Sima\*, M.A. Chagolla-Aranda\*, M. A. Solano-Maya\*,  
Samanta López Salazar\*

\*TecNM/CENIDET, Interior internado Palmira S/N, 62490, Cuernavaca, Morelos.  
([m22ce034@cenidet.tecnm.mx](mailto:m22ce034@cenidet.tecnm.mx), [efrain.sm@cenidet.tecnm.mx](mailto:efrain.sm@cenidet.tecnm.mx), [miguel.ca@cenidet.tecnm.mx](mailto:miguel.ca@cenidet.tecnm.mx),  
[d19ce072@cenidet.tecnm.mx](mailto:d19ce072@cenidet.tecnm.mx), [d18ce057@cenidet.tecnm.mx](mailto:d18ce057@cenidet.tecnm.mx))

**Abstract:** An experimental study focused on the measurement of the temperature in different sections of two test modules with and without green facade located on the roof of an educational building in Cuernavaca, Morelos is presented. The experimental analysis was carried out during 144 h, approximately 6 days, of continuous measurement where the effect of ambient temperature, solar radiation, wind speed and relative humidity on the temperature of the modules was considered. It was found that the application of a green facade on the south wall of the test module reduced the outside and inside surface temperature of the test wall by 6 °C and 3 °C, respectively. In addition, it reduced the air temperature inside the cavity by 2 °C, with respect to the wall without a green facade. The results indicate that the incorporation of the green façade shows satisfactory results as a temperature reduction method due to two main factors: (1) reduction of solar heat gain due to the shading effect and (2) moisture absorption and evaporation.

**Keywords:** green façade, thermal comfort, sustainability, green architecture, urban heat island (UHI)

### 1. Introducción

En el área rural, la vegetación y los espacios amplios y abiertos dominan el paisaje. Los árboles y las plantas no solo proporcionan sombra, también ayudan a disminuir la temperatura de la tierra y el aire. Por otro lado, en las ciudades urbanizadas, las superficies son secas e impermeables como los techos, veredas, calles y estacionamientos. A medida que el desarrollo urbano avanza, las plantas van desapareciendo y son sustituidas por edificios y pavimento, este cambio conduce a que haya menos sombra y humedad en el aire para mantener la ciudad fresca, además, esto contribuye a que las temperaturas sean más altas, lo que causa las llamadas islas de calor urbano. Este fenómeno produce un aumento considerable en la temperatura de las ciudades en comparación con la temperatura que se presenta en las zonas rurales.

Con el incremento de las temperaturas también aumenta de forma indirecta el consumo energético en el sector residencial, debido a la demanda de energía eléctrica para mantener condiciones de confort térmica, es decir, niveles de temperatura agradables para cada región climática. No obstante, el incremento en la demanda de energía eléctrica crea un ciclo inquebrantable entre demanda y producción de energía, lo que involucra la quema de combustibles fósiles, que producen gases de efecto invernadero, los cuales son causa principal del cambio climático, que se traduce en un aumento considerable de la temperatura promedio anual.

Una manera de reducir el consumo de energía eléctrica en el sector residencial está relacionada con el rediseño de la envolvente de la edificación, mediante materiales de construcción o fachadas adicionales que permiten reducir la ganancia de calor no deseada durante el verano y prevenir la pérdida de calor en invierno. En este sentido, la integración de sistemas de vegetación en construcciones en áreas urbanas tiene un gran potencial para aumentar la calidad del entorno urbano, la gestión de aguas pluviales, así como como el suministro de agua y la calidad del aire, la vegetación densa en entornos urbanos marca una disminución de la temperatura y las emisiones de carbono, así como la reducción de los efectos de las islas de calor. Además de los profundos efectos en el medio ambiente, los sistemas de vegetación proporcionan beneficios adicionales al público, como los aspectos sociales y económicos (Perini et al., 2013), además de que preservan la naturaleza y ofrecen un entorno visual amigable con el entorno sustentable. Además, la presencia de vegetación tiene un gran impacto psicológico en los habitantes urbanos, además de mejorar la estética visual de las ciudades y elevar los precios de los bienes raíces.

Por lo tanto, se enfatiza que las condiciones micro climáticas de los edificios existentes pueden ajustarse de manera rentable y ecológica utilizando diferentes tipos de sistemas de vegetación. Los desarrollos más recientes en muros verdes se centran en el diseño de sistemas para lograr soluciones técnicas más eficientes y un mejor rendimiento en todas las fases de construcción. Con la implementación de paredes