



Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y
Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

**Simulación de una vivienda con techo verde
Y su efecto en el confort térmico**

presentada por
Ing. Araceli Ávila Hernández

como requisito para la obtención del grado de
**Maestra en Ciencias en
Ingeniería Mecánica**

Director de tesis
Dr. Efraín Simá Moo

Cuernavaca, Morelos, México. Enero de 2019.



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Cuernavaca, Mor. 19 de noviembre de 2018
OFICIO No. SAC/592/2018

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ING. ARACELI ÁVILA HERNÁNDEZ
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Simulación de una Vivienda con un Techo Verde 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"

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

SEP TecNM
CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

GVGR/mcr

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos.
Tel. (01) 777 3 62 77 70, ext. 4106, e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx

www.tecnm.mx | www.cenidet.edu.mx





SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Cuernavaca, mor., 12/diciembre /2018

OFICIO No. DIM/387/2018

Asunto: Aceptación de documento de tesis

C. DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la estudiante Ing. Araceli Ávila Hernández, con número de control M17CE014, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "Simulación de una vivienda con un techo verde y su efecto en el confort térmico" hemos encontrado que se han atendido todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

DR. EFRAÍN SIMÁ MOO
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica
6601954

REVISOR 1

DR. JESÚS PERFECTO XAMÁN VILLASEÑOR
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica
4672156

REVISORA 2

DRA. YVONNE CHÁVEZ CHENA
Doctora en Ciencias en Ingeniería Mecánica
7492003

REVISOR B

DRA. SARA LILIA MOYA ACOSTA
Doctora en Ing. Mecánica (Teórica y
Aplicada)
2067214

C.p. María Elena Gómez Torres Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Araceli Ávila Hernández Estudiante
Expediente

AAP/mrsr

S.E.P. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACION Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
RECIBIDO
19 DIC 2018

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos
Tel. (01) 777 3 62 77 70, ext. 4106, e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx

www.tecnm.mx | www.cenidet.edu.mx



Agradecimientos

A mi familia por brindarme su apoyo y amor incondicional en cada una de las etapas de mi vida.

Al Dr. Efraín Simá Moo por permitirme realizar y llevar a cabo éste trabajo de investigación, por guiarme a lo largo de este proceso, por sus comentarios y sugerencias en el aspecto profesional y personal.

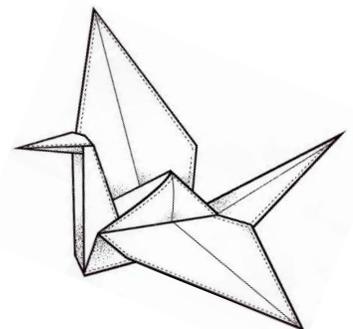
A mis revisores: Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor, Dra. Sara Lilia Moya Acosta y Dra. Yvonne Chávez Chena por sus valiosos comentarios, sugerencias y aportaciones que ayudaron a enriquecer este trabajo. Gracias por compartir sus conocimientos a través de sus clases impartidas.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), por darme la oportunidad de estudiar la maestría y las herramientas necesarias para mi desarrollo profesional.

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

A mis amigos y compañeros: Iván, Che, Irving, Lester y Luis por su compañía y apoyo.

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



CONTENIDO	Página
Lista de Figuras	V
Lista de Tablas	VII
Nomenclatura.....	IX
Resumen	XIII
Abstract	XV
Capítulo 1. Introducción y conceptos básicos	1
1.1. Crisis energética y cambio climático	3
1.2. Energía en edificaciones	6
1.2.1. Sistemas pasivos de acondicionamiento térmico	7
1.2.2. Techos verdes.....	9
1.3. Revisión bibliográfica.....	10
1.3.1. Estudios teóricos	10
1.3.2. Estudios teóricos-experimentales.....	14
1.4. Conclusión de la revisión bibliográfica	20
1.5. Justificación	20
1.6. Objetivos.....	20
1.6.1. General	20
1.6.2. Específicos	21
1.7. Alcance	21
1.8. Descripción de los capítulos	21
Capítulo 2: Fundamentos teóricos	23
2.1. Mecanismos de transferencia de calor	25
2.1.1. Conducción	25
2.1.2. Convección.....	26
2.1.3. Radiación	27
2.1.4. Propiedades termofísicas y conceptos básicos.....	28
2.2. Ganancias de calor en la edificación.....	30
2.3. Confort térmico.....	33
2.4. Características de un techo verde.....	36
Capítulo 3. Generalidades del software.....	41

3.1. Software de simulación energética en edificaciones	43
3.2. Técnicas de cálculo para la simulación térmica de edificaciones.....	43
3.3. Ecuaciones generales de EnergyPlus	44
3.3.1. Ganancias solares.....	44
3.3.2. Comportamiento térmico en muros.....	45
3.3.3. Temperatura del aire en la zona térmica	47
3.3.4. Cargas térmicas para la condición de confort	51
3.4. El techo verde en EnergyPlus	52
3.4.1. Modelo físico y matemático del techo verde	53
3.5. Simulación en EnergyPlus con interface DesignBuilder	62
3.6. Verificación del uso de EnergyPlus y DesignBuilder	65
3.6.1. Especificaciones del BESTest 900.....	65
3.6.2. Especificaciones del BESTEST 620	68
Capítulo 4. Rehabilitación del experimento	71
4.1. Módulos de prueba.....	73
4.2. Variables climáticas.....	75
4.3. Instrumentación	75
4.4. Validación de un techo de concreto.....	77
4.4.1. Evolución libre.....	77
4.4.2. Aire acondicionado	79
4.5. Validación de un techo verde.....	81
4.5.1. Aire acondicionado	82
Capítulo 5. Casos de estudio	87
5.1. Ubicación geográfica	89
5.1.1. Condiciones ambientales.....	90
5.2. Normas de construcción y eficiencia energética.....	92
5.3. Vivienda de referencia	93
5.3.1. Zonas térmicas	97
5.4. Vivienda particular	99
5.4.1. Zonas térmicas	102
5.5. Temperatura de confort.....	104

5.6. Parametros de simulación y consideraciones.....	105
Capítulo 6. Resultados.....	107
6.1. Vivienda de referencia en evolución libre	109
6.1.1. Comportamiento semanal en evolución libre.....	112
6.2. Vivienda de referencia con aire acondicionado	115
6.2.1. Cargas térmicas de acondicionamiento.....	116
6.3. Vivienda particular en evolución libre.....	119
6.3.1. Comportamiento semanal en evolución libre.....	121
6.4. Vivienda particular con aire acondicionado	124
6.4.1. Cargas térmicas de acondicionamiento.....	126
6.5. comparación entre las dos viviendas	128
Capítulo 7. Conclusiones.....	133
7.1. Recomendaciones	136
Referencias	137
Apendice	143

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1.1 Energía en México. a) Producción anual de energía. b) Consumo final de energía.....	5
Figura 1.2 Consumo eléctrico residencial.....	5
Figura 1.3 Isla de calor urbana.....	7
Figura 2.1 Conductividad en un cuerpo homogéneo.....	25
Figura 2.2 Convección superficial.....	26
Figura 2.3 Radiación en un cuerpo homogéneo.....	28
Figura 2.4 Ganancias de calor en la edificación.....	30
Figura 2.5 Ganancias de calor en la vivienda.....	32
Figura 2.6 Estructura de un techo verde.....	37
Figura 3.1 Flujo de calor en la superficie exterior.....	45
Figura 3.2 Flujo de calor en la superficie interior.....	46
Figura 3.3 Balance de calor por convección del aire en la zona.....	47
Figura 3.3 Funcionamiento de equipos de climatización en función de la temperatura.....	51
Figura 3.4 Balance de energía para un techo verde.....	53
Figura 3.5 Proceso de simulación en EnergyPlus a través de la interface DesignBuilder.....	63
Figura 3.6 Edificación del caso 900. (a) Dimensión de la construcción (b) Modelo creado en DB.....	65
Figura 3.7 Edificación del caso 620. (a) Dimensión de la construcción (b) Modelo creado en DB.....	69
Figura 4.1 Módulos experimentales: (a) Techo tradicional (b) Techo verde.....	74
Figura 4.2 Módulos de prueba con techo verde y techo tradicional.....	75
Figura 4.3 Rehabilitación de los módulos.....	76
Figura 4.4 Ubicación de los sensores.....	76
Figura 4.5 Variables climáticas (01-05 junio 2018). (a) Temperatura, (b) Radiación, (c) Humedad relativa.....	78
Figura 4.6 Temperatura, techo de concreto, evolución libre: a) Superficie interior de la losa b) Aire interior.....	79
Figura 4.7 Variables climáticas (13-17 abril 2017). (a) Temperatura, (b) Radiación, (c) Humedad relativa, (d) Velocidad del viento.....	80
Figura 4.8 Temperatura, techo de concreto aire acondicionado: (a) Superficie interior de la losa (b) Aire interior.....	81
Figura 4.9 Proceso de las simulaciones.....	83
Figura 4.10 Temperatura, techo verde aire acondicionado: (a) Superficie interior de la losa, (b) Aire interior.....	85
Figura 5.1 Distribución de climas en el estado de Morelos.....	89
Figura 5.2 Variables climáticas: (a) Temperatura, (b) Radiación, (c) Humedad relativa, (d) Velocidad del viento.....	91
Figura 5.3 Planos de la vivienda de referencia: (a) Planta baja, (b) Planta alta.....	94
Figura 5.4 Vivienda de referencia. (a) Frente y lado derecho, (b) posterior, (c) posterior y lado izquierdo.....	97
Figura 5.5 Conjunto de viviendas (vivienda de referencia).....	97
Figura 6.6 Zonas térmicas de la vivienda base: a) Planta alta, b) Planta baja.....	98
Figura 5.7 Planos de la vivienda particular: (a) Planta baja, (b) Planta alta.....	99
Figura 5.8 Vivienda particular. (a)Frente (b)Posterior.....	102
Figura 5.9 Conjunto de viviendas (vivienda particular).....	102
Figura 5.10 Zonas térmicas de la vivienda particular: (a) Planta alta, (b) Planta baja.....	103
Figura 6.1 Nomenclatura para las viviendas.....	109
Figura 6.2 Temperatura promedio mensual: (a) VR_TR_EL (b) VR_GR_EL.....	111
Figura 6.3 Comportamiento de las zonas térmicas, VR_EL, (a)(b) Semana fría (c)(d) Semana cálida.....	114
Figura 6.4 Temperatura promedio mensual: (a) VR_TR_AA (b) VR_GR_AA.....	116

Figura 6.5 Demanda de energía para enfriamiento: VR techo tradicional y verde.....	117
Figura 6.6 Demanda de energía para enfriamiento por zonas: (a) Techo tradicional (b) Techo verde.....	118
Figura 6.7 Temperatura promedio mensual: (a) VP_TR_EL (b) VP_TR_EL.....	120
Figura 6.8 Comportamiento de las zonas térmicas, VP_EL, (a)(b) Semana fría (c)(d) Semana cálida.	123
Figura 6.9 Temperatura promedio mensual: (a) VP_TR_AA, (b) VP_GR_AA	125
Figura 6.10 Demanda de energía para enfriamiento, VR_TR_AA.....	126
Figura 6.11 Demanda de energía para enfriamiento por zonas: (a) Techo tradicional (b) Techo verde.....	127
Figura 6.12 Ganancias de calor en la envolvente. (a) Muros, (b) Techos	129
Figura A.1 Pantalla inicial de DesignBuilder.	143
Figura A.2 Datos de clima.	144
Figura A.3 Modelo 3D de la edificación.	144
Figura A.4 Generación de ventanas.....	145
Figura A.5 Cerramientos y propiedades termofísicas.	145
Figura A.6 propiedades de las aberturas.....	146
Figura A.7 Actividad del edificio.....	146
Figura A.8 Iluminación del edificio.	146
Figura A.9 Sistemas de acondicionamiento de aire.	147
Figura A.10 Conjunto habitacional de las viviendas.....	147
Figura A.11 Opciones de resultados.....	148
Figura A.12 Archivo exportado a EnergyPlus.	148
Figura A.13 Parámetros de simulación.....	149
Figura A.14 Interface de EnergyPlus.	149
Figura A.15 Resultados: humedad relativa.....	149

LISTA DE TABLAS

Página

Tabla 1.1	Técnicas pasivas de acondicionamiento térmico.	9
Tabla 2.1	Valores de los coeficientes a, b y c en función del tiempo para cada sexo del individuo	35
Tabla 3.1	Especificación de los materiales.	66
Tabla 3.2	Propiedades de las ventanas.	66
Tabla 3.3	Propiedades del vidrio.	67
Tabla 3.4	Datos climáticos de la ciudad de Denver, Colorado.	68
Tabla 3.5	Resultados del BESTEST 900.	68
Tabla 3.6	Componentes de construcción del caso 620.	69
Tabla 3.7	Resultados del BESTEST 620.	70
Tabla 4.1	Componentes de construcción de los módulos experimentales.	73
Tabla 4.2	Mínimos y máximos de las variables climáticas (01-05 junio 2018).	78
Tabla 4.3	Mínimos y máximos de temperatura, módulo techo de concreto en evolución libre.	79
Tabla 4.4	Mínimos y máximos de las variables climáticas (13-17 abril 2017).	80
Tabla 4.5	Mínimos y máximos de temperatura, módulo techo de concreto con aire acondicionado.	81
Tabla 4.6	Parámetros de un techo verde en EnergyPlus.	84
Tabla 4.7	Mínimos y máximos de temperatura, módulo techo verde con aire acondicionado.	85
Tabla 5.1	Variables ambientales mensuales.	90
Tabla 5.2	Mínimos y máximos de las variables climáticas.	91
Tabla 5.3	Espacios mínimos de la edificación de Morelos.	92
Tabla 5.4	Descripción de la edificación de referencia.	93
Tabla 5.5	Materiales de construcción y propiedades termofísicas de la vivienda de referencia.	94
Tabla 5.6	Descripción de las aberturas de la fachada, vivienda de referencia.	95
Tabla 5.7	Propiedades termofísicas del vidriado, vivienda de referencia.	95
Tabla 5.8	Descripción de la edificación particular.	99
Tabla 5.9	Materiales de construcción y propiedades termofísicas, vivienda particular.	100
Tabla 5.10	Descripción de las aberturas de la fachada, vivienda particular.	100
Tabla 5.11	Propiedades termofísicas del vidriado, vivienda particular.	101
Tabla 5.12	Temperatura de confort.	105
Tabla 5.13	Parámetros del techo verde.	106
Tabla 6.1	Temperatura mensual, vivienda de referencia, evolución libre, techo tradicional y verde.	112
Tabla 6.2	Temperaturas máximas y mínimas, VR_TR/GR_EL, semana fría y cálida,	115
Tabla 6.3	Cargas térmicas de refrigeración, vivienda de referencia.	119
Tabla 6.4	Temperatura mensual, vivienda de particular, evolución libre, techo tradicional y verde.	121
Tabla 6.5	Temperaturas máximas y mínimas, VP_TR/GR_EL, semana fría y cálida,	124
Tabla 6.6	Cargas térmicas de refrigeración, vivienda particular.	128
Tabla 6.7	Características generales de las dos viviendas.	130
Tabla 6.8	Cargas térmicas de enfriamiento, techo tradicional y techo verde.	131
Tabla 6.9	Temperatura promedio anual, techo tradicional y techo verde.	132

NOMENCLATURA

Simbología

Símbolo	Descripción	Unidades
A	Área de la superficie de la pared o ventana expuesta al interior de la Zona	$[m^2]$
$C_{p,a}$	Calor específico del aire	$[J/kg^{\circ}C]$
C_e^g	Coefficiente de transferencia masiva para el calor latente cerca del sustrato	
C_i	Capacitancia térmica	
C_{en}^g	Coefficiente de transferencia masiva cerca del suelo para condiciones casi neutrales	
C_f	Coefficiente de transferencia masiva para el calor en el follaje.	
C_{hn}^f	Coefficiente de transferencia masiva en la parte superior del follaje para condiciones casi neutrales.	
C_h^g	Coefficiente de transferencia masiva para el calor sensible cerca del sustrato	
C_{hn}^g	Coefficiente de transferencia masiva cerca del suelo para condiciones casi neutrales	
C_1^f, C_2^f, C_2^f	Variables de cálculo para el follaje	
C_1^g, C_2^g, C_2^g	Variables de cálculo para el sustrato	
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura	$[^{\circ}C, K]$
e^*	Presión de vapor de saturación evaluada a la temperatura del suelo	$[Pa]$
$F_{i,j}$	Factor de vista entre las superficies	
F_f	Flujo de calor en la superficie del follaje	$[W/m^2]$
F_g	Flujo de calor en la superficie del sustarto	$[W/m^2]$
h_{conv}	Coefficiente convectivo	$[W/m^2]$
H_f	Calor sensible en la interfaz follaje / ambiente.	$[W/m^2]$
H_g	Calor sensible en la interfaz follaje / tierra	$[W/m^2]$
I_T	Radiación total que incide en una superficie	$[W/m^2]$
I_{bT}	Radiación total directa	$[W/m^2]$
I_{dT}	Radiación total difusa	$[W/m^2]$
I_{gT}	Radiación total reflejada	$[W/m^2]$
I_{ir}	Radiación de onda larga de entrada	$[W/m^2]$
I_{sg}	Flujo solar total que llega al suelo	$[W/m^2]$
I_s	Radiación de onda corta de entrada	$[W/m^2]$
K	Conductividad térmica	$\left[\frac{W}{m \cdot k}\right]$
k_v	Constante de von Karmen (0.4)	
LAI	Índice de área foliar	$[m^2/m^2]$
l_g	Calor latente de vaporización a la temperatura del sustrato	$[J/kg]$
l_f	Calor latente de vaporización a la temperatura del follaje	$[J/kg]$
L_f	Calor latente en el follaje	$[W/m^2]$
L_g	Calor latente en el sustrato	$[W/m^2]$
\dot{m}	Flujo másico	$[kg/t]$

M_g	Factor de humedad del suelo ($0 \leq M_g \leq 1$)	
P	Flujo de calor de precipitación	$[W/m^2]$
q_a	Relación de mezcla de aire sobre el follaje	
q_{af}	Razón de mezcla del aire en el follaje.	
q_{cond} , q_{ko}	Flujo de calor por conducción	$[W]$
q_{sol}	Radiación solar	$[W]$
q_{LWR}	Radiación de onda larga	$[W]$
q_{sw}	Radiación de las luces artificiales	$[W]$
q_{LWS}	Radiación de equipo eléctrico	$[W]$
q_{LWX}	Calor intercambiado entre las superficies	$[W]$
q_{supf}	Calor convectivo desde las superficies	$[W]$
q_{zonas}	Calor de air entre zonas	$[W]$
\dot{Q}_{sys}	Calor del sistema de acondicionamiento	$[W]$
$\dot{Q}_{g,c,i}$	Flujo de calor por fuentes internas	$[W]$
q_{conv}	Flujo de calor por convección	$[W]$
$q_{f,sat}$	Razón de mezcla de follaje saturado	$[W]$
$q_{g,sat}$	Razón de mezcla de tierra saturada	$[W]$
q_g	Razón de mezcla de aire en la superficie del sustrato.	$[W]$
$q_{i,j}$	Intercambio radiativo entre las superficies interiores	$[W]$
q_{rad}	Flujo de calor por radiación	$[W]$
r_a	Resistencia aerodinámica a la difusión de vapor de agua.	$[s/m]$
r_{ch}	Numero de Schmidt turbulento (0.63)	
r_s	Resistencia estomática a la difusión de vapor.	$[s/m]$
r''	Factor de humedad de la superficie del follaje	
R_{ib}	Número másico de Richardson	
R_v	Constante de gas para el vapor de agua (461.53)	$[J/kg K]$
RH	Humedad relativa	$[\%]$
T_∞	Temperatura del fluido	$[K]$
$T_{equipos}$	Temperatura de los equipos	$[K]$
T_a	Temperatura del aire a la altura Z_a	$[K]$
T_{af}	Temperatura de aire en el follaje	$[K]$
T_f	Temperatura de la vegetación	$[K]$
T_g	Temperatura del sustrato	$[K]$
$T_{i,j}$	Temperatura de las superficies i,j	$[K]$
T_{si}	Temperatura de la superficie	$[K]$
T_{sumin}	Temperatura de suministro	$[K]$
T_{zi}	Temperatura del aire de las dos zonas	$[K]$
Z_a	Altura del instrumento de medición	$[m]$
Z_d	Altura sobre el suelo donde la velocidad del viento es cero	$[m]$
Z_f	Altura del follaje	$[m]$
z_0^f	Longitud de rugosidad del follaje	$[m]$
z_0^g	Longitud de la aspereza del suelo	$[m]$
W	Velocidad del viento a la altura Z_a	$[m/s]$
W_{af}	Velocidad del viento en la interfaz aire / follaje.	$[m/s]$

Simbología griega

Símbolo	Descripción	Unidades
α_f	Reflectividad de onda corta (0-1) de la vegetación	
α_g	Reflectividad de onda corta (0-1) del sustrato	
Γ_h	Factor de estabilidad atmosférica	
ρ_a	Densidad del aire a la altura del instrumento de medición	[kg/m ³]
ρ_{af}	Densidad del aire cerca de la interfaz follaje / atmosfera	[kg/m ³]
ρ_{ag}	Densidad del aire cerca de la interfaz follaje / tierra	[kg/m ³]
ρ_f	Densidad del aire en el follaje	[kg/m ³]
ρ_g	Densidad del aire a la temperatura de la superficie del sustrato	[kg/m ³]
ε_1	Variable de cálculo	
ε_f	Emisividad de la vegetación (0-1)	
ε_g	Emisividad del sustrato (0-1)	
σ_f	Cobertura fraccionaria (0-1)	
λ	Conductividad térmica del material	[W/mK]
σ	Constante de Stefan-Boltzman	[W/m ³ K]

Subíndices y superíndices

Símbolo	Descripción
a	Aire
af	Aire dentro del follaje
e	Superficie exterior
f	Términos del follaje (vegetación)
g	Términos del sustrato (tierra)
i	Superficie interior
ir	Radiación de onda larga o radiación infrarroja
n	Paso de tiempo actual
$n + 1$	Paso de tiempo futuro

Acrónimos

Siglas	Descripción
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASTM	American Society of Testing Materials
BESTEST	Building Energy Simulation Test
BLAST	Building Loads Analysis and System Thermodynamics
BTRA	Battlespace Terrain Reasoning and Awareness
CCNNPURRE	Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos
CEV	Código de Edificación de Vivienda
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics, en inglés)

CFE	Comisión Federal de Electricidad
CONAVI	Comisión Nacional de Vivienda
COPANT	Comisión Panamericana de Normas Técnicas
CTF	Transferencia de conducción
DB	DesignBuilder
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización)
EMA	Estación Meteorológica Automática
EP	EnergyPlus
FASST	Fast Allseason Soil Strength
HVAC	Conjunto de sistemas de calentamiento, ventilación y enfriamiento (Heating, Ventilation and Air Conditioning, en inglés)
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
ISO	International Organization for Standardization
LAI	Índice de área de hoja
MBE	Mean Bias Error
MVF	Método de Volumen Finito
NMX	Normas Mexicanas
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
OSB	Oriented Strand Board
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PMV	Predicted Mean Vote
RE	Resistencia Estomática
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
TMY	Typical Meteorological Year
UHI	Isla de calor urbana (Urban Heat Island, en inglés)
UL	Underwriters Laboratories
UNE	Una Norma Española
VC	Volumen de control

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se presenta un estudio del comportamiento térmico-energético de dos viviendas de interés social; una de las viviendas es la utilizada para la elaboración de indicadores de la norma NOM-020-ENER-2011 y es llamada *vivienda de referencia* y está construida sobre un área de 45.5 m². La otra vivienda analizada es llamada *vivienda particular* con área de construcción de 28.7 m² y se encuentra físicamente en el estado de Morelos, ambas están orientadas hacia el norte y cuentan con alta masa térmica en sus materiales de construcción.

El estudio compara el comportamiento de las viviendas considerando techo tradicional que comprende una losa de concreto recubierta de impermeabilizante contra un sistema de techo verde compuesto por una capa de antiraíz, una de sustrato y por último la vegetación; el cual se implementó como estrategia de ahorro y eficiencia energética. El estudio se llevó a cabo en evolución libre y con aire acondicionado para mantener la temperatura interior dentro del intervalo de confort.

El estudio se realizó por medio de simulaciones térmicas de edificaciones usando el software EnergyPlus y DesignBuilder para predecir el comportamiento térmico-energético para un año de modelación, considerando los efectos de la capa vegetal que representa una barrera contra la radiación solar y protección al techo del edificio. La metodología que se siguió fue la creación de la geometría de las viviendas, posteriormente se introducen las variables climáticas (temperatura ambiente, radiación solar global, velocidad del viento y humedad relativa) y características de la edificación (dimensiones, orientación, propiedades termofísicas de los materiales, geometría, infiltración, etc.). Se seleccionaron los parámetros de simulación, y las variables de salida, las cuales fueron la temperatura del aire de cada zona, el flujo de calor de la envolvente y las cargas térmicas para acondicionar la zona y finalmente se analizaron los resultados.

Los resultados obtenidos indican que la implementación del techo verde en las edificaciones reduce la temperatura en promedio anual 1.6 y 2.3 °C para la vivienda de referencia y particular respectivamente, siendo mayor la reducción en los meses cálidos, estos son abril, mayo y junio. Respecto a las cargas térmicas, la vivienda de referencia requiere mayores cargas para enfriamiento en comparación con la vivienda particular, esto debido a la dimensión y configuración de esta, las cargas térmicas disminuyeron 65% para la vivienda de referencia y 69% para la particular.

En conclusión, se observaron mejoras en el desempeño energético de las edificaciones sobre todo en el nivel superior y en la temporada cálida con la implementación de un techo verde.

ABSTRACT

In the present work of investigation, a study of the thermal-energetic behavior of two houses of social interest is presented; one of the houses is the suitable one for the elaboration of the indicators of the standard NOM-020-ENER-2011 and it is called reference dwelling and it is built on an area of 45.5 m². The other dwelling analyzed is called a private dwelling with a construction area of 28.7 m² and is physically located in the state of Morelos, both houses are oriented to the north and have a high thermal mass in their construction materials.

The study compares the behavior of the two houses considering traditional roof that includes a concrete slab covered with waterproofing against a green roof system composed of an anti-root layer, a substrate layer and finally the vegetation; which was implemented as a saving and energy efficiency strategy. The study was carried out in free evolution and with air conditioning to maintain the interior temperature within the comfort range.

The study was carried out by means of thermal simulations of buildings using the EnergyPlus and DesignBuilder software to predict the thermal-energetic behavior for a year of modeling, considering the effects of the vegetal layer that represents a barrier against the solar radiation and protection to the roof of the building. The methodology that was followed was the creation of the geometry of the houses, later the climatic variables are introduced (ambient temperature, global solar radiation, wind speed and relative humidity) and characteristics of the building (dimensions, orientation, thermophysical properties of the materials, geometry, infiltration, etc.) The simulation parameters were selected, and the output variables, which were the air temperature of each zone, the heat flow of the envelope and the thermal loads to condition the area and finally the results were analyzed.

The results obtained indicate that the implementation of the green roof in the buildings reduces the average annual temperature by 1.6 and 2.3 °C for the reference and private dwellings respectively, with a greater reduction in the warm months, these are April, May and June. Regarding the thermal loads, the reference house requires greater loads for cooling compared to the private home, this due its size and configuration, the thermal loads decreased 65% for the reference house and 69% for the particular one.

In conclusion, improvements were observed in the energy performance of the buildings, especially at the upper level and in the warm season with the implementation of a green roof.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS

En este apartado se presenta de manera breve el panorama energético, la producción y consumo de energía por sector a nivel nacional, así como las emisiones de gases contaminantes derivado de ello. Uno de los sectores que mayor consumo energético presenta es el residencial, parte de esta energía está dirigida al acondicionamiento del ambiente, por ello, diversas investigaciones están encaminadas al estudio de los diferentes elementos de la envolvente y se analizan algunas alternativas que se pueden implementar para lograr el ahorro de energía de este sector. Se presenta la revisión bibliográfica y las conclusiones de esta, y con ello el planteamiento de los objetivos, el alcance y como parte final se describen los capítulos que forman parte de este trabajo.

1.1. CRISIS ENERGÉTICA Y CAMBIO CLIMÁTICO

El ser humano desde sus inicios ha consumido recursos de la naturaleza para subsistir, como vegetales, frutas, maderas, animales, rocas, etc. para alimentarse, vestirse, hacer herramientas y refugiarse de las inclemencias del clima. Una vez descubierta la agricultura ya no tuvieron la necesidad de moverse de un lugar a otro y se establecieron en lugares fijos domesticando animales para consumo propio e intercambiarlos por otros productos, surgiendo de esta manera la organización social. Con estos cambios el humano se volvió sedentario y la población aumento requiriéndose más recursos para su desarrollo. Pero fue hasta la revolución industrial cuando el consumo de recursos y la producción de bienes y servicios se aceleró con la aparición de la máquina de vapor provocando un aumento en la población y en el número de ciudades. La energía se comenzó a utilizar a voluntad del hombre siendo los recursos fósiles la principal fuente, primero se utilizó el carbón natural y posteriormente el petróleo, años después se descubrieron otras fuentes de energía.

La vida actual está inmersa en diferentes tipos de energía, como la mecánica, nuclear, cinética, magnética, química y muchas más. En especial la energía eléctrica que acompaña a la mayoría de los seres humanos en casi todas las actividades diarias es usada en pequeños y simples aparatos hasta los grandes y complejos que hacen la vida más cómoda y fácil, y prácticamente ya sería imposible estar sin ella. (Huacuz, 2003). La energía eléctrica es parte fundamental del desarrollo de la humanidad, facilitando la introducción de servicios de salud, comunicación, educación y entretenimiento. (Villamar y Huacuz, 1999). Para obtenerse, generalmente se usa calor que se libera de la combustión de recursos fósiles (gas natural, carbón, petróleo), el cual es aprovechado por un ciclo termodinámico en centrales eléctricas. En el transcurso de la obtención de electricidad se liberan Gases de *Efecto Invernadero (GEI)*, entre los más importantes se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2), óxido de nitrógeno (NO_x) mercurio (Hg) los cuales aumentan el calentamiento global. (Vijay y Molina, 2004).

El consumo de electricidad tiene sus consecuencias, estamos viviendo una etapa crítica a nivel global, los recursos fósiles que representan la fuente convencional de energía mundial se están agotando, mientras la contaminación aumenta. Se están envenenando ríos, lagos, mares, bosques, aire y al mismo ser humano con sustancias tóxicas y gases nocivos para la salud, provenientes de la extracción de hidrocarburos, procesamiento de estos, distribución y quema de productos derivados de petróleo y de otros tantos materiales, provocando enfermedades respiratorias: fatiga, dolor de cabeza, irritación de los ojos, nariz y garganta, entre otras. (UCLA, 2003).

El llamado “efecto invernadero” es el calentamiento que se produce cuando algunos gases se quedan en la atmósfera y retienen el calor, los cuales permiten el paso de la luz solar, pero retienen el calor como si se tratase de paredes de cristal de un invernadero, de ahí su nombre. Este efecto es conocido por científicos desde 1824 pero en 1895 se descubre que los humanos

están aumentando el efecto invernadero por la producción de CO₂, que es un gas de invernadero. Este cambio climático trae graves consecuencias, como el aumento de temperatura y asociado a ello el deshielo de los polos, aumento del nivel de los mares, tormentas y tornados más constantes y fuertes, incendios de bosques, etc. Un efecto interesante es que los vientos y corrientes oceánicas mueven con ellas el calor alrededor del globo, calentando algunas zonas, enfriando otras y cambiando el clima de diferente manera en diferentes áreas. (National Geographic, 2013).

Es por ello que grupos ambientales y organizaciones no gubernamentales (ONG) se manifiestan para buscar alternativas que mitiguen estos efectos, creando así el Protocolo de Kioto que es un acuerdo internacional que se deriva de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Es un acuerdo que se llevó a cabo en 1997 y establece que 37 países desarrollados reduzcan sus GEI un 5% para el año 2012 respecto a los emitidos en 1990. Este es un acuerdo grupal, pero desafortunadamente países desarrollados no lo acatan del todo. México, ya que se considera país en vías de desarrollo no está obligado a reducir los GEI bajo el Protocolo de Kioto, sin embargo, las emisiones aumentan cada año y deben tomarse medidas para la reducción a nivel industrial y residencial. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016).

La producción anual de energía primaria en el 2015 para México fue del 61.3% proveniente del petróleo crudo, 24.7% del gas natural, 7.9% de energías renovables, 3.5% del carbón, 1.5% de la energía nuclear y 1.2% de los condensados, como se puede observar en la Figura 1.1(a) 1a, aún existe una fuerte dependencia a los hidrocarburos pues más del 90% de la energía que se consume en nuestro país tiene su origen en la quema de los mismos. (SENER, 2016b). La Figura 1.1(b) se observa el consumo final de energía en México para el año 2015, el sector con mayor consumo fue el del transporte con 46.4%, le sigue el sector industrial con 31.4% y en tercer lugar a nivel nacional y mundial se encuentra el sector residencial con 15% y está en aumento cada año esto debido a características sociales como el crecimiento poblacional, el incremento en el número de hogares y equipo eléctrico, además de estas características el consumo energético también depende de cada región y nivel socioeconómico de la población. (SENER, 2016a).

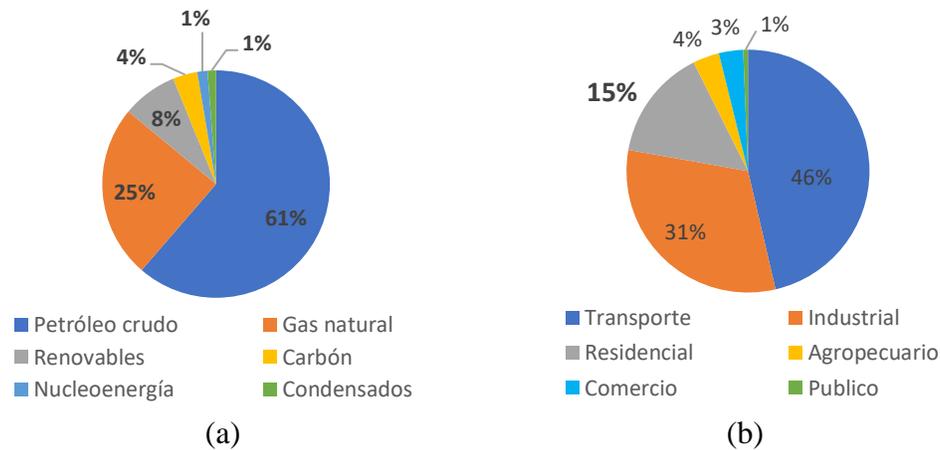


Figura 1.1 Energía en México. a) Producción anual de energía. b) Consumo final de energía.

El consumo eléctrico del sector residencial en climas cálidos se destina principalmente para sistemas de acondicionamiento de aire que representa el 35% del total, le siguen los refrigeradores con 25%, entretenimiento con 20% y la iluminación representa el 12% entre otros equipos. La Figura 1.2 muestra los rubros y porcentajes del consumo eléctrico residencial. (FIDE, 2009).

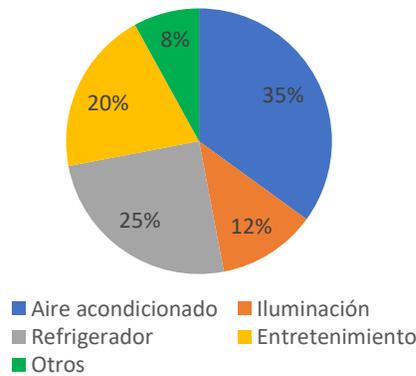


Figura 1.2 Consumo eléctrico residencial.

Es importante mencionar el impacto que tienen los sistemas de climatización de aire en el consumo de energía eléctrica, debido a su alto consumo y tiempo de servicio. El alto consumo eléctrico se ve reflejado sobre todo en climas extremosos, donde las temperaturas son muy altas o bajas. Además del impacto económico que se tiene en los hogares se genera el impacto ambiental por el uso desmedido e irracional de los recursos energéticos, de esto resulta la problemática energética y de contaminación que motiva a realizar investigaciones para obtener energía y combustibles de otras fuentes menos contaminantes, llamadas energías renovables tal como la solar, eólica, biogás, biodiesel y biomasa, estas últimas con el fin de aprovechar los residuos orgánicos animales y vegetales y de esta manera evitar en lo posible

el calentamiento global y la dependencia a los hidrocarburos. Por ello en los últimos años se han generado tecnologías y técnicas para el ahorro de energía y uso eficiente de la misma.

1.2. ENERGIA EN EDIFICACIONES

El ser humano ha creado viviendas o lugares de refugio donde se sienta más que nada seguro, estos refugios siempre han estado evolucionando; cuevas en la edad primitiva, edificios antiguos con diferentes formas y estilos en la colonia, hasta edificios modernos con sistemas avanzados de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC)¹. Al conjunto de estos asentamientos se les llama ciudades, pueblos, comunidades, etcétera, los cuales modifican las condiciones climáticas y geográficas del sitio donde se ubican siendo la ciudad donde se aprecian más marcados estos cambios.

Los materiales que se utilizan en la construcción de las edificaciones como el asfalto, concreto y aceros son materiales con la capacidad de absorber y retener el calor, estos se encuentran en la mayor parte de las ciudades y alteran el clima a escala local y regional contribuyendo al aumento de la temperatura ambiente. Esto es el resultado del efecto de la radiación que reciben las superficies de la ciudad que se disipa a la atmósfera calentado el aire cercano a ellas y por consecuencia aumenta la temperatura del aire. En las ciudades existen pocas áreas de vegetación por lo que se reduce de manera abrupta la evapotranspiración, éste es un fenómeno combinado donde se pierde humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación, esto produce un aumento de humedad en el ambiente que ayuda a bajar la temperatura del aire. En consecuencia, las pocas áreas verdes y las extensas áreas de asfalto y concreto calientan el aire circundante a las edificaciones generando el fenómeno de la isla de calor urbana (UHI)² que se caracteriza principalmente porque la temperatura del aire es más elevada en las ciudades que en zonas rurales, este cambio en la temperatura se puede considerar como un cambio climático local o regional.

En la Figura 1.3 se puede apreciar el comportamiento de la UHI que depende de varios factores, entre ellos se encuentra el calor de la combustión, pocas áreas verdes y húmedas, las estructuras y materiales urbanos, la población y la contaminación atmosférica, así, la UHI puede tener diferentes escalas, dependiendo de su localización geográfica, las condiciones climáticas y uso del suelo. La diferencia de temperatura entre el área urbana y rural es generalmente de 3 a 5 °C, este aumento en la temperatura provoca estrés térmico en los habitantes por lo que aumentará el consumo de energía eléctrica para enfriar las edificaciones y mantener una temperatura de confort.

1 Conjunto de sistemas de calentamiento, ventilación y enfriamiento (Heating, Ventilation and Air Conditioning).

2 Isla de calor urbana (Urban Heat Island).



Figura 1.3 Isla de calor urbana.

Ante esta problemática, uno de los métodos de mitigar la UHI es pintando todas las superficies de blanco con lo que se reflejaría una gran cantidad de radiación solar, sin embargo, esta medida podría implicar un mayor uso de calefacción artificial en invierno. Otro método es la aplicación de vegetación en los techos, paredes y jardines, esto ayuda a modificar el microclima pues el área donde se encuentran es más fría y húmeda que sus alrededores, esto se debe a la capacidad que tiene de absorber energía radiante a través de la evapotranspiración. Se recomienda que la vegetación tenga follaje perenne o caducifolio, ya que estas plantas al perder las hojas en la temporada otoño-invierno permiten que el flujo de calor de la radiación llegue hasta el interior de los edificios reduciendo el uso de calefacción. Sin embargo, a pesar de la importancia de la vegetación en las ciudades y de las recomendaciones que diferentes organismos hacen para su uso, parte de la población aún sigue desinformada respecto al tema; la urbanización ha desplazado y minimizado las áreas verdes, por lo que una alternativa es el uso de techos verde. (Luo et al., 2018).

1.2.1. Sistemas pasivos de acondicionamiento térmico

Las personas buscan un estado de confort para realizar sus actividades diarias, pero esto es una tarea difícil si no se cuenta con un sistema de climatización ya que la temperatura ambiente oscila en función de la posición geográfica, condiciones climáticas, de las estaciones del año e inclusive a lo largo del día. Cuando el cuerpo experimenta condiciones no confortables, éste reacciona para adaptarse a las temperaturas externas, tiritar ante el frío o sudar ante el calor. Sin embargo, estos procesos no siempre son suficientes para mantener la temperatura neutra del cuerpo, por lo que, se recurre a la utilización de barreras que lo protejan de las condiciones climáticas como lo es la vestimenta y la misma edificación respectivamente. Los edificios sirven de resguardo donde se tiene un ambiente controlado, con niveles adecuados de temperatura, iluminación, calidad del aire y control de ruido.

Existen técnicas que buscan regular la temperatura del interior de la edificación, éstas se pueden clasificar como pasivas y activas. En las pasivas no se hace uso de energía eléctrica mientras que en las activas si se usa. Muchas construcciones tradicionales aprovechan los recursos naturales según las necesidades de cada momento del día o del año, mediante la

ubicación, la forma, la disposición y diseño de los elementos constructivos. Sin embargo, en la actualidad, debido a los avances tecnológicos se han ido abandonando las prácticas basadas en el diseño pasivo y se han ido implementado cada vez más los sistemas mecánicos para obtener una temperatura de confort sin tener en cuenta las condiciones del lugar y el potencial del clima, ya que las condiciones internas son diferentes en cada edificio por ello las técnicas constructivas y los materiales empleados deberían adaptarse al lugar en el que se encuentre construida la edificación.

Un buen porcentaje de energía usada para climatizar e iluminar un edificio se puede ahorrar, al emplear una o varias técnicas pasivas que aproximen las condiciones interiores a las de confort. Algunas de estas técnicas pasivas se muestran en la Tabla 1.1 las cuales se han venido desarrollando gradualmente desde las últimas dos décadas; en particular, una de las de mayor uso en años recientes son, los techos verdes.

Tabla 1.1 Técnicas pasivas de acondicionamiento térmico.

Estrategias generales		Solución
Diseño general del edificio	Captación de la radiación solar	Ubicación Forma Orientación
Mejora de la envolvente térmica	Conservación de la energía	Aislamiento térmico Fachadas ventiladas Cubiertas ventiladas Fachadas vegetales Cubiertas vegetales Vidrios y marcos con baja transmitancia térmica
	Acumulación térmica	Fachadas y cubiertas con alta inercia térmica
Estrategias de refrigeración		Solución
Protección solar	Externa	Pérgolas Parasoles Contraventanas Vegetación
	Intermedia	Vidrios inteligentes
	Interior	Persianas
Ventilación natural	Cruzada	Huecos
	Con tiro térmico	Efecto chimenea Aspiración estática (efecto Venturi)
	Inducida	Torre de viento
Tratamiento de aire	Enfriamiento evaporativo	Agua Vegetación
	Reducción de la temperatura del aire	Conductos enterrados Patios Refrigeración nocturna
Estrategias de calefacción		Solución
Calefacción solar	Directa	Ventanas y lucernarios Invernaderos y galerías acristaladas
	Indirecta	Muros captadores y acumuladores

1.2.2. Techos verdes

Los techos verdes son tecnologías antiguas, el ejemplo más remoto que se conoce son los jardines colgantes de Babilonia (alrededor del 590 a.c.) considerados como una de las siete maravillas del mundo antiguo. Siglos después, en el VIII y XI la población del norte de Europa (los vikingos) utilizó los techos verdes como solución energética, para proteger la envoltura de la vivienda contra las pérdidas térmicas, el viento y las lluvias. Todavía hoy, las

Islas Feroe, situadas entre Noruega e Islandia, muestran muchos ejemplos de viviendas equipadas con techos verdes de estilo antiguo. Además de las cualidades estéticas, los primeros intentos para cuantificar los beneficios energéticos se realizaron en Alemania, alrededor de 1960, por otro lado, en América el primer techo verde se instaló en Nueva York, EU, en la parte superior del Rockefeller Center, en 1930. (Ascione *et al.* 2013).

Los techos verdes ofrecen un conjunto de beneficios, uno de los más sobresalientes es su rendimiento energético, es un método de sombreado que ayuda a que la radiación no incida directamente en él, esto en combinación con la evapotranspiración de la vegetación y el sustrato ayuda a bajar la temperatura del ambiente y del interior de la edificación, y por sus beneficios ambientales podrían utilizarse ampliamente como herramienta en la planificación urbana y tener un papel significativo en el desarrollo urbano sostenible.

La Unión Europea (UE) ha propuesto que los techos verdes pueden contribuir a una des carbonización, la UE adoptó un plan medioambiental que establece una reducción del 20% de las emisiones contaminantes, una reducción del 20% del consumo de energía y el uso de al menos un 20% de energías renovables en el año 2020. (Ferrante *et al.* 2016). Otros países dentro de su normativa oficial estipulan que edificios públicos tengan techos verdes como Shanghai quien dictaminó que a partir del año 2015 se debe cubrir con un techo verde un área mayor al 30% del techo disponible de los edificios públicos. (He *et al.* 2017). Otras ciudades importantes como Basilea (Suiza), Toronto (Canadá), Stuttgart (Alemania), Portland (Estados Unidos), Tokio (Japón) y Singapur han exigido el uso de techos verdes para todo edificio (Francis y Jensen, 2017) (Zeng *et al.* 2017).

1.3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta sección se muestra la revisión de la literatura referente al tema de investigación de techos verdes, estos han sido instalados en edificios residenciales y no residenciales y analizados con diferentes metodologías. Los trabajos en seguida expuestos se dividieron en teóricos, experimentales y teóricos experimentales.

1.3.1. Estudios teóricos

Hodo et al. (2012) realizaron un análisis energético de un techo verde que se resolvió por diferencias finitas en una dimensión. El estudio se llevó a cabo en Togo y se consideró un modelo físico de cinco capas: aire exterior (turbulento e incompresible), vegetación, sustrato, losa y aire interior (inmóvil, no hay convección). Se desprecian los gradientes de presión, flujos radiantes de las hoja, energía fotoquímica y disipación de calor viscoso. Concluyeron que la radiación que llega a la vegetación es mucho mayor que la que llega al sustrato, mientras más alto el LAI mayor es la evapotranspiración y menor el flujo de calor que llega al interior, y un techo verde con LAI de 0.5-1 tiene ganancias de calor similares a las de un techo tradicional.

Ascione et al. (2013) realizaron un estudio económico-energético entre un techo tradicional, uno fresco y uno verde con cinco especies diferentes de vegetación: *pasto*, *sedum corto* y *alto* y *gramináceas cortas* y *altas* para saber cuál de estos techos es la solución más efectiva en el ahorro de energía por sistemas de acondicionamiento. El estudio se llevó a cabo para climas de seis ciudades de Europa: Tenerife, Sevilla, Roma, Ámsterdam, Londres y Oslo. Se simuló un edificio de oficinas de 986 m², el techo fresco y tradicional cuentan con una capa de aislamiento de 12 cm. Se concluyó que para un clima cálido (Tenerife y Sevilla) se obtuvieron ahorros del 1-10.8%, para clima frío (Roma y Ámsterdam) se presentó un ahorro de 8.4% siendo el techo fresco la mejor opción para ambos climas. Para las ciudades de Londres y Oslo el techo verde fue el que presentó mayores ahorros anuales de 5.9-7.2% con las gramináceas. Dentro del análisis económico se tomó en cuenta el consumo de gas, electricidad y agua; la ciudad que presentó mayor consumo de estos servicios fue Tenerife con 17,082 E/año y la ciudad con menor consumo fue Londres con 5,082 E/año. Finalmente mencionan los autores que se debe hacer un estudio previo con las características específicas de cada ciudad para conocer el tipo de techo indicado para dicho clima.

Ferrante et al. (2015) llevaron a cabo un análisis comparativo del rendimiento energético de un techo verde y un techo tradicional con los softwares *EnergyPlus* y *DesignBuilder*, el estudio se realizó en Italia en un edificio de 4 pisos y un sótano, se consideró la iluminación, refrigeración, calefacción, ocupación y, ventilación natural y mecánica en un horario específico. Las conclusiones a las que llegaron es que un techo verde presenta la temperatura más estable a lo largo del día y año que un techo tradicional. También se encontró que hay mayor ahorro de energía en invierno que en verano, esto debido al uso de aire acondicionado en temporada cálida.

Gagliano et al. (2015) analizaron el comportamiento energético entre un techo estándar, techo fresco y techo verde. Se evaluaron necesidades energéticas, comportamiento térmico y confort térmico. La simulación se realizó en *EnergyPlus* y *DesignBuilder* con un paso de tiempo de una hora, los resultados de la simulación se validaron con las pruebas experimentales de un edificio que cuenta con los tres tipos de techo analizados. El estudio se realizó en Italia considerando un clima templado, el intercambio de calor radiante y convectivo, la evapotranspiración, humedad del aire y el consumo de energía para refrigeración y calefacción. La estructura del techo verde se compone del techo, 10 cm de sustrato y la vegetación. El techo estándar de losa de hormigón sin aislamiento y el techo fresco de una pintura aislante. Los resultados mostraron que un techo verde reduce el consumo de refrigeración, calefacción y ruido externo, y aumenta el confort térmico y la vida del techo presentando el menor consumo de energía. La temperatura más alta y el mayor consumo energético lo presentó el techo convencional.

Gagliano et al. (2016a) llevaron a cabo una simulación para evaluar y comparar el ahorro de energía de cinco configuraciones de un techo verde extensivo (no aislados,

moderadamente aislados: 2 y 8 cm de aislamiento y altamente aislados: 4 y 16 cm de aislamiento). Se ejecutó la simulación con ayuda de los software *EnergyPlus* y *DesignBuilder*, para el modelo de confort térmico se tomaron las especificaciones de la norma ISO EN 15251 donde se menciona que hay tres rangos de confort: expectativa alta, media y aceptable. El estudio se realizó en Italia para una casa de un nivel considerando la radiación de onda larga y corta, conducción y convección de calor, la evapotranspiración del sustrato y vegetación. Los resultados obtenidos fueron que un aislamiento de 4 a 8 cm reduce el consumo de energía, siendo el techo sin aislar el que mayor energía consume (13 kWh) y el que menos consume es el techo verde de 8 cm de aislamiento (0.62 kWh). La temperatura máxima del techo verde fue de 36 °C y para el techo tradicional de 54.5 °C.

Gagliano et al. (2016b) realizaron una simulación para estudiar el comportamiento térmico de un prototipo de techo verde y uno tradicional, se utilizaron el software *DesignBuilder* y *EnergyPlus* para la simulación y se compararon y validaron los resultados numéricos con los resultados experimentales. El estudio se realizó para la semana más caliente del verano de Catania, Italia, con las siguientes consideraciones: el techo verde es extensivo (15 cm de sustrato), las dimensiones del prototipo son de 1*1*0.25 metros, sus componentes: drenaje, filtración, sustrato y vegetación, el sistema de riego es por goteo dos veces al día, las paredes y piso son adiabáticos, se consideró la vivienda sin actividad, no hay ganancia interna de calor ni sistemas de refrigeración o calefacción y se tomaron datos de la estación meteorológica. Los resultados obtenidos muestran que la simulación coincide con los datos medidos para un techo tradicional, pero para uno verde hay una variación de dos grados. La variación diaria de temperatura para un techo verde es de 5.6 °C y para uno tradicional de 33.2 °C. La temperatura máxima interna y externa para un techo verde es de 25 °C y 29 °C y para un techo tradicional de 36 °C y 54 °C.

Malys et al. (2016) realizaron un estudio comparativo del confort térmico en edificaciones analizando tres estrategias verdes (paredes verdes, techos verdes y jardines). El estudio se realizó en Francia en un edificio de 15 m de altura orientado hacia el sur y para la simulación se usó el software *Solene-Microclimat*. Se considera la conducción, radiación y evapotranspiración, almacenamiento de calor en paredes y piso, cargas de ventilación y demanda de energía. Se concluye que los techos verdes solo son efectivos en los pisos superiores mientras que el uso de una pared verde afecta a todo el edificio y el uso de jardines no afecta el interior del edificio, pero si el ambiente cercano a ellos. El edificio tradicional alcanzó hasta 40 °C en el interior y el edificio con paredes y techos verdes reduce 2/3 el calor transmitido al interior.

Francis y Jensen (2017) hicieron una revisión literaria de varios artículos para evaluar tres beneficios de techos verdes: la reducción de la UHI, la reducción de los contaminantes del aire y el ahorro en el consumo de la energía eléctrica. Se revisaron 17 estudios para verificar la reducción de UHI en los cuales se analiza la temperatura en la vegetación, sustrato, los

común y sobre la vegetación y se comparan los resultados con un techo convencional. Para la reducción de la contaminación del aire se revisaron 4 artículos y para el ahorro de energía eléctrica en la edificación se revisaron 41 estudios que analizan la diferencia máxima de temperatura interior, temperatura en la superficie del techo y la entrada y salida de flujos de calor. De la revisión que hicieron de los artículos llegaron a la conclusión de que la disminución de la UHI a nivel de la calle oscila entre 0.03-3 °C para el periodo cálido. Referente a la reducción de contaminantes del aire se encontró que la eliminación anual de PM₁₀ en comparación con un techo tradicional varía de 0.42-9.1 g/m² de NO₂, SO₂ y O₃. Y finalmente de la revisión del ahorro de energía se encontró que el consumo anual va desde un efecto negativo de -7% hasta un ahorro del 70%.

Vacek et al. (2017) realizaron una evaluación del ciclo de vida de cuatro techos verdes semi-intensivos y la influencia de agregar materiales artificiales. Las configuraciones fueron las siguientes: un techo verde estándar, uno con poliestireno y dos usando lana mineral como aislante. Se tomaron las especificaciones de la norma ISO 14040 sobre techos verdes. Los resultados mostraron que la vida útil esperada es de 20 años y después de esta etapa se requiere una renovación. El techo verde estándar fue el techo que presentó menor impacto ambiental (reducción de vegetación, calentamiento global, deterioro de la capa de ozono) y el que presentó mayor impacto ambiental fue el techo con panel de poliestireno y sustrato de lana mineral, un 11% más que un techo verde común. Estos efectos fueron causados por el uso de materiales artificiales y el proceso de producción que tienen.

Zhang et al. (2017) analizaron la comodidad térmica del entorno exterior con diferentes configuraciones de vegetación (techo verde, suelo verde y la combinación de las dos técnicas) y con la envolvente tradicional con el fin de elegir la mejor configuración, también se analiza la temperatura de la superficie exterior de los edificios. El estudio se realizó en China donde se simuló un distrito residencial con nueve edificios (10x10x10 m cada uno) con el software *Phoenix*. Se consideró un modelo turbulento en 3D, condiciones climáticas de la zona, las características y materiales de construcción que están incorporados en el software, el césped está alrededor de los edificios hasta 1.5 m de distancia del edificio y la vegetación se considera que cubre el área al 100%. Los resultados a los que llegaron es que un edificio con la envolvente tradicional alcanza la temperatura más alta de hasta 38 °C, el techo verde tiene poco impacto a la altura del peatón al aire libre y el césped tiene poca influencia en los pisos superiores de los edificios, ambas técnicas disminuyen la temperatura exterior de 2-4 °C. En los muros se presenta la mayor temperatura en la parte media de los mismo y concluyeron que un techo verde reduce la temperatura, protege la estructura, reduce el ruido y el calor radiante por efecto de la fotosíntesis y el sombreado.

Besir y Cuce (2018) realizaron un compendio de la información referente a techos verdes y paredes verdes y sus aspectos térmicos, ambientales, sociales y económicos, especificando su cumplimiento con los estándares de edificios ecológicos. Describen la problemática

ambiental actual, los tipos de techos verdes (intensivos, semi-intensivos y extensivos) y paredes verdes (pared verde y pared viva) y beneficios. Concluyeron que el uso de techos verdes reduce la ganancia de calor hasta en un 80% en verano, un techo verde consume de 2.2-16.7% menos energía eléctrica que un techo tradicional, se reduce la calefacción entre 10-30%, la temperatura exterior se reduce entre 3.7-11.3 °C mientras aumenta la densidad del follaje.

Luo et al. (2018) realizaron una revisión bibliográfica de las condiciones de confort térmico y tasa metabólica en edificaciones. La búsqueda de la literatura se realizó en *Web of Knowledge* donde se encontraron 634 artículos relacionados al tema y se seleccionaron 76 documentos que resultaron los más relevantes. Encontraron que la tasa metabólica (causada por realizar actividades físicas y exposición a diferentes entornos) afecta más la condición de confort térmico que la temperatura del aire, siendo los hombres los que presentan mayor tasa metabólica que las mujeres, aproximadamente del 10-30% menor en mujeres que en hombres al realizar la misma actividad. Entre razas también existe variación, lo habitantes chinos presentan una tasa metabólica menor que los occidentales en 15%. Concluyeron que de la tecnología que existe para medir la tasa metabólica la más precisa es la calorimetría (mide el consumo de O₂ y la producción de CO₂), pero en estos estudios generalmente no se toma en cuenta el género, edad, peso y la actividad física en tiempo real, por lo que se recomienda que tomen en cuenta estos parámetros para así mantener un modelo de confort térmico de alta precisión. Estudios experimentales

1.3.2. Estudios teóricos-experimentales

Nicol y Humphreys (2002) realizaron estudios sobre el confort térmico de los individuos, ellos desarrollaron un índice de *confort térmico adaptativo* que expresa la interacción de la persona con el ambiente que lo rodea (edificios con y sin calefacción y refrigeración), que incluye la temperatura, humedad, movimiento del aire, vestimenta y actividad que se realice. Desarrollaron un modelo que predice la temperatura de confort en el interior de la edificación en función de la temperatura exterior, la suposición fundamental del enfoque adaptativo se expresa mediante el principio de adaptación: si se produce un cambio que produce incomodidad, las personas reaccionan de manera tal que tienden a restaurar su comodidad, esto podría ser abriendo una ventana, usar un abanico, bajar las persianas, etc., aquellos con más oportunidades para adaptarse al medio que lo rodea según sus propios requisitos tendrán menos probabilidades de sufrir incomodidades. Concluyeron que la temperatura de confort en edificios con calefacción o refrigeración es una cuestión de costumbre, pero siempre que el cambio sea lo suficientemente lento, las personas se adaptarán a un rango de temperaturas más amplio.

Nicol (2004) realizaron un estudio de campo para climas tropicales (cálidos húmedos) donde proponen un modelo adaptativo que considera las implicaciones del movimiento y humedad del aire para los estándares de comodidad adaptativa. Nicol y otros autores han encontrado

que en climas cálidos los sujetos pueden sentirse cómodos a temperaturas que excedan los 30 °C, especialmente si usan un ventilador, abren ventanas, cambian de ropa o de posición; estos son cambios a corto plazo que los modelos de balance térmico no toman en cuenta adecuadamente. El estudio mostró que la temperatura que las personas encuentran cómoda está estrechamente relacionada con la temperatura promedio ambiente, considerando esto, propuso una relación lineal que predice la temperatura de confort donde se asume que la velocidad del viento es menor a 0.1 m/s y la humedad relativa se estandariza en 50%, ello es aplicable para edificios que funcionan sin sistemas de climatización. Para tener una zona de confort es aceptable de 2-3 °C a cada lado de la temperatura óptima.

Alexandri y Jones (2007) desarrollaron un modelado matemático unidimensional que describe la transferencia de calor y masa en el aire, vegetación y sustrato. El estudio se llevó a cabo en la Escuela de Arquitectura Galesa de la Universidad de Cardiff tomando las mediciones de agosto del 2004. Para la modelación se consideraron los materiales de construcción como cuerpos porosos, la capa de vegetación como una capa combinada de aire-vegetación, tomando en cuenta la transferencia de calor entre las hojas y el aire entre ellas, pero sin dar importancia a la transferencia de calor entre las hojas y los tallos. No se tomó en cuenta el agua de riego ni la lluvia y se consideró una vegetación sana. El nodo interno (dentro de la vivienda) tuvo una temperatura constante de 20 °C con 50% de humedad y para el nodo urbano (aire sobre la vegetación) se tomaron datos de la estación meteorológica. Se validaron los resultados simulados con los experimentales encontrando como resultado un margen de error promedio de 0.4 °C en la transferencia de calor y masa. Se observó que para la transferencia de calor y masa hay mayor correlación entre las mediciones experimentales y los resultados simulados en sólidos que en el aire, esto se debe a la mayor homogeneidad de los sólidos que en los líquidos y gases.

Sailor (2008) realizó un estudio teórico experimental para conocer el efecto de un techo verde en edificios de dos ciudades diferentes. Se hizo el balance energético con ayuda del software EnergyPlus considerando las características de la vegetación y el sustrato, la evapotranspiración, condiciones climáticas, el techo verde sin drenaje ni aislante y los tres tipos de transferencia de calor: radiación, convección y conducción. El estudio se realizó tomando en cuenta los estatutos establecidos en la norma ASHRAE 90.1-2004 para edificaciones. Los resultados obtenidos mostraron que una mayor densidad del follaje aumenta el consumo de gas en invierno y reduce el consumo de electricidad en verano. Al aumentar el riego al doble se presenta un mayor ahorro de electricidad en la ciudad de Chicago que en la ciudad de Houston, esto modelado para condiciones de verano.

Ouldboukhitine et al. (2011) evaluaron el comportamiento térmico de un techo verde y uno convencional de losa de hormigón. En el estudio se analizaron dos especies de vegetación: pampa y tundra. Se desarrolló un modelo para determinar el balance energético para el follaje y el sustrato, este modelo se validó experimentalmente con la plataforma de techo verde que

se instaló en la universidad La Roche, Francia. Para la simulación se consideró el efecto de la gravedad, la evapotranspiración, la radiación solar, el sustrato como un medio poroso no deformable y de una estación meteorológica se tomaron la temperatura, humedad del aire, precipitación, velocidad y dirección del viento. Concluyeron que la variación de temperatura es proporcional al rango de densidad del follaje. Se encontró una diferencia de temperatura entre los techos de hasta 30 °C en verano. De los dos tipos de vegetación que se analizaron la Pampa tiene temperaturas ligeramente más bajas que la Tundra.

Djedjig et al. (2012) desarrollaron un modelo termo-hídrico en un techo verde para conocer las temperaturas y el efecto de la cantidad de agua en éste y se compararon los resultados con pruebas experimentales. La simulación numérica se realizó con el método de diferencias finitas. El modelo consideró la transferencia de calor y masa, la evapotranspiración, la velocidad del viento, la temperatura y humedad del aire y del suelo, radiación, precipitación y dos tipos de vegetación: la Pampa y la Tundra. Los resultados obtenidos fueron la diferencia de temperatura de hasta 25 °C entre un techo con sustrato seco y uno saturado. El estudio experimental se realizó de junio a julio del 2011 donde hubo bajas precipitaciones provocando sequía en el techo verde y aumento de la temperatura del techo hasta en 50 °C. La mitad de la radiación absorbida se disipa como calor sensible sobre la superficie del suelo, y la otra mitad se transmite por conducción a través del sustrato.

Permpituck y Namprakai (2012) realizaron un estudio teórico experimental para examinar los efectos del césped en la transferencia de energía de un edificio, comparándose diferentes grosores de suelo (10 y 20 cm), dos tipos de pastos (pasto de manila y sabana) y un techo tradicional. Se construyó un módulo de 2 x 6.20 x 2.50 m con techo de losa de concreto y una pared de tablero de cemento con espuma de polietileno de 1 pulgada de espesor, el estudio se llevó a cabo en la universidad de Naraesuan en Tailandia. Las simulaciones se realizaron en el software Visual DOE y se validaron con datos experimentales del módulo de prueba de cinco meses de mediciones (cada 5 min) del 2007, se midió la temperatura en diferentes posiciones del techo verde. Se concluyó que la profundidad del sustrato tiene un gran impacto en la transferencia de calor a través del techo en comparación con el techo tradicional; en un sustrato de 10 cm la reducción de la transferencia de calor fue de 984 W/m² (59%) y en un sustrato de 20 cm la reducción fue mayor con 2337 W/m² (96%). Respecto a las dos vegetaciones analizadas se encontró que el pasto de sabana puede reducir la ganancia de calor de manera más efectiva que el pasto de manila en un 69%. De las combinaciones de techo verde la mejor opción fue un sustrato de 20 cm con pasto de sabana, consumiendo una energía anual de 406 kWh (62%) menor que el techo tradicional.

Ferrante et al. (2016) determinaron el LAI, el índice de cobertura y la temperatura en el follaje de seis especies de plantas: *Phila nordiflora*, *Gazania uniflora*, *Gazania nivea*, *Aptenia lancifolia*, *Mesembryanthemum barbatus* and *Sedum* para aumentar la base de datos de estos parámetros y tener un primer acercamiento para seleccionar la vegetación óptima

que presente mejor rendimiento en el techo verde, el cual fue instalado en la universidad Palermo, Sicilia, Italia. Se monitoreó el crecimiento de la vegetación por un periodo de cuatro meses, el sustrato está dividido en dos partes; una de 10 cm y la otra de 5 cm de espesor y el riego es por goteo 3cm por semana. El índice de cobertura se obtuvo con imágenes digitales contando los píxeles de un área determinada, el LAI deshojando las plantas, la temperatura del follaje con un termómetro infrarrojo, las mediciones se realizaron el día 10 y 11 de noviembre del 2015 y los datos climáticos se obtuvieron de la estación meteorológica instalada en la universidad. Los resultados que se obtuvieron a los 4 meses de que se plantaron las diferentes especies fueron: un índice de cobertura y temperatura en el follaje (mínima y máxima) para *Phila nordiflora* de 95% y 17.3-24.7 °C, *Aptenia lancifolia* de 95% y 16.8-25.5 °C, *Mesembryanthemum barbatus* de 95%, *Gazania nivea* de 66% y 16.8-25.5 °C, *Gazania uniflora* de 49% y 18-24.9 °C y finalmente *Sedum* con 19%. Una vez que se obtuvieron los parámetros anteriores se simuló en DesignBuilder una oficina con techo verde y techo tradicional de 23.7 m² con una fachada, las demás paredes y piso se consideran adiabáticas. Se concluyó que un techo verde ahorra 23% de energía anual comparado con un techo tradicional y que un LAI mayor disminuye la refrigeración, pero aumenta la calefacción.

Silva et al. (2016) compararon el rendimiento energético de tres tipos de techos verdes (intensivos, extensivos y semi-intensivos) y dos tipos de techo tradicional (negros y blancos). El estudio se realizó en Portugal y se usó *EnergyPlus* para la simulación. Se consideró paredes y piso adiabáticos, ocupación, aire acondicionado, riego, precipitación, iluminación y LAI de 2. Concluyeron que el techo que presenta mejores resultados es el intensivo con 8 cm de aislamiento consumiendo 5.23 kWh/m²/año y los peores resultados los presenta un techo verde extensivo sin aislamiento consumiendo 23.55 kWh/m²/año. De los techos tradicionales el blanco fue quien consumió menos energía en verano y en invierno el techo negro es más eficiente. Otra conclusión a la que llegaron es que un mayor grosor de aislamiento en los techos muestra menor consumo de energía eléctrica para calefacción y enfriamiento, aceptos en los techos intensivos pues mucho aislamiento no permite aprovechar los efectos de la evapotranspiración. Los techos verdes intensivos y semi-intensivos muestran menor uso de energía eléctrica que los extensivos y finalmente encontraron que para reducir el uso de energía eléctrica para enfriamiento un techo blanco reflectivo es más efectivo que los efectos de enfriamiento de un techo verde.

Chagolla et al. (2017) realizaron un estudio del comportamiento térmico de un techo verde en un clima semi-cálido. El estudio se realizó en dos etapas, primero, se estudiaron cinco tipos de plantas para seleccionar la adecuada, como parámetro de selección se decidió por la resistencia a la sequía que presentaban las especies, siendo la *Aeonium subplanum* la óptima; segundo, se construyeron dos módulos (0.729 m³) con paredes aisladas y sistema de aire acondicionado, uno con techo verde y otro con techo de concreto donde se midieron la temperatura y el flujo de calor por un periodo de ocho días y se regó sólo un día de este

periodo. Los datos climáticos se obtuvieron de una estación meteorológica instalada en la zona. Los resultados obtenidos mostraron que un techo verde disminuye la temperatura en 20.5 °C y consume 10.3% menos electricidad para aire acondicionado en comparación con un techo de concreto. La temperatura máxima para el techo verde se redujo en 6.4 °C en la vegetación, 4.8 °C en el sustrato y 1.3 °C en la losa.

Foustalieraki et al. (2017) realizaron un estudio teórico experimental para estimar la contribución que un techo verde proporciona en el consumo de energía de un edificio, así como el comportamiento de diferentes especies de vegetación. El estudio se realizó en Atenas, Grecia; en un supermercado de dos niveles con un área de 700 m² donde se plantaron 3500 plantas de siete especies diferentes. El estudio se realizó en el software EnergyPlus donde se validaron los datos experimentales que se obtuvieron del techo verde instalado en el 2009, se midió en el interior y exterior del edificio la temperatura y humedad relativa cada 5 minutos en el periodo frío del año (Noviembre 2015 a Marzo del 2016). El supermercado no recibe sombreado de otros edificios vecinos y está construido de hormigón armado, tiene aislamiento térmico y de agua en el techo, las paredes del segundo piso están cubiertas de poliuretano y las ventanas son de doble panel. Los resultados a los que se llegaron fueron, que una vegetación poco densa y de colores oscuros tiene una mayor temperatura en la superficie que la vegetación de colores claros. De los siete tipos de vegetación que se analizaron la que presentó mayor temperatura en la superficie fue *Lanataka Camara* y la de menor temperatura fue *Origanum Heraclioticum* llegando a la conclusión de que las capas de la estructura del techo verde influyen más que la vegetación misma. Los efectos del techo verde son más significativos en el segundo nivel y en el primer se consideran insignificantes. Finalmente, el consumo de energía para refrigeración disminuyó 18.7% y para calefacción 11.4% con la instalación del techo verde.

He et al. (2017) evaluaron el rendimiento energético del sustrato y la vegetación de un techo verde, se validaron las simulaciones de 18 casos de techos verdes donde se varió el LAI y el grosor del sustrato con pruebas experimentales realizadas en Shanghai. El modelo se resolvió con el método de diferencias finitas, sólo se considera la transferencia de calor verticalmente y en una dimensión, se toma en cuenta, reflexiones múltiples, resistencia aerodinámica por encima y por debajo de las hojas, la humeada en el sustrato, se mantuvo el recinto con puertas y ventanas cerradas y a temperatura constante para invierno de 18 °C y para verano a 25 °C. Concluyeron que el LAI influye en verano y el espesor del sustrato en invierno, de los casos que se estudiaron para el verano el techo que mejor resultados presenta es un sustrato de 15 cm y LAI de 5 y el que tuvo resultados menos favorables es el techo con LAI de 2 y un espesor del sustrato de 4 cm. Para invierno el LAI no es muy significativo, el sustrato de 15 cm de espesor es el que mejores resultados mostró y el peor es el de 4 cm.

Scharf y Zluwa (2017) analizaron el comportamiento aislante de siete diferentes techos verdes que difieren en espesores (12, 20 y 30 cm), materiales (para el sustrato: arcilla

expandida, arcilla natural quemada, ladrillos triturados, composta, arena, perlita, filtro de lana y para el drenaje: arcilla expandida, ladrillos triturados, perlita) y capas de construcción. El estudio se realizó en Viena, Australia, durante un periodo de 15 meses, las medidas de los techos verdes son de 2*2 metros y no hay sistemas de calefacción o refrigeración. Se tomaron los parámetros de una estación meteorológica como la temperatura, radiación, humedad, precipitación, velocidad del viento. Los resultados obtenidos mostraron que la mejor opción de techo es la C (sustrato: ladrillos triturados y composta, capa de drenaje: ladrillos triturados) con una temperatura máxima de 38 °C y con un valor de U (calor que fluye por unidad de tiempo y superficie) de 0.25861 W/m² K y la peor opción es la B (sustrato: arcilla natural quemada y composta, capa de drenaje: arcilla natural quemada) mostrando el valor más alto de U de 0.52747 W/m²K.

Solcerova et al. (2017) estudiaron el comportamiento térmico de techo verde (GR) y un techo de grava blanca (WG) para un clima templado. El estudio fue teórico-experimental y se realizó en Utrecht, países bajos de Europa, en un periodo de 2010-2015. Se monitorearon 8 techos: seis de 7x3.5m, uno de 7x7.5 m y uno de 8.5x8 m. Los techos contaban con una membrana impermeabilizante, sistema de drenaje (2 cm), sustrato (3.5 cm) y la vegetación (combinación de 6 tipos de plantas: *S. floriferum* "Weihestephaner gold", *S. album* "Coral carpet", *S. reflexum*, *S. spurium* "Fuldaglut", *S. sexangulare* y *S. album superbum*). Se hicieron mediciones en dos periodos de seis días, uno en cielo limpio y otro en cielo nublado. Los resultados mostraron que la temperatura es más alta en el día que en la noche, siendo el techo de grava el que presentó la temperatura más baja de todos. Para un día nublado la diferencia de temperatura de un GR y WG fue de 0.7 °C. El techo verde presentó la temperatura más alta en la noche que un techo tradicional y en el último nodo de mediciones son similares en todos los techos, debido a que las mediciones son influenciadas por el viento de alrededor y no directamente a la vegetación.

Zeng et al. (2017) realizaron un estudio teórico experimental para determinar las propiedades óptimas de un techo verde (LAI, altura de la vegetación y espesor del sustrato) para lograr un alto rendimiento de ahorro de energía y confort en ciudades representativas (Harbin, Beijing, Chongqing y Guangzhou) de cuatro zonas climáticas de China. Concluyeron que, para aumentar el ahorro de energía eléctrica, el espesor óptimo del suelo es 0.3 m y el LAI es 0.5 para las cuatro ciudades de referencia. La altura de la vegetación recomendada es de 0.3 m, excepto en Beijing donde se recomienda de 0.1 m. en ciudades dominadas por el enfriamiento (Chongqing y Guangzhou), el consumo de energía anual disminuye al aumentar la altura del follaje y LAI, siendo este último el parámetro más importante que influye en el consumo de energía. También llegaron a la conclusión de que en zonas dominadas por enfriamiento (climas cálidos) los techos verdes y frescos funcionan de manera similar y en Harbin que es una ciudad dominada por calefacción el techo fresco consumo más energía eléctrica que un techo convencional.

1.4. CONCLUSIÓN DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

De los estudios revisados se encontraron estudios teóricos, experimentales y teórico-experimentales, en los que se busca el ahorro de energía eléctrica por el uso de sistemas de calefacción y refrigeración manteniendo el confort térmico dentro de la construcción. Los estudios coinciden que los parámetros más importantes del techo verde es el LAI, el grosor del sustrato y el contenido de humedad, esto dependiendo del clima donde se instalen, por ello se debe hacer un estudio previo antes de la instalación para conocer las características climáticas de la ciudad y la flora endémica de la región, por ello es complicado generalizar este tipo de estudios. Dentro de la modelación energética de edificaciones uno de los software más utilizados es EnergyPlus, este software es de uso gratuito y permite la simulación con una gran variedad de parámetros libres que pueden ser modificados por el usuario, entre ellos está la modelación de un techo verde. Todos los estudios concluyen que el uso de techos verdes son una alternativa pasiva de enfriamiento que disminuyen la temperatura del interior, reducen la UHI y mejora el aire de la zona, siendo los techos extensivos los de mayor uso, eso por el mantenimiento mínimo que requieren y el bajo costo de instalación.

Respecto a la literatura revisada sobre el confort térmico en la edificación, se recomienda que para tener un modelo más preciso que calcule la temperatura óptima se deben tomar en cuenta el género, edad, peso y la actividad física en tiempo real, además se deben hacer varios estudios para especificar esa temperatura de confort, pues es un estado subjetivo que depende de cada persona.

1.5. JUSTIFICACIÓN

Aun conociendo la importancia de realizar estudios para la implementación de techos verdes en viviendas residenciales, no se encontró información durante la revisión del estado del arte la cual tuviera como objetivo el análisis de un techo verde implementado en una vivienda con características y clima de México. Cuernavaca es un estado de clima variable estacional y para tener un confort dentro de la vivienda se hace uso de equipos de calefacción y refrigeración, aumentando el consumo de energía eléctrica y en consecuencia el aumento de gases de efecto invernadero, por lo cual se pretende conocer si el uso de techos verdes en Cuernavaca ayuda a disminuir el consumo de energía.

1.6. OBJETIVOS

Los objetivos que se siguieron en la presente investigación se enumeran a continuación.

1.6.1. General

Estudiar el efecto de un techo verde en el confort térmico de una vivienda residencial.

1.6.2. Específicos

1. Simular la vivienda base con techo de concreto en evolución libre y con aire acondicionado.
2. Simular la vivienda base con techo verde en evolución libre y con aire acondicionado.
3. Simular la vivienda particular con techo de concreto en evolución libre y con aire acondicionado.
4. Simular la vivienda particular con techo verde en evolución libre y con aire acondicionado.
5. Realizar estudio comparativo entre el techo de concreto y el techo verde en evolución libre y con aire acondicionado de las dos viviendas: base y particular.

1.7. ALCANCE

Se estudia el efecto que tiene un techo verde y un techo tradicional en el confort térmico de dos viviendas de interés social de dos niveles, una vivienda extraída de la NOM-020-ENER-2001 y otra ubicada en la ciudad de Cuernavaca. Las viviendas se consideran sin luminarias, equipo eléctrico ni ocupantes. Para la simulación se utilizará el software EnergyPlus y DesignBuilder para obtener los ahorros de energía eléctrica por el uso de sistemas de aire acondicionado de los diferentes tipos de techos bajo las condiciones climáticas de un año de la ciudad de Cuernavaca, Morelos.

1.8. DESCRIPCIÓN DE LOS CAPÍTULOS

El trabajo consta de siete capítulos. El capítulo uno es a manera de introducción, se hace una reseña de la crisis energética y el cambio climático a nivel mundial y nacional, se presenta el comportamiento de la edificación con el medio ambiente, se describen los sistemas de acondicionamiento térmico, el estado del arte enfatizando en estudios teóricos, experimentales y teórico-experimentales relacionados con techos verdes y los objetivos que se buscan con la elaboración del proyecto.

En el *capítulo dos*, se presentan los conceptos básicos involucrados en este trabajo, los mecanismos de transferencia de calor y su relación en edificaciones, se detalla qué son los techos verdes y la utilidad que tienen, se presenta el modelo físico del techo tradicional y del techo verde y el modelo matemático de ambos techos que describe el comportamiento de los sistemas de con el ambiente.

En el *capítulo tres* se describen los softwares de simulación que se utilizaron: DesignBuilder y EnergyPlus, se presenta la metodología que se siguió para su uso y se describen los BESTEST que se realizaron para verificar el uso adecuado de los mismos.

En el *capítulo cuatro* se presenta la rehabilitación de los módulos, la instrumentación y la posición de los sensores de temperatura y flujo de calor, se muestra el clima específico para los días de validación de las simulaciones con datos experimentales, así como los parámetros obtenidos para la simulación de las viviendas.

En el *capítulo cinco* se describen las dos edificaciones que se utilizaron para el presente estudio: la vivienda base extraída de la NOM-020 y una particular ubicada en el estado de Morelos, se muestran las zonas térmicas de las viviendas y los parámetros de simulación.

En el *capítulo seis* se muestran los resultados de las simulaciones para las dos viviendas, la base y la particular. Se presenta el comportamiento de los dos techos, el convencional y el verde con sistema de aire acondicionado y en evolución libre.

Finalmente, en el *capítulo siete* se presentan las conclusiones del trabajo de investigación, se hace una comparación entre la vivienda con techo tradicional y con la alternativa de techo verde, adicional a esto se presentan las aportaciones a las que se llegó con la elaboración del presente proyecto.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se describen algunos conceptos básicos relacionados con la transferencia de calor, las propiedades termofísicas de los materiales y del medio ambiente. Se muestran los elementos principales de la envolvente de la edificación y la forma en que ésta intercambia energía con el exterior introduciéndose el balance térmico de la misma; se abordan las teorías de confort térmico en el interior de una edificación y los modelos para obtener una temperatura de confort. Por último, se describen las características y beneficios que un techo verde proporciona.

2.1. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Un sistema transfiere o recibe energía por la interacción con su alrededor, esto se produce cuando hay una diferencia de temperaturas entre el cuerpo y sus alrededores, por principio básico de la termodinámica el calor fluirá del lugar con mayor temperatura al de menor temperatura. Existen tres principales mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación o en alguna combinación de estas.

2.1.1. Conducción

Este mecanismo de transferencia ocurre en sólidos o fluidos estáticos por la interacción molecular, éstas vibran y chocan entre sí, y debido al movimiento ocurre transferencia de calor de las moléculas más energéticas a las menos energéticas debido a un gradiente de temperatura, produciéndose un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas, y así sucesivamente hasta alcanzar el equilibrio térmico. Los mejores conductores de calor son los metales, el aire es un mal conductor del calor, así los objetos malos conductores como el aire o plásticos se llaman aislantes.

La conducción de calor sólo ocurre si hay diferencias de temperatura entre dos partes del medio conductor, para un volumen de espesor Δx (m) con área de sección transversal A (m²) y cuyas caras opuestas se encuentran a diferentes temperaturas (°C), T_1 y T_2 , donde $T_1 > T_2$ como se muestra en la Figura 2.1. Para cuantificar la transferencia de calor por conducción se utiliza la *ley de Fourier* que establece, que la rapidez del flujo de calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en ese sentido y al área normal a la dirección del flujo de calor. El modelo que permite la cualificación de esta energía se presenta a continuación:

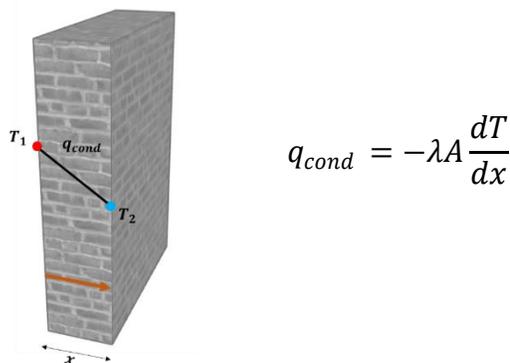


Figura 2.1 Conductividad en un cuerpo homogéneo.

Donde q_{cond} (W) es el flujo de calor por conducción que se produce por un gradiente de temperatura $\left(\frac{dT}{dx}\right)$ y este fluye de la zona de mayor temperatura a la zona de menor temperatura. λ (W/mK), es la conductividad térmica del material, magnitud que representa

la capacidad con la cual la sustancia conduce calor, puede definirse como la cantidad de calor que pasa a través de un material homogéneo durante un segundo, en un metro de espesor y cuando la diferencia de temperatura entre sus caras es de un grado Kelvin. El signo menos indica que la conducción de calor es en la dirección decreciente de la temperatura. (Incropera, 1999).

2.1.2. Convección

Este método de transferencia se compone de dos mecanismos: el primero es la transferencia de energía entre un sólido y un fluido; el segundo es la transferencia de energía debido al movimiento de masa o circulación dentro de una sustancia, es decir, al movimiento macroscópico de moléculas del fluido, causado por una fuerza externa. Esta fuerza externa puede ser natural, cuando se produce solo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, debida a una diferencia de presión, esto es, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, por ejemplo, el aire con un ventilador o el agua con una bomba. Sólo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio. Por lo general, la energía que se transfiere es energía sensible o energía interna del fluido y en algunos otros casos se involucran el intercambio de calor latente.

En este sentido, se emplean dos términos para referirse a este mecanismo de transferencia, el primero es la convección y el segundo es la advección, que es la transferencia de calor debida al movimiento horizontal del flujo, éste no se mueve por la diferencia de densidad, sino que requiere de una fuerza exterior, como el viento o las corrientes, para desplazar las partículas del medio.

Cuando la transferencia de calor ocurre entre un sólido y un fluido (Figura 2.2), la magnitud del flujo de calor depende del área superficial expuesta, de la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido y de un coeficiente convectivo. Este proceso, donde la temperatura del sólido es mayor que la del fluido se establece por la *Ley de enfriamiento de Newton*, como sigue:

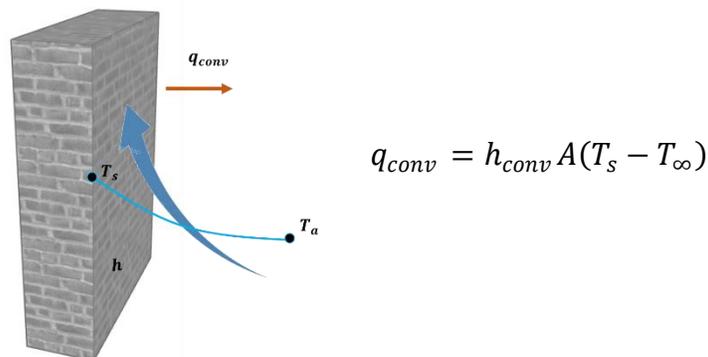


Figura 2.2 Convección superficial.

Donde q_{conv} (W) es el flujo de calor por convección, h_{conv} (W/m²K) es el coeficiente convectivo y depende de la viscosidad, velocidad del fluido, configuración física y textura de la superficie. A (m²) es la superficie que entrega calor con una temperatura T_s al fluido adyacente, que se encuentra a una temperatura T_∞ . El flujo de calor es positivo si el calor se transfiere desde la superficie al fluido ($T_s > T_\infty$) y negativo si el calor se transfiere desde el fluido hacia la superficie ($T_s < T_\infty$). (Incropera, 1999).

2.1.3. Radiación

La radiación térmica es energía emitida por una superficie sólida o un fluido que se encuentra a una temperatura dada, se produce directamente desde la fuente hacia el exterior en todas las direcciones y es absorbidas por otros cuerpos, las cuales se manifiestan en forma de calor sensible. Esta energía es producida por los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas y transportada por ondas electromagnéticas o fotones a la velocidad de la luz, por ello recibe el nombre de radiación electromagnética.

A diferencia de la conducción y la convección, o de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética es independiente de la materia para su propagación, de hecho, la transferencia de energía por radiación es más efectiva en el vacío.

La radiación que emite una superficie de área A (m²), que se encuentra a una temperatura T (°C), se produce a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie. La rapidez a la cual se libera energía se llama potencia de radiación, su valor es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Esto se conoce como la *ley de Stefan-Boltzmann*. Así como un cuerpo emite energía radiante también absorbe al mismo tiempo (Figura 2.3), si esto no ocurriera, el cuerpo en algún momento irradiaría toda su energía y su temperatura llegaría al cero absoluto. Un absorbedor perfecto se llama *cuerpo negro*, que es un objeto ideal que absorbe toda la radiación que llega a su superficie y su emisividad es igual a uno. No se conoce ningún objeto así, aunque una superficie de negro de carbono puede llegar a absorber aproximadamente un 97% de la radiación incidente.

La energía que un cuerpo absorbe proviene de sus alrededores, los cuales también emiten energía radiante. Si un cuerpo se encuentra a una temperatura T y el ambiente a una temperatura T_0 , la energía neta ganada o perdida por segundo es:

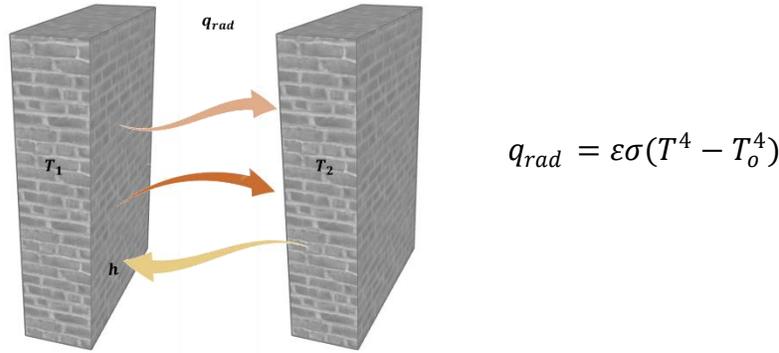


Figura 2.3 Radiación en un cuerpo homogéneo.

donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ es la constante de Stefan-Boltzmann y ε es la emisividad, sus valores varían en el rango $0 < \varepsilon < 1$, es una medida de la eficiencia con que la superficie emite energía radiante y depende del tipo de material. Cuando el cuerpo está en equilibrio con los alrededores, irradia y absorbe la misma cantidad de energía, por lo tanto, su temperatura permanece constante. (Incropera, 1999).

2.1.4. Propiedades termofísicas y conceptos básicos

Los cuerpos poseen propiedades termofísicas involucradas con la transferencia de calor, las cuales son la conductividad térmica (λ) que es la cantidad de calor que pasa a través de un material homogéneo durante un segundo en un metro de espesor y cuando la diferencia de temperatura entre sus caras es un grado kelvin.

Calor específico (C_p), es la cantidad de calor que se debe suministrar por unidad de masa para elevar la temperatura un grado Celsius, el valor varía dependiendo del material del que se trate.

Densidad (ρ), es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia. La densidad media es la relación entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa en el espacio, su valor varía dependiendo del material del que se trate.

El producto de (ρC_p) se denomina calor específico volumétrico y éste representa la capacidad de un material de almacenar energía. En el estudio de la transferencia de calor, la relación de las tres propiedades antes mencionadas se le denomina *difusividad térmica* ($\Gamma = \frac{\lambda}{\rho C_p}$) esta relación mide la capacidad de un material para conducir energía térmica en relación con su capacidad para almacenar energía térmica en unidades de m^2/s .

Calor, energía de tránsito desde un objeto con alta temperatura a un objeto con menor temperatura. Un objeto no posee calor, el término apropiado para la energía microscópica de

un objeto es energía interna. La energía interna puede aumentarse, transfiriéndole energía desde otro cuerpo con mayor energía.

Temperatura, es una medida del promedio de la energía cinética asociada con el movimiento microscópico de los átomos y las moléculas. La temperatura no es directamente proporcional a la energía interna, porque la temperatura solo mide la parte cinética de la energía interna, de modo que dos objetos que tienen la misma temperatura no tienen en general la misma energía interna, por ejemplo, el agua y el metal. Las temperaturas se miden en una de las tres escalas de temperatura estándares (Celsius, Kelvin, y Fahrenheit).

Temperatura de Bulbo Seco, es la temperatura indicada en la escala de un termómetro común.

Temperatura de Bulbo Húmedo, es la temperatura que indica el termómetro cuando a éste se le coloca una tela húmeda en el bulbo y se expone a una corriente de aire; el agua se enfriará y luego se evaporará requiriendo energía del aire cercano, por ello la temperatura del aire en contacto con la tela desciende; de esta manera se mide la temperatura del agua que se evapora.

Calor sensible, cantidad de calor que absorbe o libera un cuerpo sin que en él ocurran cambios en su estado físico (cambio de fase). Cuando a un cuerpo se le suministra calor sensible en éste aumenta la temperatura.

Calor latente, es la energía requerida por una sustancia para cambiar de fase, de sólido a líquido (calor de fusión) o de líquido a gaseoso (calor de vaporización). Durante esos procesos la temperatura no experimentará cambio alguno.

Inercia térmica, propiedad que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con que lo cede o absorbe.

Transmitancia térmica (valor U) es la medida del calor que fluye por unidad de tiempo y superficie transmitido a través de un sistema constructivo formado por una o más capas de material cuando hay un gradiente de temperatura de un 1 °C entre los dos ambientes que éste separa. Cuanto menor el valor U, menor el paso de energía entre las dos superficies y mejor la capacidad aislante.

Humedad relativa (HR), mide la cantidad de vapor de agua contenido en el aire, comparándolo con la cantidad máxima de agua que puede ser mantenida a una temperatura dada. Por ejemplo, si la humedad es del 50% a 23 °C, esto implicaría que el aire contiene 50% de vapor de agua del máximo que podría mantener a esa temperatura.

Humedad absoluta (Ha), cantidad de vapor de agua (gr) por unidad de volumen de aire ambiente (m³).

2.2. GANANCIAS DE CALOR EN LA EDIFICACIÓN

Existen edificios residenciales (casas) y no residenciales (edificios de oficinas, escuelas, centros comerciales, etc.) ambos tienen los mismos elementos constructivos: techo, muros, pisos, puertas y ventanas. De los elementos de la envolvente el techo es quien recibe mayor radiación solar debido a que se encuentra ubicado horizontalmente; los muros conforman la mayor parte de la envolvente y en ellos se encuentran las puertas y ventanas, éstas aberturas también son fuente importante de las ganancias solares de la edificación. Los pisos se pueden encontrar sobre el terreno y en pisos superiores, así un piso superior puede ser el techo de un nivel y a la vez el piso de otro nivel. En la Figura 2.4 se aprecian las ganancias solares de cada elemento constructivo, es importante conocer esta información para un mejor diseño de la edificación, de esta manera se pueden aislar las paredes o/y techo y evitar las pérdidas o ganancias excesivas de calor. (CONUEE, 2016).

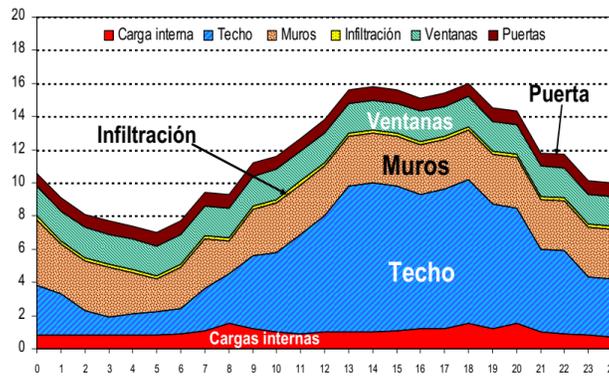


Figura 2.4 Ganancias de calor en la edificación.

La interacción de la edificación con el ambiente produce un intercambio energético que se traduce en ganancias o pérdidas de calor que están en función de la conducción, convección y radiación, se consideran ganancias cuando hay un aporte de energía al edificio y pérdida cuando la energía es liberada al ambiente. A estas ganancias de calor también se les denomina cargas térmicas que son la cantidad de energía que se remueve o adiciona a un espacio cerrado para alcanzar el confort térmico, éstas dependen de:

Geometría de la edificación: es la forma que tiene la edificación, está conformada por los muros, la cubierta y la agrupación de espacios interiores. Se podría decir que la envolvente es la parte más importante ya que está en contacto directo con el ambiente y establece el uso de sistemas de pasivos o mecánicos de enfriamiento o calentamiento.

Dimensión: determina en gran medida las ganancias de calor y el uso de aire acondicionado, pues generalmente entre mayor sea el área de los muros mayor número de ventanas, requiriendo mayor energía para acondicionar las áreas.

Orientación: determina la cantidad de radiación que recibirán los muros, por ejemplo, si la fachada que tiene mayor número de aberturas está de frente al sol, ésta recibirá mayor radiación a lo largo del día lo cual aumentará las cargas térmicas y en consecuencia la demanda de climatización. Aunque ésta es una característica importante no siempre se puede decidir la orientación de la vivienda, pues ya existe un conjunto de viviendas, calles y vialidades establecidas que impiden decidir por alguna orientación específica.

Materiales de construcción: en la fabricación de la vivienda se recomienda hacer un estudio previo para escoger los materiales de construcción más adecuados al tipo de clima de la región. A nivel mundial, la industria de la construcción es uno de los principales contribuyentes al agotamiento de los recursos naturales, tales como la contaminación del suelo, agua y aire; generación de desechos sólidos, desperdicios tóxicos y calentamiento global, es por ello que en los últimos años se ha intensificado el diseño bioclimático para llegar a tener un ambiente confortable con el mínimo impacto ambiental.

Aberturas: incluyendo puertas y ventanas, se encuentran en tercer lugar en ganancias o pérdidas de calor, una parte considerable de energía transita por estos espacios; dependiendo de la necesidad de los usuarios se puede hacer uso de persianas o vidrios especiales que evitan la entrada o pérdida de esta energía, así ayudando a minimizar los requerimientos de sistemas mecánicos de acondicionamiento.

Edificios próximos: se pueden encontrar cerca de la vivienda o colindado con alguno de los muros de ésta, pueden ser de las mismas características y dimensiones o diferentes proporcionando sombreado en muros y/o cubierta en determinadas horas del día, bloqueando el viento o disminuyendo su velocidad.

Uso del edificio y ocupantes: la principal fuente de cargas internas son los habitantes, equipo eléctrico, de cocina y de iluminación, todas estas fuentes dependen del uso del edificio y del tiempo que se use, ya que no se generan las mismas cargas térmicas en un hospital, una escuela o en hogar.

Ventilación/infiltración: la infiltración remueve o adiciona calor, dependiendo de las condiciones ambientales. La infiltración ocurre por huecos, aberturas y rendijas en puertas y ventanas. La ventilación ocurre con un sistema mecánico o con la apertura total o parcial de las aberturas.

Ubicación geográfica y tipo de clima: la ubicación geográfica determina el clima de cada región y está en función de las condiciones ambientales tales como la temperatura, la radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa, estas condiciones están determinadas por la altitud, de tal manera que la temperatura y la presión atmosférica

descienden cuando la altitud aumenta y viceversa. La temperatura local también está influenciada por la cercanía de cuerpos de agua y la precipitación.

Las cargas térmicas en el recinto se pueden clasificar en dos grupos, las que proceden de fuentes externas como la conducción a través de la envolvente la cual depende de las características térmicas de los materiales y la diferencia de temperatura interior y exterior; la radiación solar directa a través de vidrios exteriores y la radiación indirecta en superficies opacas; la ventilación-convección que puede ser intencional al abrir las puertas y ventanas o involuntaria cuando hay rejillas, el aire entra y circula por el recinto removiendo o adicionando calor y la infiltración a través de rendijas o espacios pequeños por donde se fuga el aire. El segundo grupo son las ganancias que se generan en el interior por el alumbrado, ocupantes (calor metabólico) y equipo eléctrico. También se pueden agrupar las ganancias de calor en *sensibles* y *latentes*, las ganancias sensibles ocasionan un aumento de temperatura del aire interior y las ganancias de calor latente adicionan vapor de agua aumentando la humedad en el aire. En la Figura 2.5 se pueden apreciar las ganancias y pérdidas de calor en la vivienda por factores externos e internos.

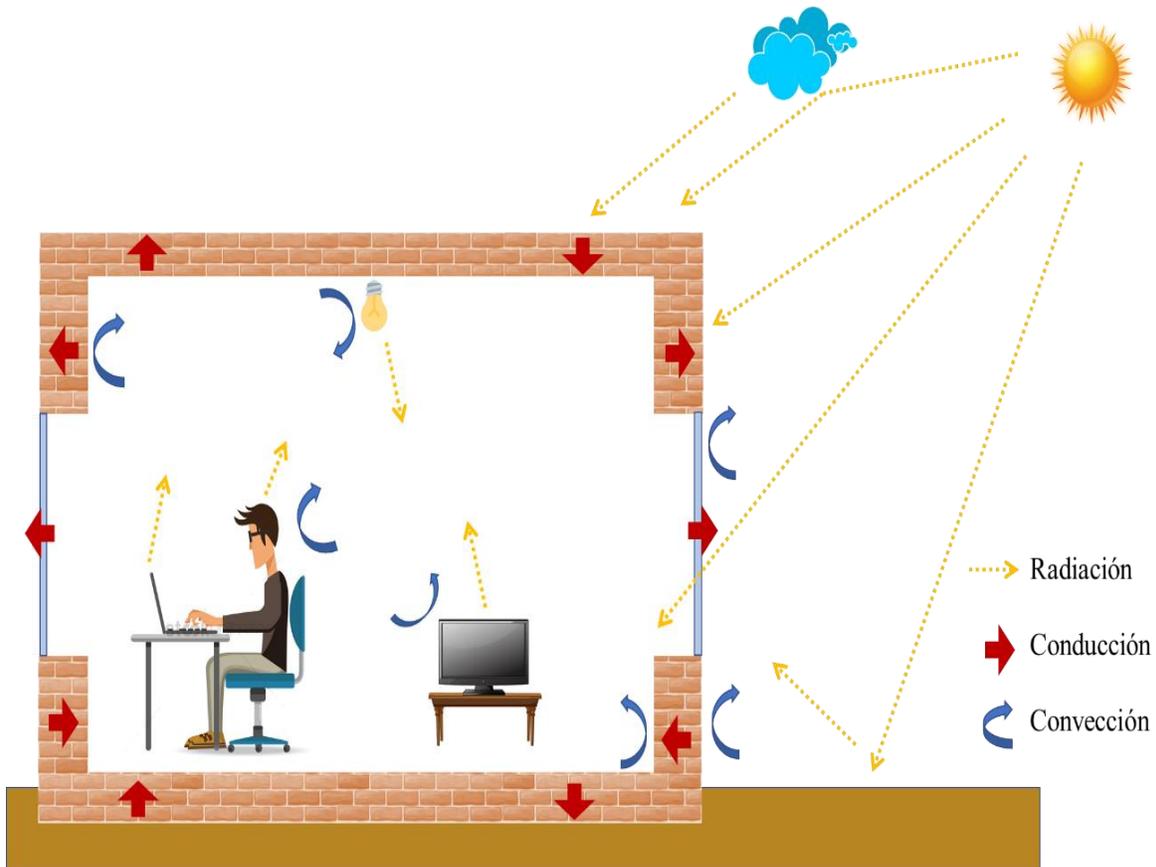


Figura 2.5 Ganancias de calor en la vivienda.

2.3. CONFORT TÉRMICO

El ser humano realiza gran variedad de actividades a lo largo del día y para llevarlas a cabo de mejor manera se busca una temperatura confortable en los espacios de trabajo, es por ello que se hace uso de sistemas de aire acondicionado para mantener el ambiente interior constante, con temperaturas uniformemente distribuidas en las zonas ocupadas. De esta forma el confort higrotérmico se determina como la situación en la cual se pueden realizar adecuadamente los intercambios de calor entre los usuarios y el ambiente interior.

El confort visual queda determinado por una adecuada distribución de la iluminación sobre el plano de trabajo y la ausencia de deslumbramientos. En el caso del confort acústico las condiciones quedan circunscritas a una protección de los ruidos no deseados tanto del ambiente exterior como interior y un acondicionamiento de los ambientes interiores para adecuar la percepción sonora en los mismos en función del uso. Para la calidad de aire interior se limita la concentración de CO₂ así como la cantidad de partículas en suspensión.

El confort térmico es una condición de la mente que expresa satisfacción con el medio ambiente, es un equilibrio térmico que posee el cuerpo humano en un momento y espacio determinado que le permite desarrollar sus actividades físicas y mentales sin dificultad y se determina de forma subjetiva en un intervalo de temperatura. De manera simplificada, la comodidad se logra cuando la persona no requiere hacer algún tipo de esfuerzo para permanecer en condiciones agradables.

El cuerpo humano busca mantener una temperatura interna agradable generalmente de 37 °C, esta temperatura depende del equilibrio térmico entre el cuerpo (metabolismo) y el ambiente, mientras que la temperatura de la piel en actividades sedentarias es típicamente de 33-34 °C. Si la temperatura corporal aumenta el cuerpo se dilata y produce sudoración para regular la temperatura, por el contrario, si la temperatura baja el cuerpo se contrae y empieza a tiritar para aumentar el calor interno.

El metabolismo, propio de la actividad, hace disipar del cuerpo humano cierta cantidad de calor (de 65 W en reposo a 520 W para actividades intensas), y de igual manera, el metabolismo y la actividad, extrae del organismo humano agua en forma de vapor que se incorpora al medio ambiente.

La sensación de comodidad varía en cada persona, es un estado mental relacionado con un balance térmico del cuerpo, éste varía en cada época del año (invierno y verano), tipo de ropa, temperatura del aire, temperatura radiante, la humedad relativa y la velocidad del aire. (Luo et al., 2018). Sin embargo, estudios previos han demostrado que no hay una diferencia significativa en la percepción de temperatura de confort entre personas jóvenes y adultos mayores, hombres y mujeres, inclusive personas con capacidades diferentes reportaron las mismas temperaturas de confort. (Wang et al. 2018).

La temperatura que siente una persona está influenciada por la temperatura del aire y la de los objetos que estén a su alrededor, la humedad relativa afecta poco al confort excepto en condiciones con elevada humedad, pero en las edificaciones con sistemas de climatización tiene poca importancia y la velocidad del aire influye en la transmisión de calor por convección. Los mecanismos de termorregulación del cuerpo le permiten adaptarse a climas variados, pero la sensación de confort se da en condiciones específicas, es por ello que se busca controlar éstas condiciones en el interior de las edificaciones, generalmente la temperatura de confort se encuentra entre 25-26 °C para personas sedentarias y en 21 °C para personas que se encuentran ejercitándose. (Luo et al. 2018). El balance energético que se produce en el cuerpo es el siguiente:

$$M \pm Cd \pm Cv \pm R - E = 0 \quad (2.1)$$

Donde M es la producción de calor metabólico, Cd es el calor por conducción, Cv es el calor convectivo, R es el calor radiativo que recibe o libera el cuerpo y E es el calor por evaporación que se pierde. La producción de calor metabólico varía de 70 W en estado de sueño hasta 700 W en actividades de trabajo pesado y deportivas. (Szokolay, 1984).

Para mantener el confort térmico en la edificación existen dos maneras de lograrlo, de forma pasiva, donde el método se centra en el edificio en sí, en su forma, posición y su estructura y de forma activa, donde se utilizan mecanismo que utilizan algún tipo de energía. Por lo general se recomienda que el control de la temperatura se realizarse por medios pasivos en la medida de lo posible, y los medios activos se empleen solo momentos específicos donde el método pasivo sea insuficiente.

Existen varios modelos para determinar la temperatura de confort del recinto, entre ellos se encuentra el modelo de *Fanger*, PMV^3 o estático, desarrollado por Povl Ole Fanger, quien realizó estudios empíricos y desarrolló un modelo basado en el confort térmico del cuerpo humano cuando éste es sometido a diferentes condiciones climáticas dentro de una cámara térmica, aplicando encuestas a 1296 personas que especificaron el nivel de confort que presentaban en una escala psicofísica, cuando eran expuestos a ciertas condiciones físicas, ambientales y tipo de vestimenta. Relacionó las ecuaciones de confort con el índice PMV y obtuvo el siguiente modelo para obtener la temperatura de confort:

$$PMV = aT + bP_v - c \quad (2.2)$$

³ Predicted Mean Vote

Donde T ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura ambiente, P_v (kPa) es la presión de vapor de agua del ambiente y los valores de los coeficientes a , b y c se encuentran especificados en la Tabla 2.1. (Orosa, 2009).

Tabla 2.1 Valores de los coeficientes a , b y c en función del tiempo para cada sexo del individuo

Tiempo (h)	Sexo*	a	b	c
1	Hombre	0.220	0.233	6.673
	Mujer	0.272	0.248	7.245
	Ambos	0.245	0.245	6.475
2	Hombre	0.221	0.27	6.024
	Mujer	0.283	0.21	7.694
	Ambos	0.252	0.24	6.859
3	Hombre	0.212	0.293	5.949
	Mujer	0.275	0.255	8.62
	Ambos	0.243	0.278	8.802

*Para una actividad metabólica sedentaria, con 0.6 clo.

Otro de los modelos de confort es el *adaptativo* propuesto por Nicol que expresa la interacción de la persona con el ambiente que lo rodea incluyendo la temperatura, humedad, movimiento del aire, vestimenta y actividad que se realice. Desarrolló un modelo que predice la temperatura de confort en el interior de la edificación en función de la temperatura exterior aplicando encuestas a los individuos, los cuales fueron expuestos a diferentes condiciones ambientales para desarrollar un índice de confort térmico de acuerdo con la escala ASHRAE.

Este modelo es dinámico ya que permite a los usuarios abrir una ventana, usar un abanico, bajar las persianas, usar ventilación, ponerse o quitarse ropa, etc. para restaurar la comodidad térmica del aire cuando ésta se ve afectada por elementos externos, las personas que tengan más capacidad para adaptarse a estos cambios son los que menos estrés térmico experimentarían, es por ello que a este enfoque se le nombró adaptativo por la capacidad de adaptación de los individuos. (Nicol y Humphreys, 2002)

La temperatura óptima o de confort para el interior de edificaciones se obtiene a través de un análisis de regresión lineal que correlaciona la temperatura exterior del sitio y las respuestas que dieron los individuos al realizar encuestas, se determina de la siguiente manera:

$$T_n = 0.534(T_{amb,ext}) + 12.9 \quad (2.3)$$

Donde T_n es la temperatura neutra o de confort y $T_{amb,ext}$ es la temperatura promedio mensual del ambiente exterior. Así mismo la temperatura de la zona de confort (Z_c) o intervalo de confort se obtiene sumando o restando 2°C a la temperatura neutra como se muestra: $Z_c = T_n \pm 2^{\circ}\text{C}$.

2.4. CARACTERÍSTICAS DE UN TECHO VERDE

El uso de techos verdes en edificaciones residenciales y no residenciales trae consigo beneficios como la mejora en la calidad del aire produciendo un microclima en el ambiente, retienen el agua de lluvia y mitigan la escorrentía ayudando que el agua fluya más lentamente evitando algunas inundaciones, aumentan el valor estético y económico de la edificación, funcionan como aislamiento acústico entre otros:

Aislamiento térmico: los techos son la parte de la envolvente del edificio que recibe la mayor parte de radiación siendo la principal fuente de calor hacia el interior del edificio, es por ello que la vegetación funciona como barrera, las hojas absorben hasta 98% en longitudes de onda visible y en el infrarrojo lejano. Es un sistema de sombreado que capta la radiación solar y evita el calentamiento del techo manteniéndolo a una temperatura más baja. (Ouldboukhitine et al, 2011).

Reducción del efecto UHI: reducen la temperatura en el ambiente cercano al techo verde, percibiéndose el efecto a nivel peatonal (1-2 m sobre el suelo) haciendo una comparativa con los techos convencionales. (Francis y Jensen, 2017).

Reducción de la contaminación del aire urbano: eliminación de la contaminación a nivel del techo, expresada como eliminación anual en gr/m de techo verde, en comparación con un techo convencional. El enfriamiento por techos verdes aumenta el flujo de aire a nivel peatonal y aumenta la dispersión de la contaminación, disminuyendo la concentración de contaminantes de un sitio. (Francis y Jensen, 2017).

Reducción del consumo de energía en la construcción: debido al efecto de sombreado del techo verde, la temperatura interior de la edificación disminuye y se mantiene más estable que con un techo tradicional, esto disminuye el uso de sistemas de aire acondicionado expresándose el ahorro de energía como un porcentaje anual o estacional.

Barrera acústica: el techo verde disminuye el ruido impidiendo que entre a la edificación, el sustrato bloquea los sonidos de baja frecuencia y la vegetación bloquea los de alta frecuencia. (Alexandri y Jones, 2007).

Los techos verdes están formados por una serie de capas y sus diseños varían ampliamente, por ello, los componentes mínimos que se deben incluir en el diseño y construcción se ilustran en la Figura 2.6, para así mantener la edificación seca, libre de humedad y de la acción destructiva que pueden ocasionar las raíces de las plantas, generalmente tienen cuatro capas base de construcción, iniciando de abajo hacia arriba se tiene:

Capa de protección (impermeabilizante o antiraíz), directamente sobre la construcción del techo para protegerlo de la humedad.

Capa de drenaje, puede incluir pequeños reservorios y huecos de retención de humedad se encuentra sobre la capa de protección para permitir que el exceso de humedad fluya fuera de la construcción del techo verde, hacia bajantes o hacia algún tipo de almacenamiento.

Capa de cultivo (sustrato), se encuentra por encima de la capa de drenaje, generalmente separada por una tela de malla densa. El sustrato está formado de tres partes, una sólida que contiene sustancias químicas y orgánicas, una líquida que incluye el agua y una parte gaseosa compuesta de aire y vapor de agua que ocupan los espacios entre las partículas del suelo.

Capa de vegetación, ésta varía por su tamaño (pequeña, mediana y grande), la especie de la planta y generalmente esta se selecciona por su resistencia a la sequía. (Sailor, 2008).

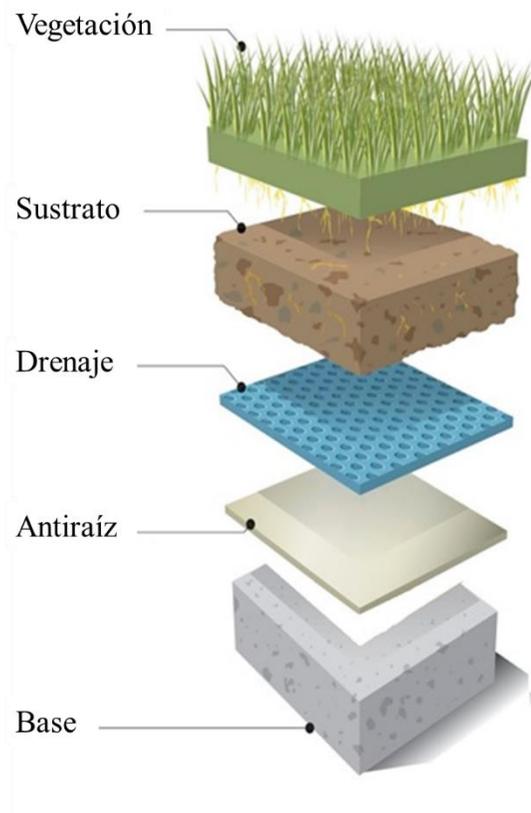


Figura 2.6 Estructura de un techo verde.

Los techos verdes se clasifican en tres categorías que se diferencian por el mantenimiento que requieren, si son o no transitables, la diversidad de vegetación, la profundidad del sustrato y el peso que aportan como sobrecarga a la estructura de techo.

Intensivo: En este tipo de cubiertas puede ser usado desde pasto y pequeños arbustos, hasta arboles de pequeño y mediano tamaño ya que la profundidad del sustrato es mayor de 15

centímetros, suelen ser cubiertas transitables, por lo tanto, su mantenimiento es muy periódica y el peso que aportan cuando están completamente saturados de agua es mayor a los 250 kilogramos por metro cuadrado.

Extensivo: Son cubiertas donde se priorizan una baja carga a la estructura, en lo ideal menor a 150 kilogramos por metro cuadrado con un sustrato que no supera los 15 centímetros de profundidad y escaso mantenimiento. No son transitables y tienen una diversidad vegetal restringida en general a pequeños arbustos y especies del tipo sedum, que se comportan bien en condiciones de sequía y poco cuidado.

Semi-intensivo: Son un punto medio entre las cubiertas extensivas y las intensivas. Pueden ser o no transitables según las especificaciones del diseño y las características estructurales del edificio. Tienen restricciones en la vegetación y el mantenimiento es variables según el diseño. (Gagliano *et al.*, 2015).

Las características de la vegetación que son más importantes desde el punto de vista del impacto de la transferencia de calor a través del techo son la altura, índice de área foliar (LAI), cobertura fraccional (σ_f), reflectividad y resistencia estomática. (Sailor, 2008).

El *índice de área foliar* es la cantidad adimensional que representa el área de las hojas (sólo por la superficie superior de las hojas) por unidad de suelo debajo de la vegetación. Si el área promedio del sustrato está debajo de dos hojas, el LAI correspondiente es 2. Los valores de LAI para techos verdes varían dependiendo del tipo de planta, pero típicamente están en el rango de 0.5-5, donde 0.5 representa una vegetación escasa y 5 una vegetación densa que cubre toda el área de suelo.

El *índice de cobertura fraccional* (σ_f) es la relación entre la superficie del suelo sombreada por las hojas y el área total de la superficie del suelo, su valor típicamente va de 0-1.

La *resistencia estomática* es un parámetro biofísico que gobierna la velocidad a la que la planta puede transpirar la humedad a través de sus estomas para una condición ambiental dada, las aberturas intercelulares se encuentran entre las células epidérmicas en las superficies de las hojas, estas aberturas presentan resistencia a la difusión de vapor de agua a la atmósfera y a este proceso se denomina resistencia estomática. Depende de factores como la intensidad de la luz, el contenido de humedad del suelo y la diferencia de presión de vapor entre el interior de la hoja y el aire ambiente.

Transpiración, es la evaporación de agua desde un tejido vivo hacia el exterior, ocurre cuando la vegetación que está expuesta al aire. La mayor parte del agua perdida, alrededor del 90% ocurre por los estomas los cuales son controlados por la planta; estos se abren y se cierran a lo largo del día. El número de estomas varía según la planta y las condiciones

ambientales, generalmente oscilando de 50 a 500 estomas por mm^2 . Durante el día la transpiración disminuye por el aumento de la resistencia estomática y durante la noche el fenómeno es inverso.

Evaporación, es el paso lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso, tras haber adquirido suficiente energía para vencer la tensión superficial, se puede producir a cualquier temperatura.

CAPÍTULO 3. GENERALIDADES DEL SOFTWARE

El estudio del comportamiento térmico de una edificación es algo complejo, ya que involucra cálculos de radiación solar, transferencia de calor a través de la envolvente, cargas térmicas internas generadas, por ocupantes, equipo eléctrico, etc. Es por ello, que se hace uso de programas de cómputo que integran todos estos elementos en un mismo sistema y facilitan el estudio de térmico-energético de las edificaciones. En este capítulo se describe el software y la metodología con que se llevará a cabo este trabajo de investigación, así como las expresiones matemáticas que permiten representar el fenómeno físico del comportamiento térmico de la edificación al incorporar un techo verde a la misma. Finalmente, se presentan dos ejercicios comparativos mediante BESTEST para corroborar el uso adecuado del software de simulación.

3.1. SOFTWARE DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA EN EDIFICACIONES

Para el diseño y análisis térmico de edificaciones existen varias opciones, algunos de los diferentes software son: BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics), DOE-2 (desarrollado por el Department of Energy de EUA), Solene, TRNSYS, Phoenics, EnergyPlus (EP) y DesignBuilder (DB). Las ventajas que tiene el uso de estos softwares es la representación detallada del fenómeno estudiado, obteniendo resultados aproximados en un tiempo considerablemente corto en comparación con estudios experimentales. Otras de las ventajas son los paquetes de características constructivas que incluye el programa, los cambios que se pueden realizar a la geometría y el tiempo para ejecutar la simulación.

EP surge de la combinación de BLAST y DOE-2 creados en la década de los 70' por la necesidad de analizar energéticamente edificaciones ya que son parte importante del consumo energético total de la población. En sus inicios EP solo consideraba aspectos térmicos de la edificación, en las versiones posteriores se integró el consumo de agua, techos verdes, cálculos de la contaminación atmosférica (CO₂, CO), ganancias internas por el uso de equipo eléctrico, iluminación, actividades del usuario, etc.

Es un programa libre para simulaciones de transferencia de calor y masa dependientes del tiempo, esto permite considerar la capacidad de la envolvente para aislar y almacenar la energía en su interior, relacionando la conductividad térmica, la densidad y el calor específico del material; tomado en cuenta las características constructivas de la envolvente, el equipo eléctrico, sistemas HVAC, luminarias, efectos radiativos y convectivos, la ocupación por personas y el horario de operación de cada equipo.

La interfaz de EP no es amigable con el usuario, por ello se buscan programas que funcionen como interfaz gráfica ya que EP fue creado para trabajar como motor de cálculo de otros softwares. En este proyecto se seleccionó DB como interfaz de EP.

3.2. TÉCNICAS DE CÁLCULO PARA LA SIMULACIÓN TÉRMICA DE EDIFICACIONES

La metodología para simular el comportamiento térmico de edificaciones consta de tres pasos: primero se calculan las cargas térmicas que la edificación gana o pierde por conducción, convección y radiación. Después se calcula la temperatura promedio de cada zona y finalmente se calculan las cargas térmicas de calentamiento o enfriamiento necesarias para mantener una zona de confort, con base en un intervalo de temperaturas determinado.

Existen diferentes métodos para determinar las cargas térmicas de un edificio, estos pueden ser en estado estable o en estado transitorio. En el primer método, las cargas se estiman mediante la diferencia de la temperatura externa del aire y la interna del edificio, sin tomar en cuenta el efecto de los materiales de construcción de almacenar energía. Estudiar el

comportamiento térmico de una edificación en estado permanente no es adecuado, pues tanto el edificio como el ambiente exterior están en constante cambio a lo largo del día. Por ello se analiza la transferencia de calor en la envolvente en estado transitorio por medio de dos metodologías: los métodos numéricos y el método de Funciones de *Transferencia de Conducción* (CTF). La ventaja que tienen estos últimos es que son fáciles de validar y conllevan un mínimo esfuerzo computacional, por ello se han vuelto populares en los programas de cómputo para el cálculo de cargas térmicas. (Seem, 1987). El método en función de la respuesta determina la respuesta que tiene un sistema a un conjunto de excitaciones, sin considerar la interacción de los componentes entre sí, solo la respuesta del sistema en su conjunto.

EnergyPlus para determinar los flujos de calor en superficies con masa térmica, implementa el método de Función de Transferencia que permite determinar la conducción de calor en 1D y estado transitorio, resolviendo el modelo matemático con la teoría de Laplace y la transformada-z. El enfoque general relaciona el flujo de calor en una superficie de un elemento de construcción con una serie infinita de temperatura en ambas superficies de frontera, la serie infinita es aproximada por una serie finita. Por lo tanto, las Funciones de Transferencia son series en el tiempo, con las cuales se determina la temperatura y flujo de calor de superficies internas y externas de una pared a partir de valores actuales y anteriores de esas variables.

3.3. ECUACIONES GENERALES DE ENERGYPLUS

El comportamiento térmico de una edificación depende de varios factores como las condiciones climáticas, materiales de construcción, uso del edificio, entre otras. Energy Plus realiza el cálculo de la temperatura, cargas térmicas de acondicionamiento de aire y el flujo de calor de la edificación con base en el método de Funciones de Transferencia por Conducción, en seguida se muestran las ecuaciones que representan las ganancias y pérdidas de calor en la edificación. (Engineering Reference, 2017).

3.3.1. Ganancias solares

La radiación solar representa el intercambio de energía más importante sobre una construcción; la radiación total que incide en una superficie (I_T) involucra la radiación total directa (I_{bT}), la difusa (I_{dT}) y la reflejada (I_{gT}) por otras superficies. Por lo general los datos climáticos que se obtienen de las estaciones meteorológicas solo aportan información de la radiación global por lo que EnergyPlus utiliza correlaciones desarrolladas por Perez R. (1990); Reindl (1990); Hay J. (1980) y Duffie (1974) para calcular estos componentes de la radiación. Así, la radiación total incidente sobre una superficie exterior está dada por:

$$I_T = I_{bT} + I_{dT} + I_{gT} \quad (3.1)$$

3.3.2. Comportamiento térmico en muros

Las superficies exteriores de la edificación están en contacto con el ambiente exterior con el cual intercambian energía, en la Figura 3.1 se muestra el comportamiento térmico de las superficies:

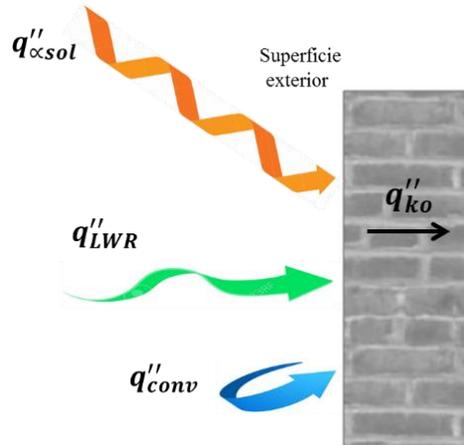


Figura 3.1 Flujo de calor en la superficie exterior.

El balance energético que lo representa es:

$$q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (3.2)$$

siendo $q''_{\alpha sol}$ la radiación solar, incluyendo la radiación directa, reflejada y difusa, este flujo está influenciado por la ubicación, el ángulo y la inclinación del muro, las propiedades del material de la superficie, las condiciones climáticas, etc. q''_{LWR} representa la radiación de onda larga (térmica) del ambiente, esto es, el intercambio de radiación entre la superficie, el cielo y el suelo. q''_{conv} es el intercambio convectivo con el aire exterior y q''_{ko} es el flujo de calor por conducción dentro de la pared. Todos los términos son positivos para el flujo neto a la cara, excepto el término de conducción, que tradicionalmente se considera positivo en la dirección desde el exterior hacia el interior del muro.

Por otro lado, el comportamiento térmico al interior de la edificación involucra las caras internas de las superficies de la zona. Este equilibrio térmico generalmente se modela con cuatro componentes de transferencia de calor acoplados: 1) conducción a través del elemento de construcción, 2) convección al aire, 3) absorción de radiación de onda corta y reflectancia y 4) intercambio radiante de onda larga. La radiación de onda corta incidente proviene de la radiación solar que ingresa a la zona a través de las ventanas y la emisión de fuentes internas, como las luces. El intercambio de radiación de onda larga incluye la absorción y emisión de fuentes de radiación de baja temperatura, como todas las superficies internas, equipos y personas. En la Figura 3.2 se muestra de forma gráfica el intercambio energético y en la Ecuación 3.3 se muestra el balance de energía.

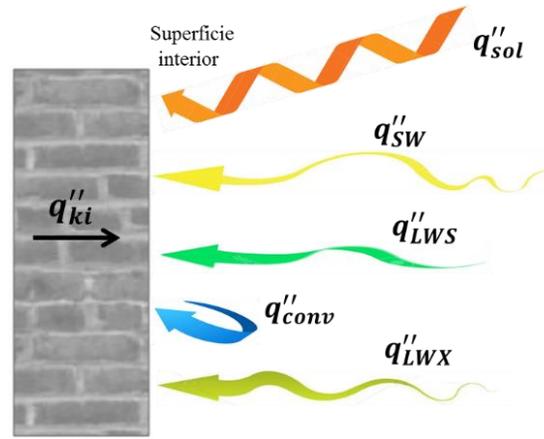


Figura 3.2 Flujo de calor en la superficie interior.

$$q''_{sol} + q''_{sw} + q''_{LWS} + q''_{conv} + q''_{LWX} + q''_{ki} = 0 \quad (3.3)$$

donde q''_{sol} es la radiación solar absorbida en la superficie, q''_{sw} es la radiación de onda corta proveniente de las luces artificiales, q''_{LWS} representa la radiación proveniente de equipos eléctricos, q''_{conv} es el flujo de calor convectivo en el nodo de aire, q''_{LWX} es el flujo de calor intercambiado entre las superficies de la zona y q''_{ki} es el flujo de calor por conducción a través de la pared.

La formulación del balance de calor en EnergyPlus trata al aire como si fuera completamente transparente, esto significa que no participa en el intercambio de radiación de onda larga entre las superficies de la zona. El modelo que considera que el aire de la habitación es completamente transparente, es razonable desde el punto de vista físico debido a las bajas concentraciones de vapor de agua y las cortas distancias medias.

EnergyPlus utiliza un modelo de intercambio “gris” para la radiación de onda larga entre las superficies de la zona. Este modelo se basa en el concepto "ScriptF" desarrollado por Hottel (1967), este procedimiento se basa en que todas las reflexiones, absorciones y emisiones de otras superficies se incluyen en el coeficiente de intercambio que se llama ScriptF. Las principales suposiciones son que todas las propiedades de radiación de la superficie son de color gris y que toda la radiación es difusa.

Una vez que se determinan los coeficientes de ScriptF, el intercambio radiativo de onda larga se calcula para cada superficie usando la siguiente expresión:

$$q_{i,j} = A_i F_{i,j} (T_i^4 - T_j^4) \quad (3.4)$$

donde A_i es el área de las superficies, $F_{i,j}$ es el factor de vista entre las superficies i y j , mientras que T_i y T_j representan la temperatura de las superficies.

3.3.3. Temperatura del aire en la zona térmica

Cada espacio térmico de la edificación se considera un nodo de aire, por lo tanto, este espacio representa la capacidad térmica del volumen de aire. En el análisis del comportamiento térmico de la edificación, uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta es la temperatura del nodo de aire, de ésta depende el funcionamiento de la construcción y los equipos de acondicionamiento de aire. Para determinar la temperatura de la zona se formulan balances de energía y humedad y se resuelven las ecuaciones diferenciales ordinarias resultantes por medio de un enfoque predictor–corrector. El balance de calor en la zona de aire se muestra en la Figura 3.3 y su balance en la Ecuación 3.5.

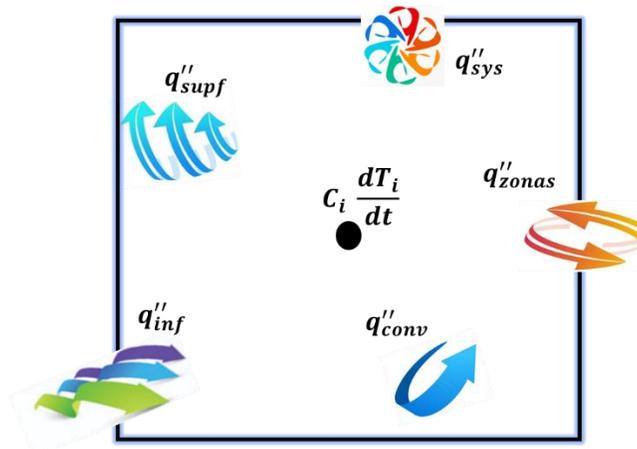


Figura 3.3 Balance de calor por convección del aire en la zona.

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = q''_{conv} + q''_{supf} + q''_{zonas} + q''_{inf} + q''_{sys} \quad (3.5)$$

donde C_i es la capacitancia térmica de la zona⁴ y $\frac{dT_i}{dt}$ es la variación de la temperatura del aire en la zona respecto al tiempo, este término representa la energía almacenada en la zona (nodo de aire).

donde q''_{conv} representa las cargas internas convectivas producidas por los equipos eléctricos, personas, etc. y se determina como:

⁴ $C_i = v_i \rho_a C_p$, $v_i = \text{volumen de la zona}$

$$\sum_{i=1}^{n_{conv}} \dot{Q}_i = h_i A_i (T_{equipos} - T_i) \quad (3.6)$$

donde h_i es el coeficiente convectivo, A_i el área de la superficie correspondiente, $T_{equipos}$ y T_i las temperaturas de los equipos y del aire.

La transferencia de calor por convección desde las superficies de la zona (q''_{supf}) se calculan como:

$$\sum_{i=1}^{n_{supf}} h_i A_i (T_{si} - T_i) \quad (3.7)$$

donde A_i , T_{si} y T_i son el área de la superficie, las temperaturas de la superficie y del aire de la zona.

Una edificación generalmente se divide en varios espacios los cuales están en contacto, ya sea por puertas, ventanas o huecos entre los espacios por los cuales se transfiere energía entre ellos; la transferencia de calor debido a la mezcla de aire entre zonas (q''_{zonas}) se determina como sigue:

$$\sum_{i=1}^{n_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_i) \quad (3.8)$$

donde \dot{m}_i y C_p son el flujo másico y calor específico del aire, T_{zi} y T_i son las temperaturas del aire de las dos zonas correspondientes.

Las ganancias por infiltración provenientes del aire exterior (q''_{inf}) se calculan como:

$$q''_{inf} = \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_i) \quad (3.9)$$

donde \dot{m}_{inf} y C_p es el flujo másico y calor específico del aire, T_{∞} y T_i son la temperatura del aire exterior e interior.

Los sistemas de aire proporcionan aire frío o caliente a las zonas para cumplir con las cargas de calefacción o refrigeración; la energía del sistema suministrada a la zona se puede formular a partir de la diferencia de entalpías del aire de suministro (T_{sumin}) y del aire de la zona como en la ecuación:

$$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{sumin} - T_i) \quad (3.10)$$

donde \dot{m}_{sys} y C_p son el flujo másico y calor específico de sistema de acondicionamiento de aire. Desarrollando los términos de la Ecuación 3.5 se tiene:

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{i=1}^{n_{conv}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{n_{supf}} h_i A_i (T_{si} - T_i) + \sum_{i=1}^{n_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_i) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_i) + \dot{Q}_{sys} \quad (3.11)$$

En simulaciones de tiempo prolongado la integración numérica puede acumular errores de truncamiento debido a muchos pasos de tiempo, en este caso la naturaleza cíclica de las simulaciones de energía en edificaciones provoca que los errores de truncamiento se cancelen en cada ciclo, de modo que no se produce una acumulación de errores incluso durante muchos días de simulación. La fórmula de Euler se empleó en la Ecuación 3.11 para reemplazar el término derivado. Todos los términos que contenían la temperatura media (T_i) del aire de la zona se agruparon en el lado izquierdo de la ecuación. Dado que los términos restantes no se conocen en el momento actual, se retrasan un paso de tiempo y se recopilan en el lado derecho; esta manipulación permite actualizar la temperatura media del aire de la zona como se muestra en seguida:

$$C_i \frac{T_i^t - T_i^{t-\delta t}}{dt} + T_i^t \left(\sum_{i=1}^{n_{supf}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{n_{zonas}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p \right) = \sum_{i=1}^{n_{conv}} \dot{Q}_i^t + \dot{m}_{sys} C_p T_{sumin}^t + \left(\sum_{i=1}^{n_{supf}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{n_{zonas}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} \right)^{t-\delta t} \quad (3.12)$$

Reordenando la ecuación se obtiene el balance de energía que incluye los efectos de la capacitancia de la zona al dividir ambos lados por el coeficiente de T_i :

$$\begin{aligned}
 T_i^t = & \sum_{i=1}^{n_{conv}} \dot{Q}_i^t + \dot{m}_{sys} C_p T_{sumin}^t \left(C_i \frac{T_i}{\delta t} \right. \\
 & + \left. \sum_{i=1}^{n_{supf}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{n_{zonas}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} \right)^{t-\delta t} / \frac{C_i}{\delta t} \quad (3.13) \\
 & + \left(\sum_{i=1}^{n_{supf}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{n_{zonas}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p \right)
 \end{aligned}$$

La ecuación anterior se puede usar para estimar las temperaturas del aire de la zona, y se define con el Método de Euler. Para mejorar el paso de tiempo en las simulaciones se desarrollaron expresiones de orden superior para la primera derivada, con los correspondientes errores de truncamiento de orden superior. El objetivo de este enfoque era permitir el uso de pasos de tiempo más grandes en la simulación, de lo que sería posible utilizando la forma de Euler de primer orden. La aproximación de diferencias finitas de tercer orden fue propuesta por Taylor (1990) como el orden de aproximación con mejores resultados. La aproximación utilizada está dada por:

$$\left. \frac{dT_i}{dt} \right|_t \approx (\delta t)^{-1} \left(\frac{11}{6} T_i^t - 3T_i^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_i^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_i^{t-3\delta t} \right) + O(\delta t^3) \quad (3.14)$$

Sustituyendo la ecuación (3.10) y (3.5) con términos desarrollados en la ecuación (3.9) se tiene:

$$\begin{aligned}
 & C_i (\delta t)^{-1} \left(\frac{11}{6} T_i^t - 3T_i^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_i^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_i^{t-3\delta t} \right) \\
 & = \sum_{i=1}^{n_{conv}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{n_{supf}} h_i A_i (T_{si} - T_i) + \sum_{i=1}^{n_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_i) \quad (3.15) \\
 & + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_i) + \dot{m}_{sys} C_p (T_{sumin} - T_i)
 \end{aligned}$$

y la temperatura de la zona para el de tiempo t está dada por:

$$\begin{aligned}
 T_i^t = & \left[\sum_{i=1}^{n_{conv}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{n_{supf}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{n_{zonas}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} \right. \\
 & + \dot{m}_{sys} C_p T_{sumin} \\
 & \left. - \left(\frac{C_i}{\delta t} \right) \left(-3T_i^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_i^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_i^{t-3\delta t} \right) \right] \\
 & / \left[\left(\frac{11}{6} \right) \frac{C_i}{\delta t} \right. \\
 & \left. + \sum_{i=1}^{n_{supf}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{n_{zonas}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p \right]
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

3.3.4. Cargas térmicas para la condición de confort

En las edificaciones se busca mantener un ambiente térmico agradable para ellos se hace uso de equipos que aportan o retiran cargas térmicas para mantener la temperatura de confort; el funcionamiento de los sistemas de acondicionamiento térmico está en función de la temperatura del aire interior como se muestra en la Figura 3.3.

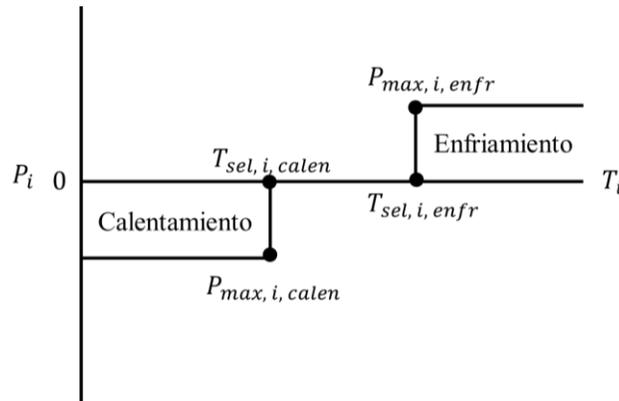


Figura 3.4 Funcionamiento de equipos de climatización en función de la temperatura.

donde P_i es la potencia de salida de la zona i (negativo para el enfriamiento y positivo para el calentamiento). $T_{max,i}$ es el valor absoluto de la potencia máxima para la zona i y $T_{sel,i}$ son los valores del set point especificados para calentar o enfriar la zona. Si el sistema de aire acondicionado no cuenta con la suficiente capacidad para mantener la temperatura deseada, entonces el sistema proporcionará su salida máxima $P_{max,i}$ y la temperatura del aire estará

variando fuera de los límites de la temperatura de confort. Posteriormente, EnergyPlus realiza el cálculo de la potencia del sistema de acondicionamiento por medio de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_i = \sum_{i=1}^{n_{supf}} h_{c,i} A_i (T_{s,i} - T_i) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{a,e} - T_i) + \sum_{i=1}^{n_{vent}} \dot{m}_{vent} C_p (T_{vent} - T_i) + \sum_{i=1}^{n_{fc}} \dot{Q}_{f,c,i} \quad (3.17)$$

siendo T_i la temperatura de confort seleccionada para enfriamiento o calefacción de la zona i . Si la temperatura del aire interior se mantiene dentro de la temperatura de confort no se utiliza el sistema de acondicionamiento de aire, si es lo contrario se utiliza la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_{inf} \eta (T_{sup} - T_{sel,i}) \quad (3.18)$$

siendo η la fracción del paso de tiempo en la que el sistema de acondicionamiento de aire se enciende, varía entre 0 y 1. T_{sup} es la temperatura a la que es suministrado el aire acondicionado a la zona. La expresión anterior determina las cargas de calentamiento o enfriamiento proporcionadas por el sistema de aire acondicionado con relación a la temperatura del aire de la zona deseada.

3.4. EL TECHO VERDE EN ENERGYPLUS

EnergyPlus cuenta con una plantilla para cubiertas verdes que incluye características físicas de la vegetación como la altura de la misma, resistencia estomática mínima y el LAI, propiedades térmicas como la reflectividad y la emisividad de las hojas y condiciones de humedad del suelo (incluyendo riego y precipitación). La capa de sustrato, de drenaje y las membranas de protección no se toman en cuenta dentro del módulo de techo verde por lo que se tienen que agregar como otras capas del techo, ingresándose de la misma manera las propiedades termofísicas de cada una de ellas.

El modelo unidimensional de suelo llamado Fast Allseason Soil Strength (*FASST*) fue desarrollado por Frankenstein y Koenig como parte del programa de investigación Army's Battlespace Terrain Reasoning and Awareness (*BTRA*) del ejército de EU. Inicialmente *FASST* fue desarrollado para determinar la capacidad del suelo de soportar vehículos tripulados y no tripulados y el movimiento del personal; posteriormente se hicieron pequeñas modificaciones para adaptarlo a capas de suelo delgadas. Este modelo unidimensional realiza

un balance de energía; calcula el contenido de humedad, la resistencia, el contenido de nieve y la temperatura del suelo en todas las interfaces (tierra-aire, tierra-vegetación; vegetación-aire) usando datos meteorológicos y de terreno, como mínimo, se requiere la temperatura del aire. La convención de signos utilizada supone que todos los flujos de calor son positivos cuando la energía se absorbe en la capa. La vegetación que incorpora el modelo son pastos, arbustos, tundra y vegetación desértica. (Frankenstein y Koenig 2004).

3.4.1. Modelo físico y matemático del techo verde

Al igual que un techo tradicional, el balance de energía de un techo verde es dominado por la radiación solar, la cual se equilibra con un flujo de calor sensible (convección) y latente (evaporación) del suelo y la vegetación y la conducción de calor hacia el sustrato.

Modelo físico

En el balance de energía para un techo verde se considera el flujo de calor latente (L), el flujo de calor sensible (H), la radiación de onda corta (I_s^\downarrow) proveniente del sol, la radiación de onda larga (I_{ir}^\downarrow) proveniente de la atmosfera y objetos cercanos, el intercambio radiativo de onda larga (LW) dentro de la vegetación (esto es, los múltiples reflexiones de las hojas al sustrato y atmósfera, y del sustrato a las hojas y atmósfera) y la conducción de calor hacia el suelo. En la Figura 3.4 se aprecia el balance de energía de un techo verde.

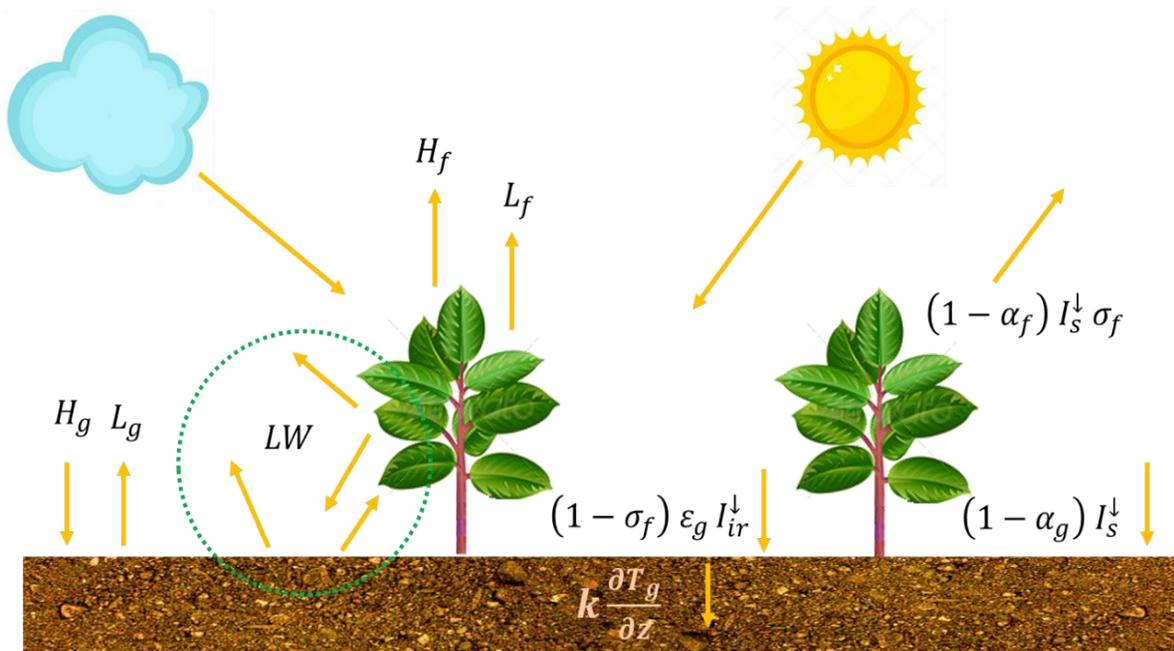


Figura 3.5 Balance de energía para un techo verde.

Modelo matemático

Interface vegetación–atmósfera

El modelo de techo verde representa el intercambio de radiación de onda larga (I_{lr}^\downarrow) y onda corta (I_s^\downarrow) dentro de la vegetación, los flujos de onda corta (ε_f) y larga (α_f) que emiten las hojas los cuales están relacionados con el índice de cobertura de la vegetación (σ_f) y los efectos de convección (H_f) y evaporación (L_f) de las hojas.

$$F_f = \sigma_f [I_s^\downarrow (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{lr}^\downarrow - \varepsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad (3.19)$$

El primer término $\sigma_f I_s^\downarrow (1 - \alpha_f)$ representa la radiación de onda corta total (tomada de la base de datos) absorbida en la vegetación. Una parte de esta radiación es reflejada a los alrededores ($\sigma_f I_s^\downarrow \alpha_f$) y otra transmitida al sustrato ($I_s^\downarrow (1 - \sigma_f)$). El flujo de onda larga procedente de la atmósfera que absorbe la vegetación se da como $\sigma_f \varepsilon_f I_{lr}^\downarrow$ y la que emitida es $\sigma_f \varepsilon_f \sigma T_f^4$, donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann y T_f la temperatura de la vegetación. El término $\frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1}$ representa el intercambio radiativo entre la vegetación y el sustrato, donde $\varepsilon_1 = \varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \varepsilon_g$

ε_f , α_f y σ_f son funciones del tipo de vegetación (pequeña, media o alta) y la estación (primavera, verano, otoño e invierno). El σ_f se calcula como una función del LAI:

$$\sigma_f = 0.9 - 0.7^{-0.75LAI} \quad (3.20)$$

Flujo de calor sensible en la vegetación

La transferencia de calor sensible entre el follaje y el aire cercano a la vegetación (H_f) está influenciada por la diferencia de temperatura entre ellos (T_{af} y T_f), el índice de área de hoja (LAI), la densidad del aire (ρ_{af}), el calor específico del aire (C_{pa}), el coeficiente de transferencia general (C_f) y la velocidad del viento (W_{af}) cercano al follaje.

$$H_f = (1.1 LAI \rho_{af} C_{pa} C_f W_{af})(T_{af} - T_f) \quad (3.21)$$

La constante “1.1” representa la transferencia de calor de los tallos y ramas. La densidad del aire cerca del follaje (ρ_{af}) se obtiene de un promedio de densidades como:

$$\rho_{af} = \frac{\rho_a + \rho_f}{2} \quad (3.22)$$

donde ρ_a es la densidad del aire a la altura del instrumento de medición y ρ_f es la densidad del aire a la temperatura del follaje. La temperatura del aire dentro del follaje (T_{af}) se estima de la siguiente manera:

$$T_{af} = (1 - \sigma_f)T_a + \sigma_f(0.3T_a + 0.6T_f + 0.1T_g) \quad (3.23)$$

donde T_a es la temperatura del aire a la altura del instrumento, T_f la temperatura del follaje y T_g es la temperatura de la superficie del sustrato. La velocidad del viento (W_{af}) cerca del follaje se estima como:

$$W_{af} = 0.83\sigma_f W \sqrt{C_{hn}^f} + (1 - \sigma_f)W \quad (3.24)$$

donde W es la velocidad del viento sobre la vegetación (máxima 2 m/s) y C_{hn}^f es el coeficiente de transferencia masiva en condiciones atmosféricas estables y se calcula como:

$$C_{hn}^f = K_v^2 \left(\ln \left(\frac{Z_a - Z_d}{Z_o^f} \right) \right)^{-2} \quad (3.25)$$

donde K_v es la constante de von Karmen (0.4), Z_a es la altura del instrumento, Z_d la altura sobre el suelo donde la velocidad del viento es cero y Z_o^f es la longitud de rugosidad del follaje (m) y se obtienen como:

$$Z_d = 0.701 Z_f^{0.979} \quad (3.26)$$

$$Z_o = 0.131 Z_f^{0.997} \quad (3.27)$$

Finalmente, el coeficiente de transferencia general está dado como:

$$C_f = 0.01 \left(1 + \frac{0.3 (m/s)}{W_{af} (m/s)} \right) \quad (3.28)$$

Flujo de calor latente en la vegetación

El proceso de pérdida de agua a través de la respiración de la planta se conoce como transpiración, ésta pérdida de agua está controlada por la apertura y el cierre de los estomas. Existe otro proceso relacionado a éste y es la resistencia aerodinámica, es la resistencia al

intercambio de humedad que ofrece la capa límite formada en la superficie de la hoja, se mide en unidades de s/m y está influenciada por la velocidad del viento, la rugosidad de la superficie y la estabilidad atmosférica. El flujo de calor latente se da como:

$$L_f = l_f LAI \rho_{af} C_f W_{af} r'' (q_{af} - q_{f,sat}) \quad (3.29)$$

donde r'' representa la humedad de la superficie del follaje, es el efecto combinado de la resistencia aerodinámica (r_a) y estomática (r_s) a la difusión de vapor y se obtiene como:

$$r'' = \frac{r_a}{r_a + r_s} \quad (3.30)$$

Cuando la resistencia aerodinámica es pequeña, el factor de humedad se aproxima a 0 (las superficies de las hojas permanecen secas a medida que la humedad de la superficie se evapora fácilmente). A medida que la resistencia aerodinámica aumenta en importancia con respecto a la resistencia estomática, el factor de humedad se aproxima a 1 (la humedad viaja fácilmente a las superficies de las hojas, pero no se evapora fácilmente). $q_{f,sat}$ es la proporción de mezcla de saturación a la temperatura de la superficie del follaje, y q_{af} es la relación de mezcla del aire dentro de la vegetación, la cual se puede determinar a partir de:

$$q_{af} = \left[\frac{(1 - \sigma_f)q_a + \sigma_f(0.3 q_a + 0.6 q_{f,sat} r'' + 0.1 q_{f,sat} M_g)}{1 - \sigma_f[0.6(1 - r'') + 0.1(1 - M_g)]} \right] \quad (3.31)$$

donde el factor M_g es el factor de humedad, es la relación entre el contenido de humedad volumétrica y la porosidad del suelo, q_a es la proporción de mezcla de aire sobre el follaje, El calor latente de vaporización (l_f) es la cantidad de energía requerida para convertir una unidad de masa de agua en vapor, se estima como:

$$l_f = 1.91846 * 10^6 \left[\frac{T_f}{T_f - 33.91} \right]^2 \quad (3.32)$$

Interface vegetación–sustrato

El balance de energía en la superficie del suelo está principalmente influenciado por las propiedades térmicas del sustrato, la cantidad de cobertura del follaje (σ_f) y la cantidad de humedad en el suelo. En el balance de energía del suelo, se ignora el calor liberado o ganado debido a los cambios de fase del agua del sustrato, el flujo de calor de precipitación y el flujo de calor debido al transporte vertical de agua en el suelo. La convención de signos seguida aquí es la misma que la anterior (el flujo de calor hacia el sustrato es positivo).

La ecuación para F_f contiene dos incógnitas: T_f y T_g , para conocer su valor es necesario formular otra ecuación que contenga al menos una de las variables desconocidas. Esto se puede hacer formulando el intercambio de flujo de energía en la interfaz follaje–sustrato como se muestra:

$$F_g = (1 - \sigma_f)[I_s^\downarrow(1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_g T_g^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (3.33)$$

Al igual que con la ecuación de energía para el follaje, esta ecuación representa el flujo de calor sensible (H_g), el flujo de calor latente (L_g) y las múltiples reflexiones asociadas con la radiación de onda larga y corta ($\frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1}$), $(1 - \sigma_f)$ representa la radiación que no intercepta con la vegetación y llega al sustrato, α_g y ε_g es el flujo de onda corta y la emisividad del sustrato, éstas propiedades dependen del tipo de sustrato, finalmente el término $K \frac{\partial T_g}{\partial z}$ es la conducción de calor en el sustrato.

Flujo de calor sensible en el sustrato

El flujo de calor sensible entre la superficie del suelo y el aire cercano a él depende de la diferencia de temperatura entre ellos y la velocidad del viento dentro de la vegetación, este flujo se da como:

$$H_g = \rho_{ag} C_{p,a} C_h^g W_{af} (T_{af} - T_g) \quad (3.34)$$

donde C_h^g es el coeficiente de transferencia de masa, T_{af} es la temperatura del aire en el follaje cerca del sustrato, T_g es la temperatura del sustrato y ρ_{ag} es la densidad del aire cerca de la superficie del suelo, dada por:

$$\rho_{ag} = \frac{\rho_a + \rho_g}{2} \quad (3.35)$$

Donde ρ_g es la densidad del aire a la temperatura de la superficie del suelo. El coeficiente de transferencia de masa se da como la combinación de los coeficientes de transferencia de masa cerca del suelo (C_{hn}^f) y cerca de la interfaz del follaje-atmósfera (C_{hn}^g) multiplicada por el factor de estabilidad atmosférica (Γ_h):

$$C_h^g = \Gamma_h [(1 - \sigma_f) C_{hn}^g + \sigma_f C_{hn}^f] \quad (3.36)$$

Los coeficientes de transferencia de masa de tierra y follaje están dados por:

$$C_{hn}^g = r_{ch}^{-1} \left[\frac{K_v}{\ln \left(\frac{Z_a}{Z_o^g} \right)} \right]^2 \quad (3.37)$$

$$C_{hn}^f = \left[\frac{K_v}{\ln \left(\frac{Z_a - Z_d}{Z_o^f} \right)} \right]^2 \quad (3.38)$$

donde Z_o^g y Z_o^f son las longitudes de rugosidad del suelo y del follaje, r_{ch}^{-1} es el número de Schmidt turbulento (0.63). Este es un número adimensional que describe la relación entre las velocidades de transporte turbulento de momento y el transporte turbulento de masa. Es útil para resolver el problema de transferencia de masa de los flujos turbulentos de la capa límite. A partir de datos experimentales y simulaciones de CFD, el número de Schmidt oscila entre 0.4-3.5. Por otro lado, K_v es la constante de von Karman (0.4), es un número adimensional que describe la distribución de la velocidad en la dirección normal de la pared de un flujo de fluido turbulento; se usa, por ejemplo, en meteorología de capa límite para calcular flujos de momento, calor y humedad de la atmósfera a la superficie terrestre. Y finalmente el factor de estabilidad atmosférica (Γ_h), se basa en el número masivo de Richardson (R_{ib}), este es un número adimensional que expresa la relación entre la energía potencial y la energía cinética de un fluido, se determina como sigue:

$$R_{ib} = \frac{2_g Z_a (T_{af} - T_g)}{(T_{af} + T_g) W_{af}^2} \quad (3.39)$$

El factor de estabilidad atmosférica

$$\Gamma_h = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{(1 - 16 R_{ib})^{0.5}} & \text{para } R_{ib} < 0 \\ \frac{1}{(1 - 5 R_{ib})} & \text{para } R_{ib} > 0 \end{array} \right\} \quad (3.40)$$

Flujo de calor latente en el sustrato

La transferencia de calor en el sustrato depende del contenido de agua y la temperatura, la eliminación del vapor de agua de la superficie del suelo depende de la diferencia de mezcla de la superficie del suelo y el aire y la velocidad del viento dentro de la vegetación. El flujo de calor latente (L_g) está dado por:

$$L_g = C_e^g l_g W_{af} \rho_{ag} (q_{af} - q_g) \quad (3.41)$$

Aquí C_e^g es el coeficiente de transferencia masiva, l_g es el calor latente de vaporización a la temperatura de superficie del suelo, q_{af} es la relación de mezcla en la interfaz follaje-atmósfera y q_g es la relación de mezcla en la superficie del suelo, dado por:

$$q_g = M_g q_{g,sat} + q_{af}(1 - M_g) \quad (3.42)$$

El coeficiente de transferencia de masa para el intercambio de calor latente es similar al del intercambio de calor sensible y está dado por:

$$C_e^g = \Gamma_e [(1 - \sigma_f) C_{en}^g + \sigma_f C_{hn}^f] \quad (3.43)$$

donde C_{en}^g es el coeficiente de transferencia general cerca del suelo para el flujo de calor latente y Γ_e es el factor de corrección de la estabilidad del intercambio de calor latente (se supone que es igual a Γ_h).

La transferencia de calor en el sustrato se supone que es uniforme horizontalmente, el usuario especifica los valores de emisividad y reflectividad, conductividad térmica, calor específico y densidad para suelo seco, y el software actualiza estas propiedades en función del estado de humedad actual del suelo y las funciones de sensibilidad generalizadas, se encontró que la difusividad y la conductividad variaban linealmente con el nivel de saturación de humedad del suelo. La base de datos meteorológicos que integran la precipitación o la programación del riego del techo verde, proporcionan una forma de entrada de humedad para la capa de sustrato, esta humedad sale del sustrato por medio del escurrimiento, evaporación de la superficie y evapotranspiración de las superficies de la vegetación. La evaporación y la evapotranspiración se calculan directamente a partir de los cálculos del flujo de calor latente para las capas de sustrato y vegetación, y los valores del calor latente de vaporización del agua.

Linealización de ecuaciones

Para resolver las ecuaciones del balance de energía en el follaje y sustrato, los términos de cuarto orden T_f^4 y T_g^4 , y los términos de relación de mezcla $q_{f,sat}$ y $q_{g,sat}$ son linearizados de la siguiente manera:

$$[T_f^{(n+1)}]^4 = [T_f^n]^4 + 4[T_f^n]^3 [T_f^{n+1} - T_f^n] \quad (3.44)$$

$$\left[T_g^{(n+1)}\right]^4 = \left[T_g^n\right]^4 + 4\left[T_g^n\right]^3\left[T_g^{n+1} - T_g^n\right] \quad (3.45)$$

donde T_f^{n+1} y T_g^{n+1} son las temperaturas del follaje y sustrato del paso de tiempo actual. T_f^n y T_g^n son las temperaturas del paso del tiempo anterior. La relación de mezcla de saturación y las temperaturas en el sustrato y la superficie del follaje se dan como:

$$q_{f,sat}\left(T_f^{(n+1)}\right) = q_{sat}\left(T_f^n\right) + \left(\frac{\partial q_{sat}}{\partial T}\right)_{T_f^n} \left(T_f^{(n+1)} - T_f^n\right) \quad (3.46)$$

$$q_{g,sat}\left(T_g^{(n+1)}\right) = q_{sat}\left(T_g^n\right) + \left(\frac{\partial q_{sat}}{\partial T}\right)_{T_g^n} \left(T_g^{(n+1)} - T_g^n\right) \quad (3.47)$$

donde $q_{sat}\left(T_g^n\right)$ es la proporción de mezcla de saturación en el paso de tiempo anterior y se obtiene como:

$$q_{sat}\left(T_g^n\right) = \frac{0.622 e^* T_g^n}{P - e^* T_g^n} \quad (3.48)$$

donde e^* es la presión de vapor de saturación (Pa) evaluada a la temperatura del suelo (T_g^n) y P es el flujo de calor de precipitación desde el paso de tiempo anterior como:

$$e^* = 611.2 \exp\left[17.67 \left(\frac{T_g^n - 273.15}{T_g^n - 29.65}\right)\right] \quad (3.49)$$

la derivada de la proporción de mezcla de saturación en el paso de tiempo anterior viene dada por:

$$\frac{dq^*}{dT_g^n} = \left[\frac{0.622P}{(P - 0.378 e^*)^2}\right] \left(\frac{de^*}{dT_g^n}\right) \quad (3.50)$$

la derivada de la presión de vapor de saturación se puede calcular a partir de la ecuación de Clausius-Clapeyron:

$$\frac{de^*}{dT_g^n} = \frac{l_g e^*(T_g^n)}{(R_v (T_g^n)^2)} \quad (3.51)$$

Donde R_v es la constante de gas para el vapor de agua y l_g es el calor latente de vaporización a la temperatura de la superficie del sustrato. Las relaciones de mezcla de saturación para las

superficies de las hojas se pueden obtener mediante la sustitución de T_g con T_f en las relaciones anteriores.

Ecuaciones finales

Después de la linealización, las ecuaciones finales tienen la forma:

$$C_1^f + C_2^f T_g + C_3^f T_f = 0 \quad (3.52)$$

$$C_1^g + C_2^g T_g + C_3^g T_f = 0 \quad (3.53)$$

Los coeficientes en estas ecuaciones son el resultado de las ecuaciones del desarrollo anterior. Este conjunto final de ecuaciones se resuelve simultáneamente para obtener T_g y T_f . Los términos de conducción en las ecuaciones para C_1^g y C_2^g se resuelven mediante las funciones de transferencia de conducción (CTF) dentro del esquema de solución de EnergyPlus. Éste enfoque modela la conducción transitoria a través de cualquier material con masa térmica.

Implementación de software

Antes de utilizar una construcción de techo verde, el usuario del software primero debe definir las características del material de techo verde. Además de proporcionar un nombre único para el material, el usuario también debe especificar los siguientes campos:

Altura de las plantas: la altura de las plantas está limitada a valores en el rango 0.01 a 1 m de altura.

Índice del área foliar: el área foliar proyectada por unidad de área de la superficie del suelo. Este campo es adimensional y está limitado en el rango de 0.001-5.0.

Reflectancia de la hoja: fracción de radiación solar incidente reflejada por las superficies de las hojas individuales. La radiación solar incluye el espectro visible, así como las longitudes de onda infrarroja y ultravioleta.

Emisividad de la hoja: radiación térmica emitida desde las superficies de las hojas debido a su temperatura. Este parámetro se usa cuando se calcula el intercambio radiante de longitud de onda larga en las superficies de las hojas, el valor va desde 0-1 y cuanto más pequeño sea el valor mejor aislante será el material.

Resistencia estomática mínima: la resistencia de las plantas al transporte de humedad. Las plantas con valores bajos de resistencia estomática darán como resultado tasas de

evapotranspiración más altas que las plantas con alta resistencia. Los valores de resistencia estomática generalmente están en el rango de 50-300 s/m.

Lo anterior fue específico para la capa de techo verde, una vez que se define el material del techo verde, el usuario puede aplicarlo como la capa de construcción más externa en cualquier elemento del techo. Las características necesarias para el uso de cualquier material aplicado a los cerramientos son: conductividad, densidad, calor específico, absorptancia térmica, absorptancia solar, absorptancia visible, grosor y rugosidad (sólo influye en el coeficiente de convección exterior; éstas propiedades también aplican para la capa de sustrato pero se especifican que son para suelo seco).

3.5. SIMULACIÓN EN ENERGYPLUS CON INTERFACE DESIGNBUILDER

El método de cálculo de EP es un modelo de balance de calor global en una dimensión, por lo que se modelan las superficies (paredes, pisos, techo, puertas y ventanas) y el aire interior con una temperatura uniforme; el balance de calor en las superficies considera efectos de conducción, convección, radiación, transferencia de masa y condiciones de frontera. En la simulación se incluyen pasos de tiempo de solución definidos por el usuario, archivos de entrada de datos climatológicos, solución simultánea de balance de calor interno y externo, modelos de confort térmico, etc. EP es un software de acceso gratuito y de los más utilizados para la simulación térmica de edificaciones es por ello, que se decidió trabajar con él, la versión con la que se cuenta es 8.9 y como interfaz de este se usó DB versión 4.5 pues se cuenta con la licencia de acceso para su uso. En la Figura 3.5 se presenta un diagrama de flujo del proceso de simulación en EnergyPlus a través de la interface DesignBuilder.

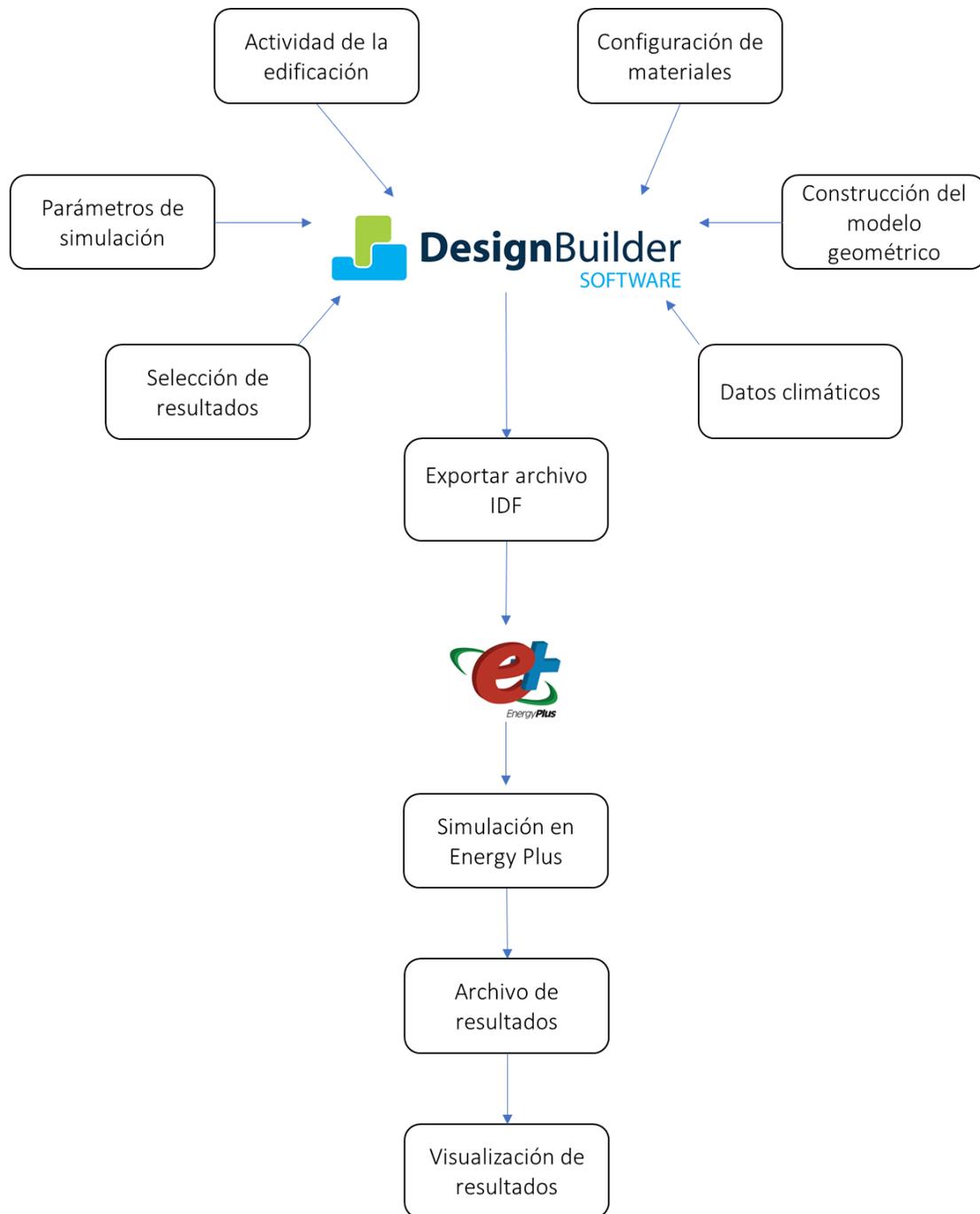


Figura 3.6 Proceso de simulación en EnergyPlus a través de la interface DesignBuilder.

La metodología para realizar simulaciones se enumera enseguida:

1. Como primer paso para iniciar la simulación se seleccionan los datos meteorológicos, DB cuenta con algunos archivos de clima para ciertas ciudades del mundo, si la ciudad de interés no se encuentra dentro de esa lista, se tiene que crear o importar el archivo en formato.EPW (Energy Plus Weather) que contiene los datos de clima y un archivo en formato .STAT que contiene los datos estadísticos del sitio: latitud, longitud, elevación sobre el nivel del mar, etc.
2. Crear el modelo geométrico, DB permite crear el modelo de dos maneras, la primera es crear el modelo bloque a bloque dentro de la interfaz de DB, la segunda es mediante la importación de un plano .DXF que se extruye para formar el edificio. Después se hacen las divisiones interiores para crear zonas térmicas específicas y se crean las aberturas: puertas y ventanas interiores y exteriores.
3. Una vez creado el edificio y las aberturas se introducen los materiales y sus propiedades termofísicas, se especifica el número de capas y el tipo de material del techo, pared y piso. Enseguida se asigna la configuración de las aberturas, se ingresan las características de las ventanas y puertas como: marcos de ventana, tipo de acristalamiento, tipo de puertas y las propiedades termofísicas.
4. Introducir los parámetros de actividad, aquí se especifica el número de ocupantes y la actividad que realizan, las cargas térmicas por el uso de equipo eléctrico y se fijan los intervalos de temperaturas para el funcionamiento de equipos de HVAC.
5. Configurar los parámetros de simulación, en este punto se selecciona el paso de tiempo de la simulación (puede ser de cada minuto o hasta cada 30 minutos), la convergencia, si existe sombreado, la adyacencia con otros edificios, entre otros.
6. Selección de resultados, se seleccionan las variables de salida de una lista de resultados prediseñados.
7. Se exporta un archivo en formato IDF al software EP el cual contiene toda la información del edificio: la geometría, dimensiones, características termofísicas de los materiales, actividad, uso del edificio, el archivo climático, etc.
8. Una vez exportado el archivo .IDF, este se abre en EP cargándose automáticamente todas las características y parámetros que se ingresaron en DB. Posteriormente, se ejecuta el comando de simulación.
9. Terminada la simulación térmica se genera un archivo en formato .dat donde se muestran los resultados seleccionados.
10. Visualización, para visualizar los resultados EP genera un archivo en formato .ESO que muestra los resultados en forma gráfica.

Información más detallada del proceso de modelación se encuentra en el apéndice A.

3.6. VERIFICACIÓN DEL USO DE ENERGYPLUS Y DESIGNBUILDER

En este apartado se describe la metodología ANSI/ASHRAE 140-2011 (*Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*) que permite verificar los resultados de la simulación energética de edificios con la versión de EnergyPlus 8.3.0. Este método de pruebas llamado *Building Energy Simulation Test (BESTEST)* incluye varios casos de estudio y fue desarrollado por la IEA (*International Energy Agency*) con el objetivo de validar los resultados de diferentes programas de simulación con los resultados experimentales.

Esta metodología proporciona las dimensiones de una construcción, el número y posición de las aberturas, opciones de sombreado, equipo eléctrico y los materiales de construcción, así como sus propiedades termofísicas. Todas estas características son introducidas al programa de simulación y los resultados obtenidos son comparados con los proporcionados por la norma ANSI/ASHRAE 140-2014, si los valores están dentro del intervalo especificado significa que se siguió correctamente la metodología y se está haciendo un uso adecuado del programa de simulación. Para verificar las simulaciones y el uso de los softwares se eligió el caso básico BESTEST 900 y 620 que es una construcción de masa térmica elevada.

3.6.1. Especificaciones del BESTest 900

Una vez seleccionado el caso para realizar la validación de las simulaciones en EP se introducen en DB las dimensiones y características de la construcción especificada en el BESTEST 900 para crear el modelo físico. La Figura 3.6 muestra las dimensiones de la construcción y la ubicación de las ventanas, así como el modelo creado en DB.

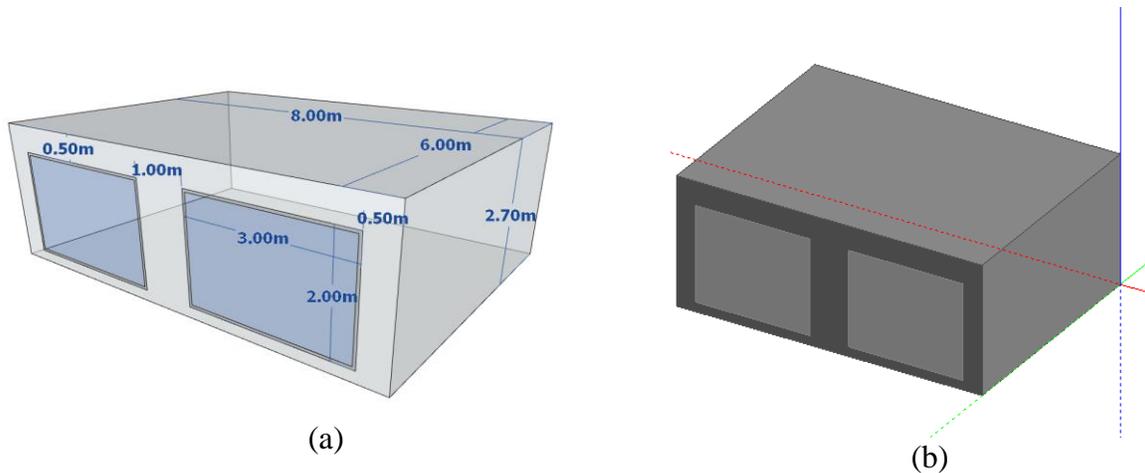


Figura 3.7 Edificación del caso 900. (a) Dimensión de la construcción (b) Modelo creado en DB.

La construcción es una zona simple rectangular que no tiene particiones interiores y cuenta con dos ventanas del mismo tamaño orientadas al sur. Las propiedades termofísicas y

espesores de los muros, techo y piso se muestran en la Tabla 3.1, los materiales están ordenados del interior al exterior de la edificación. Las ventanas son de vidrio doble separadas por 13 mm de aire, las propiedades de éstas se muestran en la Tabla 3.2 y las propiedades ópticas de los vidrios se detalla en la Tabla 3.3.

Tabla 3.1 Especificación de los materiales.

Componente	Elemento	Espesor m	λ W/mK	U W/m ² K	R m ² K/W	ρ kg/m ³	Cp J/kgK
Muros	Concreto	0.100	0.510	5.100	0.196	1400	1000
	Aislante	0.0615	0.040	0.651	1.537	10	1400
	Madera	0.009	0.140	15.556	0.064	530	900
Techo	Yeso	0.010	0.160	16.000	0.063	950	840
	Fibra de vidrio	0.1118	0.040	0.358	2.794	12	840
	Madera	0.019	0.140	7.368	0.136	530	900
Piso	Concreto	0.080	1.130	14.125	0.071	1400	1000
	Aislante	1.007	0.040	0.040	25.175	10	1400

Tabla 3.2 Propiedades de las ventanas.

Propiedades de las ventanas		
Número de vidrios	2	
Espesor del espacio de aire	13	mm
Conductancia de cada vidrio	333	W/m ² K
Densidad del vidrio	2500	Kg/m ³
Calor específico del vidrio	750	J/kgK
Coefficiente de sombreado del vidrio doble en incidencia normal	0.907	

Tabla 3.3 Propiedades del vidrio.

Propiedades del vidrio			
Térmicas		Espesor (mm)	3.175
		Conductividad (W/mK)	1.06
Ópticas	Espectro solar	Transmitancia	0.86156
		Reflectancia exterior	0.07846
		Reflectancia interior	0.07846
	Espectro visible	Transmitancia	0.91325
		Reflectancia exterior	0.082
		Reflectancia interior	0.082
	Espectro infrarrojo	Transmitancia	0
		Emisividad exterior	0.84
		Emisividad interior	0.84

Una vez introducidos los elementos constructivos se especifican los parámetros de climatización; se consideran 0.5 cambios de aire por hora, un sistema de refrigeración con un set-point de 27 °C, un sistema de calefacción con un set-point de 20 °C, ambos sistemas con un COP (*Coefficient of Performance*) de 1. Las ganancias internas por ocupantes, iluminación y equipo eléctrico se asignan en 200 W continuos, no se consideran ganancias de calor latente y se tiene una fracción radiante del 60%. La temperatura del suelo se fijó en 10 °C para todo el año con una reflectancia de 0.20. Los datos meteorológicos usados para la simulación son de la ciudad de Denver, Colorado, EU y son de un año meteorológico típico (TMY)⁵, la ubicación y las características de la ciudad se muestran en la Tabla 3.4.

⁵ Typical Meteorological Year

Tabla 3.4 Datos climáticos de la ciudad de Denver, Colorado.

Ubicación y datos climáticos	
Ciudad	Denver, Colorado, EU.
Latitud	39.83 °
Longitud	-104.66 °
Elevación sobre el nivel del mar	1655
Clima	Verano cálido/Inviernos frío y secos, nublado parcialmente todo el año.
Velocidad del viento promedio anual	4.00 m/s
Temperatura ambiente bulbo seco promedio anual	9.71 °C
Temperatura ambiente punto de rocío promedio anual	-1.46 °C
Radiación solar directa normal	2336.67 kWh
Radiación solar difusa horizontal	498.15 kWh

Resultados del BESTEST 900

Una vez creado el modelo se introdujeron todos los parámetros especificados en el BESTEST 900 y se procedió a obtener las cargas de calentamiento y de enfriamiento. En la Tabla 3.5 se presentan los resultados de las cargas de calentamiento y enfriamiento proporcionados por la norma ANSI/ASHRAE 140-2011 y los obtenidos con la simulación que se realizó para la verificación. Como se aprecia en los resultados obtenidos el error porcentual máximo es de 2.57% y corresponde a las cargas de calentamiento, estos resultados aseguran que se ingresaron correctamente los valores a los programas de simulación y que se está haciendo un uso correcto de los softwares.

Tabla 3.5 Resultados del BESTEST 900.

Cargas (año)	ANSI/ASHRAE 140-2007 (MWh)	Presente trabajo (MWh)	Diferencia (%)
Calentamiento	1.164	1.194	2.57
Enfriamiento	2.683	2.643	0.22

3.6.2. Especificaciones del BESTEST 620

Este caso contiene la misma dimensión de la construcción, las propiedades de las ventanas y condiciones climáticas del caso 900. La diferencia que existe son los materiales de construcción de los muros, el techo y el piso permanecen igual que la edificación anterior.

Tiene dos ventanas del mismo tamaño ubicadas al este y oeste, la Figura 3.7 muestra las dimensiones de la construcción y el modelo creado en DB.

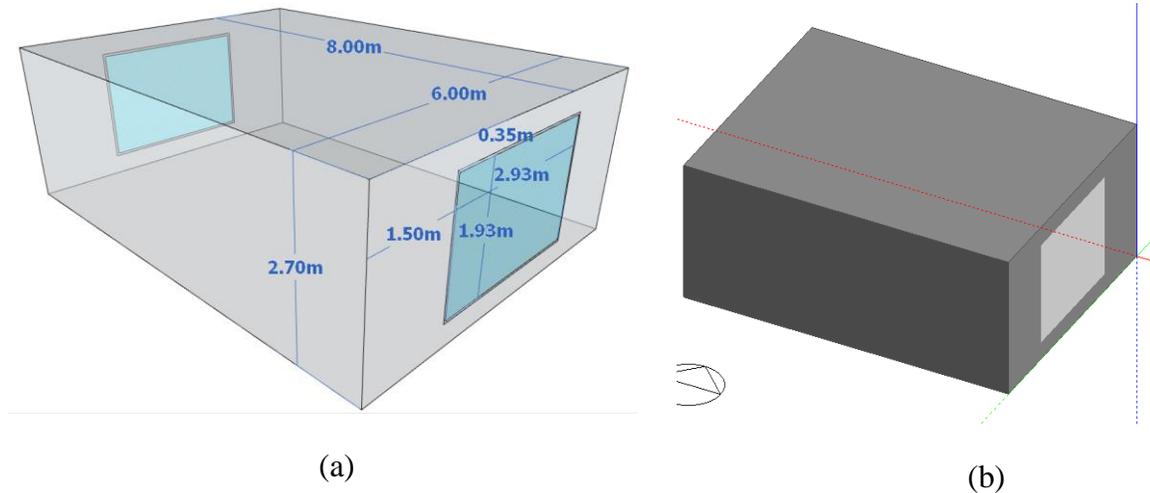


Figura 3.8 Edificación del caso 620. (a) Dimensión de la construcción (b) Modelo creado en DB.

En esta edificación los muros y techo son de los mismos materiales, pero con diferente espesor de las capas de los cuales están formados. En la Tabla 3.6 se muestran las propiedades de cada uno de los componentes de la envolvente, los materiales están ordenados del interior al exterior.

Tabla 3.6 Componentes de construcción del caso 620.

Componente	Elemento	Espesor m	λ W/mK	U W/m ² K	R m ² K/W	ρ kg/m ³	Cp J/kgK
Muros	Yeso	0.012	0.160	13.333	0.075	950	840
	Fibra de vidrio	0.066	0.040	0.606	1.650	12	840
	Madera	0.009	0.140	15.556	0.064	530	900
Techo	Yeso	0.010	0.160	16.000	0.063	950	840
	Fibra de vidrio	0.1118	0.040	0.358	2.794	12	840
	Madera	0.019	0.140	7.368	0.136	530	900
Piso	Concreto	0.025	0.140	5.600	0.179	650	1200
	Aislante	1.003	0.040	0.040	25.175	10	1400

Resultados del BESTEST 620

Para la obtención de los resultados de este caso se siguió la misma metodología que en el caso 900, se introdujeron las características del BESTEST y se obtuvieron las cargas de enfriamiento y calentamiento. La Tabla 3.7 muestra los valores obtenidos en la simulación y los proporcionados por la norma ANSI/ASHRAE 140-2011, se observa que el máximo error

porcentual corresponde a la carga de enfriamiento con 0.95%, con esto se verifica que los software están siendo usados correctamente.

Tabla 3.7 Resultados del BESTEST 620.

Cargas (año)	ANSI/ASHRAE 140- 2007 (MWh)	Presente trabajo (MWh)	Error (%)
Calentamiento	4.512	4.516	0.08
Enfriamiento	4.384	4.426	0.95

CAPÍTULO 4. REHABILITACIÓN DEL EXPERIMENTO

En el presente capítulo se muestra la instrumentación que se realizó a los módulos de prueba, se detallan los sensores utilizados, así como la posición de estos para recabar información de temperatura y flujo de calor, además de las variables climáticas necesarias para el estudio. Finalmente se presenta la validación de las simulaciones con y sin techo verde, donde se comparan los datos obtenidos experimentalmente con los datos simulados, de esta manera se confirman los parámetros de techo verde para la simulación de una vivienda.

4.1. MODULOS DE PRUEBA

Los módulos de prueba fueron construidos, por Chagolla en el año 2017 como proyecto de doctorado, con la finalidad de evaluar térmicamente un techo verde y un techo de concreto. Los módulos están fabricados de madera tipo OSB (Oriented Strand Board) de 2.5 cm de espesor, en el interior se colocó aislante térmico de poliestireno extruido de 2.5 cm de espesor y están reforzadas con una estructura metálica para que pueda soportar el peso de la losa de concreto la cual tiene un espesor de 10 cm de espesor y 120 cm de lado. El exterior de las paredes está pintado de blanco para reflejar la mayor cantidad de radiación y se instaló un sistema de aire acondicionado a los dos módulos, de estos, uno permaneció con la losa sencilla y al otro se le agregó un techo verde; el cual tiene como base la losa de concreto, después una capa de impermeabilizante que integra un antiraíz, en seguida 6 cm de sustrato y finalmente la vegetación de la especie *Aeonium subplanum*, comúnmente conocida como suculenta o crasulácea. En la Tabla 4.1 se muestran las propiedades de los materiales y en la Figura 4.1 la estructura y componentes de los módulos.

Tabla 4.1 Componentes de construcción de los módulos experimentales.

Componente	Espesor (cm)	λ W/mK	Cp J/kgK	ρ kg/m ³
Aislante térmico	2.5	0.0288	1470	10
Madera	2.5	0.13	1880	650
Losa	10	1.74	840	2300

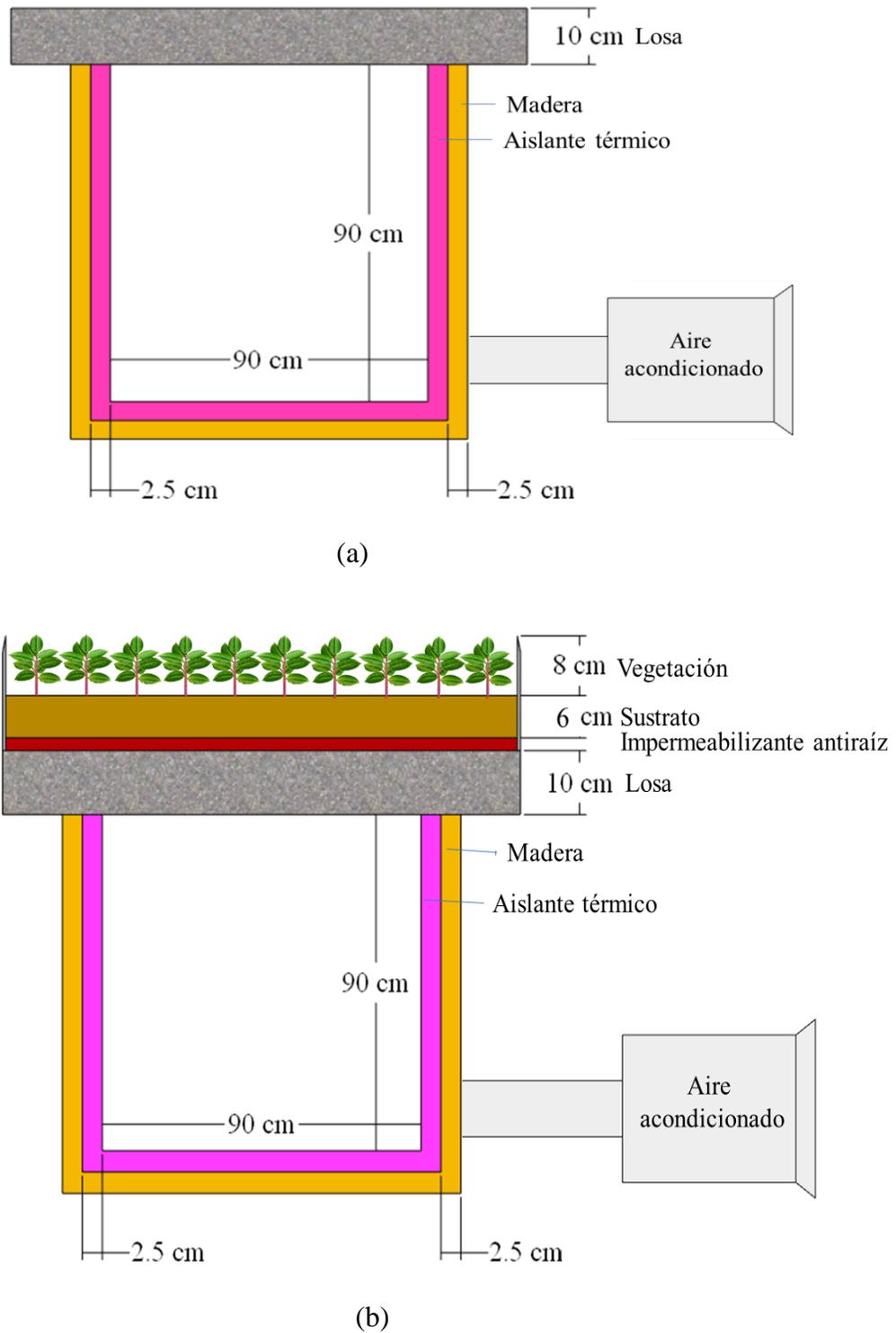


Figura 4.1 Módulos experimentales: (a) Techo tradicional (b) Techo verde.

Los módulos se instalaron en la azotea del edificio de CENIDET a 20 m de la estación meteorológica como se muestra en la Figura 4.2, donde no se tiene sombreado por edificaciones vecinas o por árboles, también se observan los equipos de aire acondicionado

conectados a las celdas, estos tienen dos ductos cada uno que están aislados térmicamente para evitar pérdidas o ganancias y hacen circular el aire entre el sistema mecánico y los módulos.



Figura 4.2 Módulos de prueba con techo verde y techo tradicional.

4.2. VARIABLES CLIMÁTICAS

En el sitio del experimento se encuentra la estación meteorológica Vaisala Maws100 que mide la radiación solar con un piranómetro Vaisala QMS101 que tiene un error de $\pm 1\%$, la temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento se obtienen con un multisensor Vaisala WXT536 que tiene un error para cada variable de $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 3\%$ y $\pm 3\%$ respectivamente.

4.3. INSTRUMENTACIÓN

Para conocer la temperatura en las superficies y del aire interior de los módulos Chagolla et al. (2017) colocaron sensores en diferentes posiciones, se instaló el aire acondicionado con capacidad de 1470 W para mantener la temperatura constante al interior de los módulos en $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Una vez que se recabaron los datos experimentales de interés para el autor, se usó el equipo de medición y adquisición de datos para experimentos de otros tesis, por lo que ya no se siguieron obteniendo datos experimentales. Para adquirir nuevos datos de los módulos sin un sistema de aire acondicionado se rehabilitaron los mismos, se quitó la losa para revisar que el aislante y los sensores internos estuvieran en condiciones adecuadas para seguir funcionando; se adicionaron sensores de flujo de calor en las paredes, piso y techo de los módulos, se calibraron los sensores y se conectaron de nuevo al adquisidor, tomando mediciones cada cinco minutos, la Figura 4.3 muestra este proceso.



Figura 4.3 Rehabilitación de los módulos.

Para medir la temperatura se colocaron termopares tipo “T” (error ± 0.5 °C) en la losa, sustrato, vegetación y en el interior de los módulos. Para medir el flujo de calor a través de las losas y paredes se colocaron sensores de película delgada Omega HFS-4 (error ± 5 %), los cuales se colocaron con pasta térmica para un mejor contacto entre la superficie y el sensor y se fijaron con cinta adhesiva. Para medir el contenido volumétrico de agua se instalaron dos sensores Decagon Devices EC-5 (error $\pm 3\%$). La información de los sensores se monitoreó en un adquisidor de datos Keysight 34972A (resolución de $6\frac{1}{2}$ dígitos). En la Figura 4.4 se puede apreciar la posición de los sensores que se colocaron en los dos módulos para la adquisición de nuevos datos.

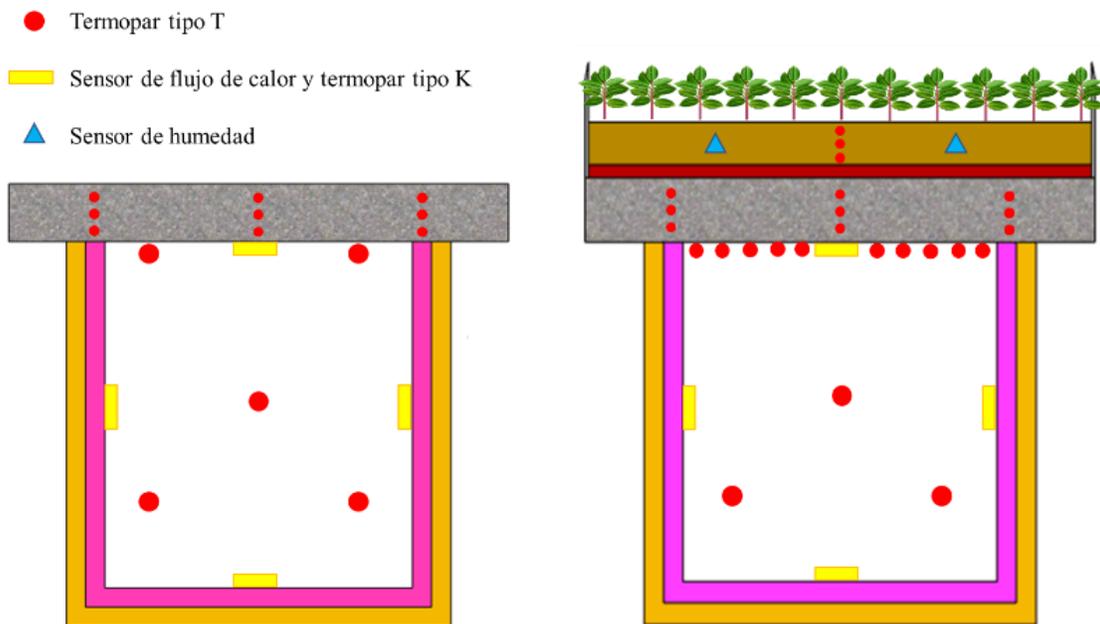


Figura 4.4 Ubicación de los sensores.

4.4. VALIDACIÓN DE UN TECHO DE CONCRETO

Para la validación de las simulaciones se compararon los datos obtenidos de la mismas con datos experimentales obtenidos de los módulos de prueba. Se validó un techo tradicional en evolución libre y con un sistema de aire acondicionado, donde se contrasta la temperatura de la superficie interior de la losa y la temperatura del aire interior. Los datos experimentales se registran cada 5 min y cada 12 datos experimentales hacen una hora, los que se promedian para tener valores cada hora, que son los valores requeridos por el software; EnergyPlus interpola los datos horarios para coordinarlos con las etapas de simulación (paso de tiempo). Así, las figuras muestran el comportamiento horario de las cavidades.

Para realizar la comparación de los datos medidos y los datos simulados se empleó el error MBE (*Mean Bias Error*) que es utilizado por Zeng et al. (2017) el cual se obtiene con la siguiente ecuación:

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

Donde y son los datos simulados y x los valores experimentales.

4.4.1. Evolución libre

Para realizar la validación del módulo con techo de concreto en evolución libre se compararon los datos experimentales de las mediciones realizadas con los datos obtenidos de la simulación. Los datos experimentales seleccionados para hacer la validación fueron la temperatura en la superficie interior del techo y la temperatura del aire interior. El módulo se encuentra sellado sin infiltración de aire y la losa no tiene ningún tipo de recubrimiento.

Datos de clima para validación

Las variables meteorológicas se registraron para el periodo del 01 al 05 de junio del 2018 en la estación meteorológica, lo que se considera como la temporada cálida. En los cinco días de recolección de datos no se presentaron lluvias siendo el comportamiento ambiental bastante uniforme. La temperatura ambiente promedio durante este periodo fue de 28 °C con un máximo de 38 °C y un mínimo 18.6 °C, la radiación solar máxima fue de 990 W/m², la humedad relativa promedio fue de 47% con una máxima 75% y una mínima de 30%, y la velocidad del viento promedio es de 1.2 m/s en todo el periodo. En la Figura 4.5 se observan las variables climáticas utilizadas.

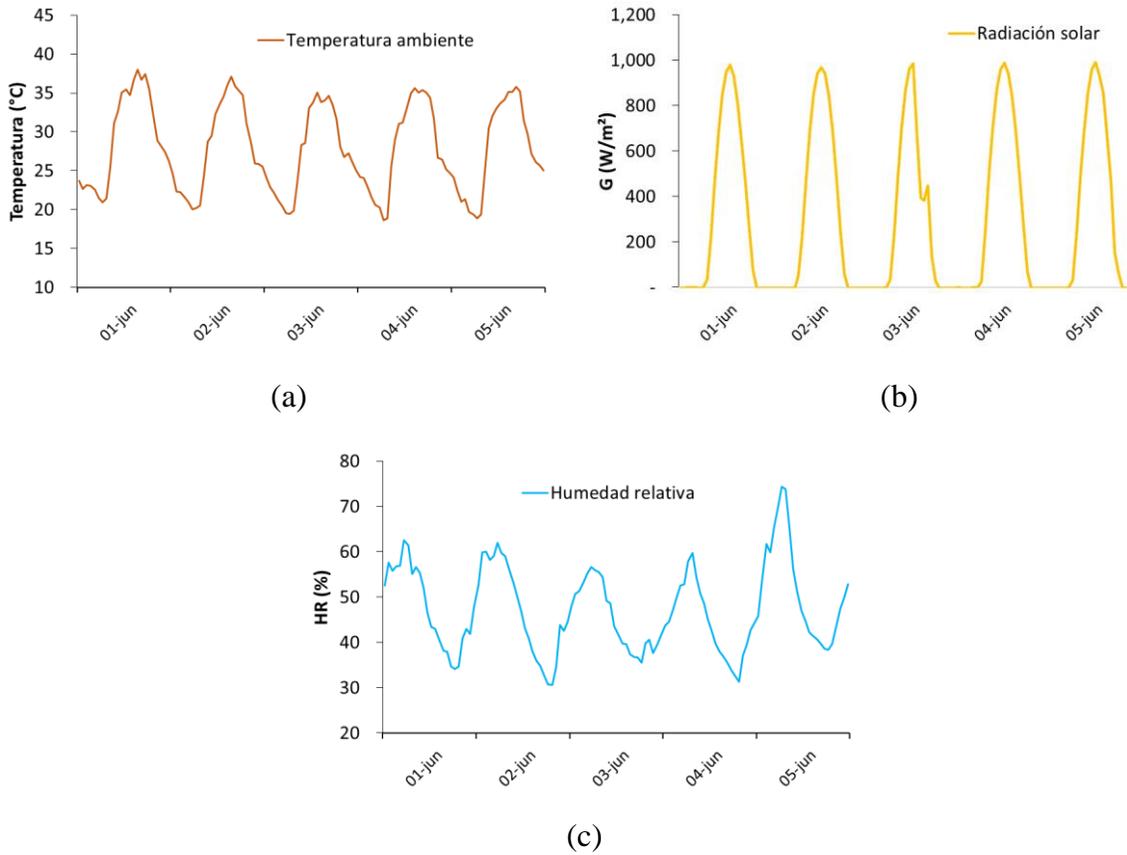


Figura 4.5 Variables climáticas (01-05 junio 2018). (a) Temperatura, (b) Radiación, (c) Humedad relativa.

En la Tabla 4.2 se muestran los máximos y mínimos de las variables climáticas del periodo de simulación.

Tabla 4.2 Mínimos y máximos de las variables climáticas (01-05 junio 2018).

Variable	Máximo	Mínimo	Promedio
Temperatura (°C)	38	18.60	28
Radiación solar (W/m ²)	990	0.10	300
Humedad relativa (%)	75	30	47

Resultados

En la Figura 4.6(a) se muestra la temperatura de la superficie interior del techo de concreto, la temperatura máxima obtenida en el sitio de medición fue de 48.7 °C y la simulada de 49 °C, en promedio se obtuvo 0.2 °C de diferencia entre los dos tipos de datos. En la misma Figura (b) se muestra la temperatura del aire interior del módulo, de los cinco días simulados el 03 de junio es el día que presenta menor temperatura y así mismo es el día que mejor se ajusta. La temperatura máxima experimental es de 45.7 °C mientras que en la simulación se obtuvo 47.3 °C, teniendo en promedio 0.7 °C de diferencia entre la simulación y lo

experimental. En la Tabla 4.3 se muestra el MBE, los valores mínimos y máximos de la temperatura del aire interior y de la superficie interior del techo. Una vez simulada la cavidad se compararon los datos encontrando un error del 0.5% para la superficie interior de la losa y un 2.1% para el aire interior.

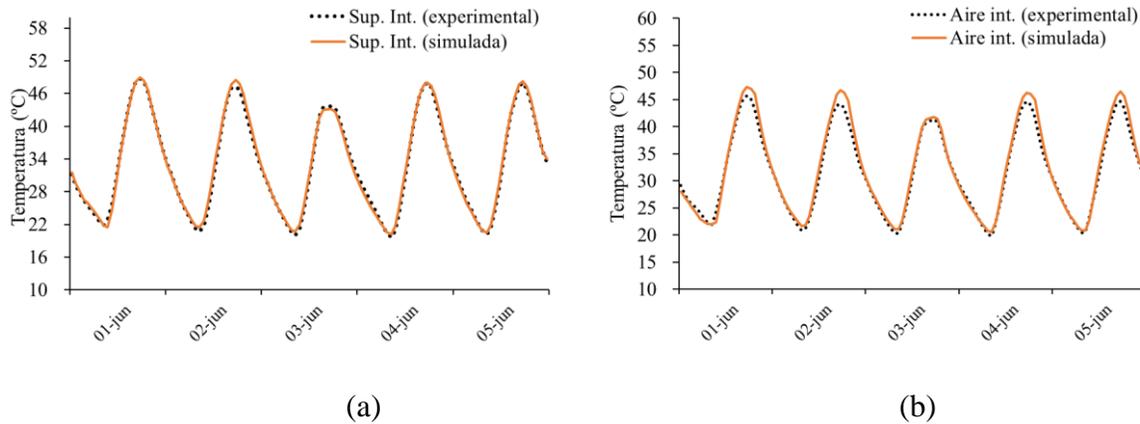


Figura 4.6 Temperatura, techo de concreto, evolución libre: a) Superficie interior de la losa b) Aire interior.

Tabla 4.3 Mínimos y máximos de temperatura, módulo techo de concreto en evolución libre.

Variable	Datos	Máximo	Mínimo	Promedio	MBE (%)
Temp. superf. interior	Experimentales	48.7	19.6	33.1	0.5
	Simulados	49.0	20.2	33.3	
Temp. aire interior	Experimentales	45.7	20.0	31.6	2.1
	Simulados	47.3	20.6	32.3	

4.4.2. Aire acondicionado

Para realizar la validación del techo tradicional con el sistema de aire acondicionado instalado se usaron los datos obtenidos por Chagolla et al. (2017). El aire acondicionado mantiene la temperatura interior constante a 25 °C, controlada por un termostato eléctrico (error ± 1 °C). Los datos experimentales seleccionados para hacer la validación fueron la temperatura en la superficie interior de la losa y la del aire interior de la cavidad.

Datos de clima para validación

Las variables meteorológicas utilizadas en la validación son la temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento, estas variables se registraron para el periodo del 13 al 17 de abril del 2017 en la estación meteorológica. La temperatura ambiente promedio durante este periodo fue de 24.3 °C con un máximo de 30.5 °C y un mínimo 18.4 °C. La radiación solar máxima fue de 945.7 W/m². La humedad relativa ambiente promedio fue de

35 % con una máxima 63 % y la velocidad del viento promedio es menor a 2 m/s en todo el periodo, en la Figura 4.7 se observan las variables climáticas utilizadas.

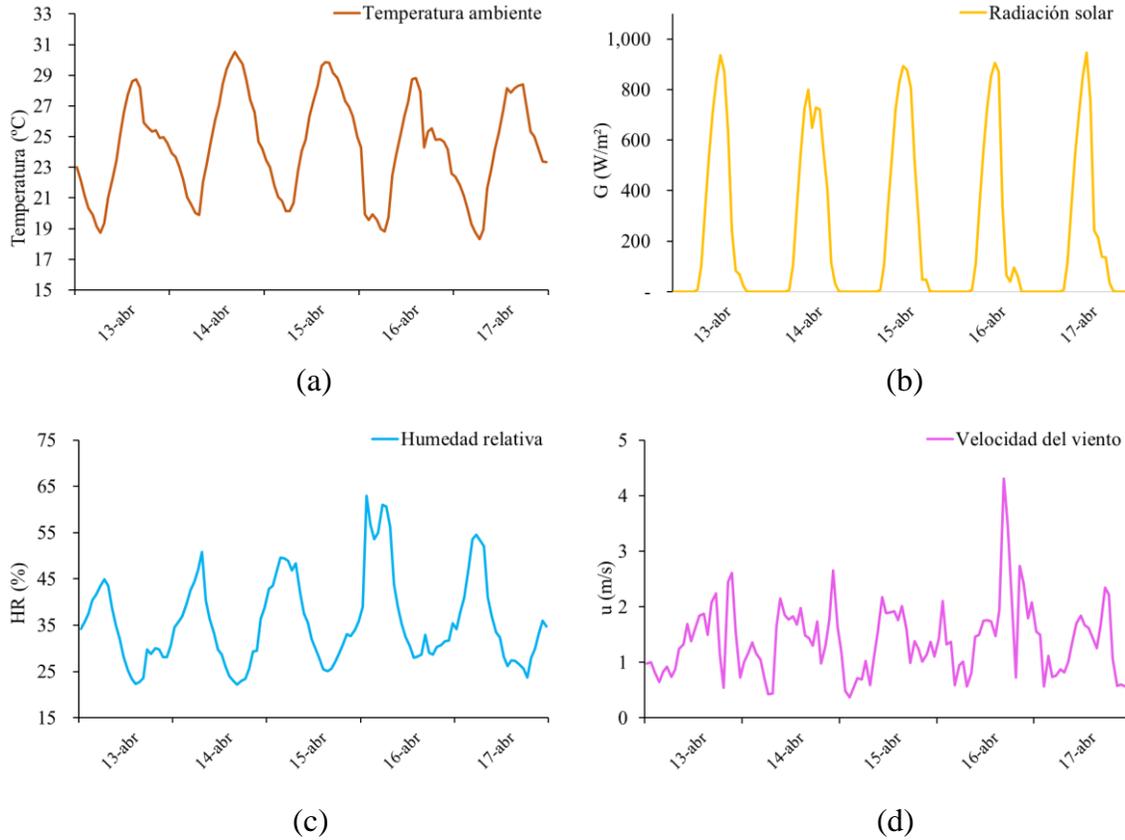


Figura 4.7 Variables climáticas (13-17 abril 2017). (a) Temperatura, (b) Radiación, (c) Humedad relativa, (d) Velocidad del viento.

El valor máximo de humedad y velocidad del viento se presentaron el 16 de abril, y a su vez, es este día donde se presenta la menor temperatura. En la Tabla 4.4 se muestran los máximo y mínimos de las variables climáticas del periodo de simulación.

Tabla 4.4 Mínimos y máximos de las variables climáticas (13-17 abril 2017).

Variable	Máximo	Mínimo	Promedio
Temperatura (°C)	30.5	18.4	24.3
Radiación solar (W/m ²)	945.7	0.1	226.2
Humedad relativa (%)	63	22	35
Velocidad del viento (m/s)	4.3	0.3	1.4

Resultados

De la simulación de la cavidad con aire acondicionado se encontró una diferencia máxima de $2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un promedio de $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura de la superficie entre los datos simulados y los experimentales, el día que presenta la temperatura más alta es el 15 y el que presenta la menor es el 17 de abril, esto se puede apreciar en la Figura 4.8(a). Por otro lado, otro parámetro comparado en la validación es la temperatura del aire dentro de la cavidad, el comportamiento de los cinco días se puede apreciar en la misma Figura 4.8(b). La diferencia promedio entre los dos tipos de datos es de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una máxima de $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$; siendo el día 15 de abril el día que presenta mayor temperatura en la superficie de la losa y en consecuencia en el aire interior del módulo, esto aproximado a las 16:00 h. Las mayores temperaturas se encuentran entre las 15:00 y las 16:00 h y las menores a las 7:00 h.

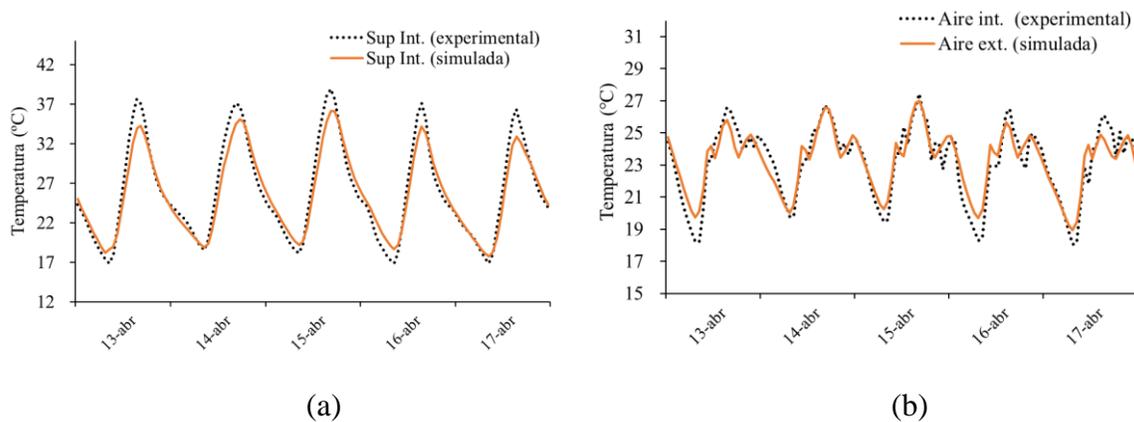


Figura 4.8 Temperatura, techo de concreto aire acondicionado: (a) Superficie interior de la losa (b) Aire interior.

En la Tabla 4.5 se muestra el MBE, los valores mínimos y máximos de la temperatura de la superficie interior del techo y del aire interior. De las simulaciones se encontró un error de 1.25 % para la temperatura en la superficie interior y de 0.46 % para la temperatura del aire dentro de la cavidad.

Tabla 4.5 Mínimos y máximos de temperatura, módulo techo de concreto con aire acondicionado.

Variable	Datos	Máximo	Mínimo	Promedio	MBE (%)
Temp. superf. interior	Experimentales	38.9	16.9	25.9	1.25
	Simulados	36.2	17.7	25.6	
Temp. aire interior	Experimentales	27.4	18	23.1	0.46
	Simulados	27	18.9	23.2	

4.5. VALIDACIÓN DE UN TECHO VERDE

El techo verde se colocó sobre uno de los módulos de prueba, este se compone de cuatro capas: como estructura base se tiene la losa de concreto la cual se recubrió de un

impermeabilizante antiraíz, en seguida se encuentra el sustrato y finalmente la vegetación, todo esto se encuentra contenido con un pretil de lámina de 15 cm de altura.

4.5.1. Aire acondicionado

El módulo con techo verde cuenta con un equipo de aire acondicionado para mantener la temperatura interior constante a 25 °C. Los datos experimentales para la validación son los obtenidos por Chagolla et al. (2017) y se compararon la temperatura en la superficie interior de la losa y la del aire interior de la cavidad.

Datos de clima para validación

Las variables climáticas que se usaron en la simulación de la cavidad con techo verde son las mismas presentadas en la sección 4.4.2. donde se validó un techo tradicional con aire acondicionado; éstas variables son la temperatura ambiente, la radiación solar, la humedad relativa y la velocidad del viento. El comportamiento de éstas variables se puede apreciar en la Figura 4.7 que corresponde al periodo del 13 al 17 de abril del 2017.

Descripción del techo verde

El balance de energía de un techo verde requiere de ciertas variables que involucran las características y propiedades de la vegetación y sustrato. Para la vegetación son la altura, el LAI, resistencia estomática (RE), reflectividad y emisividad de las hojas; para el suelo son la profundidad, conductividad, densidad, calor específico, emisividad, absorbancia, máximo y mínimo contenido volumétrico de humedad. De estas variables se conoce el valor de algunas por la literatura o por mediciones realizadas por Chagolla et al. (2017) y fue establecido su valor en el software para la simulación. Para conocer el valor de las variables libres o desconocidas se realizaron varias simulaciones donde se varió su valor en un intervalo determinado establecido por la literatura, esto para que los resultados se ajustaran con los datos experimentales y así tener los parámetros de un techo verde adecuados para la simulación de viviendas.

En la Figura 4.9 se muestran las simulaciones ejecutadas y el orden de las variables que se fueron variando, el color verde indica los valores seleccionados para la simulación final del módulo con techo verde. En primer lugar, se tiene el LAI donde se realizaron diez simulaciones, una vez obtenido el primer valor de una de las variables libres, se procedió a variar el segundo parámetro que fue la RE, ésta se encontró haciendo seis simulaciones. Después se encontró la reflectividad con cuatro simulaciones y por último se obtuvo la emisividad variando ésta propiedad en tres simulaciones; dando un total de 23 simulaciones que se realizaron para encontrar los valores de las variables libres que se tenían de un techo verde.

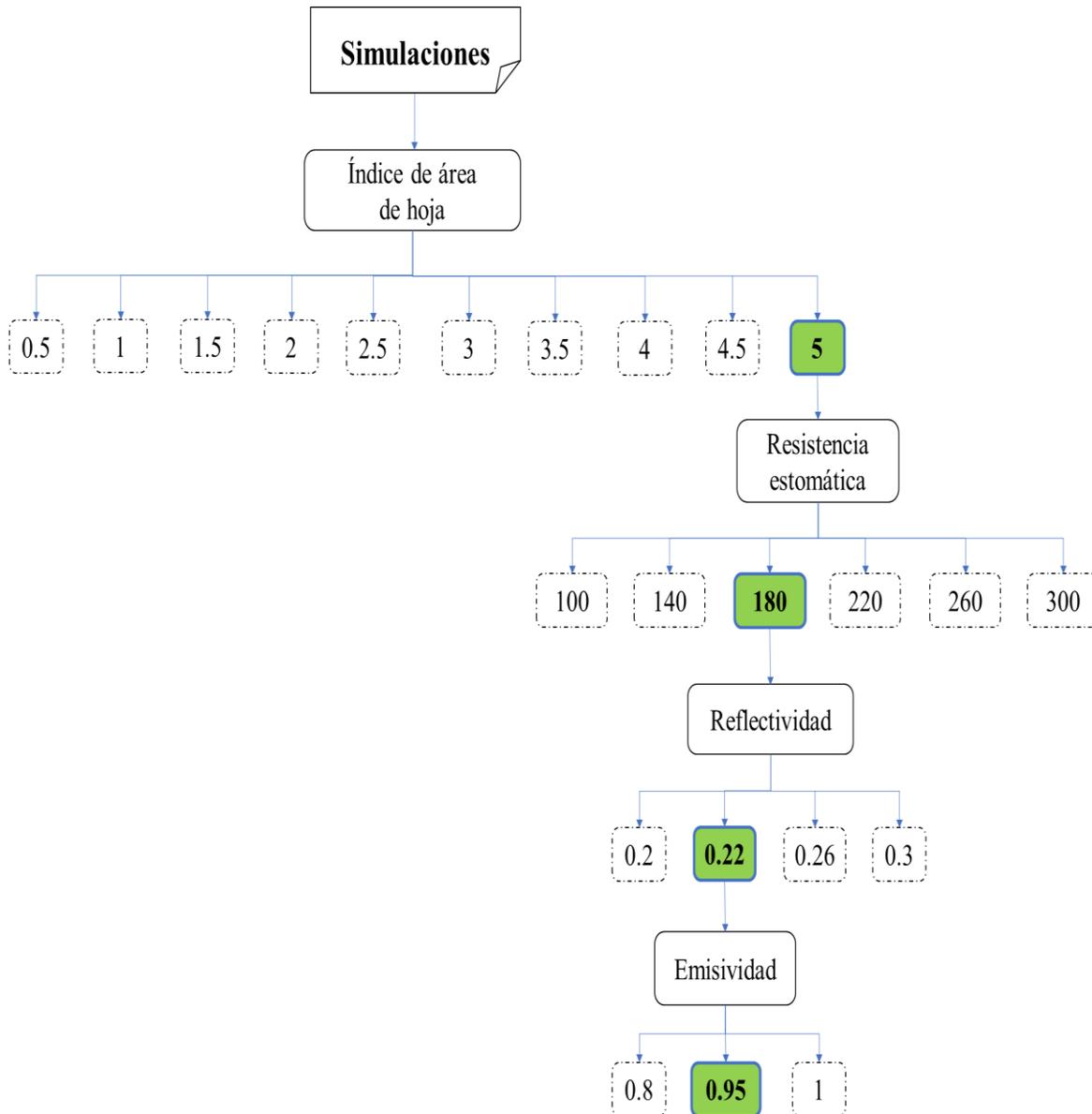


Figura 4.9 Proceso de las simulaciones.

De las variables (índice de área de hoja, resistencia estomática, reflectividad, emisividad) que se variaron la que mayor impacto tiene en un techo verde es el LAI, este permite estimar la capacidad de captura de radiación y la capacidad fotosintética del follaje. He et al. (2017) realizaron un estudio donde señalan la importancia del índice de hoja, de ella depende principalmente la ganancia o pérdida de energía de la edificación, por lo que se inició variando este parámetro. El rango de esta variable se encuentra entre 0.001 a 5 dentro de la estructura de EnergyPlus; la simulación se comenzó con un valor de 0.5, este valor representa una vegetación escasa y poco densa, los resultados de la simulación mostraron temperaturas en la superficie exterior de la losa y del aire interior muy similares al módulo con techo de concreto, esto a pesar de que tenía una cubierta verde, pero al ser muy escasa la vegetación

el mayor porcentaje de radiación llegó al sustrato y por conducción pasó a la losa y al interior del módulo, es por ello que se descartó este valor. Se hicieron más simulaciones variando el LAI hasta que se encontró el valor óptimo de 5, este representa una vegetación densa que cubre el 100% del área del techo.

La segunda característica que se varió es la resistencia estomática (RE), esta representa la resistencia a la transferencia de vapor por las estomas, que son pequeñas aberturas en la superficie de las hojas que les permiten intercambiar agua y gases con el ambiente. El rango de la RE varía de entre 50 y 300 s/m y el valor que mejor se ajustó a los datos experimentales fue 180 s/m, esto concuerda con los valores reportados por Sailor en 2008 y Gagliano et al. en 2016a para la vegetación *Aeonium subplanum* (suculentas).

La tercera propiedad libre que se tenía era la reflectividad de las hojas, el intervalo de variación del que se dispone es el software está entre 0.1 a 0.4. Los valores reportados por Chagolla et. al (2017) y Gagliano en 2015 y 2016 se encuentran en el orden de 0.2 a 0.3 para la vegetación suculentas, por lo que se hizo mayor énfasis en esos valores, de acuerdo con los autores y los resultados de la simulación, el valor de 0.22 para la reflectividad fue el que mejor se ajustó a los valores medidos.

Finalmente, se varió la emisividad de las hojas, el intervalo de la variación se encuentra entre 0.8 a 1, los resultados de la simulación muestran que esta característica no presenta cambios significativos y de acuerdo con los estudios hechos por Gagliano en 2015 y 2016 se seleccionó el valor de 0.95 para la emisividad de las hojas de las suculentas.

En la Tabla 4.6 se muestran los componentes y propiedades del techo verde que requiere el software de simulación, el sombreado color verde representa los parámetros que se encontraron.

Tabla 4.6 Parámetros de un techo verde en EnergyPlus.

Parámetros de techo verde			
	Tipo	Suculentas	
	Altura	0.08	m
Vegetación	LAI	5	
	Reflectividad hojas	0.22	
	Emisividad hojas	0.95	
	Resistencia estomática	180	s/m
	Max contenido volumétrico de humedad	0.5	
	Min contenido volumétrico de humedad	0.01	
Suelo	Profundidad	0.1	m
	Conductividad	0.25	W/mK
	Densidad	1370	kg/m ³
	Calor específico	800	J/kgK

Resultados

Para la validación del techo verde se utilizó el módulo de prueba que se encuentra ubicado en la azotea de CENIDET al cual se le instaló un sistema de aire acondicionado. En la Figura 4.10(a) se muestra el comportamiento de la temperatura en la superficie interior de la losa para el periodo de validación, se observa que la temperatura no supera los 25.5 °C en ninguno de los cinco días, esto debido a la capa de vegetación que funciona como una barrera solar y evita que la radiación llegue a la losa. La máxima diferencia de temperatura entre los datos experimentales y los simulados es de 0.9 °C y la mínima de 0.09 °C. Otro parámetro que se comparó es la temperatura del aire interior y su comportamiento se aprecia en la Figura 4.10(b), la cual muestra que; la diferencia máxima de temperatura entre los dos tipos de datos es de 1°C y en promedio de 0.1 °C. A lo largo del periodo de validación la temperatura es menor a 26 °C manteniéndose así de 11:00 a 23:00 h aproximadamente. La temperatura más baja se presentó el día 17 de abril a las 7:00 h.

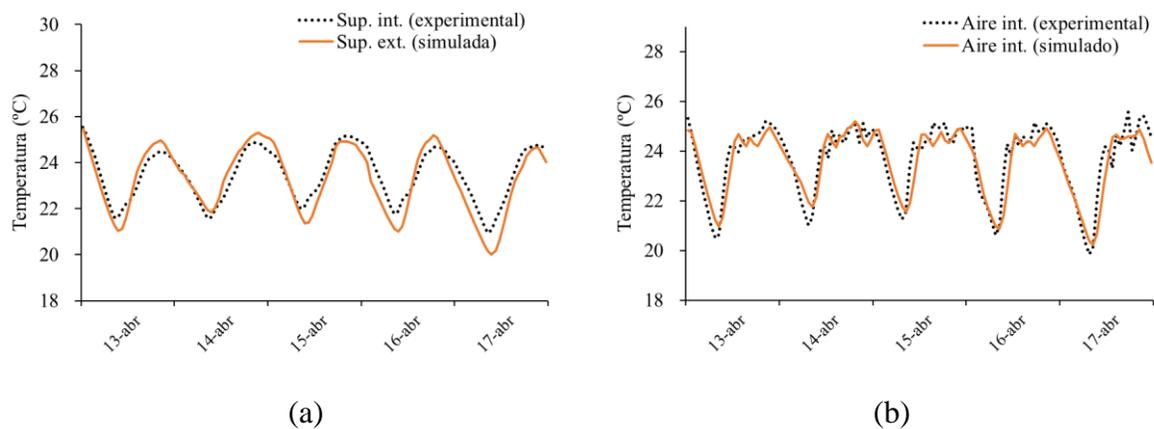


Figura 4.10 Temperatura, techo verde aire acondicionado: (a) Superficie interior de la losa, (b) Aire interior.

En la Tabla 4.7 se muestra el MBE, así como los valores mínimos y máximos de la temperatura de la superficie interior del techo y del aire interior. De las simulaciones se obtuvo un error de 0.85% para la temperatura en la superficie interior y de 0.50% para la temperatura del aire dentro de la cavidad respecto a los datos experimentales.

Tabla 4.7. Mínimos y máximos de temperatura, módulo techo verde con aire acondicionado.

Variable	Datos	Máximo	Mínimo	Promedio	MBE (%)
Temp. superf. interior	Experimentales	25.5	20.9	23.4	0.85
	Simulados	25.4	20	23.2	
Temp. aire interior	Experimentales	25.5	19.8	23.6	0.50
	Simulados	25.7	20.8	23.7	

CAPÍTULO 5. CASOS DE ESTUDIO

En este capítulo se describen las dos edificaciones estudiadas: la *vivienda de referencia* que se utilizó como base para la elaboración de indicadores de la NOM-020-ENER-2011 y la *vivienda particular*, así mismo, se describe la ubicación de estas, la distribución de las zonas térmicas y la franja de confort, la información climática de un año de simulación, los planos, los materiales y propiedades de la envolvente. Por último, se mencionan los parámetros de simulación para los casos de estudio.

5.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La República Mexicana está situada en el continente americano, en América Central. Su extensión territorial es de 1,964,375 km², las coordenadas que enmarcan el territorio son al Norte: 32° 43' 06'' latitud norte, en la frontera con los Estados Unidos. Al Sur: 14° 32' 27'' latitud norte en la desembocadura del río Suchiate, frontera con Guatemala. Al Este: 86° 42' 36'' longitud oeste, en el extremo suroeste de la Isla Mujeres. Al Oeste: 118° 27' 24'' longitud oeste, en la Punta Roca Elefante de la Isla de Guadalupe, en el Océano Pacífico. La división política de México se compone de 32 entidades federativas, siendo la capital del país la CDMX. (SRE, 2014).

Morelos es uno de los 32 estados de México, representando el 0.2% del territorio nacional. Se encuentra localizado en el centro del país, colindado con Guerrero, el Estado de México, CDMX y Puebla. El estado está conformado por 33 municipios siendo el más extenso Tlaquiltenango y más pequeño Zacatepec. Con respecto al clima, el 87% de su territorio presenta clima cálido subhúmedo; 11% templado húmedo localizado en la parte norte del estado; 2% templado subhúmedo el cual se localiza hacia la parte noreste; también se presenta una pequeña zona con clima frío. La temperatura media anual es de 21.5 °C y la precipitación promedio anual es 900 mm con lluvias sobre todo en verano, en la Figura 5.1 se aprecia la distribución de climas y la ubicación de cada ciudad y municipio, los casos de estudio se encuentran bajo el mismo clima. (INEGI, 2013).

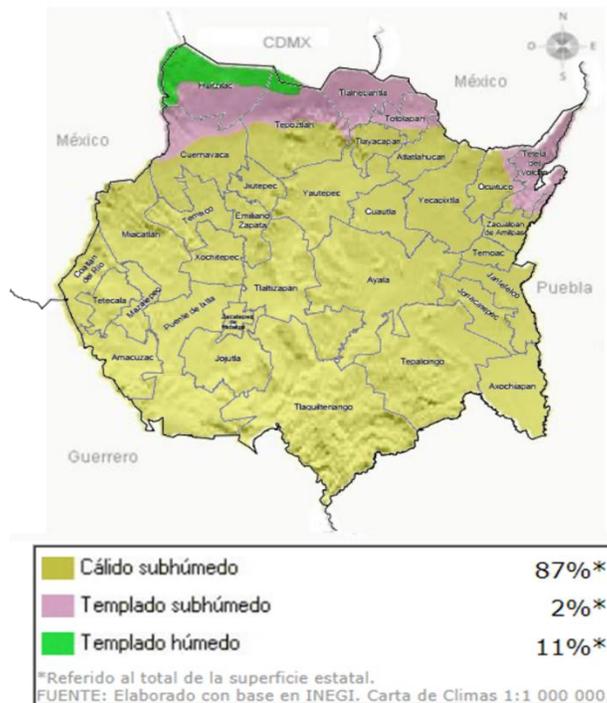


Figura 5.1 Distribución de climas en el estado de Morelos.

5.1.1. Condiciones ambientales

El comportamiento térmico de la edificación está estrechamente relacionado con la masa térmica de la envolvente y de las condiciones climáticas. Las viviendas de estudio se encuentran ubicadas en la región de clima cálido subhúmedo con lluvias en verano. Las variables más relevantes para la simulación son temperatura, humedad relativa, radiación global, velocidad y dirección del viento. Estos datos se adquirieron de una Estación Meteorológica Automática (EMA) perteneciente al sistema de monitoreo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que se encuentra ubicada en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Los instrumentos de medición tienen un intervalo de cobertura de 5 km de radio, pudiendo alcanzar hasta 10 km si no hay condiciones geográficas muy marcadas como montañas o diferente altitud con respecto al sitio donde se encuentre la estación meteorológica; la vivienda de estudio se encuentra a 6.5 km de distancia de la estación por lo que está dentro del radio de cobertura.

La estación meteorológica adquiere datos climáticos cada 10 min durante todo el año y se hacen promedios cada hora para la simulación, pues el software requiere variables climáticas horarias. El mes de mayo es el más caluroso presentando una temperatura promedio de 25.7 °C y el mes más frío corresponde a enero con una temperatura de 18.5 °C. La mayor humedad relativa se presentó en septiembre esto corresponde a uno de los meses más lluviosos, y la menor humedad se mostró en abril, uno de los dos meses con mayor temperatura y radiación, ésta última alcanzando 283.6 W/m² en julio, siendo este el mes con mayor radiación del año. En la Tabla 5.1 se presentan los promedios mensuales de las variables climáticas del año 2016 y en la Figura 5.2 se puede apreciar el comportamiento de estas variables de manera gráfica.

Tabla 5.1 Variables ambientales mensuales.

Mes	T. ambiente (°C)	HR (%)	Rad. Solar (W/m ²)	Vel. Viento (m/s)
Enero	18.5	50	185.81	2
Febrero	20.7	38	240.50	2
Marzo	22.0	45	246.27	2.2
Abril	25.1	35	281.96	2.2
Mayo	25.7	48	270.64	1.8
Junio	22.1	75	269.91	1.7
Julio	21.9	74	283.67	1.8
Agosto	21.7	80	268.37	1.7
Septiembre	21.1	84	241.69	1.6
Octubre	21.4	73	243.25	1.8
Noviembre	19.9	69	217.04	1.8
Diciembre	20.7	54	216.44	2
Prom. Anual	21.7	60	247.1	1.9

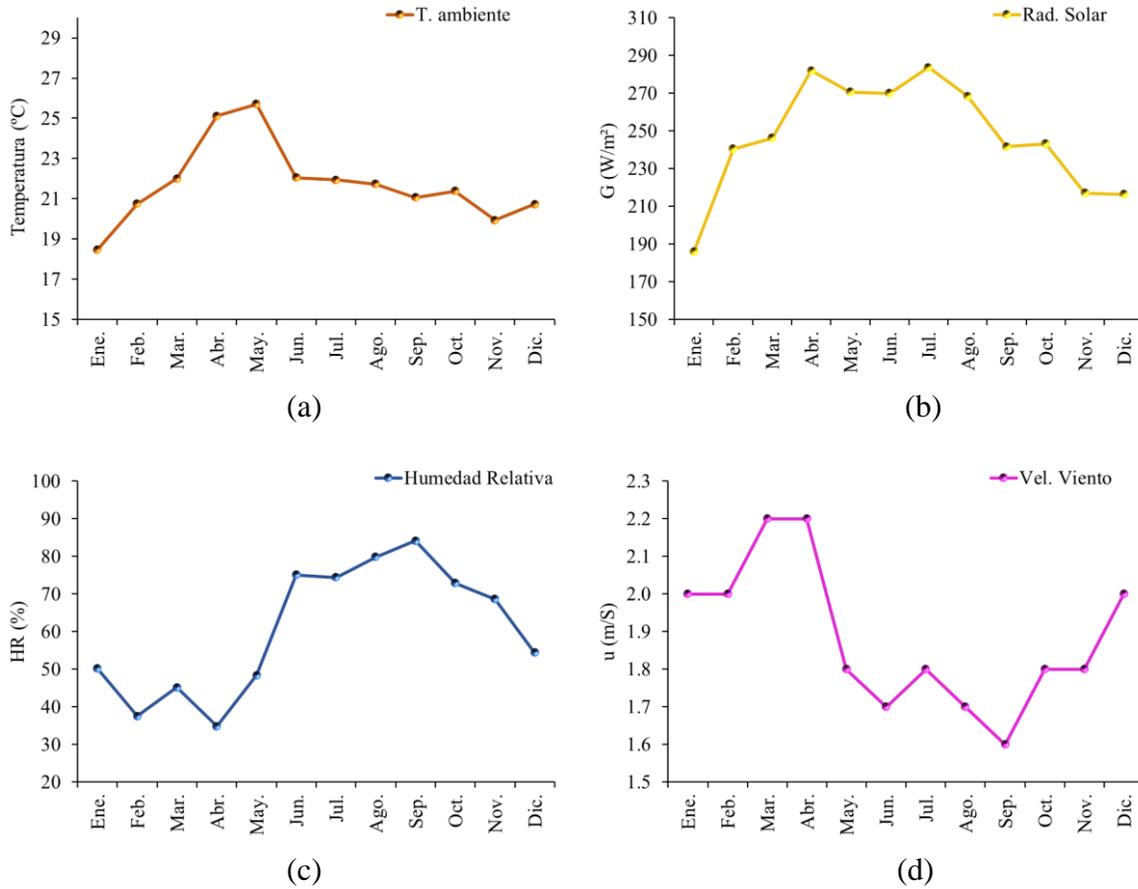


Figura 5.2 Variables climáticas: (a) Temperatura, (b) Radiación, (c) Humedad relativa, (d) Velocidad del viento.

En la Tabla 5.2 se muestran los valores máximos y mínimos promedios de cada mes del año de las cuatro variables ambientales utilizadas. Estos valores permiten conocer la variación mensual del clima y el efecto que produce en el comportamiento térmico-energético de la edificación.

Tabla 5.2 Mínimos y máximos de las variables climáticas.

Mes	T. ambiente (°C)		HR (%)		Rad. Solar (W/m²)		Vel. Viento (m/s)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Enero	10.0	30.4	7.0	95	19.0	1,017	1.4	2.5
Febrero	9.3	31.4	8.0	68	25.2	1,064	1.4	2.5
Marzo	9.0	33.8	10	98	23.5	1174	1.4	2.7
Abril	15.3	34.8	9.0	98	26.4	1,179	1.5	2.7
Mayo	16.9	35.8	10	97	29.5	1,151	1.0	2.4
Junio	15.1	30.9	27	99	32.4	1,202	1.0	2.4
Julio	15.4	29.6	29	98	31.0	1,249	1.0	2.3
Agosto	19.0	29.2	18	98	30.5	1,269	1.0	2.3
Septiembre	18.7	28.2	18	98	27.5	1,247	0.8	2.2
Octubre	18.4	28.5	5.0	99	22.6	1,178	1.0	2.2
Noviembre	10.8	30.2	22	99	16.5	1,010	1.2	2.3
Diciembre	12.5	30.1	21	100	15.0	872	1.3	2.4
Prom. Anual	14.2	31.1	15.3	95.6	24.9	1,134.3	1.2	2.4

5.2. NORMAS DE CONSTRUCCIÓN Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

En los últimos años se han creado diferentes normas y especificaciones para garantizar la correcta fabricación de materiales y el buen funcionamiento de equipo eléctrico, mecánico y de la propia construcción de edificaciones. Existen normas Extranjeras (ASTM, ASHRAE, UL, UNE, DIN)⁶, de Referencia (PEMEX, CFE)⁷, Internacionales (ISO, IEC, COPANT)⁸ y mexicanas. La Ley Federal sobre Metrología y Normalización (*LFMN*) distingue de acuerdo con su régimen de aplicación dos tipos de normas, las Normas Oficiales Mexicanas (*NOM*) de aplicación obligatoria y las Normas Mexicanas (*NMX*) de aplicación voluntaria. En México la normalización energética inicia en 1993, siendo la finalidad de las *NOM* establecer las características y procedimientos que permitan proteger y promover el mejoramiento y preservación de los recursos naturales.

Para el caso de edificaciones residenciales existen normas que regulan la construcción y la eficiencia térmica de su envolvente. Uno de los estatutos es el Código de Edificación de Vivienda (CEV) emitido en 2007 por la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) que busca establecer la calidad y seguridad física de las construcciones a través de la utilización de productos y servicios normalizados y certificados. Así mismo el estado de Morelos cuenta con un Reglamento de Construcción de viviendas residenciales, éste al igual que el código de CONAVI especifican los espacios y dimensiones mínimas que debe tener la edificación para ser habitable y proporcionar seguridad. Ambos reglamentos especifican una altura mínima de 2.4 m entre pisos, en la Tabla 5.3 se pueden apreciar estos espacios y dimensiones. (Gobierno del Estado de Morelos, 2012).

Tabla 5.3 Espacios mínimos de la edificación de Morelos.

Espacio habitable	CONAVI	Reglamento de Construcción: Morelos
	Área mínima (m ²)	Área mínima (m ²)
Recámara	7.29	7.30
Comedor	4.41	4.00
Cocina	3.30	3.00
Baño	2.73	3.00

Dentro de la eficiencia energética de la vivienda se cuenta con la norma NOM-020-ENER-2011 publicada en 2011 por el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos (*CCNNPURRE*), la cual tiene por

⁶ ASTM: American Society of Testing Materials; ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; UL: Underwriters Laboratories; UNE: Una Norma Española; DIN: Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización).

⁷ PEMEX: Petróleos Mexicanos; CFE: Comisión Federal de Electricidad.

⁸ ISO: International Organization for Standardization; IEC: International Electrotechnical Commission; COPANT: Comisión Panamericana de Normas Técnicas.

objetivo limitar la ganancia de calor de las edificaciones residenciales a través de su envolvente para racionalizar el uso de la energía en los sistemas de enfriamiento manteniendo el confort térmico de sus habitantes, para ello se optimiza el diseño, por ejemplo utilizando materiales aislantes térmicos.

En nuestro país las viviendas se pueden clasificar dependiendo de su dimensión y materiales de construcción, estas pueden ser populares, de interés social, media residencial y residencial. Para la realización de este estudio se tomaron las viviendas de interés social que tienen un área de construcción de 61-90 m² y pueden ser de una o dos plantas. Una de las características sobresalientes de este tipo de viviendas es que se construyen en serie, se dan créditos para su adquisición y están enfocadas al extracto social medio y bajo. A continuación, se describe la edificación base y las zonas térmicas que la conforman. (CONAVI, 2010).

5.3. VIVIENDA DE REFERENCIA

Una de las viviendas residenciales que se utilizaron para la realización del presente estudio, es la edificación utilizada para la elaboración de indicadores de la norma NOM-020-ENER-2011, llamada edificación de referencia o edificación base, la cual consta de un edificio típico de interés social de dos pisos con características que se encuentran en todo el país. Esta norma supervisa el presupuesto energético de las edificaciones, proporcionando una metodología para calcular las ganancias de calor de la envolvente en el edificio base, que es la edificación existente y el edificio proyectado, que es el edificio que se pretende construir, este es idéntico en geometría, orientación, colindancia, dimensiones y elevación, pero diferente en las características de la envolvente. Una vez calculadas las ganancias en los dos edificios se comparan los totales y se determina si el edificio proyectado cumple con los estatutos de eficiencia energética comparándose con el de referencia. De esta manera la norma brinda una guía para la optimización de la envolvente obteniéndose como beneficios el ahorro de energía por la disminución de la capacidad de los equipos de enfriamiento. (Heard 2007). En la Tabla 5.4 se muestra la descripción de la vivienda base.

Tabla 5.4. Descripción de la edificación de referencia.

Descripción	Valor
Número de pisos	2
Área de la envolvente	160 m ²
Área del techo	54.3 m ²
Altura de los pisos	2.5 m
Reflectancia de las paredes	0.1
Reflectancia del techo	0.1-0.9

La vivienda es de dos niveles (planta baja y planta alta) con un área total de la envolvente de 160 m², para el techo de 54.3 m², la altura entre los pisos es de 2.5 m, la fachada principal está orientada hacia el norte con acceso principal hacia el oeste, en el este y oeste se

encuentran otras viviendas con las mismas características y al sur no se hace contacto con otra vivienda pues se encuentra un patio. En la Figura 5.3 se muestran los planos de la vivienda.

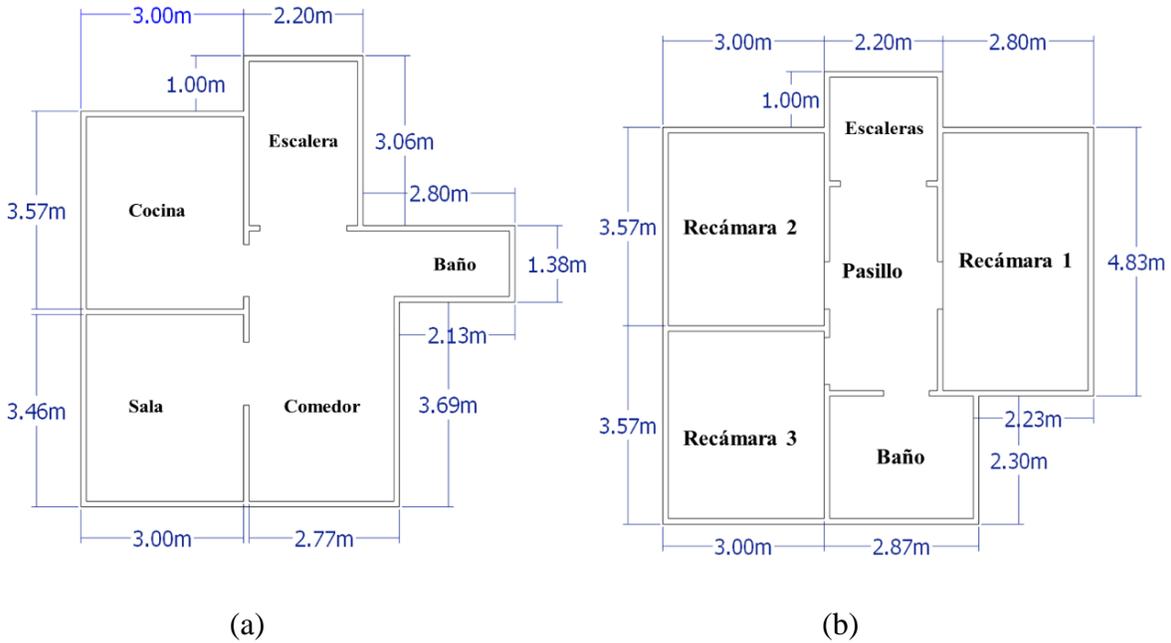


Figura 5.3 Planos de la vivienda de referencia: (a) Planta baja, (b) Planta alta.

Los muros de la vivienda son de ladrillo recubiertos de mortero al exterior y yeso en el interior, el techo y pisos son de concreto, los pisos recubiertos de azulejo y el techo de yeso e impermeabilizante. En la Tabla 5.5 se presentan los materiales de construcción ordenados del interior al exterior, las dimensiones de cada una de las capas de la envolvente y sus propiedades termofísicas.

Tabla 5.5. Materiales de construcción y propiedades termofísicas de la vivienda de referencia.

Elemento	Material	Espesor (cm)	Cp (J/kgK)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)
Piso nivel del suelo	Mosaico	1	795	1.136	2600
	Concreto	10	840	1.74	2300
Piso superior	Mosaico	1	795	1.136	2600
	Concreto	10	840	1.74	2300
	Yeso	1.5	1000	0.372	800
Muros	Yeso	1.5	1000	0.372	800
	Ladrillo	14	800	0.81	1600
	Mortero	1.5	837	0.72	1890
Techo	Yeso	1.5	1000	0.372	800
	Concreto	10	840	1.74	2300
	Impermeabilizante	2	800	0.17	1127

Fuente: librería de EnergyPlus.

La vivienda cuenta con ventanas de diferentes dimensiones, éstas tienen marco de aluminio, vidrios claros de 4 mm de espesor de una sola hoja y en algunos de los muros tienen más de una ventana, la fachada principal cuenta con cuatro ventanas, la parte trasera con tres y el lado derecho e izquierdo con una y las puertas son de madera. Los acristalamientos representan el 7.3 % del total de los muros, en la Tabla 5.6 se muestran las características de las aberturas y su ubicación, y en la Tabla 5.7 se muestran las propiedades termofísicas del vidriado.

Tabla 5.6 Descripción de las aberturas de la fachada, vivienda de referencia.

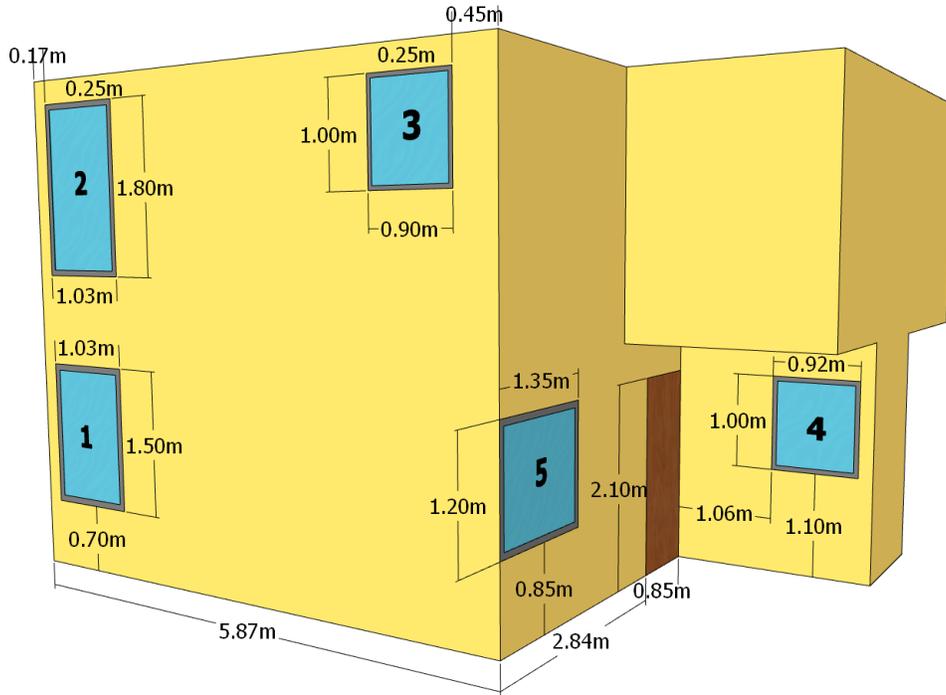
Fachada	Descripción	Material	Área m ²
Frente	Ventana 1	Vidrio	1.54
	Ventana 2	Vidrio	1.85
	Ventana 3	Vidrio	0.90
	Ventana 4	Vidrio	0.92
Lado derecho	Puerta principal	Madera	1.78
	Ventana 5	Vidrio	1.62
Trasera	Puerta trasera	Madera	1.78
	Ventana 6	Vidrio	1.68
	Ventana 7	Vidrio	1.68
	Ventana 8	Vidrio	1.80
Lado izquierdo	Ventana 9	Vidrio	0.75

Tabla 5.7 Propiedades termofísicas del vidriado, vivienda de referencia.

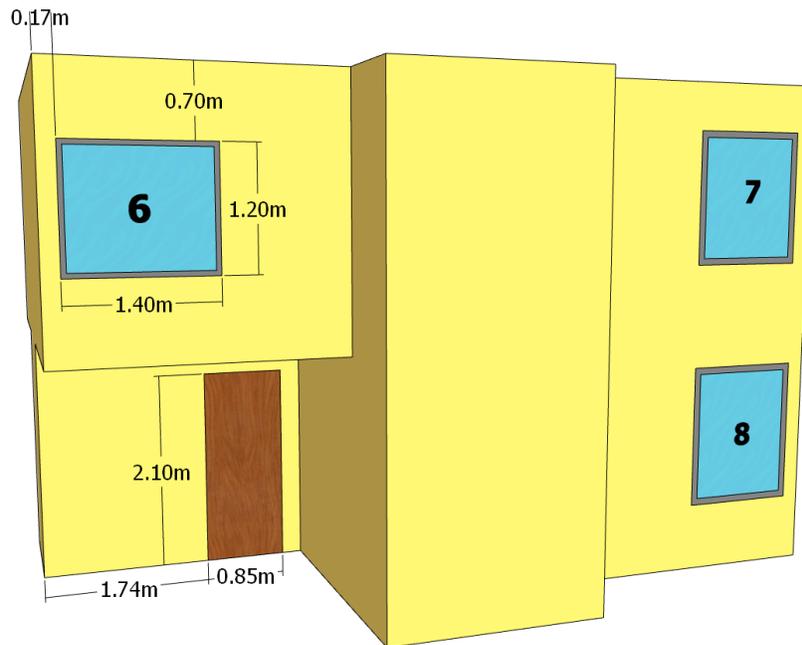
Propiedades del vidrio			
Térmicas	Espesor (mm)		4
	Conductividad (W/mK)		1
Ópticas	Espectro solar	Transmitancia	0.816
		Reflectancia exterior	0.075
		Reflectancia interior	0.075
	Espectro visible	Transmitancia	0.892
		Reflectancia exterior	0.081
		Reflectancia interior	0.081
	Espectro infrarrojo	Transmitancia	0
		Emisividad exterior	0.84
		Emisividad interior	0.84

Fuente: librería de EnergyPlus.

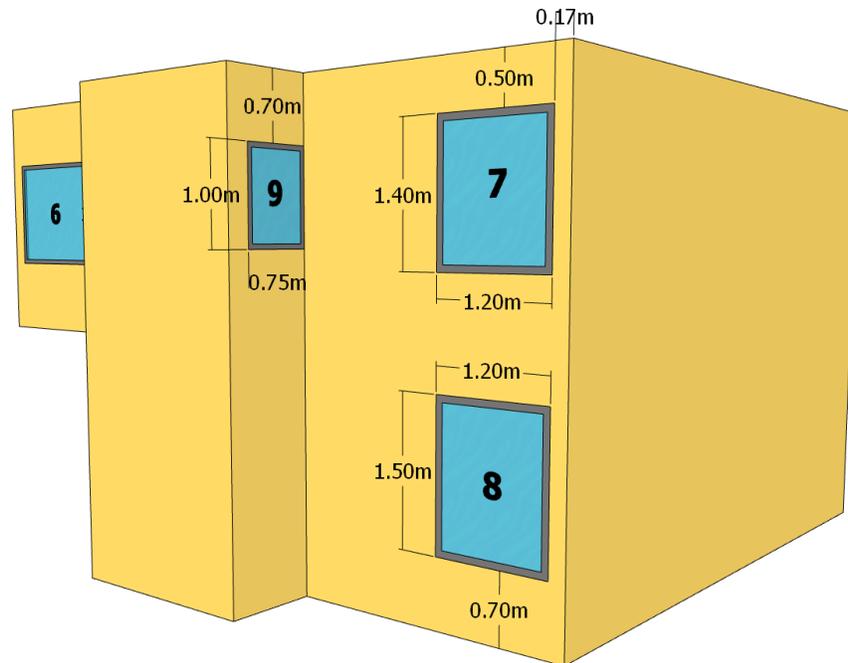
En la Figura 5.4 se aprecian las dimensiones de la vivienda y la posición de las ventanas y en la Figura 5.5 se muestra el conjunto de viviendas.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.4 Vivienda de referencia. (a) Frente y lado derecho, (b) posterior, (c) posterior y lado izquierdo.

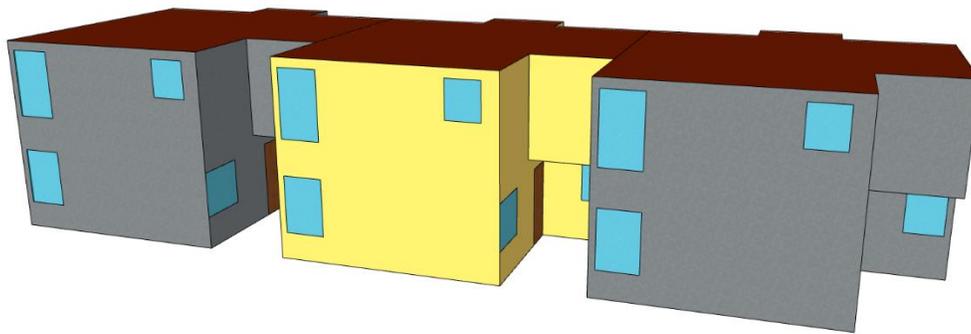
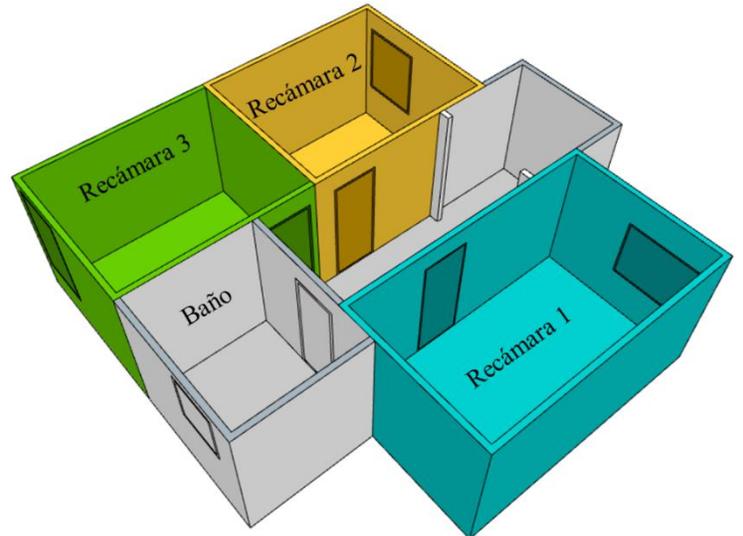


Figura 5.5 Conjunto de viviendas (vivienda de referencia).

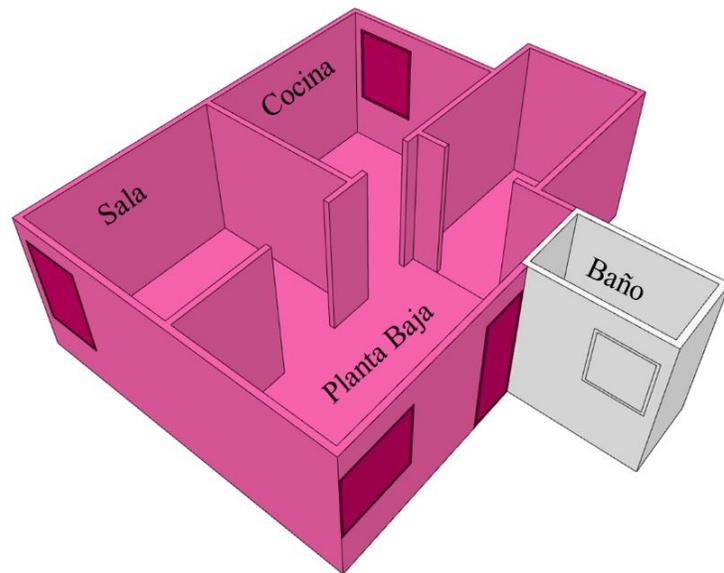
5.3.1. Zonas térmicas

La vivienda es de dos plantas, la planta baja tiene un área de construcción de 40 m^2 y está dividida en tres espacios principales: cocina (9.5 m^2), comedor (15 m^2) y sala (9.5 m^2) y adicionalmente tiene un pequeño baño y las escaleras hacia el segundo piso. La planta alta tiene tres espacios: un dormitorio principal (12 m^2) y dos dormitorios más de las mismas dimensiones (9.5 m^2), el baño (5.5 m^2) y pasillo (8 m^2) son espacios pequeños y de menor importancia. Así pues, la vivienda se divide en zonas térmicas para identificar el comportamiento de la temperatura del aire en cada uno de los espacios, tanto con un sistema

de acondicionamiento como en evolución libre. La planta baja (PB) en su totalidad se considera como una zona térmica, puesto que los espacios son abiertos, no hay puertas que los dividan y no hay ganancias térmicas interiores, por lo que se puede considerar que la temperatura es uniforme. La planta alta (PA) se dividió en tres zonas térmicas: recámara 1 (R1), recámara 2 (R2) y recámara 3 (R3). En la Figura 5.6 se muestra la distribución de éstas zonas.



(a)



(b)

Figura 6.6 Zonas térmicas de la vivienda base: a) Planta alta, b) Planta baja.

5.4. VIVIENDA PARTICULAR

Para el estudio se utilizaron dos viviendas, la vivienda base especificada anteriormente y la vivienda particular se ubica en el fraccionamiento *Los Almendros* ubicado en la calle del Ferrocarril s/n, Colonia Modesto Rangel, en Emiliano Zapata, Morelos. Cuenta con dos niveles donde la altura de los pisos es de 2.5 m, el área de la envolvente de 109.5 m² y la del techo de 31 m². La fachada y acceso principal están orientadas hacia el norte, en el este y oeste se encuentran otras viviendas vecinas con las mismas características, al sur no se hace contacto con otra vivienda pues se encuentra un patio de servicio con una pared a tres m de distancia de la fachada trasera. En la Tabla 5.8 se muestra la descripción de la vivienda particular y los planos de la construcción se pueden apreciar en la Figura 5.7.

Tabla 5.8 Descripción de la edificación particular.

Descripción	Valor
Número de pisos	2
Área de la envolvente	109.5 m ²
Área del techo	31 m ²
Altura de los pisos	2.5 m
Reflectancia de las paredes	0.1
Reflectancia del techo	0.1-0.9

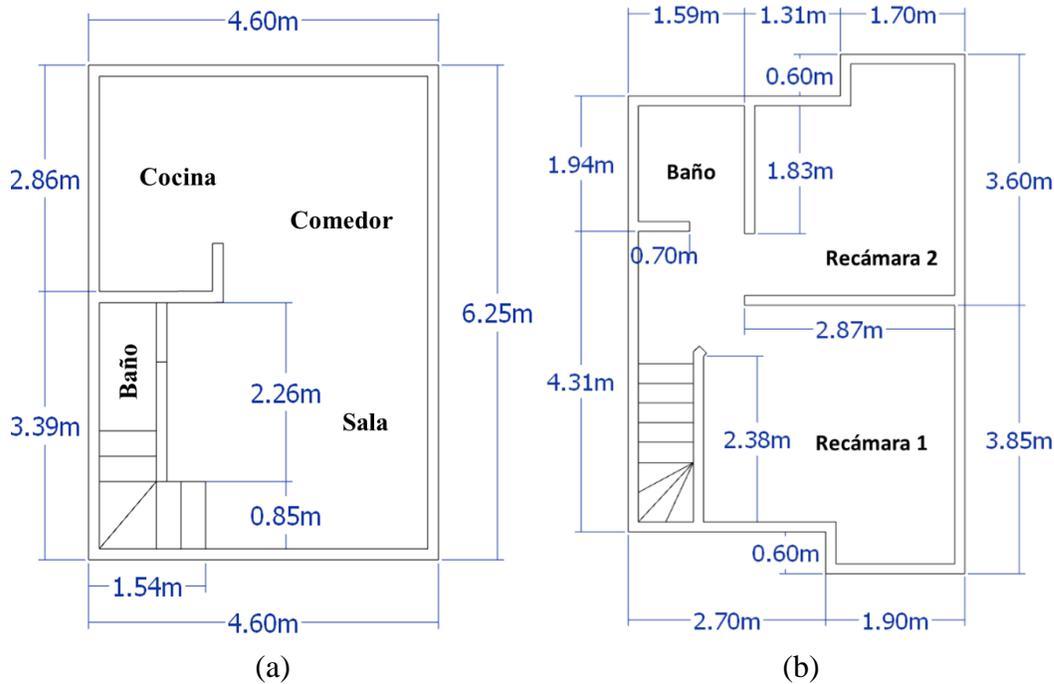


Figura 5.7 Planos de la vivienda particular: (a) Planta baja, (b) Planta alta.

Los muros de la vivienda son de block hueco recubiertos de concreto al exterior y yeso en el interior, el techo y pisos son de concreto, los pisos recubiertos de azulejo y el techo de yeso e impermeabilizante al exterior. En la Tabla 5.9 se presentan los materiales de construcción ordenados del interior al exterior, las dimensiones de cada una de las capas de la envolvente y sus propiedades termofísicas.

Tabla 5.9 Materiales de construcción y propiedades termofísicas, vivienda particular.

Elemento	Material	Espesor (cm)	Cp (J/kgK)	λ (W/mK)	ρ (kg/m3)
Piso nivel del suelo	Azulejo	1	795	1.136	2600
	Concreto	10	840	1.740	2300
Piso superior	Azulejo	1	795	1.136	2600
	Concreto	10	840	1.740	2300
	Yeso	1	1000	0.372	800
	Yeso	1	1000	0.372	800
Muros	Block hueco	12	1000	0.510	1400
	Concreto	1	840	1.740	2300
Techo	Impermeabilizante	0.35	800	0.17	1127
	Concreto	10	840	1.740	2300
	Yeso	1	1000	0.372	800

Fuente: librería de EnergyPlus.

La vivienda cuenta con tres ventanas en la fachada frontal y con 4 en la fachada trasera, estas tienen marco de aluminio y cristal claro de 3 mm de espesor, la ventana más grande es de 3 m² y la más pequeña de 0.32 m², las dos puertas son de prefabricado de tambor sin boquilla, las ventanas representan el 8% del total de los muros, en la Tabla 5.10 se muestran las características de las aberturas y su ubicación, mientras que la Tabla 5.11 se observan las propiedades termofísicas de los cristales.

Tabla 5.10 Descripción de las aberturas de la fachada, vivienda particular.

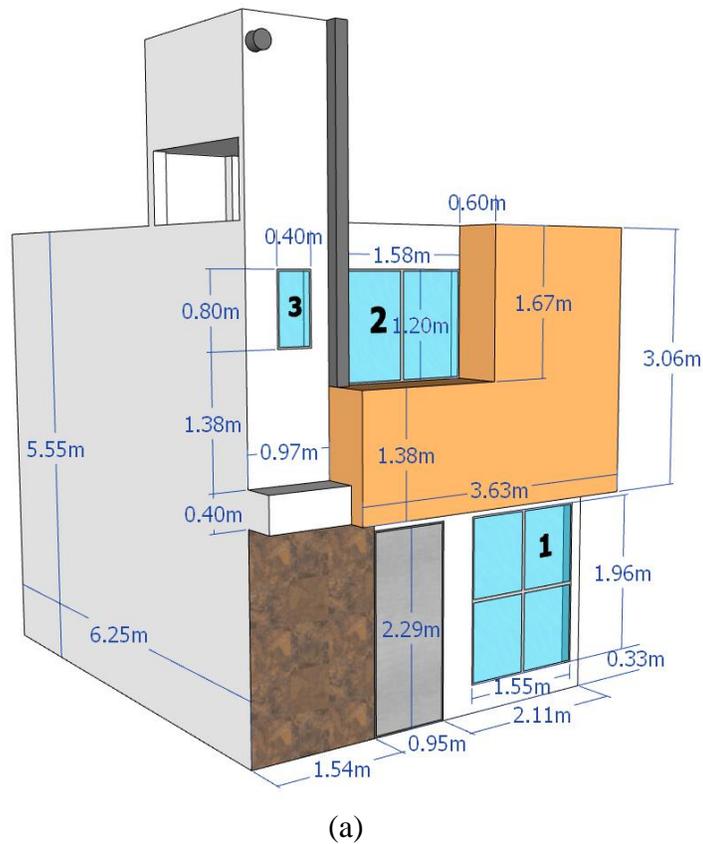
Fachada	Descripción	Material	Área m ²
Frente	Ventana 1	Vidrio	3
	Ventana 2	Vidrio	1.9
	Ventana 3	Vidrio	0.32
	Puerta delantera	Prefabricado de tambor	2.18
Trasera	Puerta trasera	Prefabricado de tambor	1.9
	Ventana 4	Vidrio	1.76
	Ventana 5	Vidrio	0.6
	Ventana 6	Vidrio	2
	Ventana 7	Vidrio	0.36

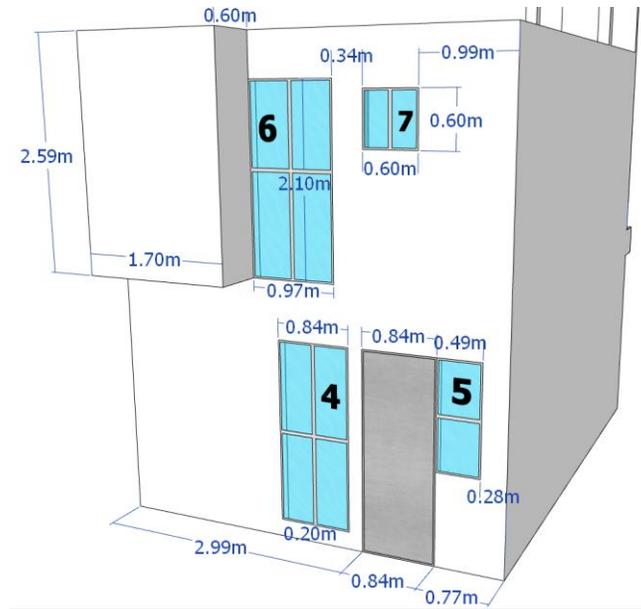
Tabla 5.11 Propiedades termofísicas del vidriado, vivienda particular.

Propiedades del vidrio			
Térmicas		Espesor (mm)	3
		Conductividad (W/mK)	1
Ópticas	Espectro solar	Transmitancia	0.816
		Reflectancia exterior	0.075
		Reflectancia interior	0.075
	Espectro visible	Transmitancia	0.892
		Reflectancia exterior	0.081
		Reflectancia interior	0.081
Espectro infrarrojo	Transmitancia	0	
	Emisividad exterior	0.84	
	Emisividad interior	0.84	

Fuente: librería de EnergyPlus.

En la Figura 5.8 se aprecian las dimensiones de la vivienda y en la Figura 5.9 se muestra el conjunto de viviendas.





(b)

Figura 5.8 Vivienda particular. (a)Frente (b)Posterior.

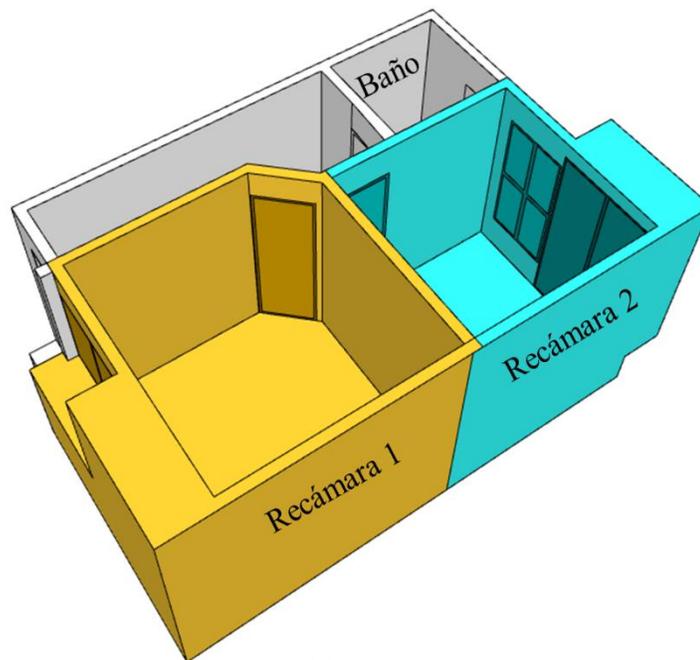


Figura 5.9 Conjunto de viviendas (vivienda particular).

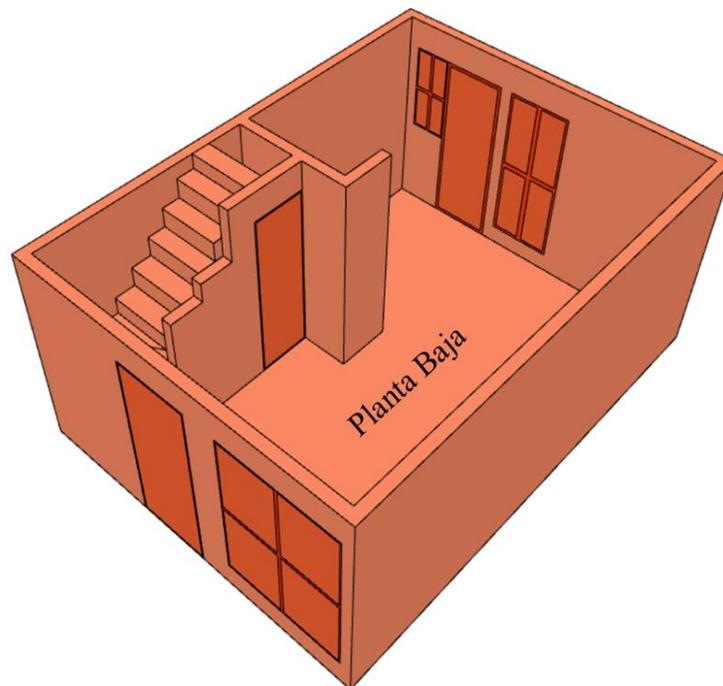
5.4.1. Zonas térmicas

La planta baja es un espacio abierto de 26.63 m² donde se encuentra la sala, comedor, cocina, un baño pequeño y las escaleras hacia el segundo piso. La planta alta tiene dos espacios: un dormitorio principal (13.74 m²) y otro de (8.87 m²) y el baño (2.32 m²). La vivienda se divide en tres zonas térmicas, la planta baja (PB) en su totalidad se considera como una zona térmica

y la planta alta (PA) se dividió en dos zonas térmicas: recámara 1 (R1) y recámara 2 (R2). En la Figura 5.10 se muestra la distribución de éstas zonas.



(a)



(b)

Figura 5.10 Zonas térmicas de la vivienda particular: (a) Planta alta, (b) Planta baja.

5.5. TEMPERATURA DE CONFORT

La temperatura de confort o neutra es la temperatura en la que el cuerpo humano siente una sensación agradable, sin calor o frío. Esta temperatura se busca todo el día y durante todo el año para que los habitantes realicen sus actividades diarias de manera más cómoda, es por ello la importancia en el diseño de la edificación y/o en el uso de sistemas pasivos de climatización. Dos de los parámetros más importantes relacionados con la obtención de la temperatura neutra son, la temperatura ambiente y la humedad relativa del lugar. De esta manera uno de los métodos para determinar la zona de confort es el método adaptativo, que involucra directamente la temperatura ambiente. Este método toma en cuenta el tipo de vestimenta, calor metabólico, actividades como abrir una ventana, uso de cortinas, ventilación o abanicos, permitiendo de esta manera que el individuo se adapte a determinada zona.

Para determinar la zona de confort en este caso de estudio se decidió por el método adaptativo propuesto por Nicol en 2004, el cual está enfocado a climas cálido húmedos; es un modelo lineal que predice la temperatura de confort para el interior de edificaciones por medio de estudios de campo, donde se toman en cuenta aspectos referentes al clima cálido, como la temperatura ambiente, el tipo de vestimenta y las actividades que se realicen. Teniendo en cuenta estos factores, se determina la temperatura de confort como en la Ecuación 2.3.

Si se requiere calcular la temperatura de confort para una semana determinada se debe usar la temperatura promedio de esa semana o si se requiere la temperatura de confort para todo un mes, se tomará la temperatura promedio mensual. Así mismo la temperatura de la zona de confort o intervalo de confort se obtiene sumando o restando 2 °C a la temperatura neutra, así se tienen los límites inferior y superior de la zona, esto corresponde al 10% de posible insatisfacción de las personas reportado en los estudios de campo.

Para obtener la temperatura de confort se usó el promedio mensual de la temperatura ambiente que se obtuvo de la estación meteorológica del IMTA, en la Tabla 5.12 se presenta la zona de confort térmico que se obtiene con la temperatura óptima, máxima y mínima.

Tabla 5.12 Temperatura de confort.

Mes	T. ambiente (°C)	T. mínima	T. óptima	T. máxima
Enero	18.5	20.8	22.8	24.8
Febrero	20.7	22.0	24.0	26.0
Marzo	22.0	22.7	24.7	26.7
Abril	25.1	24.3	26.3	28.3
Mayo	25.7	24.6	26.6	28.6
Junio	22.1	22.7	24.7	26.7
Julio	21.9	22.6	24.6	26.6
Agosto	21.7	22.5	24.5	26.5
Septiembre	21.1	22.2	24.2	26.2
Octubre	21.4	22.3	24.3	26.3
Noviembre	19.9	21.5	23.5	25.5
Diciembre	20.7	22.0	24.0	26.0
Promedio	21.7	22.5	24.5	26.5

De esta manera se puede observar que la zona de confort se encuentra en promedio anual entre los 22.5 y 26.5 °C, estos valores se utilizan para especificar el set-point máximo y mínimo, y así realizar el cálculo de cargas térmicas de enfriamiento para mantener la edificación dentro de la zona de confort a lo largo de todo un año.

5.6. PARAMETROS DE SIMULACIÓN Y CONSIDERACIONES

En el presente trabajo se evalúa el comportamiento térmico y el consumo energético total de las dos edificaciones, con techo tradicional y con techo verde en evolución libre y con un set-point de acuerdo con el mes de simulación, con los datos de la Tabla 5.12. La simulación se realizó para las condiciones climáticas del año 2016, sin tomar en cuenta el índice de lluvias, las cargas internas por iluminación, personas, equipo eléctrico o alguna otra fuente de energía, ni el uso de sistemas de calefacción ya que no son necesarios por el tipo de clima de la zona donde se realiza el estudio. Las aberturas son de vidrio claro estándar, permanecen cerradas todo el tiempo y no se tienen sistemas de sombreado en ellas. La infiltración se estableció en 0.7 de acuerdo con la norma ASHRAE. Se consideran las viviendas vecinas al este y oeste con las mismas condiciones térmicas que la casa simulada, por lo que los muros de la vivienda simulada que están junto a las otras viviendas no están expuestas a las condiciones ambientales por ello se consideran adiabáticas. El riego para el techo verde se estableció cada siete días con 0.648 m³ y 1.07 m³ de agua para la vivienda particular y de referencia respectivamente. El modelo de confort que se utilizó fue el adaptativo, propuesto por Nicol en 2004 el cual permite calcular el set-point de la temperatura de confort tomando en cuenta el clima local.

Para el techo verde se utilizó la especie *Aeonium subplanum* comúnmente llamada “Suculenta”, se considera un LAI de 5, esto es, una vegetación que cubre el 100% del techo. En la Tabla 5.13 se especifican los parámetros y valores del techo verde requeridos por el software para simular las viviendas.

Tabla 5.13 Parámetros del techo verde.

Parámetros de techo verde			
Vegetación	Tipo	Suculentas	
	Altura	0.08	m
	LAI	5	
	Reflectividad hojas	0.22	
	Emisividad hojas	0.95	
	Resistencia estomática	180	s/m
	Max contenido volumétrico de humedad	0.5	
Min contenido volumétrico de humedad	0.01		
Suelo	Profundidad	0.1	m
	Conductividad	0.25	W/mK
	Densidad	1370	kg/m ³
	Calor específico	800	J/kgK

Para la vegetación que se propone en este estudio y considerando las condiciones climáticas de un clima cálido subhúmedo, el mantenimiento que requiere un techo verde es mínimo; sólo se requiere de riego semanal. El módulo de prueba del techo verde se ha monitoreado por más 12 meses, en los que no se ha requerido de herbicidas, fumigantes o algún tipo de abono para el tipo de planta seleccionado (suculentas). Se decidió por esta vegetación, precisamente por su resistencia a la sequía y el bajo mantenimiento que requiere, por lo que se concluye que, al instalar un techo verde con este tipo de vegetación, el cuidado será poco, requiriendo un riego semanal.

Los sistemas de climatización se modelan considerando que tienen una capacidad ilimitada, de tal manera que pueden satisfacer cualquier demanda de calefacción y/o refrigeración, así como mantener siempre la temperatura establecida, ésta opción puede generar cargas de calefacción y/o refrigeración excesiva, sobrestimando los consumos energéticos y subestimando las horas de desconfort.

El *coeficiente de seguridad* se multiplica por la suma de las cargas de calefacción de todas las zonas, con el objetivo de establecer la capacidad total recomendada del sistema de calefacción. Esto ofrece la certeza de que el sistema de calefacción mantendrá condiciones de confort incluso ante condiciones de invierno extremas. El valor predeterminado es 1.25 lo que significa que el sistema se sobredimensionará en un 25%. Los sistemas de refrigeración acondicionan las zonas hasta que la temperatura media del aire alcanza la consigna especificada.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados de la simulación del comportamiento térmico-energético de las dos viviendas (referencia y particular), se detallan las temperaturas promedio y las cargas térmicas de cada zona en evolución libre y con un sistema de acondicionamiento para el año 2016. Este comportamiento se basa en la masa térmica de la envolvente, del sistema pasivo de sombreado instalado en el techo y de la infiltración de aire, pues son los aspectos que modifican la temperatura interior de la edificación.

6.1. VIVIENDA DE REFERENCIA EN EVOLUCIÓN LIBRE

Como se mencionó anteriormente, la edificación de referencia utilizada en éste trabajo es la empleada por la norma NOM-020-ENER-2011 para la realización de indicadores de eficiencia energética en la envolvente. La edificación emplea materiales de construcción convencionales como mortero, yeso, ladrillo, azulejo, vidrio claro, entre otros.

Las edificaciones generan CO₂ por el uso de electricidad, para la estimación de emisiones indirectas se emplea un factor de emisión eléctrico que cuantificar este gas. El factor de emisión varía cada año de acuerdo con la mezcla de combustibles empleados en la generación de electricidad distribuida por el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) que para el 2017 es 0.582 toneladas de CO₂/MWh. (SEMARNAT, 2018).

En la Figura 6.1 se presenta la nomenclatura que aparecerá en las figuras posteriores, se reportan resultados del comportamiento térmico-energético de la vivienda de referencia (VR) y la vivienda particular (VP), éstas en evolución libre (EL) y con aire acondicionado (AA) para los dos tipos de techo analizados, el techo tradicional (TR) y el techo verde (GR), así mismo, los espacios de las viviendas que se analizan son la planta baja (PB), la planta alta (PA) y las recámaras (R1, R2, R3), no se toma en cuenta el comportamiento en baños, pasillos y escaleras ya que son espacios de conexión y los habitantes no permanecen en ellos ni realizan actividades.

VR	Vivienda de referencia
VP	Vivienda particular
GR	Techo verde
TR	Techo tradicional
PB	Planta baja
PA	Planta alta
R1, R2, R3	Recámara 1, 2 y 3

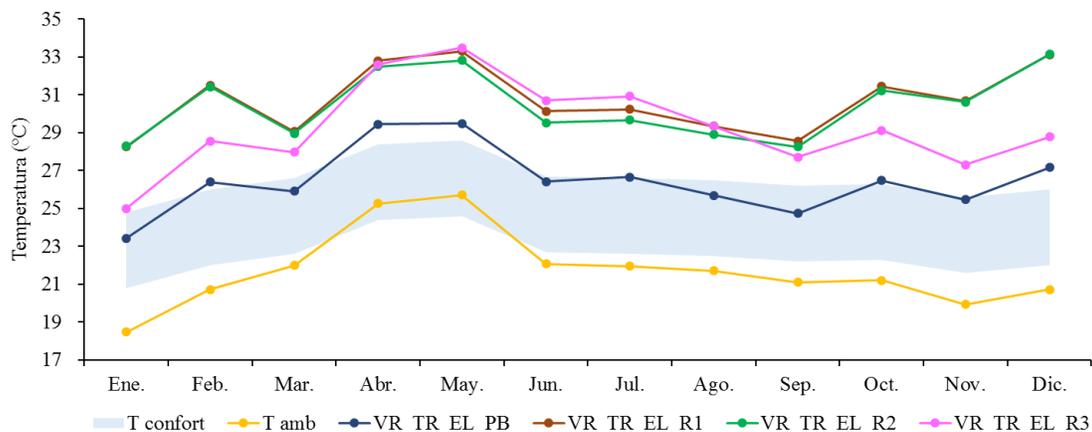
Figura 6.1 Nomenclatura para las viviendas.

Primero se discuten los resultados de la vivienda de referencia en evolución libre, se comparará el comportamiento térmico de la misma con dos tipos de techos: uno tradicional, el cual consta de una losa de concreto recubierto de una capa de impermeabilizante, y un techo verde, este es un sistema pasivo de protección solar que sirve para disminuir la temperatura al interior de la edificación y a su vez disminuir el consumo eléctrico por el uso de sistemas de aire acondicionado. El techo verde que se analizó está formado de una losa de concreto como base, una capa antiraíz, el sustrato y la vegetación. Los parámetros de simulación del techo verde se discutieron en el apartado 5.6. En seguida se describe el efecto que trae consigo el uso de un techo verde para el clima cálido subhúmedo

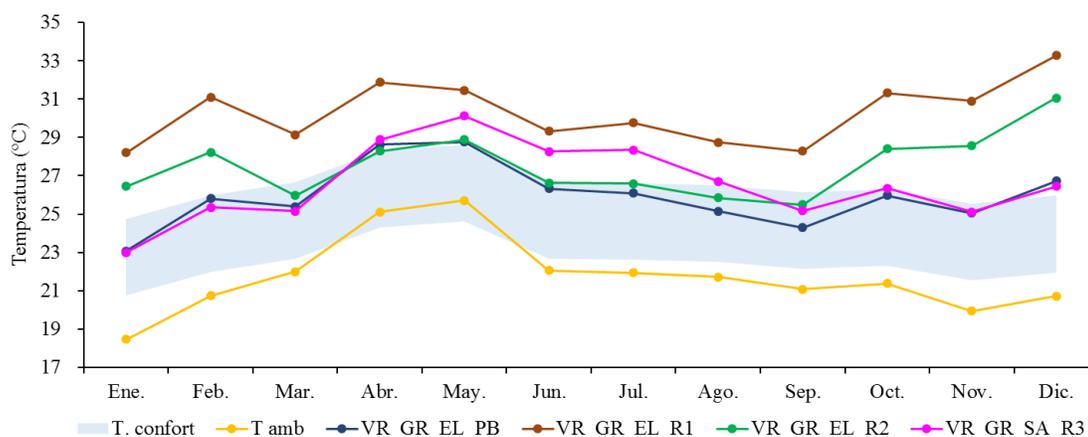
En la Figura 6.2 (a) se aprecia el comportamiento térmico anual de la vivienda de referencia en evolución libre, esta se dividió en cuatro zonas térmicas: la planta baja (VR_TR_EL_PB), la recámara de mayor área (VR_TR_EL_R1), una segunda recámara orientada hacia el sur (VR_TR_EL_R2) y una tercera orientada al norte (VR_TR_EL_R3). La planta baja es un espacio abierto y presenta menor temperatura que la planta alta debido al sombreado permanente que recibe del piso superior alcanzando una temperatura máxima de 29.5 °C. La zona VR_TR_EL_R1 y VR_TR_EL_R2 cuentan con una ventana que cubre el 28.5% y 26% respectivamente del muro de la habitación donde se encuentran, estas dos zonas se comportan de manera similar a lo largo del año con una diferencia promedio anual de 0.26 °C. La zona VR_TR_EL_R3 está ubicada al norte de la edificación y tiene una ventana en la fachada frontal que cubre el 28.5% del muro. Este espacio presenta menor temperatura en la temporada fría y mayor en la cálida siendo la zona donde se marcan mayormente los cambios estacionales; esto debido a la posición aparente del sol, ya que en invierno está más orientado hacia el sur lo que impide que entre radiación por las aberturas que se encuentran al norte, esta habitación alcanza una temperatura máxima de 33.5 °C y una mínima de 25 °C. La vivienda se comporta en el intervalo de 25 y 33.5 °C.

El comportamiento de la vivienda de referencia con un techo verde se presenta en la Figura 6.2(b). Un techo verde afecta sobre todo el piso superior, ya que éste se encuentra en contacto con el sistema de sombreado, impidiendo que la radiación llegue directamente al techo, de esta manera se logra reducir la temperatura al interior de la vivienda y en el ambiente. Se puede observar que la zona VR_GR_EL_PB no presentó cambios significativos con el techo verde, la máxima reducción de temperatura se presentó en abril con 0.82 °C y en promedio al año se redujo medio grado, con esto se corrobora que el techo verde no afecta los niveles inferiores. De las zonas térmicas del nivel superior, VR_GR_EL_R1 es la de mayor volumen y está sobre un espacio de 2.80 x 1.40 m, por lo tanto, la mayor parte del suelo está en contacto con el ambiente exterior. Esta zona es la que presentó menor reducción promedio anual con un 0.42 °C, el mayor cambio se observó en abril y mayo, con una reducción máxima de 1.85 °C. Las zonas VR_GR_EL_R2 y VR_GR_EL_R3 son los dos espacios que presentaron mayor reducción en la temperatura, tienen la misma área de construcción, una ventana en unos de sus muros y están orientadas en sentidos opuestos. VR_GR_EL_R2 presenta una reducción durante todo el año, siendo mayor en verano y menor en invierno. Esta zona logra entrar en la franja de confort de marzo a septiembre, presentándose la mayor reducción en abril con 4.2 °C y en los meses restantes no logra hacerlo por la posición en la que se encuentra, ya que ésta y el sol están orientados al sur, por lo tanto la habitación recibe radiación directa en la fachada sur donde se encuentra una ventana que cubre el 26 % del muro, esto aumenta la temperatura interior y el sombreado del techo verde es insuficiente para reducirla; pues para que ésta zona entre en la franja de confort el techo verde debería reducir 6.5 °C la temperatura en estos meses, y la máxima reducción es de 3.2 °C. El espacio VR_GR_EL_R3, a diferencia de la zona antes descrita, entra en la franja de confort en los meses de enero a marzo y de septiembre a diciembre. Esta diferencia estacional entre las dos

zonas se debe a la ubicación de estas, pues una se encuentra posicionada al norte y otra al sur. Se reduce la temperatura en promedio anual $2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una máxima de $3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en abril.



(a)



(b)

Figura 6.2 Temperatura promedio mensual: (a) VR_TR_EL (b) VR_GR_EL

En la Tabla 6.1 se aprecian las temperaturas promedio mensuales para cada zona térmica en evolución libre con techo tradicional (TR) y techo verde (GR), así como la diferencia de temperatura que hay entre los dos techos. El signo negativo indica que el techo verde ocasionó que la temperatura aumentara. Se observa que en los meses más cálidos es en la planta superior donde se presenta la mayor reducción de temperatura, en promedio anual la vivienda redujo la temperatura $1.64\text{ }^{\circ}\text{C}$ con la aplicación del techo verde.

Tabla 6.1 Temperatura mensual, vivienda de referencia, evolución libre, techo tradicional y verde.

Temperatura promedio mensual (°C)												
MES	VR_EL_PB			VR_EL_R1			VR_EL_R2			VR_EL_R3		
	TR	GR	Difer.									
Ene.	23.43	23.08	0.36	28.26	28.21	0.05	28.29	26.45	1.84	25.01	23.00	2.01
Feb.	26.41	25.82	0.59	31.50	31.11	0.40	31.43	28.24	3.20	28.56	25.35	3.21
Mar.	25.91	25.40	0.52	29.07	29.15	-0.07	28.97	25.98	2.99	27.97	25.16	2.81
Abr.	29.45	28.63	0.82	32.79	31.88	0.92	32.49	28.29	4.20	32.61	28.90	3.71
May.	29.49	28.78	0.72	33.32	31.47	1.85	32.82	28.89	3.93	33.50	30.12	3.38
Jun.	26.41	26.33	0.08	30.13	29.33	0.80	29.54	26.63	2.91	30.69	28.26	2.43
Jul.	26.65	26.10	0.56	30.23	29.75	0.48	29.67	26.59	3.08	30.92	28.35	2.57
Ago.	25.68	25.16	0.53	29.34	28.75	0.59	28.90	25.86	3.04	29.35	26.71	2.64
Sep.	24.74	24.29	0.44	28.56	28.29	0.28	28.25	25.50	2.75	27.70	25.18	2.52
Oct.	26.48	25.97	0.51	31.44	31.32	0.13	31.23	28.41	2.83	29.13	26.35	2.78
Nov.	25.47	25.05	0.41	30.69	30.91	-0.22	30.62	28.57	2.06	27.31	25.10	2.20
Dic.	27.17	26.74	0.44	33.13	33.29	-0.15	33.15	31.06	2.09	28.79	26.45	2.33

6.1.1. Comportamiento semanal en evolución libre

Se simuló el comportamiento térmico de la vivienda en evolución libre, con techo tradicional y con techo verde, para una semana cálida y una fría, de esta manera se aprecia mejor cómo evoluciona la temperatura al pasar las horas. Estas dos semanas se tomaron en función de la temperatura ambiente, ya que es el parámetro de interés que afecta el comportamiento interior de la vivienda.

El mes más frío del año es enero y la semana de simulación comprende el periodo del 21 al 27 de este mismo mes. En la Figura 6.3 (a) se observa que la temperatura de la planta baja (VR_TR_EL_PB) se encuentra cercana a la franja de confort, alcanzando una temperatura máxima de 34.2 °C. Las zonas VR_TR_EL_R1 y VR_TR_EL_R2 se comportan de manera similar, siendo VR_TR_EL_R1 la recámara de mayor dimensión por ello que recibe mayor radiación y alcanza una temperatura de 42.4 °C a las 17:00 h. La zona VR_TR_EL_R3 es el espacio que presenta menor temperatura de la planta superior, alcanzando una temperatura máxima y mínima de 30.4 y 20.8 °C, y con respecto a las otras dos habitaciones existe una diferencia promedio de 3.8 °C. Las bajas temperaturas se deben a su ubicación, ésta se encuentra orientada al norte de la edificación y en ésta época del año el sol está situado hacia el sur, lo que impide que la radiación llegue directo a la fachada principal.

En la Figura 6.3(b) se muestra el comportamiento de la vivienda con techo verde para la semana fría. VR_GR_EL_PB es la zona que permanece más horas dentro de la zona de confort, excepto de 17:00-21:00 h que es el horario que presenta la mayor temperatura alcanzando hasta 33.9 °C. Las zonas de la planta superior presentan una temperatura escalonada, la habitación de mayor dimensión (VR_GR_EL_R1) es la que presenta las temperaturas más altas llegando hasta 42.3 °C, después está la VR_GR_EL_R2 con

temperaturas máximas de 36.1 °C y finalmente VR_GR_EL_R3 que es la zona con temperatura más baja, esta presenta un comportamiento casi estable con una diferencia de temperatura de 5.7 °C a diferencia de las otras zonas que alcanzan hasta 20.85 °C de diferencia entre el día y la noche.

La semana cálida se tomó del mes más cálido del año, este periodo comprende del 01-07 mayo. En la Figura 6.3(c) se puede apreciar que la temperatura más baja la sigue presentando el nivel inferior (VR_TR_EL_PB) con una máxima de 36.4 °C. Las zonas de la planta superior tienen un comportamiento similar, teniendo en promedio 0.7 °C de diferencia entre ellas. Los días que presentaron mayor temperatura ambiente y en consecuencia el aumento de la temperatura en el interior de la edificación son el 01 y 02 de mayo, alcanzando la temperatura máxima a las 17:00 h con 39.81 °C.

Finalmente, se presenta el comportamiento de la semana cálida para el techo verde, en la Figura 6.3(d) se puede observar que el mayor cambio se presentó en las zonas VR_GR_EL_R2 y VR_GR_EL_R3 disminuyendo en promedio 3.8 y 3.2 °C respectivamente. En la habitación VR_GR_EL_R1 se elevó la temperatura en los días 01 y 02, en estos días la temperatura ambiente alcanzó los 35.5 °C, esto también provocó que la temperatura interna se elevara, en esta habitación la temperatura se redujo en promedio 1 °C.

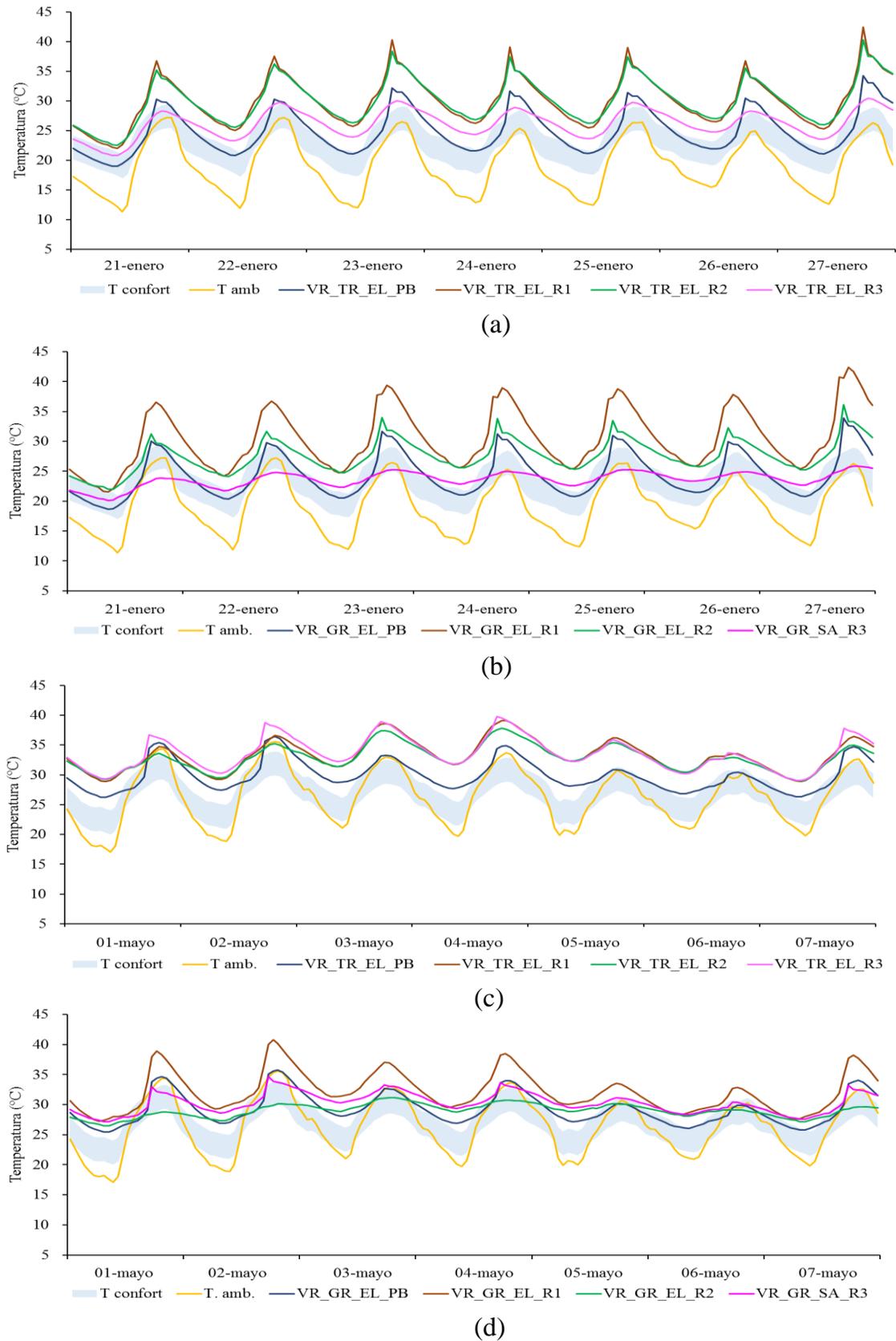


Figura 6.3 Comportamiento de las zonas térmicas, VR_EL, (a)(b) Semana fría (c)(d) Semana cálida.

En la Tabla 6.2 se pueden apreciar las temperaturas mínimas y máximas para la vivienda con techo tradicional y techo verde para la semana fría y cálida. La mayor reducción de temperatura se presentó en la semana cálida en la zona VR_GR_EL_R2 cuando se activó el techo verde, con una disminución promedio de 3.84 °C. El espacio VR_TR_EL_R1 y VP_GR_EL_R1 (recámara de mayor dimensión) es quien alcanza la mayor temperatura en la semana fría y cálida en los dos tipos de techos.

Tabla 6.2 Temperaturas máximas y mínimas, VR_TR/GR_EL, semana fría y cálida,

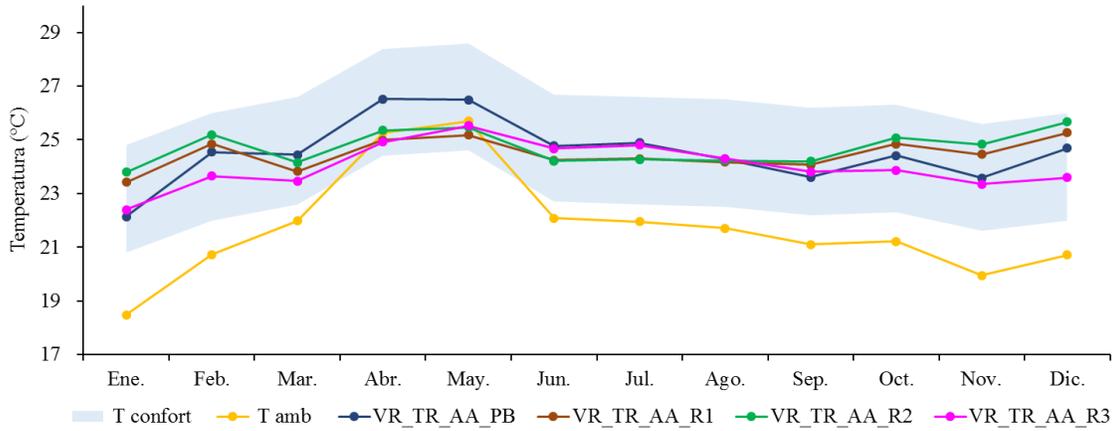
Semana	Zona térmica	Temperatura anual (°C)		
		Mínimo	Máximo	Promedio
Fría	VR_TR_EL_PB	18.97	34.28	24.86
	VR_TR_EL_R1	22.02	42.44	30.07
	VR_TR_EL_R2	22.53	40.26	30.06
	VR_TR_EL_R3	20.81	30.42	26.21
	VR_GR_EL_PB	18.67	33.93	24.41
	VR_GR_EL_R1	21.52	42.37	30.43
	VR_GR_EL_R2	21.97	36.14	27.64
	VR_GR_EL_R3	20.14	25.84	23.65
Cálida	VR_TR_EL_PB	26.19	36.46	29.89
	VR_TR_EL_R1	28.87	39.13	33.27
	VR_TR_EL_R2	29.00	37.8	32.84
	VR_TR_EL_R3	29.04	39.81	33.55
	VR_GR_EL_PB	25.41	35.79	29.21
	VR_GR_EL_R1	27.22	40.77	32.09
	VR_GR_EL_R2	26.46	31.18	29.00
	VR_GR_EL_R3	27.13	34.68	30.27

6.2. VIVIENDA DE REFERENCIA CON AIRE ACONDICIONADO

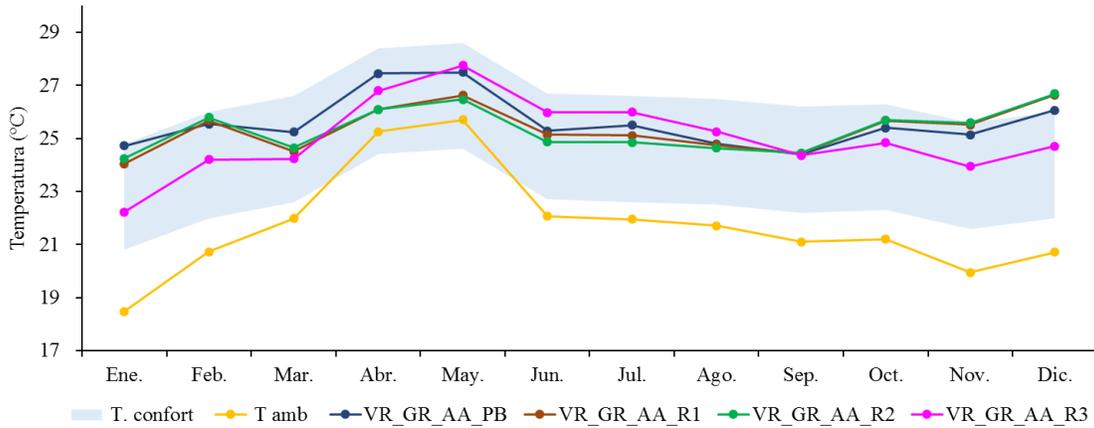
La temperatura de la vivienda en evolución libre está sobre la franja de confort, por lo que se busca reducirla, para ello se simuló un sistema de techo verde. Ésta tecnología es útil para reducir la temperatura a lo largo del año, sin embargo, para la vivienda de referencia este sistema fue insuficiente para alcanzar la temperatura neutra y no bajó la temperatura lo necesario, por ello, además del techo verde se implementa un sistema de aire acondicionado especificando una temperatura de confort; esto indica que la vivienda se simula con un equipo de climatización que cubra la demanda requerida para mantener las zonas dentro del rango de confort, con capacidad del 95%.

Una carga térmica, es la energía térmica que se debe agregar o sustraer de un espacio a fin de mantener la temperatura interior dentro de un intervalo de confort. En la Figura 6.4 (a) se aprecia la vivienda con techo tradicional y la disminución de temperatura cuando se activa el sistema de climatización, manteniendo la edificación dentro de la franja de confort. Existen en promedio 0.6 °C de diferencia entre las zonas de la edificación.

El sombreado del techo verde fue insuficiente para reducir la temperatura de la vivienda y así lograr que ésta permaneciera todo el año dentro de la zona de confort, por lo que se siguió requiriendo de un sistema de climatización. En la Figura 6.4(b) se aprecia la vivienda con techo verde y con aire acondicionado, se aprecia que todas las zonas están dentro de la zona de confort (franja azul), excepto en diciembre donde están 0.5 °C arriba, en promedio todas las zonas se encuentran en 25.3 °C.



(a)



(b)

Figura 6.4 Temperatura promedio mensual: (a) VR_TR_AA (b) VR_GR_AA

6.2.1. Cargas térmicas de acondicionamiento

Una edificación gana o pierde energía en función del ambiente que la rodea, la ubicación geográfica en la que se encuentra, los materiales de construcción, la orientación y el diseño de esta; adicionalmente también se pueden generar cargas internas elevando la temperatura al interior, por lo que es necesario hacer uso de un sistema de acondicionamiento de aire (calefacción y enfriamiento) para mantener la temperatura lo más confortable posible. Para

éste caso de estudio no se requiere de calefacción, ya que no es necesaria por el tipo de clima que se usa para la simulación.

En la Figura 6.5 se muestra la demanda de energía por cargas térmicas de enfriamiento para la vivienda con techo tradicional (VR_TR_AA), se puede apreciar que mayo es el mes que requiere mayor energía para acondicionar las zonas y el de menor demanda es enero con 1299 y 459 kWh, respectivamente. Abril y mayo son los meses de mayor consumo y en los meses restantes el consumo es menor a 900 kWh. La demanda anual de enfriamiento es de 12238 kWh, lo que permite calcular las emisiones de CO₂, considerando el factor de emisión eléctrico, son emitidos al ambiente 7.13 tCO₂/año.

La demanda de energía para enfriar la vivienda con techo verde (VR_GR_AA), la cual muestra que el mes de mayo requiere 178 kWh siendo el de mayor consumo, por el contrario, el mes que requiere menor energía es enero con 62 kWh. El techo verde bajó la temperatura de la vivienda, por ello se requieren menores cargas de enfriamiento que un techo tradicional para acondicionar las zonas, demandando al año 4245 kWh y emitiendo al ambiente 2.48 tCO₂/año. De esta manera se puede observar que, con el uso de techo verde se reducen las emisiones de CO₂ en un 65%.

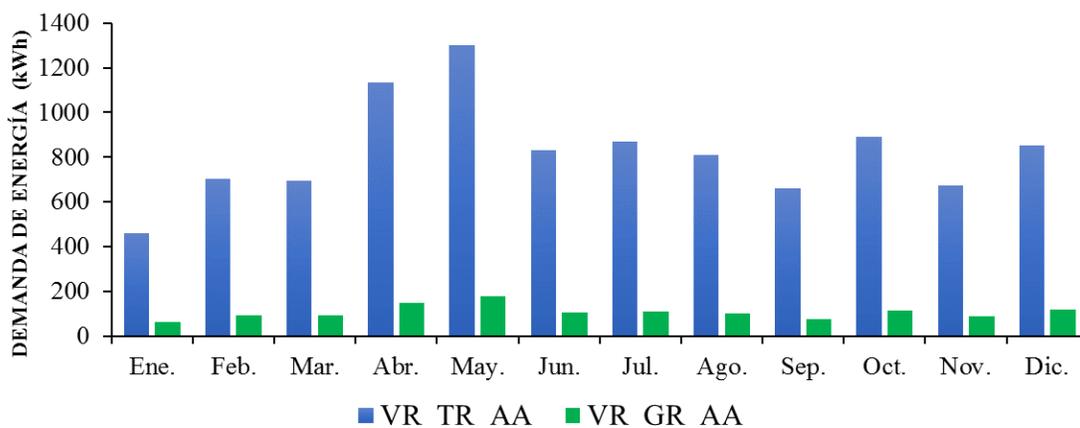
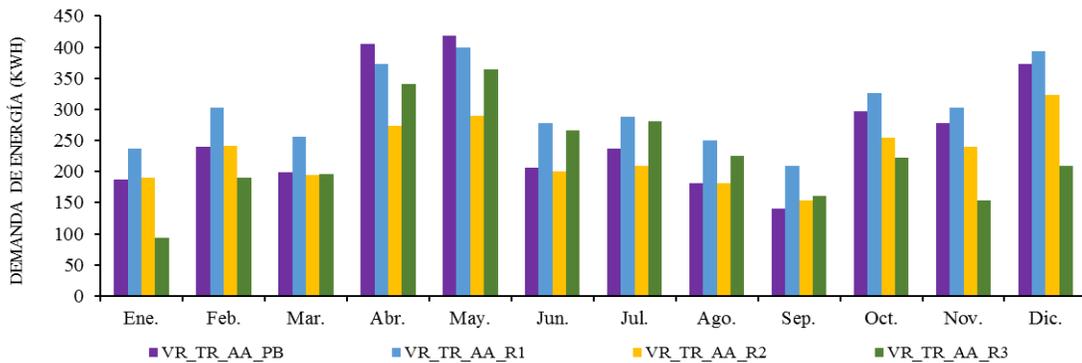


Figura 6.5 Demanda de energía para enfriamiento: VR techo tradicional y verde

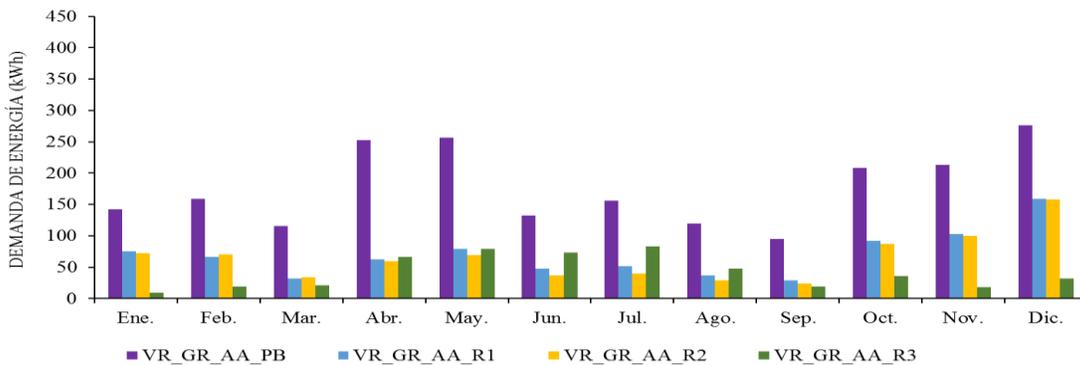
En la Figura 6.6 (a) se presenta la demanda mensual de enfriamiento especificado por zonas térmicas para la vivienda con techo tradicional, los meses de abril y mayo son los meses más cálidos del año y son estos donde se requiere mayores cargas de enfriamiento, la planta baja (VR_TR_AA_PB) es la zona de mayor dimensión por ello requiere mayor energía estos dos meses, y para los meses posteriores es la zona VR_TR_AA_R1 quien más demanda pues es la recámara de mayor dimensión de las tres. Los espacios VR_TR_AA_R2 y VR_TR_AA_R3 están ubicados al sur y al norte respectivamente, y sus requerimientos energéticos se deben a su ubicación y temporada del año, VR_TR_AA_R2 requiere mayor

enfriamiento en la temporada fría y VR_TR_AA_R3 en la temporada cálida, esto debido al cambio en la ubicación del sol a lo largo del año.

Las cargas térmicas para enfriamiento requeridas para la vivienda con techo verde se presentan en la Figura 6.6(b), se observa que VR_GR_AA_PB (planta baja) es la zona que más energía requiere a lo largo del año y las recámaras VR_GR_AA_R1 y VR_GR_AA_R2 son quienes más requieren en la temporada fría, esto se debe a la posición en la que se encuentran, ya que, sus ventanas están frente al sol a lo largo del día. Las zonas del nivel superior requieren menor energía para enfriamiento que el nivel inferior, aquí es donde se observa un mayor desempeño del techo verde pues los espacios están en contacto directo con el sombreado que la vegetación proporciona.



(a)



(b)

Figura 6.6 Demanda de energía para enfriamiento por zonas: (a) Techo tradicional (b) Techo verde

En la Tabla 6.3 se observa la demanda de refrigeración para las zonas de interés de la vivienda con techo tradicional (TR) y techo verde (GR), así como la diferencia de entre los dos techos. En los meses más cálidos (abril y mayo) se consume mayor energía para acondicionar los espacios, así mismo en estos meses se presentó mayor disminución en el consumo de energía

con la aplicación del techo verde, el mayor ahorro se presentó en la habitación de mayor tamaño con 320 kWh.

Tabla 6.3 Cargas térmicas de refrigeración, vivienda de referencia.

Cargas térmicas de refrigeración (kWh)												
MES	VR_AA_PB			VR_AA_R1			VR_AA_R2			VR_AA_R3		
	TR	GR	Difer.	TR	GR	Difer.	TR	GR	Difer.	TR	GR	Difer.
Ene.	187.68	142.71	44.97	237.53	75.40	162.13	190.85	72.61	118.24	93.51	8.85	84.66
Feb.	239.63	158.78	80.85	302.99	66.87	236.12	241.50	70.68	170.82	189.69	18.63	171.06
Mar.	198.59	115.54	83.05	256.50	31.83	224.67	194.42	33.43	160.99	196.45	21.54	174.91
Abr.	404.82	252.60	152.22	372.42	62.10	310.32	274.05	59.54	214.51	340.68	66.56	274.12
May.	419.01	256.16	162.85	399.80	79.07	320.73	288.99	68.99	220.00	364.35	79.01	285.34
Jun.	206.93	132.06	74.87	277.40	47.21	230.19	199.92	36.51	163.41	266.41	73.38	193.03
Jul.	236.90	156.41	80.49	288.88	51.56	237.32	209.01	40.20	168.81	280.55	83.36	197.19
Ago.	180.77	119.20	61.57	250.60	37.17	213.43	181.74	29.39	152.35	225.96	47.77	178.19
Sep.	140.65	94.82	45.83	208.63	29.23	179.40	153.36	24.20	129.16	160.61	18.77	141.84
Oct.	297.36	208.54	88.82	326.58	91.52	235.06	254.90	87.24	167.66	222.94	35.90	187.04
Nov.	278.25	213.30	64.95	303.06	103.32	199.74	240.67	99.85	140.82	153.56	18.55	135.01
Dic.	372.56	275.90	96.66	393.43	158.80	234.63	323.81	158.36	165.45	209.53	32.10	177.43

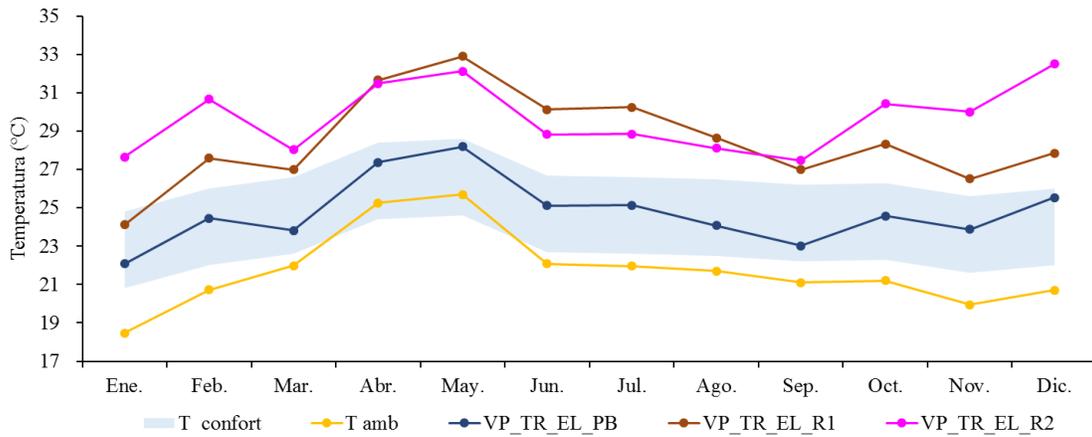
6.3. VIVIENDA PARTICULAR EN EVOLUCIÓN LIBRE

La vivienda particular se diferencia de la vivienda de referencia en el área de construcción, número y dimensiones de las aberturas, número de espacios interiores y más sobresalientemente en el alma de los muros; la vivienda de referencia es de ladrillo y la particular de block hueco, de esta manera se tiene una vivienda de materiales clásicos en la construcción de edificaciones residenciales y una de materiales actuales, pues en los últimos años el block hueco es el preferido por compañías constructoras y particulares.

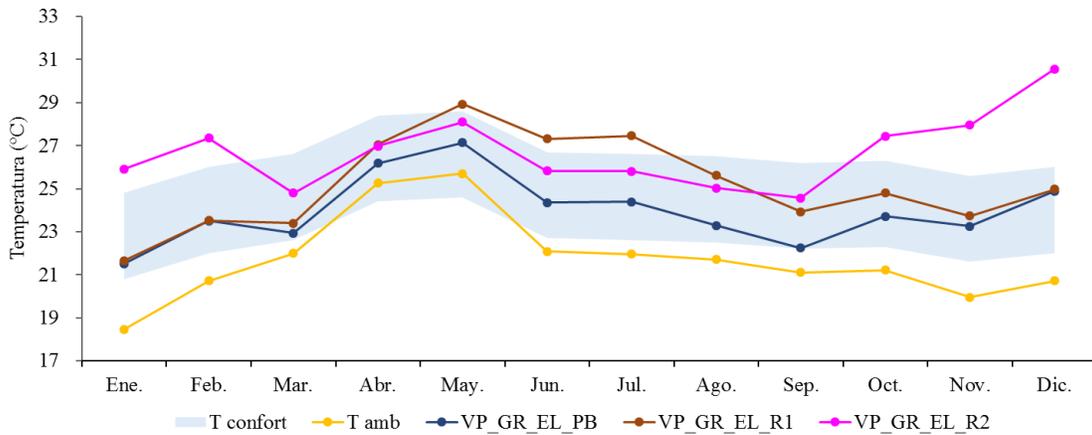
Se analiza el comportamiento térmico de la vivienda en evolución libre con los dos tipos de techo: el tradicional y el verde. Esta vivienda se dividió en tres zonas térmicas, la planta inferior que es un espacio abierto donde se encuentra la sala, comedor y cocina, y en la planta superior se analizan dos recámaras, no se toman en cuenta los pasillos, baños y escaleras. En la Figura 6.7(a) se muestra de forma gráfica las temperaturas promedio mensuales, se observa que VP_TR_EL_PB se mantiene dentro de la zona de confort a lo largo del año presentando la temperatura más baja de las tres zonas. Los espacios de la planta superior: VP_TR_EL_R1 y VP_TR_EL_R2 cuentan con una ventana cada una, orientadas hacia el norte y hacia el sur las cuales cubren el 14.5% y el 21% del total del muro donde se encuentran ubicadas. VP_TR_EL_R1 presenta menor temperatura en la temporada fría llegando a 24 °C y mayor en la temporada cálida alcanzando los 32.9 °C en el mes de mayo, por el contrario, VP_TR_EL_R2 presenta mayor temperatura en la temporada fría con 32.5°C debido a que el

sol está inclinado al sur y está de frente a esta habitación. Entre éstas dos zonas existe una diferencia promedio y una máxima de 1 y 4.6 °C.

Se activa la opción de techo verde en el software y los resultados de la simulación se observan en la Figura 6.7(b), se puede observar que el techo verde disminuyó la temperatura en todas las zonas; el nivel inferior sigue dentro de la zona de confort teniendo 27 °C como máximo. VP_GR_EL_R1 se encuentra dentro de la zona de confort todo el año, excepto de mayo a julio presentando una temperatura máxima y una mínima de 28.9 y 21.5 °C respectivamente. La zona VP_GR_EL_R2 se mantiene dentro de la franja de confort en verano y en la temporada otoño-invierno que comprende los meses de octubre-diciembre y enero-febrero se presentan las temperaturas más altas alcanzando 30.5 °C. Ésta recámara se encuentra al sur y recibe de frente la radiación los meses antes mencionados, por lo que, el techo verde no logra bajar la temperatura lo suficiente para alcanzar la franja de confort, en promedio anual disminuyó 3 °C.



(a)



(b)

Figura 6.7 Temperatura promedio mensual: (a) VP_TR_EL (b) VP_TR_EL

En la Tabla 6.4 se aprecian las temperaturas promedio mensuales para cada zona térmica en evolución libre con techo tradicional (TR) y techo verde (GR) para la vivienda particular, así como la diferencia de temperatura que hay entre los dos techos. El mejor desempeño del techo verde se observa en el nivel superior en los meses de abril y mayo reduciendo hasta 4.5 °C en la zona VP_GR_EL_R2. En promedio anual la vivienda redujo la temperatura 2.37 °C con la aplicación del techo verde.

Tabla 6.4 Temperatura mensual, vivienda de particular, evolución libre, techo tradicional y verde.

Temperatura promedio mensual (°C)									
MES	VP_EL_PB			VP_EL_R1			VP_EL_R2		
	TR	GR	Difer.	TR	GR	Difer.	TR	GR	Difer.
Ene.	22.08	21.52	0.57	24.13	21.66	2.47	27.66	25.92	1.74
Feb.	24.46	23.49	0.96	27.58	23.51	4.07	30.68	27.35	3.32
Mar.	23.82	22.94	0.88	26.99	23.39	3.60	28.04	24.80	3.24
Abr.	27.37	26.18	1.19	31.67	27.05	4.63	31.48	26.98	4.50
May.	28.19	27.14	1.05	32.91	28.93	3.97	32.12	28.09	4.03
Jun.	25.12	24.36	0.76	30.13	27.31	2.82	28.84	25.82	3.01
Jul.	25.14	24.39	0.76	30.25	27.45	2.80	28.84	25.82	3.03
Ago.	24.08	23.30	0.79	28.66	25.61	3.05	28.11	25.03	3.08
Sep.	23.02	22.25	0.78	27.00	23.92	3.08	27.46	24.57	2.89
Oct.	24.58	23.72	0.86	28.33	24.80	3.53	30.43	27.44	2.99
Nov.	23.89	23.25	0.64	26.52	23.73	2.79	30.02	27.95	2.07
Dic.	25.54	24.89	0.64	27.86	24.98	2.88	32.51	30.56	1.95

6.3.1. Comportamiento semanal en evolución libre

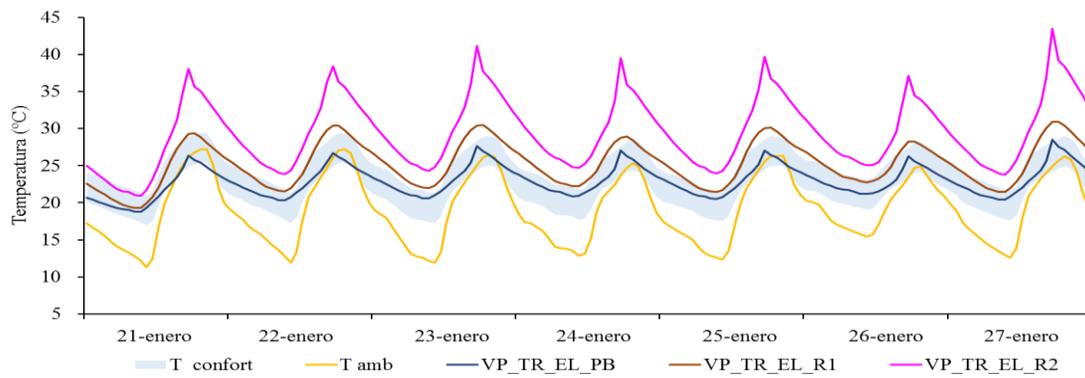
La vivienda particular se simuló en evolución libre, con techo tradicional y con techo verde, para una semana fría y una cálida para apreciar mejor el comportamiento térmico horario. Primeramente, en la Figura 6.8(a) se aprecia la semana fría que corresponde al periodo del 21 al 27 de enero. Se observa que la temperatura de la planta baja (VP_TR_EL_PB) se mantiene dentro de la franja de confort, alcanzando una temperatura máxima de 28.5 °C. La habitación VP_R_EL_R1 se mantiene en el límite superior de la franja de confort, llegando a una temperatura máxima de 30.9 °C. por otro lado, VP_TR_EL_R2 es el espacio con la temperatura más alta alcanzando una máxima de 43.5 °C a las 17:00 h, ésta temperatura se encuentra 15 °C arriba de la temperatura neutra en ese horario.

El comportamiento térmico de la vivienda con techo verde de una semana fría se muestra en la Figura 6.8(b), se observa que con la aplicación del techo verde disminuye la temperatura del aire interior, siendo la planta baja (VP_GR_EL_PB) la zona en la cual hubo una menor disminución de temperatura, en promedio bajo 0.7 °C y se sigue manteniendo dentro de la franja de confort. La zona VP_GR_EL_R1 disminuyó en promedio 3.3 °C lo que provoca que de 16:00 a 22:00 la temperatura esté por debajo de la temperatura neutra, este comportamiento se debe a la posición de la recámara, pues ésta se ubica al norte de la

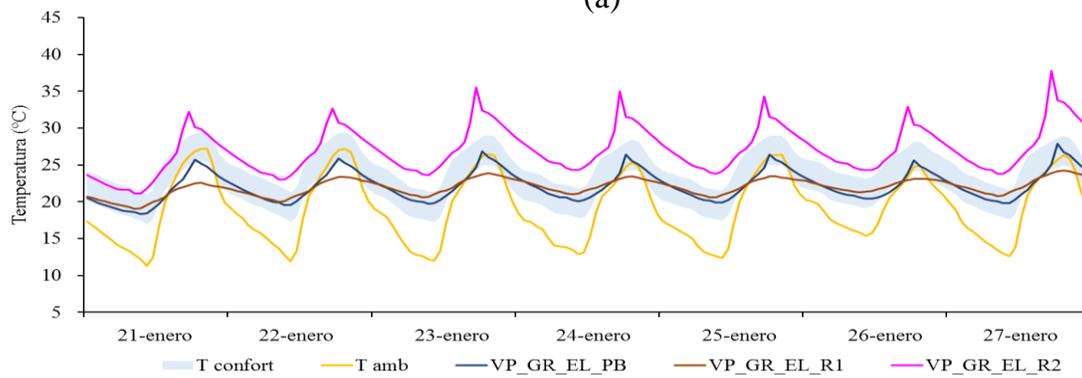
vivienda y la radiación no llega a la fachada frontal. En el espacio VP_GR_EL_R2 la temperatura disminuyó en promedio 2.5 °C y se encuentra sobre la temperatura neutra, llegando a una temperatura máxima y mínima de 37.8 y 21 °C, ésta zona a diferencia de VP_GR_EL_R1 se encuentra en la parte sur de la edificación recibiendo por su fachada principal la radiación, en consecuencia, la temperatura no logra bajar más por el efecto del techo verde.

La semana cálida se tomó del mes más cálido del año, este periodo comprende del 01-07 mayo. En la Figura 6.8 (c) se puede apreciar que la zona VP_TR_EL_PB se encuentra dentro de la franja de confort la mayor parte del día, excepto de 6:00 a 10:00 donde la temperatura es mayor que la neutra. Las zonas de la planta superior tienen un comportamiento similar, teniendo en promedio 0.7 °C de diferencia entre ellas. Los días que presentaron mayor temperatura en el interior de la edificación son el 03 y 04 de mayo, alcanzando una temperatura máxima de 41 °C.

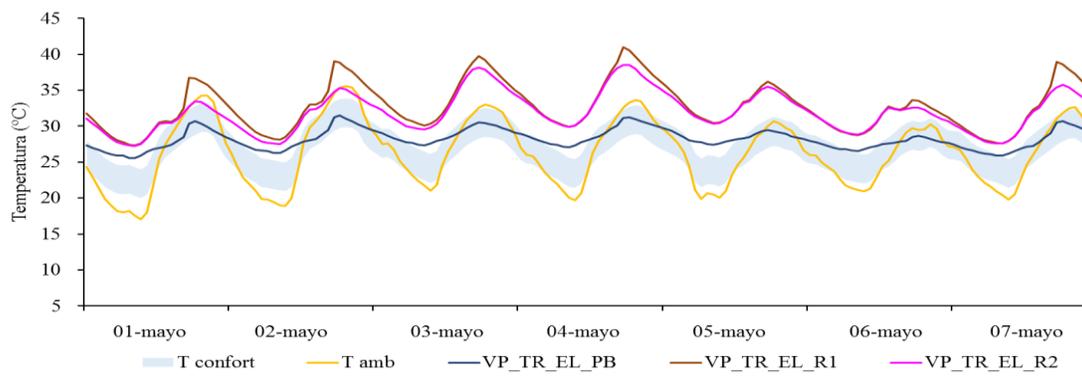
Finalmente se muestra el comportamiento de la semana cálida para el techo verde, en la Figura 6.8 (d) se puede observar que todos los espacios se mantienen dentro de la zona de confort durante algunas horas del día, es de 5:00 a 11:00 h el horario donde la temperatura de la edificación es mayor a la temperatura neutra. La diferencia máxima de temperatura entre ellas es de 3.4 °C el 02 de mayo; éste mismo día se presentó la temperatura más alta con 30.3 °C. En promedio la temperatura se redujo 4.6 °C en la planta superior.



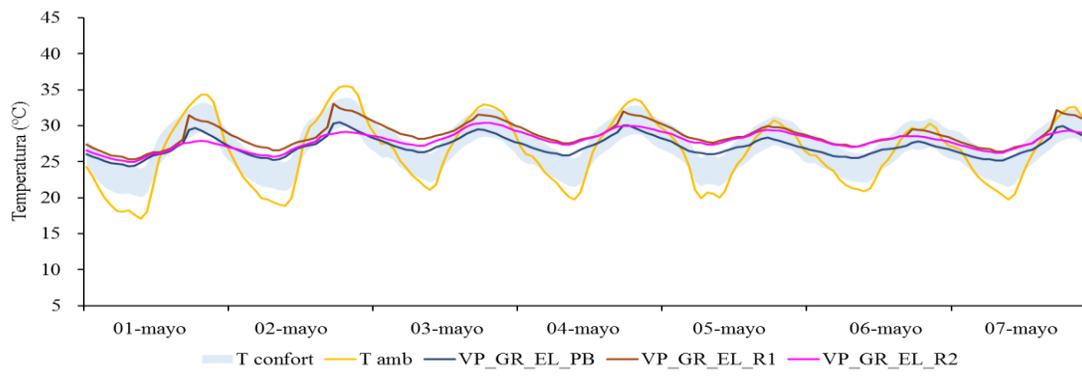
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.8 Comportamiento de las zonas térmicas, VP_EL, (a)(b) Semana fría (c)(d) Semana cálida.

En la Tabla 6.5 se pueden apreciar las temperaturas mínimas y máximas para la vivienda con techo tradicional y techo verde, para la semana fría y cálida. Se puede observar que en la semana fría la recámara VP_TR/GR_EL_R2 que se ubica al sur de la edificación es quien alcanza las temperaturas mayores, alcanzando una máxima para el techo tradicional y verde de 43.4 y 37.8 °C. Por el contrario, en la semana cálida la habitación que presenta la mayor temperatura fue VP_TR/GR_EL_R1, obteniendo 41 y 33 °C para el techo tradicional y el verde, respectivamente. La zona VP_GR_EL_R2 presentó mejor rendimiento en la semana cálida reduciendo 4°C al activar el techo verde.

Tabla 6.5 Temperaturas máximas y mínimas, VP_TR/GR_EL, semana fría y cálida.

Semana	Zona térmica	Temperatura anual (°C)		
		Mínimo	Máximo	Promedio
Fría	VP_TR_EL_PB	18.77	28.50	22.93
	VP_TR_EL_R1	19.31	30.95	25.28
	VP_TR_EL_R2	20.97	43.44	29.49
	VP_GR_EL_PB	18.34	27.83	22.18
	VP_GR_EL_R1	19.06	24.26	21.97
	VP_GR_EL_R2	21.12	37.80	27.03
Cálida	VP_TR_EL_PB	25.58	31.49	28.22
	VP_TR_EL_R1	27.30	41.02	32.76
	VP_TR_EL_R2	27.20	38.50	31.97
	VP_GR_EL_PB	24.41	30.53	27.17
	VP_GR_EL_R1	25.32	33.02	28.76
	VP_GR_EL_R2	24.95	30.39	27.93

6.4. VIVIENDA PARTICULAR CON AIRE ACONDICIONADO

La vivienda particular con techo tradicional se encuentra sobre de la franja de confort, por ello se simuló un techo verde para reducir la misma. El uso del techo verde redujo la temperatura interior 3 °C promedio anual, sin embargo, existen espacios y meses del año donde la vivienda se encuentra fuera de la temperatura neutra, por esta razón se hace uso de un sistema de aire acondicionado, esto garantiza que la vivienda se mantendrá con la temperatura adecuada para los habitantes. El aire acondicionado sólo se aplicó en el nivel superior donde las temperaturas son más altas, la planta baja no requirió un sistema de climatización ya que se encuentra dentro de la franja de confort a lo largo del año.

En la Figura 6.9(a) se observa la temperatura promedio mensual para cada zona térmica, se puede apreciar que todas las zonas se encuentran dentro de la franja de confort, teniéndose una temperatura máxima de 27.2 °C para la VP_TR_AA_PB y una mínima de 21.7 °C para la misma zona. La habitación VP_TR_AA_R2 sale de la zona de confort 0.6 °C en diciembre, esto se atribuye a la radiación que es absorbida por la fachada y que entra por las aberturas.

El uso del techo verde disminuyó la temperatura sobre todo en el nivel superior, sin embargo, no se logró permanecer en la franja de confort, por lo tanto, se hace uso del sistema de aire acondicionado. En la Figura 6.9(b) se aprecia la vivienda con techo verde y con aire acondicionado, se aprecia que todas las zonas están dentro de la zona de confort, excepto en diciembre donde están 0.5 °C arriba.

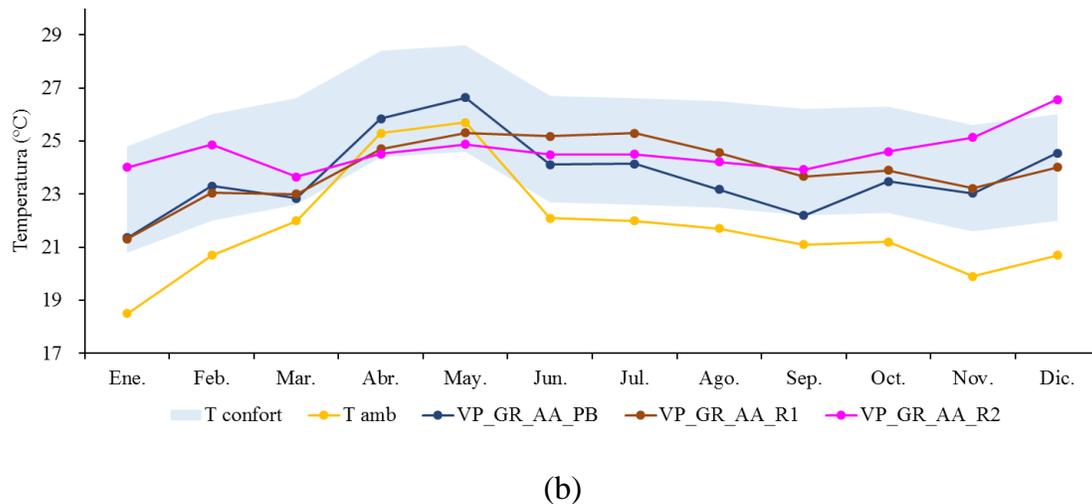
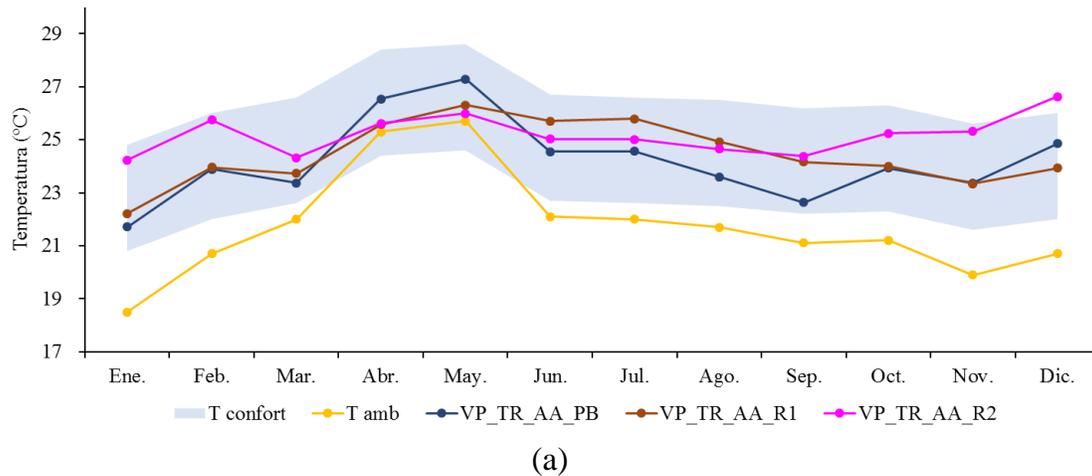


Figura 6.9 Temperatura promedio mensual: (a) VP_TR_AA, (b) VP_GR_AA

6.4.1. Cargas térmicas de acondicionamiento

En la vivienda particular se requirió de un sistema de aire acondicionado para mantener la temperatura confortable, a continuación, se presentan las cargas térmicas de refrigeración necesarias para la edificación con techo tradicional y verde.

En la Figura 6.10 se muestra la demanda de energía para acondicionar la vivienda con techo tradicional (VP_TR_AA), se puede apreciar que la mayor demanda se presenta en mayo y abril con 679 y 599 kWh, en estos meses la temperatura ambiente es mayor, ocasionando el aumento de temperatura en el interior y en consecuencia un uso mayor del aire acondicionado. El mes con menor demanda de energía es enero con 251 kWh y anualmente la vivienda requiere 5046 kWh. Considerando el factor de emisión eléctrico, son emitidos al ambiente 2.93 tCO₂/año.

Por otro lado, la demanda de energía de la edificación con techo verde (VP_GR_AA), es menor que la vivienda con techo tradicional, pues también es menor la temperatura interior, esta disminución se debe al sombread del techo verde. Se puede observar que el mes de mayo requiere 300 kWh siendo el de mayor consumo, por el contrario, el mes que requiere menor energía es septiembre con 40 kWh y la demanda anual es de 1561 kWh, emitiendo al ambiente 0.90 tCO₂/año. Representando así una reducción del 69% anual en las emisiones de CO₂ cuando se implementa un techo verde.

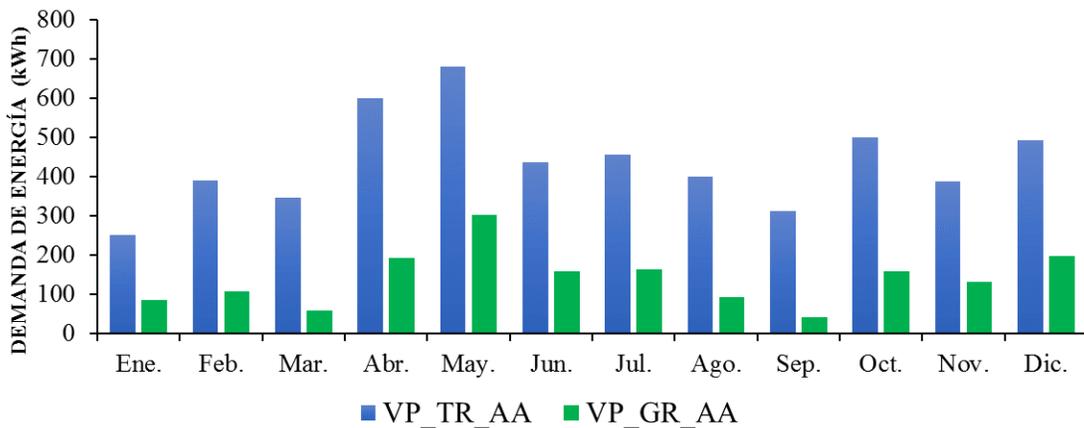
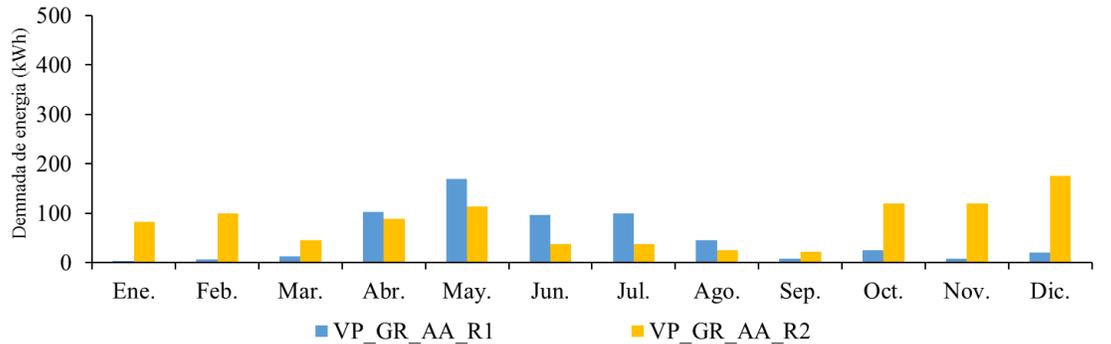


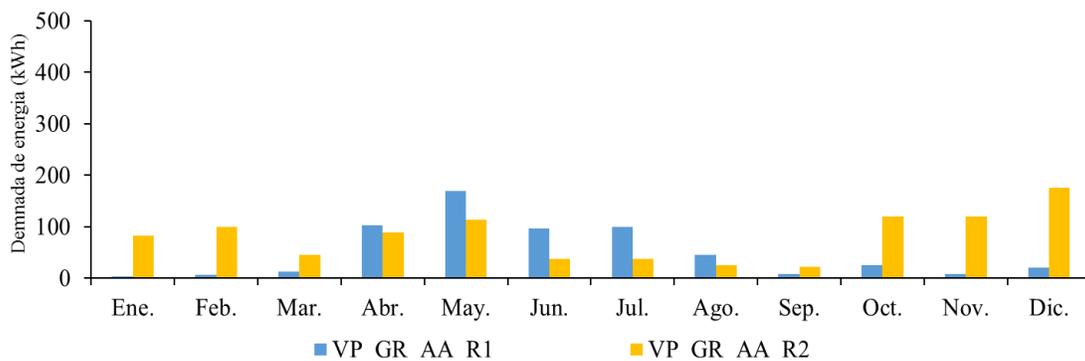
Figura 6.10 Demanda de energía para enfriamiento, VR_TR_AA.

La demanda de enfriamiento para cada una de las zonas térmicas de la vivienda con techo tradicional se presenta en la Figura 6.11(a), se observan los requerimientos para las dos zonas térmicas del nivel superior las cuales están ubicadas una al norte y al sur, es por ello que la demanda varía en cada temporada ya que en los meses de cálidos el sol se encuentra perpendicular al techo y en los meses fríos se encuentra inclinado al sur. La demanda máxima se presentó en VP_TR_AA_R1 para abril y mayo, siendo la mínima para ambas recámaras en enero y septiembre.

Las cargas térmicas de enfriamiento requeridas para la vivienda con techo verde se presentan en la Figura 6.11(b), se puede observar que el comportamiento térmico de los dos espacios depende de la temporada del año, siendo VP_GR_AA_R1 quien más demanda en verano con una máxima de 169 kWh y en invierno lo hace el VP_GR_AA_R2 con una demanda máxima de 175 kWh.



(a)



(b)

Figura 6.11 Demanda de energía para enfriamiento por zonas: (a) Techo tradicional (b) Techo verde.

La vivienda particular solo necesitó aire acondicionado en el nivel superior, pues la planta baja obtuvo la temperatura de confort cuando se aplicó el techo verde. En la Tabla 6.6 se presenta la demanda de refrigeración para el techo tradicional y verde, así mismo el ahorro

energético que produce el uso del sombreado pasivo. Al igual que la vivienda de referencia, la vivienda particular consume más energía para refrigerar las zonas en abril y mayo, presentándose el mayor ahorro en VP_AA_R1 con 239 kWh.

Tabla 6.6 Cargas térmicas de refrigeración, vivienda particular.

Cargas térmicas de refrigeración (kWh)						
MES	VP_AA_R1			VP_AA_R2		
	TR	GR	Difer.	TR	GR	Difer.
Ene.	88.16	2.95	85.21	162.34	81.7	80.64
Feb.	176.13	6.87	169.26	213.08	100.1	112.98
Mar.	177.57	12.08	165.49	168.2	45.07	123.13
Abr.	342.74	103.08	239.66	255.15	88.59	166.56
May.	387.33	169.38	217.95	273.97	113.81	160.16
Jun.	246.03	95.81	150.22	156.34	37.18	119.16
Jul.	257.23	100.09	157.14	163.19	37.43	125.76
Ago.	210.25	45.39	164.86	148.89	24.53	124.36
Sep.	147.33	7.53	139.80	130.41	22.54	107.87
Oct.	234.32	24.6	209.72	241.64	120.21	121.43
Nov.	158.5	7.33	151.17	219.43	120.3	99.13
Dic.	202.91	19.7	183.21	285.57	175.3	110.27

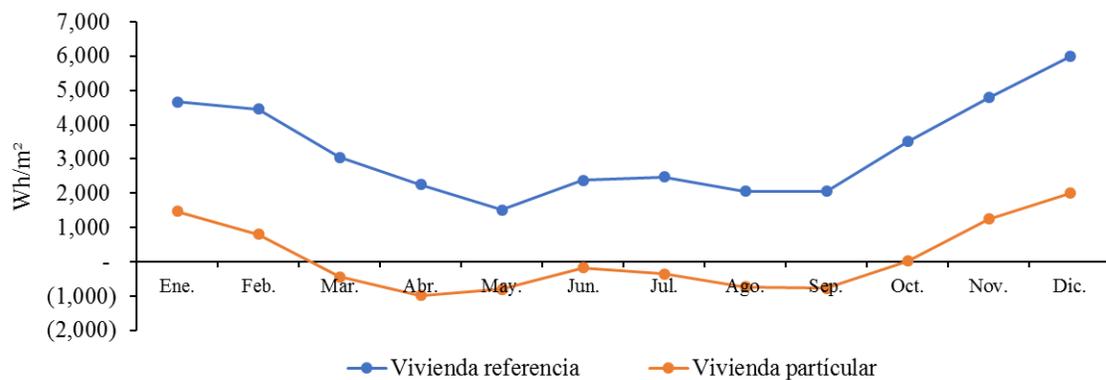
6.5. COMPARACIÓN ENTRE LAS DOS VIVINEDAS

Ganancias de calor en la envolvente

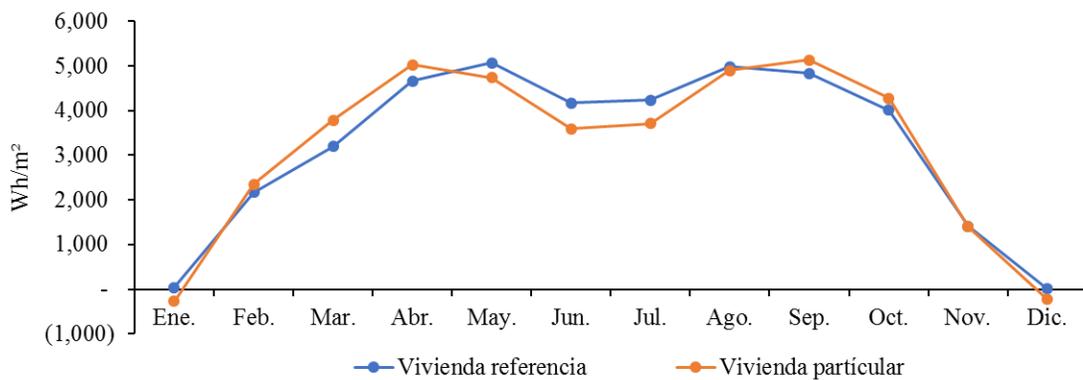
La envolvente de una edificación está formada por los muros, aberturas (puertas y ventanas), suelo y techo. La parte que más ganancias térmicas presenta debido a la radiación es el techo, puesto que está expuesto a ella la mayor parte del día. En la Figura 6.12 se presenta el flujo de calor mensual que absorbe la envolvente de las dos viviendas con techo tradicional y en evolución libre. En (a) se observa que la vivienda de referencia (VR) tiene ganancias a lo largo del año, presentándose las mayores en diciembre y enero con una máxima de 5947 Wh/m². Por otro lado, la vivienda particular (VP) presenta ganancias y pérdidas a lo largo del año, de marzo a septiembre la vivienda pierde energía y gana en los meses restantes. Esto es ocasionado a la posición aparente del sol, pues en los meses de perdida se encuentra perpendicular al techo y en los meses donde se gana llega la radiación directo a los muros por la inclinación aparente del sol. En (b) se muestra el flujo de calor ganado a través del techo, las dos viviendas están construidas de los mismos materiales y tienen un comportamiento similar. VP presenta perdidas de energía en enero y diciembre estos meses son los más fríos del invierno; en esta estación el polo norte de la tierra se encuentra más alejado del sol y los rayos no caen perpendicularmente al techo, además de que los días son

más cortos que la noche, todo ello contribuye a la pérdida de la energía en estos meses. A diferencia del techo, los muros ganan más energía en el invierno pues reciben mayor radiación por la posición inclinada de la tierra en esta estación.

La vivienda de referencia presenta ganancias por los muros a lo largo del año, mientras que la vivienda particular presenta ganancias y pérdidas, esto debido a la configuración de las viviendas y los materiales de construcción, pues en la particular se cubren los muros Este y Oeste completamente por las viviendas vecinas, mientras que en la vivienda de referencia se tiene una porción de las paredes Este y Oeste descubiertas, a las cuales les llega radiación. El techo de la vivienda de referencia presenta máximo 73 W/m^2 en los meses más cálidos y la vivienda particular 54 W/m^2 . En promedio el flujo de calor ganado en las dos viviendas es 5100 Wh/m^2 al año.



(a)



(b)

Figura 6.12 Ganancias de calor en la envolvente. (a) Muros, (b) Techos

Las dos viviendas, la de referencia y la particular tienen los mismos materiales de construcción para el techo y pisos, ambos techos están contruidos de los mismos materiales, una losa de concreto de 10 cm recubierta de yeso e impermeabilizante, en lo que difieren es

en el grosor. La mayor diferencia se encuentra en los muros, la vivienda de referencia está construida de ladrillo y la particular de block hueco. La vivienda de referencia tiene un área mayor del techo y porcentaje de ventanas, las dos viviendas requieren mayor enfriamiento para acondicionar las zonas en verano, siendo la edificación de referencia quien más demanda, en la Tabla 6.7 se muestra de forma resumida las características de las viviendas.

Tabla 6.7 Características generales de las dos viviendas.

Viviendas			
Componente		Referencia	Particular
Techo (cm)	Impermeabilizante	2.0	0.4
	Concreto	10.0	10.0
	Yeso	1.5	1.0
Muros (cm)	Mortero	1.5	-
	Concreto	-	1.0
	Ladrillo	14.0	-
	Block hueco	-	12.0
	Yeso	1.5	1.0
Área del techo (m ²)		54.3	31
Volumen total (m ³)		216.5	151.5
Ventanas (%)		8.5	8.0

En la Tabla 6.8 se observa el consumo anual de energía para enfriar las zonas de la vivienda de referencia y particular. En la vivienda de referencia la mayor disminución se presentó en VR_AA_R1 reduciendo las cargas de enfriamiento 77% y en promedio en la edificación se redujeron 65% con la aplicación del techo verde. En la vivienda particular se acondicionaron dos espacios, siendo VP_AA_R1 el que mayor disminución presentó con 77% y en promedio anual la vivienda redujo 69%. Las dos viviendas mostraron una disminución en la demanda de enfriamiento cuando se simula el techo verde en las edificaciones, siendo ésta, de más del 50%, lo que indica que con el techo verde se demandó menos de la mitad de energía que el techo tradicional.

Tabla 6.8 Cargas térmicas de enfriamiento, techo tradicional y techo verde.

Vivienda de referencia				
Zona térmica	Energía para enfriamiento (kWh)			
	Techo tradicional	Techo verde	Ahorro	% de ahorro
VR_AA_PB	3,163.15	2,126.02	1,037.13	32.79
VR_AA_R1	3,617.82	834.08	2,783.74	76.95
VR_AA_R2	2,753.22	781.00	1,972.22	71.63
VR_AA_R3	2,704.24	504.42	2,199.82	81.35
Total	12,238.43	4,245.52	7,992.91	65.31

Vivienda particular				
Zona térmica	Energía para enfriamiento (kWh)			
	Techo tradicional	Techo verde	Ahorro	% de ahorro
VP_AA_R1	2,628.50	594.81	2,033.69	77.37
VP_AA_R2	2,418.21	966.76	1,451.45	60.02
Total	5,046.71	1,561.57	3,485.14	69.06

Una manera de comparar el consumo de cargas térmicas entre las dos viviendas es analizando cuanta energía se requiere para enfriar 1 m³ de aire. De esta manera, la vivienda de referencia con 180 m³ de espacio a enfriar necesita 68 kWh con el techo tradicional y con el techo verde requiere 23.5 kWh por cada m³ de aire. Se puede apreciar que la vivienda con techo verde requiere menor energía para acondicionar las zonas, esto debido al sombreado del techo.

La vivienda particular tiene 60 m³ de aire para enfriar, estos equivalen a dos recámaras. Así, la vivienda con techo tradicional requiere 84 kWh/m³ y con techo verde requiere 26 kWh/m³, reduciendo 69% la demanda de cargas térmicas de enfriamiento al colocar el techo verde.

En la Tabla 6.9 se muestran las temperaturas promedio anuales de cada espacio de las dos viviendas, con los dos tipos de techo en evolución libre. Se puede observar que en la vivienda de referencia se reducen las temperaturas con la aplicación del techo verde. En la zona VR_AA_R2 es donde se presenta una mayor reducción de temperatura, en promedio 2.9 °C y 1.6 °C en la vivienda en general. En la edificación particular se presenta una disminución de temperatura de hasta 3.3 °C en la habitación VR_AA_R1 y en promedio anual 2.3 °C para la vivienda.

Tabla 6.9 Temperatura promedio anual, techo tradicional y techo verde.

Vivienda de referencia			
Zona térmica	Temperatura evolución libre (°C)		
	Techo tradicional	Techo verde	Diferencia
VR_AA_PB	26.44	25.94	0.50
VR_AA_R1	30.71	30.29	0.42
VR_AA_R2	30.45	27.54	2.91
VR_AA_R3	29.29	26.58	2.72
Promedio	29.22	27.59	1.64

Vivienda particular			
Zona térmica	Temperatura evolución libre (°C)		
	Techo tradicional	Techo verde	Diferencia
VP_AA_PB	24.77	23.95	0.82
VP_AA_R1	28.50	25.20	3.31
VP_AA_R2	29.68	26.69	2.99
Promedio	27.65	25.28	2.37

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos de las modelaciones de las dos viviendas, con techo tradicional y con techo verde, el cual es una estrategia pasiva de sombreado incorporado en el techo de las edificaciones. Finalmente se muestran algunas recomendaciones para trabajos futuros.

En este trabajo de investigación se realizó un análisis del comportamiento térmico-energético de dos viviendas de interés social, en las cuales se implementó un sistema de techo verde bajo condiciones del clima cálido-subhúmedo representativo del sitio, mismo que aumenta la temperatura al interior de las edificaciones, por ello se llevó a cabo este proyecto de investigación, con la finalidad de reducir las temperaturas al interior, y por ende, la demanda energética por cargas térmicas de enfriamiento necesarias para mantener una temperatura de confort. El comportamiento de las dos viviendas se discute a continuación:

Vivienda de referencia

La vivienda está construida de dos niveles orientada hacia el norte, con 8.5% de acristalamiento respecto a los muros y con un diseño en sus muros que permite la absorción de radiación a lo largo del día, por ello presenta mayores ganancias de calor que la vivienda particular.

Del comportamiento en evolución libre la vivienda con techo tradicional alcanzó una temperatura promedio anual de 29.2 °C, la cual se redujo a 27.5 °C al implementar el sistema de techo verde. La zona con mayor reducción fue la recámara 2, la cual está orientada hacia el sur de la edificación y cuenta con una ventana, ésta redujo en promedio anual 2.9 °C.

Al implementar el techo verde se redujeron las cargas térmicas para enfriamiento en un 65%, de 12.23 MWh/año a 4.24 MWh/año.

Respecto a las emisiones contaminantes al ambiente se ven reducidas de 7.13 a 2.48 tCO₂/año, lo que representa una disminución del 65% con el uso de techo verde.

Vivienda particular

Cuenta con dos niveles en su construcción y está ubicada hacia el norte con un área de acristalamiento del 8%, es una construcción totalmente rectangular y en los muros Este y Oeste se encuentra otra edificación por lo que no tienen contacto alguno con el medio ambiente, esto contribuye a que las ganancias solares por los muros sean menores, reduciendo así la temperatura, por ello no se requiere aire acondicionado en la planta baja después de que se implementa el techo verde.

Del comportamiento en evolución libre la vivienda con techo tradicional alcanzó una temperatura promedio anual de 27.6 °C, la cual se redujo a 25.2 °C al implementar el sistema de techo verde. La zona con mayor reducción fue la recámara 1, que redujo en promedio anual 3.3 °C, ésta se encuentra ubicada al norte de la edificación y es la de mayor dimensión.

Al implementar el techo verde se redujeron las cargas térmicas para enfriamiento en un 69%, de 5.04 MWh/año a 1.56 MWh/año.

Las emisiones de CO₂ se redujeron de 2.93 a 0.90 tCO₂/año, lo que representa una disminución del 69% con la implementación de un techo verde.

En general, los techos verdes afectan sobre todo los pisos superiores de las viviendas, presentando en los meses cálidos una mayor reducción de temperatura y cargas térmicas para enfriamiento. Ambas edificaciones tienen el mismo comportamiento, consumen y ahorran en los mismos meses y alcanzan las temperaturas mayores a las 17:00 h en todos los días del año.

Finalmente, se debe enfatizar la importancia y beneficios medioambientales que un techo verde aporta y que van más allá del ahorro energético en climatización que pudiera generar; reducen el efecto de la isla de calor urbana y aumentan la superficie de áreas verdes. Además, funcionan como aislante acústico aumentan la plusvalía de los edificios y mejoran la estética de las ciudades. Sus beneficios abarcan una zona global, más allá del lugar donde son instalados, ayudan a construir entornos más saludables, confortables y sostenibles.

7.1. RECOMENDACIONES

A continuación, se enlista una serie de recomendaciones para trabajos futuros en cuanto al comportamiento térmico-energético de techos verdes en edificaciones residenciales de interés social y de esta manera ampliar el tema y dar continuidad al presente trabajo de investigación.

- Realizar simulaciones en las viviendas, considerando ocupación y ganancias internas debido a lámparas y equipos, ya que de esto depende el aumento de la temperatura interior y por ende la demanda de energía para acondicionamiento.
- Considerar otro tipo de clima para analizar el comportamiento térmico de las viviendas consideradas en este estudio.
- Considerar la variación de otros parámetros en la envolvente con el fin de mejorar las condiciones de confort dentro de las viviendas.
- Realizar simulaciones con otro tipo de vegetación, variando su altura e índice de hoja, ya que algunas especies modifican su tamaño en función de la estación del año.
- Analizar el costo-beneficio de la implementación del techo verde para el estado de Morelos.

REFERENCIAS

Alexandri E. y Jones P. (2007). Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results. *Building and Environment*. 42, 2835–2849.

Ascione F., Bianco N., de' Rossi F., Turni G. y Vanoli G. P. (2013). Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? *Applied Energy*. 104, 845–859.

Besir A. B. y Cuce E. (2018). Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 82, 915–939.

Chagolla A. (2017). Estudio de la transferencia de calor de techos verdes en edificaciones en México. (tesis de doctorado). Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Cuernavaca, Morelos.

Chagolla-Aranda M. A., Simá E., Xamán J. Álvarez G. Hernández-Pérez I. y Téllez-Velázquez E. (2017). Effect of irrigation on the experimental thermal performance of a green roof in a semi-warm climate in Mexico. *Energy and Buildings*. 154, 232–243.

Comisión Nacional de Vivienda CONAVI. (2010). Código de Edificación de Vivienda. Segunda edición, CDMX.

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), Secretaría de Energía, Gobierno Federal. (2016). Eficiencia energética en edificaciones, México.

Djedjig R., Ouldboukhité S.-E., Belarbi R. y Bozonnet E. (2012). Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 39, 752–761.

Duffie J. A. y Beckman W. A. (1974). *Solar Energy Thermal Processes*, Book, edit. Wiley, New York.

EnergyPlus, Version 6.0 Documentation, 2010, Engineering Reference, 26-35 y 58-103

Ferrante P., La Gennusa M., Peri G. Rizzo G. y Scaccianoce G. (2016). Vegetation growth parameters and leaf temperature: Experimental results from a six plots green roofs' system. *Energy*. 115, 1723–1732.

Ferrante P., La Gennusa M., Peri G., Scaccianoce G. y Sorrentino G. (2015). Comparison between conventional and vegetated roof by means of a dynamic simulation. *Energy Procedia*. 78, 2917–2922.

Fideicomiso para Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE). (2009). Consumo eléctrico residencial en México, México.

Foustalieraki M., Assimakopoulos M. N., Santamouris M. y Pangalou H. (2017). Energy performance of a medium scale green roof system installed on a commercial building using numerical and experimental data recorded during the cold period of the year. *Energy and Buildings*. 135, 33–38.

Francis L. F. M. y Jensen M. B. (2017). Benefits of green roofs: A systematic review of the evidence for three ecosystem services. *Urban Forestry and Urban Greening*. 28, 167–176.

Frankenstein, S., y Koenig, G. (2004). FASST Vegetation Models. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 56.

Gagliano A., Detommaso M., Nocera F. y Berardi U. (2016a). The adoption of green roofs for the retrofitting of existing buildings in the Mediterranean climate. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. 7, 116–129.

Gagliano A., Detommaso M., Nocera F. y Evola G. (2015). A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional roofs. *Building and Environment*. 90, 71–81.

Gagliano A., Nocera F., Detommaso M. y Evola G. (2016b). Thermal Behavior of an Extensive Green Roof: Numerical Simulations and Experimental Investigations. *International Journal of Heat and Technology*. 34, 226–234.

Gobierno del Estado de Morelos, Consejería Jurídica. (2012). Reglamento de construcción del municipio de Cuernavaca, Morelos.

Hay J. y Davies J. (1980). Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface, Proceedings First Canadian Solar Radiation Workshop, 59-72.

He Y., Yu H., Ozaki A., Dong N. y Zheng S. (2017). Influence of plant and soil layer on energy balance and thermal performance of green roof system. *Energy*. 141, 1285–1299.

Heard C. Notes on the typical house description as used with SUNCODE.

Hodo-Abalo S., Banna M. y Zeghmatti B. (2012). Performance analysis of a planted roof as a passive cooling technique in hot-humid tropics. *Renewable Energy*. 39, 140–148.

Hottel y Sarofim. (1967). Radiative Transfer, Capítulo 3, McGraw Hill.

Huacuz V. J. M. (1999). Generación eléctrica distribuida con energías renovables. Actividades de investigación. Boletín IIE, 216-222.

Huacuz V. J. M. (2003). Energías Renovables: ¿Opción real para la generación eléctrica en México? Actividades de investigación. Boletín IIE. 111–117.

Incropera F. y DeWitt D. (1999). Fundamentos de transferencia de calor, cuarta edición, PRENTICE HALL, México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). Información por entidad, Climatología. México.

Luo M., Wang Z., Ke K., Cao B., Zhai Y. y Zhou X. (2018). Human metabolic rate and thermal comfort in buildings: The problem and challenge. *Building and Environment*. 131, 44-52.

Malys L., Musy M. y Inard C. (2016). Assessment of direct and indirect impacts of vegetation on building comfort: A comparative study of lawns, greenwalls and green roofs. *Energies*. 9, 603–610.

National Geographic. (2010), ¿Qué es el Calentamiento Global?, México.

Nicol F. (2004). Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. *Energy and Buildings*. 36, 628–637.

Nicol J. F. y Humphreys M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*. 34, 563–572.

NOM-020-ENER-2011. (2011). Eficiencia energética en edificaciones.- Envolverte de edificios para uso habitacional, Norma Oficial Mexicana.

Orosa J. A. (2009). Research on general thermal comfort models, *European Journal of Scientific Research*. 27, 217–227.

Ouldboukhittine S. E., Belarbi R., Jaffal I. y Trabelsi A. (2011). Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model. *Building and Environment*. 46, 2624–2631.

Perez R., Stewart R., Seals R. y Guertin T. (1990). The development and verification of the diffuse radiation model, Sandia Report SAND88-7030, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.

Permpituck S. y Namprakai P. (2012). The energy consumption performance of roof lawn gardens in Thailand. *Renewable Energy*. 40, 98–103.

Reindl D. T., Beckman W. A. y Duffie J. A. (1990). Diffuse Fraction Correlations, *Solar Energy*. 45, 1-7.

Sailor D. J. (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*. 40, 1466–1478.

Scharf B. y Zluwa I. (2017). Case study investigation of the building physical properties of seven different green roof systems. *Energy and Buildings*. 151, 564–573.

Secretaría de Energía (SENER). (2016a). Balance Nacional de Energía: Consumo final de energía por sector.

Secretaría de Energía (SENER). (2016b). Balance Nacional de Energía: Producción de energía primaria.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016), Protocolo de Kioto sobre cambio climático. México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2018). Reporte de Registro Nacional de Emisiones. Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental Dirección General de Políticas para el Cambio Climático. CDMX.

Secretaria de Relaciones Exteriores (SRE). (2014). Consulado de Carrera de México en San Pedro Sula.

Seem J. E. (1987). Modeling of Heat Transfer in Buildings. Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, WI.

Silva C. M., Gomes M. G. G. y Silva M. (2016). Green roofs energy performance in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*. 116, 318–325.

Solcerova A., van de Ven F., Wang M., Rijdsdijk M. y van de Giesen N. (2017). Do green roofs cool the air? *Building and Environment*. 111, 249–255.

-
- Szokolay S. (1984). *Passive and low energy design for thermal and visual comfort. Passive and Low Energy Ecotechniques Applied to Housing (PLEA '84)* Pergamon Press, New York, US.
- Taylor R. D., Pedersen C. O. y Lawrie L. K. (1990). Simultaneous simulation of buildings and mechanical systems in heat balance based energy analysis programs, Proceedings of the 3rd international conference on system simulation in buildings, Liege, Belgium.
- UCLA Labor Occupational Safety y Health Program (LOSH). (2003). ¿Qué son emisiones de diesel?, México.
- Vacek P., Struhala K. y Matejka L. (2017). Life-cycle study on semi intensive green roofs. *Journal of Cleaner Production*. 154, 203–213.
- Vijay S. y Molina L. T. (2004). Cálculo de emisiones de contaminación atmosférica por uso de combustibles fósiles en el sector eléctrico mexicano.
- Wang Z., de Dear R., Luo M., Lin B., He Y., Ghahramani A. y Zhu Y. (2018). Individual difference in thermal comfort: A literature review. *Building and Environment*. 138, 181–193.
- Zeng C., Bai X., Sun L., Zhang Y. 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.
- Zhang L., Jin M., Liu J. y Zhang L. (2017). Simulated study on the potential of building energy saving using the green roof. *Procedia Engineering*. 205, 1469–1476.

APÉNDICE

Procedimiento para la modelación en DesignBuilder y EnergyPlus

DesignBuilder es un software especializado en la simulación ambiental y energética de edificios. Sus herramientas permiten evaluar aspectos como los niveles de confort y los consumos de energía, entre otros.

La pantalla inicial aparece cuando se abre directamente el programa, se puede seleccionar un archivo utilizado en sesiones de trabajo previas o crear uno nuevo (Figura A.1). En la pantalla de edición se crea el modelo 3D del edificio (pestaña Modelo), se asignan los datos del mismo (pestañas Actividad, Cerramientos, Aberturas, Iluminación y HVAC), se definen los parámetros personalizados para los análisis CFD (etiqueta CFD), se indican los resultados que se desea generar con las simulaciones (pestaña Opciones de resultados), una vez construida la edificación se puede ver la trayectoria de las sombras generadas por la posición del sol (etiqueta Visualización) y completar el análisis del edificio con sistemas de refrigeración y calefacción (etiquetas Diseño de calefacción, Diseño de refrigeración, Simulación, CFD, Iluminación natural, Coste y carbono).

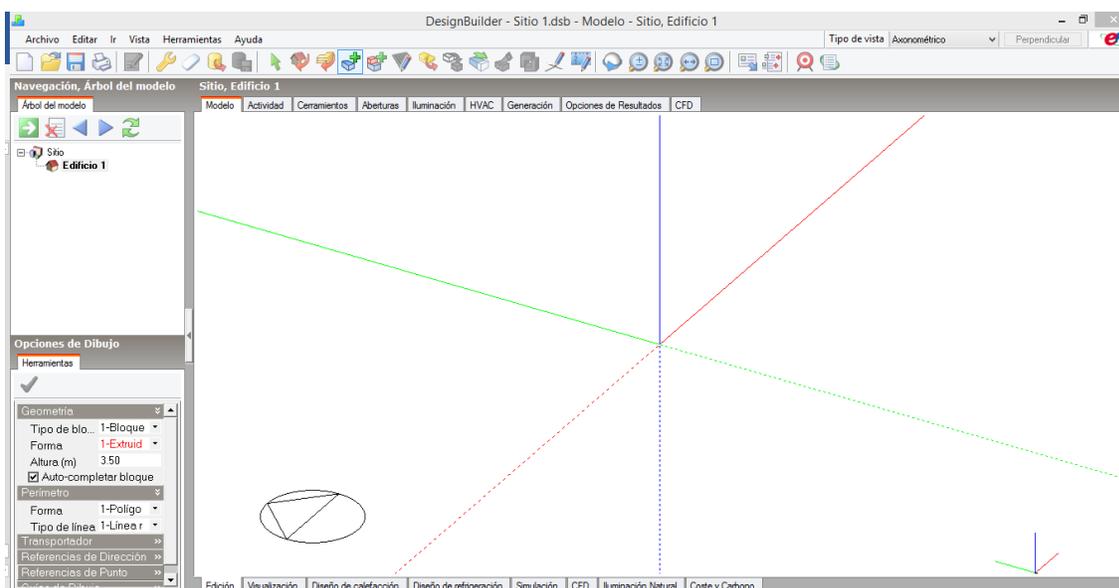


Figura A.1 Pantalla inicial de DesignBuilder.

Para la modelación energética de una edificación, DesignBuilder a través de su interfaz gráfica permite crear modelos de edificios volumétricamente realistas, en un ambiente tridimensional. Como primer paso se abre un archivo “nuevo” y se seleccionan los datos de clima de una lista predeterminada que contiene el software, si el archivo climático no se encuentra disponible se tiene que crear o importar el archivo en formato EPW (EnergyPlus Weather) que contiene los datos de clima de forma horaria y la información del sitio como la latitud y longitud (Figura A.2).

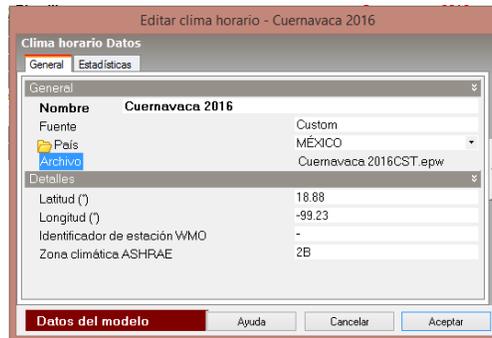


Figura A.2 Datos de clima.

Una vez seleccionado el clima, se crea la geometría, el concepto central de modelado con DesignBuilder es la creación de bloques. Se trata de formas geométricas básicas que se puedan ensamblar, mover y transformar. Los bloques se generan dibujando perímetros en dos dimensiones sobre planos horizontales, verticales o inclinados, los cuales luego se extruyen para generar formas tridimensionales, también se puede importar un plano en formato DXF y archivos de dibujo Bitmap (PDF, BMP, JPG, PNG, GIF o TIFF) que se extruyen dentro de DesignBuilder para formar el edificio (Figura A.3).

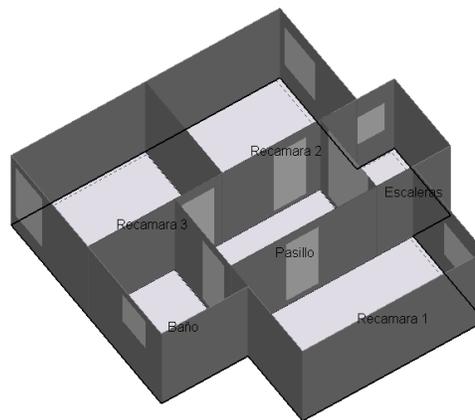


Figura A.3 Modelo 3D de la edificación.

Después se crean las aberturas (puertas y ventanas) internas y externas, éstas se pueden crear de forma automática o personalizada posicionándose sobre la pared donde se colocarán, se crean mediante el trazo de perímetros sobre planos de dibujo activos (Figura A.4). Se encuentran herramientas para realizar diferentes formas con diferentes ángulos y líneas.

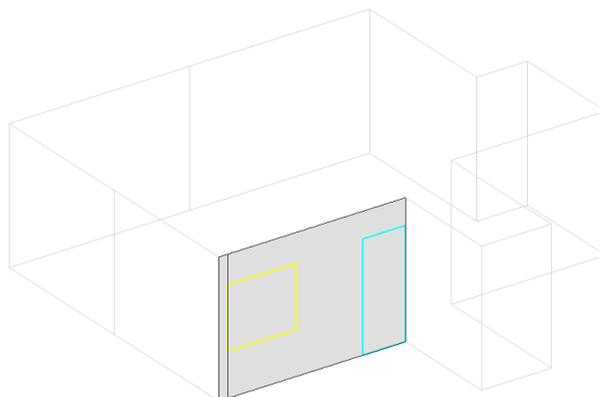


Figura A.4 Generación de ventanas.

Una vez creado el edificio y las aberturas se introducen los materiales y sus propiedades termofísicas. DesignBuilder emplea componentes denominados **Cerramientos** para modelar los elementos constructivos opacos del edificio: muros, techos y suelos, entre otros. Estos componentes se asignan en la pestaña de datos de cerramientos, en la pantalla de edición, y pueden ser definidos en conjunto mediante Plantillas de cerramientos. El comportamiento térmico de los cerramientos, y la forma en que reflejan y absorben la radiación solar, depende de las propiedades termofísicas y ópticas de sus materiales. En ese sentido es importante revisar cuidadosamente su composición, principalmente en lo que respecta a los niveles de aislamiento (valor U) y masa térmica (capacidad térmica interna), así como las propiedades superficiales de las capas de material expuestas al exterior y al interior. La envolvente puede estar formada por una o varias capas de varios o del mismo material, cada una de las capas requiere información como la conductividad, calor específico, densidad, entre otros (Figura A.5).

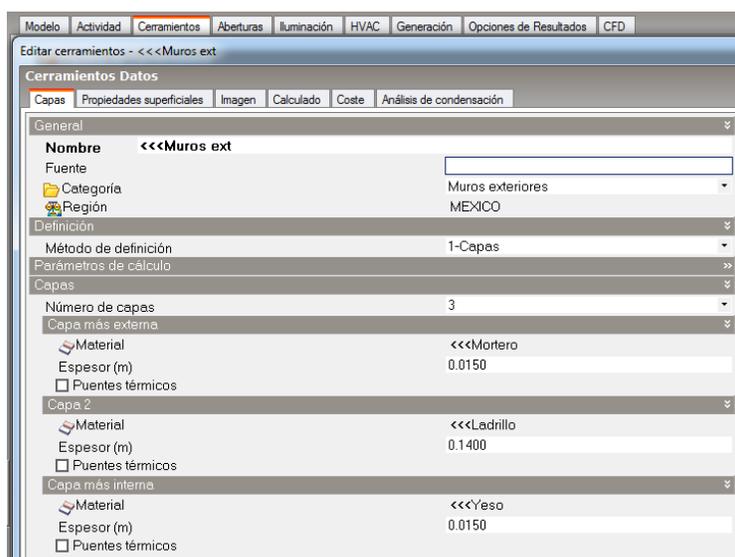


Figura A.5 Cerramientos y propiedades termofísicas.

Después se introducen las propiedades de las aberturas (puertas, ventanas, huecos, rejillas), se especifica el tipo de cristal, el grosor, marcos de ventanas, si es cristal simple o doble, así como las propiedades ópticas (Figura A.6).

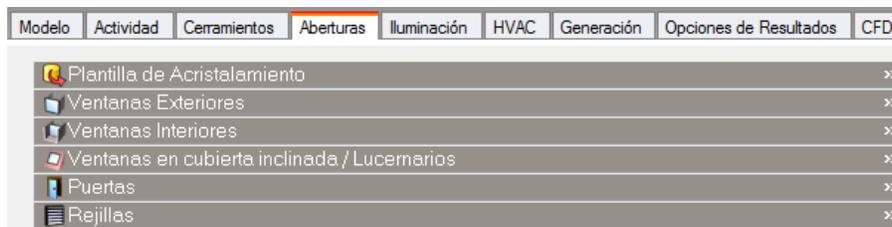


Figura A.6 propiedades de las aberturas.

Posteriormente, se agrega la actividad del edificio, ésta es parte importante pues de ella depende el comportamiento térmico. En la etiqueta de **Actividad** se definen aspectos como las características de ocupación del edificio (personas), las ganancias internas por aparatos y equipos (computadoras, equipo de oficina y cocina, etc.), las condiciones ambientales requeridas, la demanda de agua, entre otros. En la Figura A.7 se aprecia cada campo en esta pestaña.



Figura A.7 Actividad del edificio.

La plantilla de **Iluminación** permite definir las características de los sistemas de iluminación artificial, así como el control de ésta a partir de la disponibilidad de luz natural (Figura A.8).

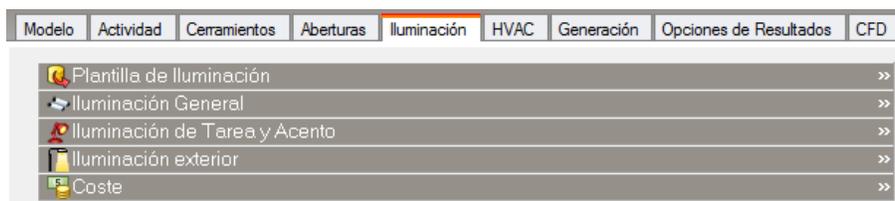


Figura A.8 Iluminación del edificio.

Si en la edificación se generan cargas térmicas que comprometan la temperatura de confort o si la temperatura está por debajo de la misma, DesignBuilder permite la simulación de sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación, modelando a detalle cada uno de sus componentes, mediante el módulo HVAC. Incluye todos los sistemas HVAC de referencia del estándar ASHRAE 90.1 (Figura A.9).



Figura A.9 Sistemas de acondicionamiento de aire.

Si la edificación que se requiere modelar tiene viviendas vecinas, es importante que se construyan para que el fenómeno sea lo más cercano a la realidad, así se modela la transferencia de calor entre las viviendas y se toma en cuenta las sombras que estas edificaciones pueden proporcionar sobre la edificación de interés (Figura A.10).

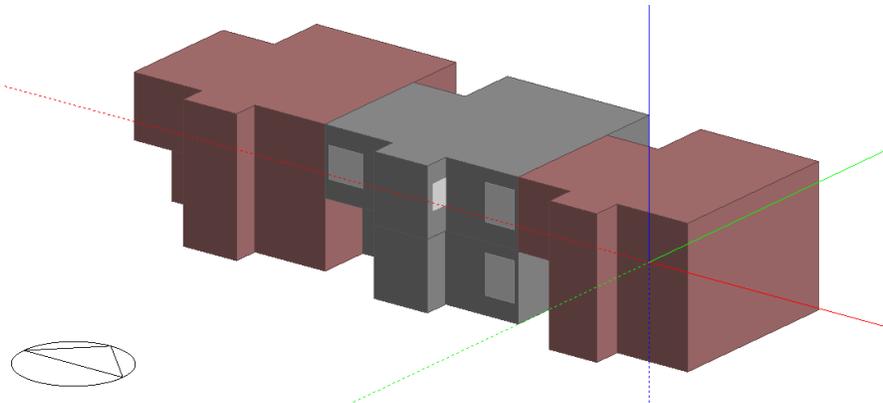


Figura A.10 Conjunto habitacional de las viviendas.

Terminada la edificación se selección los resultados en la pestaña **Opciones de Resultados**, aquí se seleccionan las variables de salida de una lista de resultados prediseñados. Esta opción permite generar resultados promedio y totales en los niveles Edificio y Bloque. Dentro de los resultados, se encuentran resultados de Energía (transferencia de calor en superficies, ganancias internas y solares, cargas y consumos HVAC, etc.), Confort y ambiente (ambiente,

renovaciones de aire, confort y distribución de temperaturas) y Detalles de cerramientos y superficies (Figura A.11).

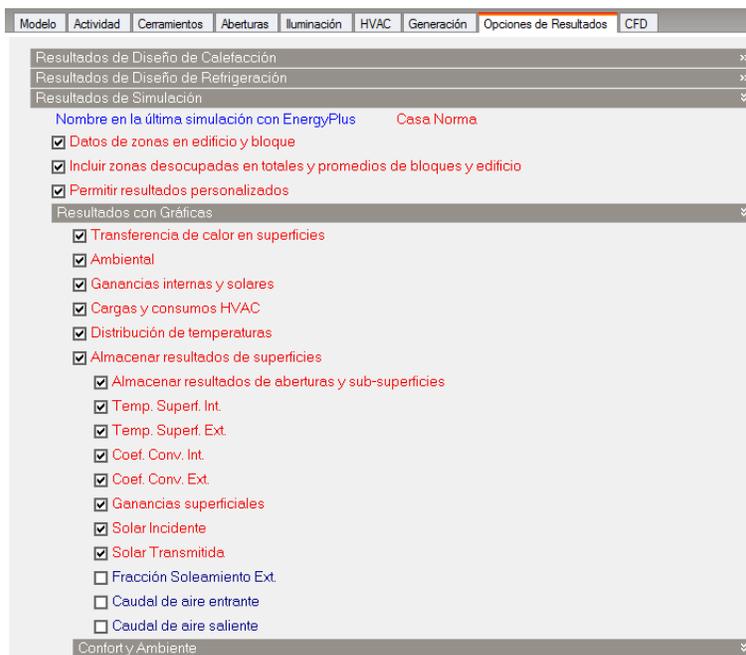


Figura A.11 Opciones de resultados.

Para la modelación se exporta un archivo en formato IDF al software EnergyPlus el cual contiene toda la información del edificio: la geometría, dimensiones, características termofísicas de los materiales, actividad, uso del edificio, el archivo climático, etc. (Figura A.12).

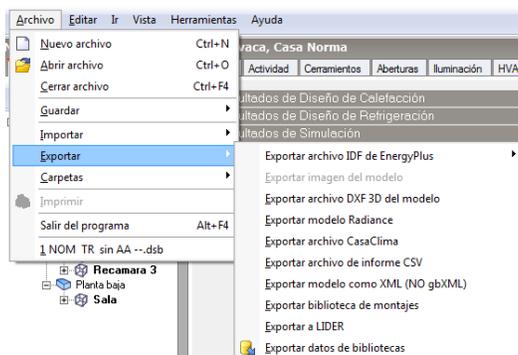


Figura A.12 Archivo exportado a EnergyPlus.

Antes de exportar el archivo DesignBuilder requiere los parámetros de simulación (Figura A.13), en este punto se selecciona el paso de tiempo de la simulación (puede ser de cada minuto o hasta cada 30 minutos), el periodo de la simulación (semanal, mensual, anual, este último abarca los 365 días del año), la convergencia, si existe sombreado y los Intervalos de resultados (mensual y anual, diario, horario y sub-horario).

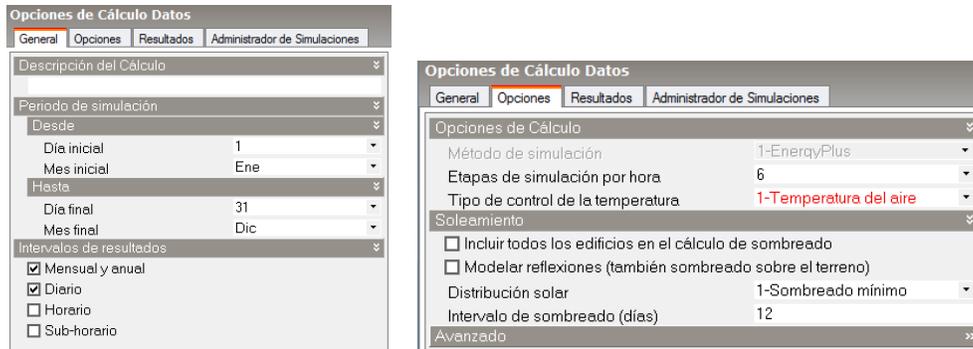


Figura A.13 Parámetros de simulación.

Una vez exportado el archivo IDF, este se abre en EnergyPlus cargándose automáticamente todas las características y parámetros que se ingresaron en DesignBuilder. Posteriormente, se ejecuta el comando de simulación (**Simulate**) (Figura A.14).

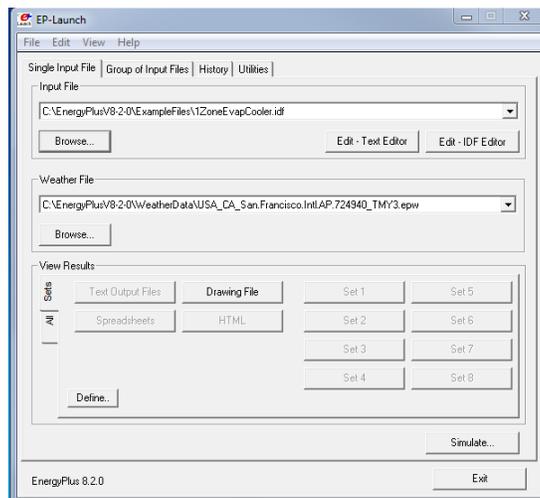


Figura A.14 Interface de EnergyPlus.

Una vez terminada la simulación térmica se genera un archivo en formato .dat donde se muestran los resultados seleccionados, otra manera de visualizarlos es de manera gráfica como se observa en la Figura A.15.

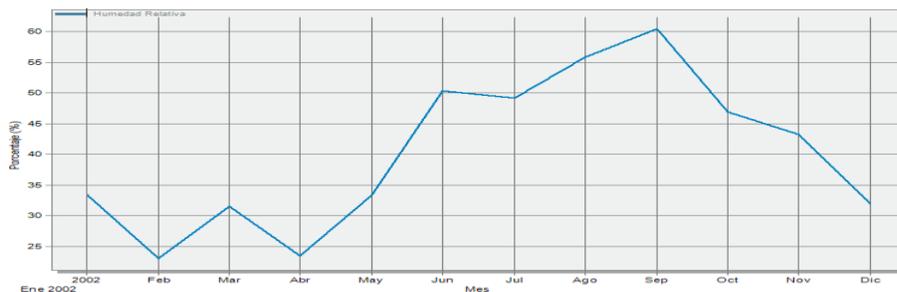


Figura A.15 Resultados: humedad relativa.