



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Desempeño de modelos de confort térmico en
vivienda de interés social ubicada en el clima
cálido de México

presentada por

Ing. Wendy G. Báez García

como requisito para la obtención del grado
de

**Maestra en Ciencias en Ingeniería
Mecánica**

Director de tesis

Dr. José Jassón Flores Prieto

Cuernavaca, Morelos, México. Junio de 2020.



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Cuernavaca, Morelos **29/mayo/2020**

OFICIO No. SAC/ 155/2020

Asunto: Autorización de impresión de tesis

WENDY GUADALUPE BÁEZ GARCIA
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
P R E S E N T E

Por este conducto tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado *"Desempeño de modelos de confort térmico en vivienda de interés social ubicada en clima cálido de México"*, 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.

A T E N T A M E N T E

Excelencia en Educación Tecnológica

"Conocimiento y tecnología al servicio de México"

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



**CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA**

C.c.p. M.E. Guadalupe Carrido Rivera, Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Expediente
CVGR/CHG



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Mecánica

"2020. Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"


Cuernavaca, Mor., [REDACTED]


OFICIO No. DIM/072/2020


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


Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la Ing. Wendy Guadalupe Báez García con número de control M18CE024, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado **"Desempeño de modelos de confort térmico en vivienda de interés social ubicada en clima cálido de México"** y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.


Dr. José Jassón Flores Prieto
Director de tesis


Dr. Sara Lilia Moya Acosta
Revisor 1


Dr. Efraín Simá Moo
Revisor 2


Dr. Héctor Javier Vergara
Hernández
Revisor 3

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante
ABO/mstt

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Interiores Internos Relativo a/El. Palmira, V. P. 4249 Cuernavaca, México.
, ext. 1421 • correo: dim@cenidet.edu.mx
www.tecnm.mx | www.cenidet.tecnm.mx



A g r a d e c i m i e n t o s

Le agradezco al **gran Yo Soy** por ser tan magnifico y sentir su presencia en cada momento de mi vida ♡

Agradezco a mis padres **Miguel Ángel Báez y Domi García** por todo el amor, apoyo y comprensión que me han brindado, gracias a ustedes hoy soy lo que soy.

A mis hermanos **Arichel, Ana, Raquel, Miguel Ángel y Felisrael** porque sin ustedes no sé qué sería de mí, sin ese gran apoyo en momentos de dificultad y en momentos de triunfo.

A un gran y maravilloso hombre **Luis Guillermo Carreto Hernández**, gracias por todo el apoyo, cariño, paciencia y amor que me brindaste.

Sangre de mi sangre, mi pequeño **Neizan Ibrahim Carreto Báez**, si no tenía ganas de seguir, con solo verte me impulsaste a continuar más que mil charlas motivacionales.

Agradezco a mi segunda familia **Hugo Carreto, Minerva Hernández y Abigail Esmeralda Carreto Hernández** por todo el apoyo incondicional que siempre nos brindan.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (**CENIDET**) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACYT**), por la oportunidad y el apoyo económico para continuar con mi formación académica.

Agradezco a mis profesores **Dr. Jassón, Dr. Sima, Dra. Sara, Dr. Vergara, Dr. Xamán, Dra. Yvonne, Dr. Arce y Dr. Chagolla, Dr. Blanco, Dr. Arturo, Dr. Eladio y Dra. Claudia** por cada sabio consejo y apoyo que me brindaron en este camino.

A la señora **Roció Salazar Ruiz** por ser tan amable siempre y por la atención que me brindó en todo este proceso.

A mis amigos y compañeros, **Julio, Arturo, Víctor, Agustín, Luis, Fernando, Verónica, Sandra, Mau, Sam Luis A., Sergio y Benjamín** gracias por brindarme su amistad, los guardaré por siempre en mi corazón. “*Chi trova un amico, trova un tesoro*”

D e d i c a t o r i a

*Dedico este trabajo con un gran amor y cariño a las personas más importantes en mi vida a Luis
Guillermo Carreto Hernández y a nuestro hijo Neizan Ibrahim Carreto Báez los amo ♥*

Mujer, amiga:

“Hay muchas mujeres virtuosas y capaces en el mundo. ¡Pero tú las superas a todas!”
(Proverbios 31:29; NTV)

¡ÁNIMO!



ÍNDICE

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABLAS.....	vii
NOMENCLATURA.....	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xvi
Capítulo I Introducción.....	1
1.1 Generalidades	2
1.1.1 Sociedad, energía y medio ambiente	2
1.1.2 Consumo de energía en edificios y confort térmico.....	4
1.1.3 Estrategias de ahorro de energía y confort térmico en edificios	5
1.2 Revisión bibliográfica	7
1.2.1 Revisión del confort térmico y consumo de energía en edificaciones.....	8
1.2.2 Modelos de confort térmico estáticos	10
1.2.3 Modelos de confort térmico adaptativos.....	11
1.2.4 Evaluación térmica y energética en edificaciones	16
1.2.5 Evaluación térmica y energética de edificaciones aplicando modelos de confort	19
1.2.6 Conclusiones de la revisión bibliográfica.....	21
1.3 Objetivos y alcances.....	22
1.3.1 Objetivo general.....	22
1.3.2 Objetivos específicos	22
1.3.3 Alcances	23
1.4 Estructura de tesis.....	23
Capítulo II Marco teórico, localización de lugar y edificación de estudio	25
2.1 Fundamentos teóricos.....	26
2.1.1 Edificaciones	26
2.1.2 Transferencia de calor en edificaciones.....	26
2.1.2.1 Conducción.....	27
2.1.2.2 Convección	28
2.1.2.3 Radiación	33

2.1.3	Transferencia de calor a través de los materiales.....	35
2.1.4	Balance térmico en edificaciones	36
2.1.5	Ganancias y pérdidas de calor en edificaciones.....	37
2.1.6	Cargas térmicas	38
2.1.6.1	Cargas térmicas de calentamiento	39
2.1.6.2	Cargas térmicas de enfriamiento	40
2.1.7	Geometría solar	43
2.1.8	Confort térmico	45
2.1.8.1	Actividad física	46
2.1.8.2	Humedad relativa.....	48
2.1.8.3	Temperatura radiante media y del aire	48
2.1.8.4	Velocidad del aire	50
2.1.8.5	Vestimenta	50
2.1.9	Enfoque estático y enfoque adaptativo	51
2.1.9.1	Enfoque estático	51
2.1.9.2	Enfoque adaptativo.....	53
2.2	Localización y caracterización climática	54
2.2.1	Selección de tipo clima y número de población por ciudad.....	54
2.2.2	Selección por capacidad de AC recomendada por zona.....	59
2.2.3	Ubicación geográfica y condiciones climáticas de las ciudades de estudio	61
2.3	Edificación de estudio.....	70
2.3.1	Selección de la edificación de estudio	70
2.3.2	Edificación de estudio (vivienda de interés social)	70
2.3.3	Zonas térmicas.....	74
2.3.4	Ganancias internas	77
Capítulo III Modelos de confort térmico y plataforma de simulación.....		79
3.1	Modelos de confort térmico	79
3.2	Modelo de confort térmico estático	80
3.2.1	Modelo de confort térmico ASHRAE 55.....	80
3.3	Modelos de confort térmico adaptativos	82
3.3.1	Modelo de confort térmico EN 15251	82
3.3.2	Modelo de confort térmico CIBSE GUIDE A	84
3.3.3	Modelos de confort térmico adaptativo locales.....	85
3.4	Modelos de confort térmico para ciudades de estudio	87
3.5	Evaluación del confort térmico	87
3.6	Evaluación del costo de la energía eléctrica.....	88
3.7	Verificación de la plataforma de simulación	89
3.7.1	Verificación de los casos BESTest 900FF y 900	89

3.7.1.1 BESTest 900FF: simulación de la temperatura interior	91
3.7.1.2 BESTest 900: simulación de las cargas térmicas	93
3.7.2 Verificación de la edificación de estudio (vivienda de interés social)	95
Capítulo IV Resultados y discusión.....	100
4.1 Resultados y discusión.....	101
4.1.1 Clima cálido húmedo	101
4.1.2 Clima cálido semihúmedo	105
4.1.3 Clima cálido seco	109
4.1.4 Clima cálido seco extremo	113
Capítulo V Conclusiones y recomendaciones.....	118
5.1 Conclusiones	119
5.2 Recomendaciones.....	122
BIBLIOGRAFÍA	124

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Porcentaje de población urbana en cada continente	2
Figura 1.2 Población y tasa de crecimiento poblacional en México, 1900-2050	3
Figura 1.3 Consumo de energía nacional dividida por sectores	4
Figura 2.1 Representación de los mecanismos de transferencia de calor	27
Figura 2.2 Representación del mecanismo de transferencia de calor por conducción	28
Figura 2.3 Representación del mecanismo de transferencia de calor por convección	29
Figura 2.4 Descomposición de la energía incidente en una superficie	34
Figura 2.5 Transferencia de calor y masa en edificios	37
Figura 2.6 Trayectoria de la tierra alrededor del sol	44
Figura 2.7 Ángulos y altura en la trayectoria del sol	44
Figura 2.8 Confort térmico en función de la temperatura del aire y la humedad relativa	48
Figura 2.9 Confort térmico en función de la temperatura del aire y la temperatura de cerramientos	49
Figura 2.10 Confort térmico en función de la velocidad del viento y la temperatura del aire	50
Figura 2.11 Relación entre el PMV y el PPD	53
Figura 2.12 Zonas térmicas en el mundo	54
Figura 2.13 Distribución municipal de los climas en México, (Fuente: CONUEE,2016)	56
Figura 2.14 a) vivienda con alto consumo de energía, b) vivienda con mediano consumo de energía, c) vivienda con bajo consumo de energía	57
Figura 2.15 Número de habitantes de las ciudades con clima cálido de México	59
Figura 2.16 Clasificación de zonas por Estados de la Republica Mexicana	60
Figura 2.17 Comportamiento de las condiciones climáticas de Acapulco y Villahermosa	63
Figura 2.18 Comportamiento de las condiciones climáticas de Cancún y Mérida	65
Figura 2.19 Comportamiento de las condiciones climáticas de Ciudad Juárez y Tijuana	67
Figura 2.20 Comportamiento de las condiciones climáticas de Hermosillo y Mexicali	69
Figura 2.21 Conjunto de viviendas	71
Figura 2.22 Orientaciones de la edificación de estudio	73
Figura 2.23 Zonas térmicas (a) planta alta (b) planta baja	75
Figura 2.24 Dimensiones de las zonas térmicas de la planta alta	76
Figura 2.25 Dimensiones de las zonas térmicas de la planta baja	77
Figura 3.1 Temperatura de confort en función de la temperatura exterior en edificios en funcionamiento libre (A), y edificios acondicionado (B) (Fuente: Base de datos ASHRAE y Humphreys)	74
Figura 3.2 Ancho de banda de confort de ASHRAE 55-2010	76
Figura 3.3 Ancho de banda de confort de EN 15251	79
Figura 3.4 Ancho de banda de confort de CIBSE Guide A	80
Figura 3.5 Modelo BESTest para los casos 900FF y 900	85
Figura 3.6 Componentes para la plataforma de simulación del caso 900FF	86
Figura 3.7 Comparativo de las temperaturas interiores del caso 900FF con el presente trabajo	88
Figura 3.8 Componentes para la plataforma de simulación del caso 900	88
Figura 3.9 Comparativo de las cargas térmicas entre el caso 900 con distintos autores/software y el presente trabajo	89
Figura 3.10 Proceso de construcción y simulación de la edificación NOM-020-ENER-2011	90
Figura 3.11 (a) Construcción de una zona térmica a través del Plugin, (b) conjunto de zonas térmicas de la edificación NOM-020-ENER-2011	91
Figura 3.12 Comparativo de las cargas de enfriamiento de la edificación NOM-020-ENER-2011	92

Figura 4.1 Comparación de los modelos de confort térmico en ciudades con clima cálido húmedo.....	101
Figura 4.2 Comparación de los modelos de confort térmico en ciudades con clima cálido semihúmedo ...	105
Figura 4.3 Comparación de los modelos de confort térmico en ciudades con clima cálido seco	109
Figura 4.4 Comparación de los modelos de confort térmico en ciudades con clima cálido seco extremos .	114

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Conductividad térmica de los materiales de construcción.....	28
Tabla 2.2 Coeficientes de rugosidad del método simple combinado	30
Tabla 2.3 Índice de rugosidad del método TARP.....	31
Tabla 2.4 Coeficientes MoWITT	31
Tabla 2.5 Algoritmo difusor para la envolvente de una edificación.....	32
Tabla 2.6 Reflectividad y emisividad de los materiales de construcción	35
Tabla 2.7 Tasa metabólica.....	47
Tabla 2.8 Factor de vestimenta de diferentes conjuntos de ropa.....	51
Tabla 2.9 Valores de los coeficientes a, b y c.....	52
Tabla 2.10 Relación entre el PMV y el PPD	53
Tabla 2.11 Selección de ciudades con clima cálido de México	58
Tabla 2.12 Clasificación de zonas de capacidad de BTU por m ² de los Estados de la República Mexicana ..	59
Tabla 2.13 Ciudades seleccionadas para el estudio	61
Tabla 2.14 Clasificación de climas de acuerdo a la carta climática Köppen-Geiger.....	61
Tabla 2.15 Condiciones climáticas de Acapulco y Villahermosa	62
Tabla 2.16 Condiciones climáticas de Cancún y Mérida	64
Tabla 2.17 Condiciones climáticas de Ciudad Juárez y Tijuana.....	66
Tabla 2.18 Condiciones climáticas de Hermosillo y Mexicali	68
Tabla 2.19 Clasificación por superficie construida y valor de la vivienda	70
Tabla 2.20 Especificaciones de los materiales utilizados para la construcción de la edificación de estudio .	72
Tabla 2.21 Propiedades termofísicas de los materiales	72
Tabla 2.22 Descripción de las aberturas de la fachada.....	74
Tabla 2.23 Horario de permanencia de los ocupantes	74
Tabla 2.24 Descripción de las zonas térmicas	76
Tabla 2.25 Ganancias dentro de la vivienda	77
Tabla 3.1 Aplicabilidad sugerida para las categorías y sus rangos de temperatura aceptables asociados	83
Tabla 3.2 Selección de los modelos de confort térmico para cada tipo de clima.....	87
Tabla 3.3 Relación entre PMV/PPD	88
Tabla 3.4 Resumen del lugar y el clima.....	90
Tabla 3.5 Especificaciones de los materiales	91
Tabla 3.6 Propiedades de las ventanas y vidrios	91
Tabla 3.7 Comparación de resultados del caso 900FF de BESTest.....	92
Tabla 3.8 Comparación de resultados del caso 900 de BESTest.	94
Tabla 3.9 Datos generales de la edificación de estudio	97
Tabla 3.10 Datos generales de la edificación de estudio.....	97
Tabla 3.11 Comparación de los resultados para la verificación de la plataforma	98
Tabla 4.1 Nomenclatura de las ciudades con clima cálido húmedo.....	101
Tabla 4.2 Comparativo del costo de la energía eléctrica en ciudades con clima cálido húmedo	103
Tabla 4.3 Comparativo de los modelos en términos del potencial de ahorro de energía, sensación térmica y costo económico en ciudades con clima cálido húmedo	104
Tabla 4.4 Nomenclatura de las ciudades con clima cálido semihúmedo	105
Tabla 4.5 Comparativo del costo de la energía eléctrica en ciudades con clima cálido semihúmedo.....	107
Tabla 4.6 Comparativo de los modelos en términos del potencial de ahorro de energía, sensación térmica y costo económico en ciudades con clima cálido semihúmedo	108
Tabla 4.7 Nomenclatura de las ciudades con clima cálido seco.....	109
Tabla 4.8 Comparativo del costo de la energía eléctrica en ciudades con clima cálido seco	111
Tabla 4.9 Comparativo de los modelos en términos del potencial de ahorro de energía, sensación térmica y costo económico en ciudades con clima cálido seco	112

Tabla 4.10 Nomenclatura de las ciudades con clima cálido seco extremo.....	113
Tabla 4.11 Comparativo del costo de la energía eléctrica en ciudades con clima cálido seco extremo ...	116
Tabla 4.12 Comparativo de los modelos en términos del potencial de ahorro de energía, sensación térmica y costo económico en ciudades con clima cálido seco extremo	116

NOMENCLATURA

Simbología	Descripción	Unidades
A	Área	[m ²]
A _s	Área expuesta a la transferencia de calor	[m ²]
C _t	Constante de convección natural turbulenta	[W/(m ² · K ^{4/3})]
D, E, F	Coefficientes de rugosidad del material	
ET*	Temperatura efectiva	[°C]
G	Radiación solar	[W/m ²]
h _c	Coefficiente convectivo	[W/m ² · K]
h _f	Coefficiente convectivo forzado	[W/m ² · K]
h _n	Coefficiente convectivo natural	[W/m ² · K]
h _r	Coefficiente de radiación	[W/m ² · K]
k	Conductividad térmica	[W/m · K]
P	Perímetro de la superficie	[m]
R _f	Multiplicador de la rugosidad de la superficie	
T _a	Temperatura del aire	[°C]
T _c ^{ASHRAE55}	Temperatura de confort ASHRAE55	[°C]
T _c ^{EN1521}	Temperatura de confort EN 15251	[°C]
T _c ^{CIBSE}	Temperatura de confort CIBSE	[°C]
T _{co}	Temperatura de confort	[°C]
T _f	Temperatura del fluido	[°C]
T _g	Temperatura del globo	[°C]
T _m	Temperatura ambiente promedio	[°C]
T _{mr}	Temperatura media radiante	[°C]
T _s	Temperatura de la superficie	[°C]
T _{sa}	Temperatura seca del aire	[°C]
T _o	Temperatura operativa	[°C]
T _{out}	Temperatura exterior	[°C]
T _{ref}	Temperatura media mensual del aire del bulbo seco	[°C]
T _{rm}	Temperatura media en funcionamiento	[°C]
V _a	Velocidad del aire	[m/s]
V _z	Velocidad del viento calculada a la altura sobre el centroide de superficie	[m/s]
W _f	Modificador de la dirección del viento	

Simbología griega

α	Absortividad	
ε	Emisividad	
θ _{ed}	Temperatura media actual	
θ _{rm}	Temperatura media anterior	
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/m ² · K ²]
ρ	Reflectividad	
τ	Transmisividad	

Acrónimos

AC	Aire Acondicionado
----	--------------------

AEMA	Agencia Europea del Medio Ambiente
ASHRAE	Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado
ATG	Guía de Límites de Temperatura Adaptativos
BCS	Conservación de Energía en Edificios y Sistemas Comunitarios
BESTest	Prueba de Simulación de Energía del Edificio
CIBSE	Ingeniero de Institución Colegiada de Servicios de Construcción
CIMAV	Centro de Investigación en Materiales Avanzados
CONUEE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía
CONAFO	Consejo Nacional de Población
DOF	Diario Oficial de la Federación
EN	Norma Europea
HVAC	Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado
IEA	Agencia Internacional de Energía
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
ISO	Organización Internacional para la Estandarización
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
NREL	Laboratorio Nacional e Energías Renovables
OTS	Sensación Térmica Observada
PMV	Voto Medio Predicho
PPD	Porcentaje Previsto de Insatisfechos
SCAT	Control Inteligente y Confort Térmico
SENER	Secretaría de Energía
SHA	Calefacción Solar y Enfriamiento
SSPC	Comité Permanente de Proyectos Estándar
TSV	Voto de Sensación Térmica
VN	Ventilación Natural

RESUMEN

Este trabajo muestra un estudio comparativo entre los modelos de confort térmico y un modelo de referencia con una temperatura a 25.0°C en una vivienda de interés social en el clima cálido de México.

El comparativo se realizó en términos del potencial de ahorro de energía, la sensación térmica y el costo económico de la energía eléctrica. Los modelos de confort térmico considerados fueron el ASHRAE 55, EN 15251, CIBSE Guide A y locales basados en el enfoque estático y adaptativo. La edificación considerada fue utilizada para la elaboración de la norma NOM-020-ENER-2011.

Las ciudades de estudio se seleccionaron a partir del número de habitantes, el tipo de clima y el consumo de energía. Acapulco y Villahermosa se seleccionaron para representar el clima cálido húmedo, Cancún y Mérida el clima cálido semihúmedo, Ciudad Juárez y Tijuana el clima cálido seco, Hermosillo y Mexicali el clima cálido seco extremoso. El modelo arquitectónico de la edificación se realizó mediante el software Google SketchUp V.14 el cual fue transferido a la plataforma de TRNSYS 17. Las cargas de enfriamiento se obtuvieron en periodos anuales utilizando el modelo de referencia y los modelos de confort térmico. La sensación térmica se basó mediante el uso del modelo PMV/PPD y la escala de los siete puntos ASHRAE. El costo de la energía se encontró de acuerdo al precio presentado por la CFE en 2019.

Los resultados mostraron que en ciudades con clima cálido húmedo y semihúmedo el modelo adaptativo CIBSE Guide A reduce entre 5.92-7.23 *MWh* las cargas de enfriamiento al año. El modelo CIBSE Guide A mostró un potencial de ahorro de energía de 40.6-43.1%, logró ahorrar hasta casi \$10,000.00 pesos en el costo económico y exhibió una sensación térmica de neutro a ligeramente cálido.

Por otra parte, en ciudades con clima cálido seco y seco extremoso el modelo adaptativo local mostró una reducción de las cargas de enfriamiento al año de 1.97-6.05 *MWh*. El modelo local mostró un potencial de ahorro de energía de 30.3-47.8%, logró ahorrar hasta casi \$8,000.00 pesos en el costo económico y expuso una sensación térmica de neutro a ligeramente frío.

En conclusión, los modelos de confort muestran alto desempeño en el ahorro energético y a su vez reducen el costo económico de la energía, sin embargo, los modelos adaptativos llegan a la neutralidad en la sensación de los ocupantes, siendo los recomendados para viviendas ubicadas en el clima cálido.

ABSTRACT

This work shows a comparative study between thermal comfort models and a reference model in a social interest housing in Mexico's warm climate.

The comparison was made in terms of the energy saving potential, the thermal sensation and the economic cost of electric energy. The thermal comfort models were ASHRAE 55, EN 15251, CIBSE Guide and specific premises in the static and adaptive approach. The building used was used for the elaboration of the norm NOM-020-ENER-2011.

The cities of study were selected based on the number of inhabitants, the type of climate and energy consumption. Acapulco and Villahermosa were selected to represent the humid warm climate, Cancún and Mérida the semi-humid warm climate, Ciudad Juárez and Tijuana the dry warm climate, Hermosillo and Mexicali the extreme dry warm climate. The architectural model of the study building was made using Google SketchUp V.14 software, which was transferred to the TRNSYS 17 platform. Cooling loads were obtained in annual periods and using the reference model with respect to thermal comfort models. The thermal sensation was based on the use of the PMV/PPD model and the seven-point ASHRAE scale. The cost of energy was found according to the price presented by the CFE in 2019.

The results showed that in cities with warm humid and semi-humid climate the adaptive model CIBSE Guide A reduces between 5.92-7.23 *MWh* of cooling loads per year. The CIBSE Guide A model showed an energy saving potential of 40.6-43.1%, managed to save up to \$10,000.00 in economic spending and exhibited a thermal sensation from neutral to slightly warm.

On the other hand, in cities with hot dry and extreme dry weather, the local adaptive model showed a reduction in cooling loads per year of 1.97-6.05 *MWh*. The local model showed an energy saving potential of 30.3-47.8%, managed to save up to \$8,000.00 in economic spending and exposed a thermal sensation of neutral to slightly cold.

In conclusion, the comfort models show high performance energy saving and in turn reduce the cost of energy, however, adaptive models reach neutrality in the feeling of the occupants, being recommended for housing located in warm weather.

CAPÍTULO I

Introducción

En este Capítulo se presentan las generalidades del estudio y la motivación que impulsó la realización del proyecto. Por otra parte, se muestra la revisión del estado del arte referente a la aplicación de los modelos de confort térmico y el ahorro de energía en edificaciones, la cual llevo al planteamiento de los objetivos y los alcances del proyecto.

1.1 Generalidades

La humanidad ha mantenido una estrecha relación con la naturaleza, pues de ella ha obtenido alimentos, medicamentos, combustible, materias primas para viviendas u otro tipo de infraestructura entre otros. Sin embargo, el uso excesivo de los recursos naturales ha llevado a la degradación ambiental, provocando así afectaciones para la humanidad.

1.1.1 Sociedad, energía y medio ambiente

En las últimas décadas, el crecimiento de la población aunado al estilo de vida de las personas, han resultado en un rápido aumento en el consumo de energía (Pasquevich, 2016). La migración del campo a la ciudad para buscar una mejor calidad de vida, es una de las principales causas del crecimiento urbano. A inicios del siglo XIX, la población urbana representaba el 3.0% de la población mundial, mientras que, para el siglo XX fue de 13.0%. En el año de 1950, la población urbana representó el 29.1% y en 2015 alcanzó la cifra del 48.7%. Por lo anterior, se estima que para el año 2030 la población urbana represente el 60.0% de la población mundial (Saladié, 2019). La Figura 1.1 muestra el porcentaje de distribución de la población urbana por continentes desde el año 1990 hasta el estimado para el 2030.

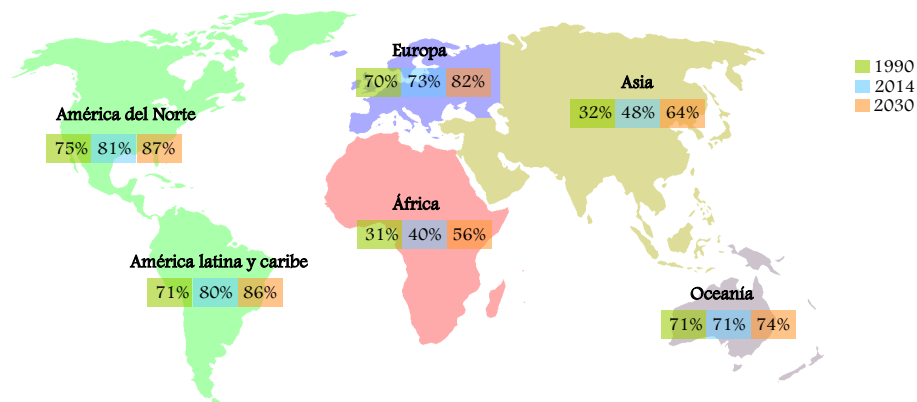


Figura 1.1 Porcentaje de población urbana en cada continente

Por otra parte, en México el impacto del crecimiento poblacional no ha sido diferente al resto del mundo. Para el siglo XXI la tasa de crecimiento nacional era del 1.2%, siendo casi ocho veces mayor el número de habitantes que en el siglo XX. Mientras que, en el año 2010, la población llegó a ser de 114.26 millones de habitantes y se estima que para el año 2050 el número de habitantes alcance la cifra de 150.84 millones. La Figura 1.2 muestra el comportamiento del crecimiento poblacional en México desde 1900-2050 (CONAPO, 2013).

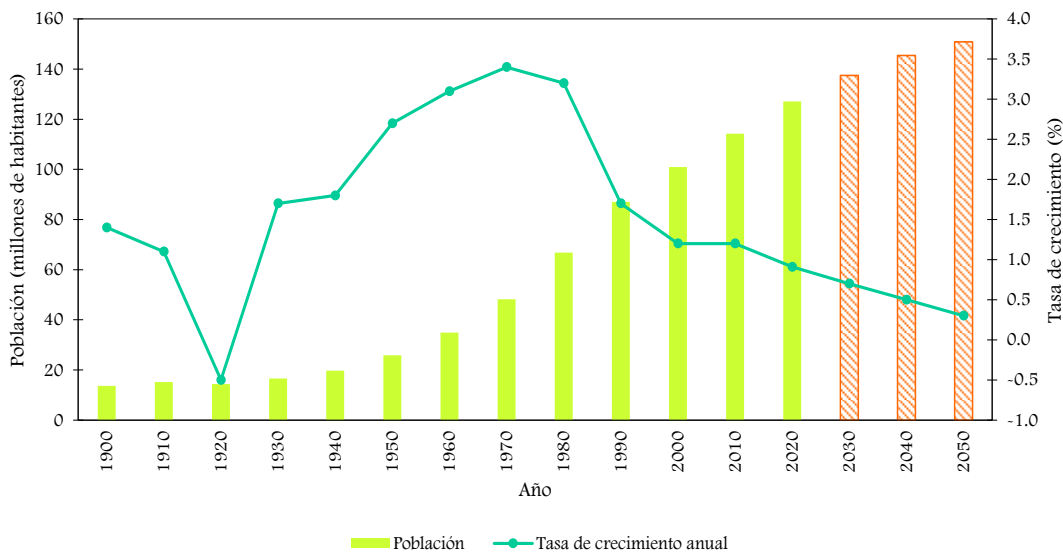


Figura 1.2 Población y tasa de crecimiento poblacional en México, 1900-2050

El incremento de la población ha sido estrechamente relacionado al continuo aumento de la energía. La energía es uno de los pilares fundamentales del progreso de la sociedad. Hoy en día, la importancia de la energía es evidente ya que su uso es indispensable para realizar la mayor parte de las actividades humanas requeridas en la agricultura, los procesos industriales, el transporte, las viviendas, entre otros. Sin embargo, estas actividades contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual lleva a cambios en el medio ambiente como el aumento de la temperatura, la disminución de la capa de ozono, entre otros aspectos (Torres-Aguilar *et al.*, 2016). El gas más emitido a la atmósfera es el dióxido de carbono (CO₂) con un 81.2%, seguido del metano (CH₄) con un 10.6%, el óxido nítrico (N₂O) con un 5.5% y los hidrofluorocarburos (HFCs) con un 2.5%. Mundialmente, la energía es la responsable del 78.0% de las emisiones de estos gases (AEMA, 2015). A

nivel nacional, el dióxido de carbono emite el 71.0% del total de gases, donde el 64.0% corresponde al consumo de combustible fósiles. Aunque en sí, los gases de efecto invernadero constituyen un elemento esencial para la vida, puesto que sin ellos el planeta sería un bloque de hielo, el aumento de estos gases lleva al calentamiento global y consigo al cambio climático.

1.1.2 Consumo de energía en edificios y confort térmico

El crecimiento anual del consumo de la energía mundial entre 2005-2011 fue de 3.2%, mientras que entre 2014-2020 se estima un crecimiento del 56.0% (IEA, 2014; Allouhi, 2015). Por lo tanto, el aumento del consumo de la energía mundial es considerable, y la preocupación del ahorro de energía para disminuir los cambios ambientales se hacen presente en los sectores de mayores demandas (López *et al.*, 2019). En los países desarrollados, el sector residencial utiliza entre 20.0-40.0% del consumo final de energía (Perez-Lombard, 2008). En México, el crecimiento urbano y económico ha generado una demanda mayor del uso de la energía en los sectores de transporte, industria y residencial como se muestra en la Figura 1.3. La energía demandada por el sector residencial a nivel nacional representa el 21.9% de la energía total, este porcentaje aumenta aunado al incremento de la población y número de edificaciones (Briceño, 2018).

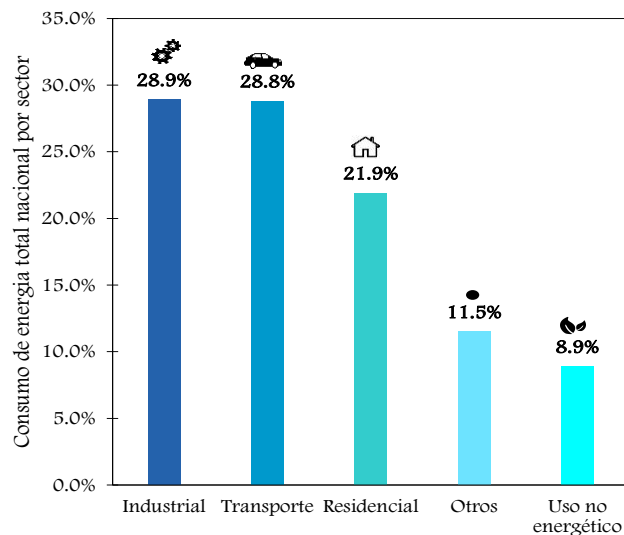


Figura 1.3 Consumo de energía nacional dividida por sectores

Las edificaciones consumen el 41.0% de la energía mundial y son las responsables de emitir el 30.0% de gases de efecto invernadero en todo el mundo (Danish, 2019). El consumo en los edificios se debe a la duración de la estancia de las personas en su interior, pues se estima que representa entre el 80.0-90.0%, por lo que controlar las condiciones de confort es una de las principales preocupaciones (Wei, 2010; Vakiloroyaya, 2014; Rupp, 2015; Arballo, 2016). El confort térmico, el lumínico, el acústico y la calidad del aire constituyen los cuatro aspectos clave de la calidad del entorno interior de los edificios, entre los cuales el confort térmico es de gran importancia e influye significativamente en la satisfacción y el rendimiento de los ocupantes (Jingyi *et al.*, 2018). Específicamente, el confort térmico y la eficiencia energética son el foco de múltiples estudios, involucrando un número considerable de variables que van desde aspectos fisiológicos, psicológicos, sociales y culturales de las personas, así como también de la ubicación geográfica (Djongyang *et al.*, 2010; Rupp *et al.*, 2015; Chenari *et al.*, 2016; Enescu, 2017).

Por otra parte, los sistemas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC) satisfacen los niveles de confort térmico aceptables por los ocupantes, sin embargo, estos sistemas consumen una proporción considerable de energía en los edificios representando el 50.0% de consumo de la energía anual, por lo que acciones concretas que conduzcan a la optimización en este rubro son de gran importancia para el ahorro energético (Bastide, 2006; Vakiloroyaya, 2014; Ionescu *et al.*, 2015). No obstante, dependiendo las condiciones climáticas, difiere el consumo de energía por los sistemas HVAC. En los climas cálidos el aumento de temperatura expone a los ocupantes a condiciones térmicas difíciles de tolerar, esto hace que el uso del aire acondicionado se vuelva necesario. Hasta el momento, los estudios sobre el confort térmico en México se desarrollan principalmente en los climas cálidos, los cuales se encuentran en el norte y sureste del país (Rincón *et al.*, 2017).

1.1.3 Estrategias de ahorro de energía y confort térmico en edificios

El sector residencial se destaca por ser uno de mayores impulsores de la demanda energética, esto debido a la alta dependencia de electricidad que requiere dicho sector (Chatellier y McNiel, 2019). El consumo de energía eléctrica en el sector residencial en México, representa casi el 19.0% de la demanda total de la nación, donde el 16.0% proviene del consumo de energía en edificaciones residenciales (viviendas) mientras que, el 3.0%

proviene edificaciones no residenciales (públicas y comerciales) (Griego *et al.*, 2015). Por lo que, para tener ahorro en el consumo de energía en las edificaciones en México, se han desarrollado distintas estrategias pasivas de enfriamiento, que, a su vez ayudan al confort térmico. Sin embargo, estas estrategias de enfriamiento pasivo aún son inasequibles para el grueso de la población de México, en particular para los usuarios de viviendas, esto debido al periodo de inversión inicial que estas requieren (Oropeza, 2016). Por otra parte, el uso de modelos de confort térmico se ha planteado como una alternativa viable en su implementación para el ahorro de energía y el confort térmico aceptable por los ocupantes de viviendas.

El confort térmico es un aspecto importante a considerar para el diseño y ahorro de energía dentro de una edificación (Enescu, 2017) y este se define como aquella condición de la mente que proporciona satisfacción con el ambiente térmico (ASHRAE55, 1992; ISO7730, 1994). El estudio del confort térmico se divide en dos tipos de enfoques: el estático y el adaptativo. La teoría del confort térmico basado en el enfoque estático fue desarrollada por Povl Ole Fanger (1934-2006) en la década de los setentas, y expresa que el sistema de termorregulación del hombre es bastante eficaz y, por tanto, creará un balance de calor dentro de amplios límites de las variables ambientales, incluso si no existe comodidad (Charles, 2003; Djongyang *et al.*, 2010). El estudio de Fanger se realizó principalmente en entornos controlados por una cámara térmica, donde predijo la sensación térmica a un grupo de 1396 personas, (Fanger, 1970). El resultado fue el modelo PMV y el modelo PPD los cuales fueron la base para algunos estándares internacionales (ASHRAE55, 1992; ISO7730, 1994; EN 15251,2007; CIBSE, 2006). El PMV es usado como índice de confort térmico, el cual predice el valor medio de un grupo de personas en una escala de sensación térmica de siete puntos que van desde +3 a -3 caliente a frío, considerándose el 0 como neutro (Wei, 2010; Vakiloroyaya, 2014). Por otra parte, la teoría del enfoque adaptativo expresa que si se produce un cambio que produzca malestar, las personas reaccionan de manera que tienden a restablecer su comodidad (Humphreys, 1997; Nicol *et al.*, 2012). Los estudios de los modelos adaptativos tenían como objetivo el analizar el comportamiento de los ocupantes y la aceptabilidad del ambiente térmico (Nicol y Humphreys, 1973; deDear *et al.*, 1997). El enfoque adaptativo se basa en estudios de campo donde se recopilan encuestas sobre el entorno térmico. Nicol y Humphreys en 2002, demostraron que la temperatura exterior tiene un efecto significativo en la sensación térmica, y que utilizando

la temperatura media en funcionamiento (T_{rm}) se tiene mayor precisión en el la temperatura de confort térmico.

Hoy en día, el desarrollo y uso de los modelos adaptativos se han propuesto como alternativas para el ahorro de energía en edificaciones. Por otro lado, los modelos estáticos, en la actualidad siguen siendo utilizados para la climatización de espacios, no obstante, han demostrado tener ineficiencias al encontrar la temperatura de confort adecuada para los ocupantes de edificaciones (Cheung *et al.*, 2019). En trabajos previos, se ha observado que la satisfacción térmica y el consumo de energía en la climatización se pueden optimizar utilizando el enfoque adaptativo (Attia y Carlucci, 2015; Young, 2018; López *et al.*, 2019). Cabe destacar que, utilizando los modelos se puede lograr ahorros considerables de energía desde el 10.0-50.0% (Attia y Carlucci, 2015; Godoy 2012).

Con base en lo anterior, en este trabajo se propone un estudio comparativo en términos del potencial de ahorro de energía, la sensación térmica y el costo económico de la energía eléctrica aplicando modelos de confort térmico (adaptativo y estático), que se utilizan en estándares internacionales y estudios de campo. Además, se contempla identificar el modelo que ayude a reducir el consumo de energía en las ciudades con clima cálido de México.

1.2 Revisión bibliográfica

En esta sección se presenta la revisión bibliográfica de trabajos e investigaciones previas relacionados con la climatización de edificaciones, ahorro de energía y confort térmico aplicando modelos de confort térmico estáticos y adaptativos, los cuales se agruparon en: revisión del confort térmico y consumo de energía en edificaciones, modelos de confort térmico estáticos, modelos de confort térmico adaptativo, evaluación térmica y energética en edificaciones y evaluación térmica y energética en edificaciones aplicando modelos de confort.

1.2.1 Revisión del confort térmico y consumo de energía en edificaciones

Taleghani *et al.* (2013) realizaron una revisión de los modelos del confort térmico desde los primeros conceptos hasta la actualidad. El estudio se basó en dos enfoques: el modelo de estado estacionario y el modelo adaptativo. Los modelos estudiados fueron: el estándar estadounidense ASHRAE 55-2010, el estándar europeo EN15251 y la guía holandesa ATG. Los estudios se dividieron en pruebas de cámara climática y estudios de campo. El estudio en cámaras climáticas se basó en considerar los procesos de intercambio de calor del cuerpo con el entorno, lo que ha conducido a modelos y estándares termo-fisiológicos de laboratorio en estado estable. Los estudios de campo fueron derivados en modelos y estándares como el estándar americano ASHRAE 55-2010, el estándar europeo EN 15251 y la guía holandesa ATG. El principal objetivo del estándar ASHRAE 55-2010 es especificar los parámetros ambientales y personales involucrados en el confort. El estándar EN 15251 se basa en el diseño y rendimiento energético de la edificación. Por su parte, la guía holandesa ATG describe el procedimiento para determinar los límites de temperatura adaptativos en varios tipos de edificios. Las normas y estándares adaptativos permiten determinar los parámetros de confort para mayor comodidad de los ocupantes dentro de una habitación.

Arballo *et al.* (2016) realizaron una evaluación de modelos de confort para interiores y en la optimización de edificios. El estudio se basó en estudiar las correlaciones que existen entre los datos de mediciones físicas y los datos subjetivos recabados a través de encuestas. Los datos en conjunto definen la delimitación de rangos de aceptación térmica y satisfacción del usuario del edificio. La revisión de los modelos de confort incluyó los estudios más significativos de las últimas décadas dividiendo los modelos en tres categorías: modelos estándar o de estáticos, modelos adaptativos y modelos adaptativos variables. Los modelos estáticos que estudiaron fueron los de Fanger (1970), Mayer (1997), Yoon (1999) y el de Araújo y Araújo (1999). Los modelos adaptativos estudiados fueron los presentados por Nicol y Humphreys (1973), Auliciems (1981), deDear *et al.*, (1997) y deDear y Brager (1998). El modelo adaptativo variable estudió el modelo de Kuchen (2009). El resultado mostró que los modelos estáticos presentan dificultades al momento de evaluar el confort en espacios ventilados naturalmente o en situaciones mixtas. El resultado de los modelos adaptativos presentó una respuesta muy propia hacia la evaluación del confort, ya que

consideran activos a los usuarios con respecto a su ambiente térmico. El resultado que mostró el modelo adaptativo variable fue que, se puede admitir una variabilidad en el tiempo real de las condiciones ambientales internas y externas que afectan al edificio.

Chenari *et al.* (2016) realizaron una investigación de distintos tipos de estrategias de climatización: con ventilación natural, mecánica e híbrida en edificaciones. Tomaron en cuenta factores como la influencia del comportamiento de los ocupantes y la correlación entre la ventilación, la salud y la productividad. Para ello revisaron estándares, normas y métodos de construcción, los cuales evalúan e informan sobre el desarrollo de los métodos más eficientes de energía para la ventilación en edificaciones. Mostraron que la ventilación está interrelacionada con muchos factores, como las condiciones interiores y exteriores, las características del edificio, aplicación de construcción, así como el comportamiento de los usuarios. Concluyeron que se deben tener en cuenta muchos factores para diseñar sistemas de ventilación saludables y eficientes en el consumo de energía. La utilización de ventilación híbrida en edificios integrados con estrategias de control adecuadas, para ajustar la ventilación mecánica y natural, permite un considerable ahorro de energía mientras se mantiene una calidad del aire apropiada.

Martínez *et al.* (2016) realizaron una revisión sobre la relación entre el confort térmico y la eficiencia energética en edificaciones. La eficiencia energética de edificios históricos realizó sus primeros estudios a finales de la década de los 70 y comienzos de la década de los 80. El estudio se enfocó en analizar edificios residenciales (23.0%), edificios focales (17.0%), museos, teatros o bibliotecas (11.0%), académicos y palacios (17.0%). Los edificios residenciales fueron el tema principal de investigación para este estudio debido a que tienen mayor porcentaje en investigaciones realizadas en eficiencia energética y confort térmico. La revisión mostró que el clima cálido fue el mayor estudiado en edificios residenciales y edificios modernos. En los resultados observaron que en los climas cálidos los ahorros de energía presentan altos niveles en comparación con los climas fríos.

La climatización de edificaciones ya sea de manera natural, mecánica o mixta, se considera de suma importancia para el confort térmico de los ocupantes. Los edificios más estudiados a lo largo del tiempo han sido los residenciales, ya que estos, exhiben ser los mayores consumidores de energía en relación al confort térmico de los ocupantes. El estudio del confort térmico se basa principalmente en dos tipos de enfoques: estático y adaptativo, de los cuales se han obtenidos modelos de confort térmico. Los modelos estáticos demuestran

dificultades para evaluar el confort térmico, mientras que, los modelos adaptativos presentan mayor respuesta por los ocupantes en la evaluación del confort.

1.2.2 Modelos de confort térmico estáticos

Indraganti *et al.* (2013) realizaron un estudio para identificar la temperatura de confort preferida por los ocupantes de 25 edificios de oficina ubicados en las ciudades de Hyderabad y Chennai. Las oficinas estaban climatizadas con VN y AC, donde se consideraron 1658 sujetos en 2612 oficinas. La encuesta se dividió en dos secciones. La primera considera los datos generales como: género, edad, peso, altura y las preferencias térmicas de los ocupantes. La segunda encuesta define la satisfacción térmica de los ocupantes considerando la escala de los siete puntos ASHRAE. Los autores compararon la temperatura de confort preferida por los ocupantes con la temperatura calculada mediante el PMV. En los resultados observaron que la temperatura de confort preferida estuvo en un intervalo de 26.1-27.0°C, a diferencia del intervalo con el del voto medio predicho de Fanger que fue de 24.0-25.0°C. La aceptabilidad térmica fue de 51.0-60.0% con VN y 55.0-71.0% con AC.

Azizpour *et al.* (2013) realizaron un estudio del confort térmico para encontrar la relación entre la TSV y el PMV de los ocupantes del Centro Médico Kebangsaan de la Universidad de Malasia. El clima que presentó es cálido-húmedo constantemente con altas temperaturas y humedad relativa casi todo el año. El estudio consideró diez zonas térmicas de las cuales comprendían tres oficinas, farmacia, radiología, sala de oración, cocina, guardería, vestíbulo y corredor. La encuesta realizada incluyó 188 ocupantes, evitando pacientes. Las dos preguntas principales de la encuesta se basaban en comprender si el ocupante se encontraba en un ambiente térmico agradable o si le gustaría cambiar algo de ese ambiente. Con los resultados obtenidos de la encuesta calcularon el TSV. El PMV fue calculado con la teoría de Fanger. Los datos obtenidos se analizaron de forma subjetiva y objetiva. La temperatura efectiva neutra según las mediciones subjetivas y objetivas fueron 23.4°C y 21.3°C, respectivamente. Los resultados mostraron que existe una fuerte relación entre TSV y PMV para una $R=0.8$. Concluyeron observaron que la temperatura operativa preferida fue de 20.3°C.

Cheung et al. (2019) evaluaron la precisión en el modelo PMV/PPD utilizando la base de datos de confort térmico global ASHRAE II. La relación entre la OTS y el PMV representó una linealidad. La precisión del modelo PMV en la predicción de OTS fue solo del 34.0%, lo que significa que la sensación térmica se predice incorrectamente dos de cada tres veces. En clima templado, el modelo PMV tuvo un rendimiento ligeramente mejor con un 40.0%. Por otra parte, el PPD se vuelve solo confiable en climas cálidos y templados, puesto que, no puede predecir la tasa de insatisfacción en otro tipo de clima. Los resultados mostraron que el modelo PMV/PPD ofrece una baja precisión en encontrar la sensación térmica aceptable de los ocupantes.

Los estudios para la evaluación el PMV/PPD incluyeron encuestas fundamentadas en la base de datos ASHRAE. Para una mayor precisión en el estudio del confort térmico, en las edificaciones recomiendan la división de la edificación en zonas térmicas. El modelo estático PMV/PPD predice la temperatura de confort con un rango de aceptabilidad 50.0-70.0% para ocupantes con edificios con VN y AC.

1.2.3 Modelos de confort térmico adaptativos

Nicol y Humphrey (2002) realizaron un estudio sobre el desarrollo del enfoque adaptativo para el confort térmico en edificaciones basándose en los estándares internacionales. Observaron que un estándar busca definir climas interiores aceptables. Por lo cual, requieren estándares de confort térmico para ayudar a los diseñadores de edificaciones estimar la temperatura de entrada, con la cual, los ocupantes se encontrarán más confortables. Tomaron en cuenta el enfoque racional de confort térmico para explicar las respuestas de las personas al entorno térmico, en términos de la física y la fisiología de la transferencia de calor. Los estándares ISO 7730 y ASHRAE 55 fueron utilizados para el estudio. Los resultados que obtuvieron es que los índices racionales son muy difíciles de usar para situaciones reales lo cual no presentan una buena condición de comodidad en las edificaciones, por lo cual sugieren que las relaciones basadas en experimentos deben probarse en el campo antes de ser incluidas en los estándares. Así concluyeron que, el edificio debe dar la oportunidad de ajustar las condiciones de acuerdo a los requerimientos de los ocupantes.

Indraganti (2010) realizó un modelo de confort térmico adaptativo e identificó la temperatura neutra, mediante un estudio de campo. El estudio se realizó en 45 departamentos con ventilación natural, de edificios residenciales ubicados en la ciudad de Hyderabad, India. La temperatura neutra se determinó de acuerdo a deDear *et al.* (1997). En la encuesta participaron 113 ocupantes de los cuales obtuvo 3962 datos, de mayo- julio del 2008. La encuesta consideró la identificación de la planta, el aislamiento de la ropa, el nivel de actividad, la sensación de confort térmico, los controles ambientales y los métodos de adaptación. Los siete puntos de la escala ASHRAE se utilizaron para identificar la sensación térmica de los ocupantes. Las variables medidas del ambiente interior fueron: la temperatura del aire, la temperatura del globo, la humedad relativa y la velocidad del aire. La temperatura neutra resultó de 29.2°C. La comodidad de los ocupantes de mayo-julio fue del 40.0-60.0%, en mayo inició en 40.0% y en julio llegó al 60.0%. Para un clima cálido húmedo, el modelo de deDear permitió determinar que la temperatura neutra puede llegar por arriba de los 29.0°C en ventilación natural, con una aceptación del 60.0% durante el mes de julio. La climatización en este tipo de edificios puede incrementar considerablemente la satisfacción térmica, con bajo consumo de energía si se utilizan modelos adaptativos.

Indraganti *et al.* (2014) llevaron a cabo un estudio de campo para determinar el confort térmico en 28 oficinas con VN y AC en las ciudades de Chennai y Hyderabad. Estas ciudades se encuentran al sur de India. El clima que presentan es un cálido-húmedo. Realizaron una encuesta a un conjunto de 2787 individuos, de los cuales obtuvieron 6048 respuestas. La encuesta se dividió en preguntas generales, satisfacción térmica de los ocupantes la cual está basada en la escala de los siete puntos ASHRAE y la adaptación ambiental basada en los cinco puntos de Nicol de preferencia térmica. De acuerdo a los datos obtenidos propusieron un modelo de confort térmico adaptativo y encontraron temperaturas de confort promedio de 28.0°C y 26.4°C en VN y AC respectivamente. Los ocupantes en edificaciones con ese tipo de clima prefieren temperaturas de confort mayores que las obtenidas con los modelos de enfoque racionales.

Mishra y Ramgopal (2015) realizaron un estudio de campo sobre los distintos tipos de modelos de confort térmicos adaptativos, para edificios con AC y VN para predecir el confort de los ocupantes en las regiones climáticas tropicales de la India. Los estudios se basaron en encuestas realizadas en las ciudades de Bangalore, Bhubaneswar, Chennai,

Hyderabad, Kolkata, Mumbai y Trivandrum. Los modelos utilizados como referencias fueron ASHRAE 55 y EN 15251 y los modelos propuestos por Indraganti (2014), Nguyen et al., (2012) y Toe y Kubota (2013). El modelo reportado EN 15251 y el modelo de Nguyen fueron los que presentaron mayor potencial de ahorro de energía, mientras que los ocupantes tuvieron mayor confort térmico con el de ASHRAE 55. El modelo de EN 15251 resultó más adecuado en las regiones climáticas estudiadas, considerando al mismo tiempo el potencial de ahorro de energía y el confort térmico.

Manu et al. (2016) propusieron un modelo de confort adaptativo para encontrar las temperaturas neutras en 16 edificios de oficinas con VN, con modo mixto y con AC. El estudio de campo contempló cinco ciudades de cinco zonas climáticas de la India. La encuesta se realizó a 6330 ocupantes para recopilar respuestas relacionadas con la sensación térmica, la preferencia de temperatura y la aceptabilidad térmica, la preferencia de movimiento de aire, el nivel de aislamiento de la ropa y la actividad metabólica. El enfoque analítico para el desarrollo del modelo adaptativo se dividió en dos etapas; la etapa uno involucró la sensación térmica con el clima interior, mientras que la etapa dos buscó la relación entre la neutralidad térmica y el clima exterior. La neutralidad térmica se encontró por regresión lineal, regresión de Probit y el método Griffiths. La temperatura neutra aceptable en el interior de las oficinas fue de 21.5-28.7°C, cuando la temperatura exterior se encuentra entre 13.0-38.5°C. Los resultados mostraron que el modelo encontrado se acopla a los modos de ventilación natural, mixto y aire acondicionado.

Damiati et al. (2016) determinaron la temperatura de confort considerando el enfoque adaptativo en oficinas ubicadas en Malasia, Indonesia, Singapur y Japón. El estudio se realizó a través de encuestas durante el verano de 2015. Las variables medidas fueron la temperatura del globo, la humedad relativa, la temperatura media radiante y la temperatura operativa. La temperatura del globo y la humedad relativa se midieron a cada 10 s durante 30 min en Malasia, Indonesia y Singapur. Las temperaturas media radiante y operativa se determinaron siguiente la norma ASHRAE. La sensación térmica y la preferencia de los ocupantes se determinó con la escala de los siete puntos de ASHRAE. Los modelos adaptativos que utilizaron para encontrar la temperatura de confort interior fueron de acuerdo a ASHRAE, CIBSE Guide, EN 15251 y modelos encontrados en la literatura. La comparación de los modelos se realizó para ventilación natural, modo mixto y climatizado. Los resultados mostraron que, la temperatura de confort más alta fue de

27.5°C en Indonesia, en las oficinas con ventilación en modo mixto. En el caso de oficinas climatizadas, las temperaturas de confort en Singapur, Indonesia, Japón y Malasia fueron 26.4°C, 26.3°C, 25.8°C y 25.6°C respectivamente. Las temperaturas de confort bajas en el modo de ventilación natural fueron en Indonesia y Japón con 24.7°C y 25.8°C respectivamente. La temperatura de confort determinada con el modelo EN 15251 coincidió con la zona de confort para ventilación natural. Para modo mixto, la temperatura de confort concordó con lo reportado en un estudio en Pakistán (Nicol y Roaf, 1996). Para el modo de climatización, la temperatura de confort fue semejante a lo obtenido con el modelo CIBSE. El estudio permitió observar que cada modelo es aplicable a diferentes modos de operación en la climatización de la oficina. También se puede observar que en el clima cálido húmedo se pueden aplicar los modelos independientemente del lugar.

López *et al.* (2017) realizaron un estudio experimental para determinar la temperatura neutra y encontrar un modelo de confort adaptativo. El estudio se llevó a cabo dentro de los edificios universitarios del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Las edificaciones contaban con sistemas AC y VN. La temperatura neutra se determinó relacionando el voto de sensación térmica con la temperatura interior, de acuerdo con la escala de confort de los siete puntos del estándar ASHRAE-55. El modelo de confort adaptativo se construyó correlacionando la temperatura operativa de confort interior con la temperatura exterior, con base al estándar EN 15251. Este estándar considera el voto de sensación térmica 0 como la ausencia de frío y calor. Las edificaciones correspondían a oficinas administrativas, cubículos de catedráticos, bibliotecas, laboratorios. La actividad mayormente desarrollada era “Escribiendo a computadora” con el 44.1%, seguido de “sentado escribiendo/quieto” con el 33.5%, que corresponden a las actividades que se esperaría encontrar en un centro educativo. Durante la temporada cálida del año la temperatura neutra resultó de 24.2°C para edificios con AC y 27.0°C para edificios con VN. Los autores observaron que las personas en condiciones de VN se sienten cómodas a temperaturas más elevadas, 2.8°C más que las personas en edificios con AC; por lo que sugirieron que los mecanismos de climatización térmicas activas en edificaciones influyen en las expectativas de confort de los ocupantes.

Oropeza *et al.* (2017) realizaron un estudio para encontrar modelos de confort térmico adaptativo en climas típicos de México. Las cuatro regiones climáticas fueron cálido

húmedo, cálido seco, cálido seco extremoso y templado. El cuestionario contemplaba la sensación de las temperaturas exteriores y las sensaciones de las temperaturas de confort. El estudio se realizó para calefacción y refrigeración. Los autores encontraron los modelos adaptativos para cada tipo de clima, para calefacción y enfriamiento. Los modelos tomaron en cuenta los factores principales humanos y físicos. En los edificios con aire acondicionado se encontró que el punto de ajuste de la temperatura del termostato se incrementa considerablemente manteniendo el confort en el interior. Por otro lado, para edificios de funcionamiento libre, la sensación de incomodidad podría disminuir si los ocupantes pueden controlar su entorno mediante el uso de técnicas de control pasivo, es decir, ventilación natural y sistemas de control solar. En los resultados, los autores observaron que en todo el territorio mexicano las personas pueden permanecer a 30.0°C, a excepción de los climas templados.

López *et al.* (2019) realizaron un estudio para encontrar un modelo de confort térmico adaptivo y determinar la temperatura de confort en edificios educativos. El estudio se realizó en 27 edificios en Tuxtla Gutiérrez, de los cuales obtuvieron 496 datos en conjunto. El cuestionario para conocer las condiciones de confort se basó en los estudios de Nicol y Humphreys (2002), McCartney y Nicol (2002), Indraganti *et al.*, (2013), entre otros. El cuestionario se dividió en cuatro secciones, las cuales comprendían el aislamiento de la ropa, el nivel de actividad, la información demográfica de los encuestados y la sensación térmica, humedad, movimiento del aire preferidos. Los edificios se encontraban climatizados con VN y AC. La temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire fueron medidas simultáneamente en la temporada cálida de 2017 para conocer las condiciones de trabajo por los ocupantes en el interior de los edificios. Los autores encontraron las temperaturas operables y las temperaturas media radiante con base en la norma ASHRAE Standard 55 y el estándar EN. Con los datos obtenidos observaron que en modo AC, el 48.1% de los ocupantes se sintió cómodo, mientras que 44.0% sentía frío y el 7.9% sintió calor. Sin embargo, en modo VN el 59.7% de los ocupantes sintió cómodo, mientras que el 11.0% sintió frío y el 29.3% sintió calor. La temperatura de confort encontrada en AC fue de $27.4 \pm 1.9^\circ\text{C}$, mientras que en VN la temperatura de confort fue de $29.3 \pm 2.6^\circ\text{C}$.

Los modelos de confort térmico basados en el enfoque adaptativo se encuentran en su mayoría en normas internacionales como la ASHARE 55, EN 15251, CIBSE Guide e ISO 7730. Por otra parte, se han encontrado modelos locales los cuales se acondicionan al clima

del lugar. Los climas cálidos, por su parte, son los más estudiados debido a las altas temperaturas a la que se exponen los ocupantes.

1.2.4 Evaluación térmica y energética en edificaciones

Álvarez *et al.* (2014) realizaron una evaluación del impacto del uso de techos frescos en el consumo energético y el ahorro de energía, en edificaciones residenciales y no residenciales de México. Las edificaciones fueron definidas considerando el cumplimiento de las normas NOM-008-ENER-2001 y NOM-020-ENER-2011. El estudio comprendió las seis zonas climáticas clasificadas por el INEGI. Las ciudades seleccionadas para el estudio se dividieron de acuerdo a su clima la cuales fueron Villahermosa con cálido húmedo, Mérida con cálido subhúmedo, Monterrey con clima seco, Hermosillo con clima muy seco, Tulancingo con templado húmedo, Guadalajara y CDMX ambas con clima templado subhúmedo. El programa Meteonorm se utilizó para obtener la información climática de cada ciudad. Los softwares Desing Builder y EnergyPlus se utilizaron para realizar la simulación energética de las edificaciones. Las cargas de enfriamiento y calentamiento fueron calculadas cambiando la reflectancia del techo de 0.1-0.9 con el fin de encontrar un techo fresco para los dos tipos de edificaciones. Las cargas de enfriamiento en función de la reflectancia presentan mayor ahorro de energía para la ciudad de Mérida con $1.14MWh$ de ahorro y menor para la ciudad de México con $0.80MWh$ de ahorro. Los resultados mostraron que el ahorro de energía se presentó con mayor consideración en los climas cálidos y secos, mientras que, en los climas templados no se encontró un ahorro significativo de energía.

Rodríguez *et al.* (2015) realizaron un análisis térmico para encontrar las cargas de refrigeración anuales mediante simulaciones dinámicas utilizando una cámara ventilada. El estudio se llevó a cabo en un edificio de laboratorios del CIMAV en Durango. La simulación se realizó utilizando los softwares Google SketchUp y TRNSYS 17. Las zonas térmicas se encontraron delimitando lo rangos de temperaturas de confort. El horario de ocupación se estableció de 07:00 a 19:00 horas diarias. Los materiales que utilizaron para la construcción de la vivienda fueron con base a las Normas Oficiales Mexicanas. El rango establecido de confort fue de $20.0-25.5^{\circ}C$ y $20.0-28.0^{\circ}C$ implementados en el sistema de climatización, de acuerdo al propuesto por la norma ASHRAE 55-2010. Las simulaciones

se realizaron en evolución libre, con climatización y climatización ventilada en el edificio. Las temperaturas máximas y mínimas obtenidas en evolución libre fueron de 3.9 y 38.0°C respectivamente. Los resultados obtenidos mostraron que las temperaturas no se encuentran dentro del rango de confort, por lo tanto, recomendaron el uso de sistemas de climatización. El edificio fue climatizado con un sistema tipo Fan and Coil, utilizando una programación ON/OFF, la cual permite climatizar cuando las temperaturas se encuentren fuera de la zona de confort. Los resultados que obtuvieron fue que la demanda de energía aumenta por lo que propusieron una estrategia más de climatización. La climatización ventilada consideró la ventilación del plafón. Los resultados obtenidos mostraron que fue posible reducir la carga de refrigeración hasta un 37.0%. En conclusión, se destaca los esfuerzos multidisciplinarios para lograr reducir la demanda de energía mediante el diseño e implementación de estrategias óptimas.

Barbhuiya y Barbhuiya (2013) estudiaron el confort térmico y el consumo de energía en un edificio de educación superior. El edificio estudiado es de la facultad de ingeniería civil en la universidad de Loughborough Reino Unido, considera 17 oficinas en la parte baja y 19 oficinas en el segundo piso. El confort térmico en invierno se analizó durante el periodo de 82 días entre el 7 de diciembre del 2011 y el 29 de febrero de 2012. Los datos monitoreados fueron la temperatura interior para analizar el confort térmico. Las oficinas se calentaron con radiadores de invierno, con termostato para el control de temperatura por parte de los ocupantes. De lunes a viernes la temperatura se fijó a 19.0°C. El software IES se utilizó para simular la temperatura interior y el consumo de energía al abrir y cerrar la puerta de entrada al edificio. Las temperaturas monitoreadas en las oficinas del segundo piso fueron 1.8 °C más altas que las temperaturas de la planta baja. En las horas laborables durante el invierno, la comodidad térmica fue del 50.0-70.0%. En la planta baja, el estudio permitió observar un problema de altura del piso al techo y en la entrada principal, donde atendiendo estos problemas se puede lograr hasta un 13.0% de ahorro de energía.

Brooks *et al.* (2015) realizaron una comparación del control de eficiencia energética en un edificio comercial en Florida con sistemas HVAC. En la investigación, los autores propusieron dos algoritmos de control: un algoritmo basado en reglas utilizando una retroalimentación de ocupación en tiempo real, y un control predictivo basado en modelos que utiliza las predicciones de ocupación y predicciones climáticas. La simulación fue realizada en MATLAB, con un tiempo de prueba de 30 minutos y 120 minutos. En los

resultados de la comparación, el control predictivo basado en modelos, obtuvo un ahorro máximo del 48.0%. El algoritmo basado en reglas utilizando una retroalimentación de ocupación en tiempo real, obtuvo un ahorro del 15.0%. De los resultados se observa que al considerar los horarios de ocupación como una variable más en una habitación que se pretende climatizar, genera un considerable ahorro de energía.

Amin *et al.* (2016) realizaron una investigación sobre las preferencias de confort térmico de los ocupantes en un complejo de edificios de residencias que ofrece 1104 habitaciones, el edificio se ubicada en Sounthampton, Reino Unido. Obtuvieron la información a través de 223 respuestas al cuestionario, junto con datos de temperatura monitoreados y encuestas de confort térmico en 30 salas. En el análisis de los resultados de la encuesta, los investigadores descubrieron que el origen de los ocupantes tiene influencia significativa sobre las preferencias de confort térmico. Los resultados que obtuvieron fue que la temperatura interior promedio de los residentes de climas cálidos fue de 2.3°C más alta que la de los residentes en climas fríos en febrero de 2015.

Amasyali y El-Gohary (2016) realizaron un estudio empírico en los edificios residenciales y de oficinas en Arizona, Illinois y Pensilvania. Dicho estudio se basó en comprender el comportamiento de los ocupantes para reducir el consumo energético en los edificios. Para ello, encuestaron a un conjunto de 618 ocupantes de las tres ciudades y de los dos tipos de edificaciones. Identificaron los valores de los ocupantes que contribuyen en la importancia del comportamiento, por ejemplo, la salud, la productividad personal y la comodidad. Los autores obtuvieron siete valores principales los cuales fueron identificados y clasificados en tres categorías. En la primera se encontraban los valores que afectaban al comportamiento de uso de energía, los cuales son el confort térmico, confort visual y calidad del aire interior. En la segunda se encontraban los valores de salud y productividad personal. Y en la tercera se encontraba la protección del medio ambiente y ahorro de costos de energía. Los datos obtenidos se analizaron mediante cinco métodos estadísticos: Razón de correlación, Coeficientes de correlación de Spearman, Coeficientes de concordancia de Kendall, Prueba de Kruskal-Wallis y Prueba de Mann-Whitney. Los resultados que obtuvieron fueron que, porcentajes considerables de ocupantes no estaban satisfechos con el cumplimiento de uno o más valores (11.2 -21.4%). Mientras que porcentajes más altos de ocupantes (24.8 - 38.6%) pensaban que su salud y/o productividad personal son negativamente afectado por las condiciones ambientales interiores actuales.

Young (2018) realizó un estudio sobre el control percibido en una evaluación subjetiva y el consumo de energía por los ocupantes de siete edificios de la universidad Kyung Hee en Suwon, Corea del Sur. Para las mediciones de campo seleccionó ocho oficinas climatizadas y con ventanas operables: tres viviendas de estudiantes de posgrado y cinco oficinas para personal administrativo. El número de ocupantes en las oficinas fue de 12, con un total de 77 ocupantes. El periodo de estudio fue de Julio a septiembre de 2013 (verano), donde monitoreó la temperatura y la humedad relativa ambientales exteriores e interiores, a intervalos de un min. Como software de simulación usó EnergyPlus, con el cual calculó las cargas térmicas y el consumo de energía de los sistemas HVAC basados en soluciones de balance de calor simultáneas de zonas térmicas. Determinó la temperatura operativa como la media aritmética del aire y la temperatura media radiante. Los resultados que obtuvo al calcular la temperatura operativa promedio fueron de 25.5 °C con una desviación estándar de 1.7 °C. Además el autor obtuvo la relación entre las temperaturas interiores y exteriores durante el periodo de monitoreo la cual fue de 15.5 -26.7 °C y la temperatura promedio fue de 24.2 °C. El resultado del voto de confort térmico durante el periodo de monitoreo varió de -2 a 3 que es de frío a caliente respectivamente en la escala de sensación térmica ASHRAE. Las simulaciones energéticas dinámicas del edificio ilustraron que un cambio en el nivel percibido de control sobre el entorno térmico podría reducir el consumo de energía de refrigeración en los edificios sin sacrificar la comodidad térmica de los ocupantes.

El alto consumo de energía en las edificaciones se debe principalmente al uso de sistemas de HVAC. Las evaluaciones energéticas y térmicas de edificaciones consideran a la temperatura de confort como un factor importante para la evaluación del ahorro energético. Los softwares más utilizados para las evaluaciones son Energy Plus y TRNSYS. Los climas cálidos presentan mayor alto consumo de energía utilizado sistemas HVAC que en cualquier otro clima.

1.2.5 Evaluación térmica y energética de edificaciones aplicando modelos de confort

Godoy (2012) realizó un estudio sobre los modelos de confort térmico desarrollados a lo largo de la historia. El estudio se limitó a dos tipos de enfoques, el enfoque racional y el enfoque adaptativo. El modelo PMV-PDD fue estudiado para conocer los primeros hallazgos

mostrados para el confort térmico en edificaciones. En el enfoque racional estudió modelos presentados desde Fanger en la década de los 70s hasta modelos que se agregaron en los estándares ASHRAE 55 e ISO 7730. En el enfoque adaptativo estudió el modelo presentado por el estándar EN 15251. Además, presentó la diferencia de la utilización de los dos tipos de enfoque en edificios con VN y ventilación mecánica. El autor analizó un caso de estudio de una vivienda donde aplicaron los dos tipos de enfoques. Los resultados que observó fue que aplicando los modelos se puede tener un 70.0% de horas dentro del rango de confort y un 50.0% en demanda de energía aproximadamente. Por lo que, concluyó que los modelos ayudan a la par a encontrar la zona de confort y a saber cuánta es la demanda de energía que la edificación requiere para satisfacer las necesidades de los ocupantes.

Griego *et al.* (2015) investigaron medidas de optimización de eficiencia energética y confort térmico en edificios residenciales en Salamanca Guanajuato. El análisis de optimización fue realizado para un prototipo residencial existente y un prototipo residencial nuevo por construir. El confort térmico fue evaluado utilizando el modelo de Fanger para estimar el PMV anual. Las características de los materiales de construcción, las cargas de equipos de electrodomésticos y las cargas de sistemas de calefacción y refrigeración se analizaron para conocer el consumo de energía. Las temperaturas máximas de la ciudad oscilan entre 30.0-35.0°C en el mes de mayo, y las temperaturas mínimas oscilan entre los 0.0-5.0°C en los meses de invierno. La ciudad consume 79.87 *MWh* anuales y tiene un potencial de ahorro de electricidad de 13.82 *MWh* anuales. El 50.0% de las viviendas cuentan con AC. El software Building Energy Optimization junto con EnergyPlus (BEOptE +) se utilizó para simular el comportamiento térmico y energético de las residencias. Los resultados de la simulación y el análisis de la optimización sugieren que una combinación de eficiencias mejoradas de electrodomésticos, mayores niveles de aislamiento térmico en techos y paredes, ayuda a ahorrar el consumo de energía hasta un 35.0%.

Attia y Carlucci (2015) realizaron una comparación de distintos tipos de modelos de confort térmico en edificios de energía neta cero en la ciudad del Cairo Egipto. De los modelos compararon el consumo energético y el rendimiento de confort, dichos modelos fueron: modelo Fanger, Givoni y los modelos adaptativos ASHRAE 55 y EN 15251. Utilizaron dos herramientas de simulación una para el rendimiento del edificio, ZEBO y otra para el comportamiento energético, EnergyPlus. El estudio demostró la diferencia en

la energía entregada anual que es de 2526 kW/año, utilizando un modelo de confort adaptativo se estimó un ahorro de energía de $10.0 \pm 18.0\%$ de la carga de enfriamiento total. Los resultados obtenidos de la comparación de los modelos con ISO 7730 muestran que es posible obtener un ahorro energético con los modelos ASHRAE 55, EN 15251 y Givoni de un 16.0%, 21.0% y 24.7 %, respectivamente.

Los modelos de confort térmico basado en el enfoque estático y adaptativo logran un ahorro de energía en viviendas entre el 10.0-50.0% y hasta el 70.0% del confort térmico. Las optimizaciones de materiales de construcción de la envolvente ayudan a ahorrar hasta el 35.0% del consumo de energía. Los modelos ASHRAE 55 y EN 15251 logran ahorrar desde un 10.0-20.0% en viviendas de energía neta cero.

1.2.6 Conclusiones de la revisión bibliográfica

De acuerdo a estudios revisados, entre el 80.0-90.0% de nuestras vidas ocurre en el interior de un edificio, por lo tanto, controlar las condiciones de confort térmico es importante para mantener un buen rendimiento de los ocupantes. Las maneras de climatización ya sea de forma natural, mecánica o mixta, son consideradas de suma importancia para satisfacer el confort térmico de los ocupantes (Chenari *et al.*, 2016). Los estudios del confort térmico son basados principalmente en dos tipos de enfoques: el estático y el adaptativo, de los cuales se obtienen modelos que ayudan a encontrar la temperatura ideal para las personas (Taleghani *et al.*, 2013). Los modelos basados en el enfoque estático demuestran dificultades en la evaluación del confort térmico en comparación con los modelos basados en el enfoque adaptativo (Arballo *et al.*, 2016).

Los modelos de confort térmico más utilizados son los presentados por normas internacionales como ASHRAE 55, EN 15251, ISO 7730 y CIBSE Guide A (Nicol y Humphrey, 2002; Mishra y Ramgopal, 2015; Damiani *et al.*, 2016). Por otra parte, trabajos realizados recientemente, han obtenido modelos de confort térmico de manera empírica, sin embargo, su aplicación se reduce de acuerdo al clima con el que fue obtenido (Indraganti 2010; Indraganti *et al.*, 2014; Manu *et al.*, 2016; López *et al.* 2017; Oropeza *et al.*, 2017; López *et al.*, 2019).

Los edificios más estudiados a lo largo del tiempo han sido los residenciales, puesto que, exhiben ser los mayores consumidores de energía en relación al confort térmico de los ocupantes, y esto a causa del uso de sistemas HVAC (Brooks *et al.*, 2015; Griego *et al.*, 2015; Martínez *et al.*, 2016; Young, 2018). Los climas cálidos, por su parte, debido las altas temperaturas a la que se exponen los ocupantes, el requerimiento de aire acondicionado se vuelve indispensable para la satisfacción de las personas, volviéndolos los mayores consumidores de energía (Oropeza *et al.*, 2017; López *et al.*, 2019). La aplicación de los modelos de confort térmico en edificios residenciales ha demostrado tener desempeño de 10.0-50.0% en ahorro de energía. Por otra parte, también se encontró que, utilizando los modelos de confort se puede predecir el confort térmico hasta con un 70.0% de satisfacción de los ocupantes (Godoy, 2012; Attia y Carlucci, 2015).

1.3 Objetivos y alcances

De acuerdo a la revisión bibliográfica se plantean el objetivo general, los objetivos específicos y alcances de este trabajo de tesis.

1.3.1 Objetivo general

Realizar un estudio comparativo entre el modelo de confort térmico estático ASHRAE 55, los modelos de confort térmico adaptativos EN 15251, CIBSE Guide A, y los modelos locales, en términos del potencial de ahorro de energía, sensación térmica y costo económico de la energía eléctrica, en una vivienda de interés social ubicada en el clima cálido de México.

1.3.2 Objetivos específicos

- ✓ Construir una plataforma de simulación verificada para el estudio del consumo energético requerido al climatizar una vivienda de interés social.
- ✓ Estudiar el consumo de energía en la vivienda de interés social al aplicar los modelos de confort térmico estático y adaptativos.

- ✓ Determinar el potencial de ahorro de energía, la sensación térmica y el costo económico de la energía eléctrica de la vivienda de interés social ubicada en el clima cálido de México, y utilizando el enfoque estático y adaptativo.
- ✓ Realizar un comparativo de los modelos de confort térmico, encontrando el modelo con mejor desempeño en términos del potencial de ahorro de energía, sensación térmica y costo económico.

1.3.3 Alcances

- ✓ Construir una plataforma para la simulación de la vivienda de interés social de utilizada para la elaboración de la NOM-020-ENER-2011.
- ✓ Simular y estudiar la vivienda en ciudades con clima cálido seleccionadas: Acapulco, Villahermosa, Mérida, Cancún, Tijuana, Ciudad Juárez, Mexicali y Hermosillo.
- ✓ Considerar en el estudio cuatro modelos de confort para cada ciudad: el modelo de confort térmico estático AHSRAE 55, los modelos de confort térmico adaptativos EN 15251, CIBSE Guide A y un modelo de confort térmico adaptativo local dependiendo el clima a estudiar
- ✓ Realizar un estudio comparativo entre el modelo de confort térmico estático y los modelos de confort térmico adaptativos, encontrando el modelo que muestre el menor consumo de energía y costo de energía eléctrica, mayor sensación térmica.

1.4 Estructura de tesis

La estructura de la tesis consta de los siguientes Capítulos:

Capítulo II Marco teórico, localización de lugar y edificación de estudio: en este capítulo se presentan los fundamentos teóricos relacionados con la transferencia de calor en edificaciones. A demás se analizan los dos tipos de enfoques encontrados en los modelos de

confort térmico. Por otra parte, se describe la selección de los lugares y la edificación de estudio.

Capítulo III Modelos de confort térmico y plataforma de simulación: en este capítulo se presenta los modelos de confort térmico estáticos y adaptativos que se utilizaran para el estudio. También se describe la plataforma de simulación y las verificaciones realizadas.

Capítulo IV Resultados y discusión: en este capítulo se muestra los resultados obtenidos de la simulación energética de la vivienda, aplicando los modelos de confort térmico adaptativo y estáticos. Por otro parte, se realiza la comparación entre los dos tipos de enfoques de los modelos de confort térmico.

Capítulo V Conclusiones y recomendaciones: este capítulo presenta las conclusiones de los resultados obtenidos, por lo que, se describen las recomendaciones a trabajos futuros.

CAPÍTULO II

Marco teórico, localización del lugar y edificación de estudio

En este Capítulo se presentan los fundamentos teóricos relacionados con la transferencia de calor en edificaciones. Además, se analizan los dos tipos de enfoques encontrados en los modelos de confort térmico. Por otra parte, se describe la selección de los lugares y la edificación de estudio.

2.1 Fundamentos teóricos

En este apartado se muestran los fundamentos teóricos relacionados a los mecanismos de transferencia de calor en una edificación y a través de los materiales de construcción. Por otra parte, se describen las cargas térmicas existentes en una edificación. Además, que se enfatiza el estudio del confort térmico y los dos tipos enfoques relacionados a éste.

2.1.1 Edificaciones

El termino de edificación se utiliza para definir y describir a todas aquellas construcciones realizadas artificialmente por el ser humano con diversos propósitos. La edificación siempre se encuentra relacionada con edificio, entendiéndose como cualquier bien e inmueble que haya sido construido con el fin de ser destinado a la vivienda, o a otro uso permitido por las normas de urbanísticas (Ramírez, 2018). La envolvente de un edificio está compuesta por muros exteriores, techos, superficies inferiores, ventanas y puertas, y tiene gran impacto en la cantidad de energía necesaria para mantener la temperatura interior dentro de un rango confortable.

Los muros forman la mayor parte de la envolvente del edificio, estos pueden ser integrados por cerramientos, ventanas y puertas. Por otra parte, el techo es uno de los elementos del edificio que recibe mayor radiación solar, puesto que los edificios se encuentran sobre el plano horizontal, por lo tanto, captan la mayoría de los rayos solares (Hernández, 2016). Las ventanas son aberturas con vidrios en las paredes exteriores de un edificio que típicamente constan de acristalamiento. En las paredes exteriores de un edificio las ventanas ofrecen la menor resistencia al flujo de calor. El efecto neto de una ventana sobre el balance de calor de un edificio depende de sus características y orientación si como la radiación solar y del estado del clima (Cengel, 2007).

2.1.2 Transferencia de calor en edificaciones

Cuando existe una diferencia de temperaturas entre el edificio y el ambiente exterior, ocurre una transferencia de calor. El calor se propaga a través de los materiales por

diferentes medios o formas. Cada uno de los materiales se calienta a diferentes velocidades y retiene el calor en función de sus características, por lo que cada tipo de material tendrá diferente temperatura. Las formas de transmisión o propagación de calor se llevan a efecto por los fenómenos de conducción, convección y radiación. En la Figura 2.1 se muestra una representación esquemática de los mecanismos de transferencia de calor en una edificación.

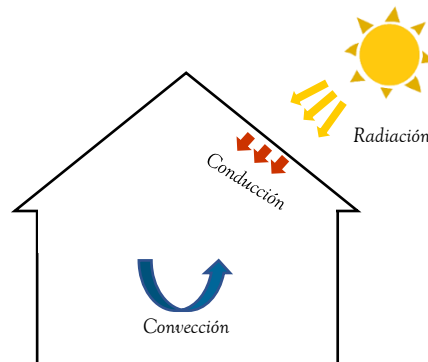


Figura 2.1 Representación de los mecanismos de transferencia de calor

2.1.2.1 Conducción

La conducción de calor es vista como la transferencia de energía en donde las partículas más energéticas de una sustancia ceden energía a las menos energéticas debido a la interacción entre las mismas, produciendo un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas. En una edificación se puede encontrar este mecanismo en los cerramientos, por ejemplo, en verano se calienta el exterior del cerramiento y por conducción se calienta el interior. En este caso, el modelo que describe la transferencia de calor por conducción, es la ley de Fourier, la cual establece que “la velocidad a la que el calor se transfiere por conducción (Q_c) en un medio homogéneo es proporcional al gradiente de temperatura (dT/dx)” (Özisik, 1980).

$$Q_c = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

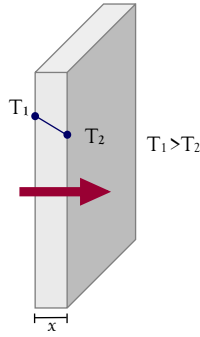


Figura 2.2 Representación del mecanismo de transferencia de calor por conducción

Donde k es la conductividad térmica del material y es una propiedad física donde la velocidad real del flujo de calor depende de ella. En una edificación los mecanismos de transferencia de calor por conducción suceden a través de la envolvente. La Tabla 2.1 muestra el valor de conductividad térmica de cada uno de los materiales utilizados para la construcción de la edificación de estudio.

Tabla 2.1 Conductividad térmica de los materiales de construcción

Materiales de construcción	Conductividad térmica (W/m K)
Yeso	0.38
Tabique	0.81
Mortero	0.72
Colado	1.74
Impermeabilizante	0.17
Loseta	1.14

2.1.2.2 Convección

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos, la transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio y la energía transferida mediante el movimiento global, o macroscópico del fluido (Kreith *et al.*, 2012). La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo. La convección forzada cuando el flujo es causado por medios externos, como un ventilador, una bomba o vientos atmosférico. En cambio, en la convección natural el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido (Incropera y DeWitt, 2002). En una edificación este mecanismo de transferencia se produce en la envolvente, que, al tener una temperatura diferente con

el aire exterior, se produce un intercambio de calor entre la envolvente y el aire. El modelo que describe la transferencia de calor por convección es la Ley de enfriamiento Newton, la cual establece que “El flujo de calor por unidad de superficie que se transmite por convección entre una superficie y un fluido a distinta temperatura, es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido” (Montes *et al.*, 2014).

$$Q_v = h_c A (T_s - T_f) \quad (2.2)$$

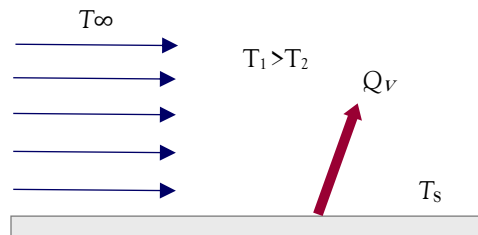


Figura 2.3 Representación del mecanismo de transferencia de calor por convección

Donde A es el área expuesta a la transferencia de calor, T_s la temperatura de la superficie, T_f la temperatura del fluido y h_c el coeficiente de calor convectivo.

Coefficientes convectivo exterior

Desde la década de 1930 se han realizado distintos métodos para el cálculo del coeficiente convectivo en exteriores, los cuales se describen los modelos utilizados en softwares de simulación energética de edificios, TARP, MoWITT, DOE-2, Algoritmo combinado adaptable (EnergyPlus, 2013).

Modelo Simple combinado

El método simple combinado utiliza la rugosidad de la superficie y la velocidad del viento de la superficie local para calcular el coeficiente de transferencia de calor exterior como se muestra en la Ec. (2.3).

$$h = D + EV_z + FV_z^2 \quad (2.3)$$

Donde D , E y F son los coeficientes de rugosidad del material, V_z es la velocidad del viento calculada a la altura sobre el suelo del centroide de superficie. Los coeficientes de rugosidad D , E y F para distintos materiales se muestran en la Tabla 2.2, los cuales fueron tomados del estándar ASHRAE Handbook of Fundamentals (ASHRAE 1989).

Tabla 2.2 Coeficientes de rugosidad del método simple combinado

Índice de rugosidad	D	E	F	Material
Muy áspero	11.6	5.9	0.0	Estuco
Áspero	12.5	4.1	0.02	Ladrillo
Medio áspero	10.8	4.2	0.0	Concreto
Medio suave	8.2	4.0	-0.06	Pino
Suave	10.2	3.1	0.0	Yeso
Muy suave	8.2	3.3	-0.04	Vidrio

Modelo TARP

El método TARP, integra un modo de convección exterior combinado con correlaciones de ASHRAE y experimentos de placa plana, además de ser un predecesor de EnergyPlus. La Ec. (2.4) muestra la suma total de los coeficientes de convección para una superficie exterior.

$$h_c = h_f + h_n \quad (2.4)$$

Donde la h_c representa el coeficiente de transferencia de calor de una superficie exterior, la h_f y h_n son el coeficiente convectivo forzado y natural. Para el cálculo del componente de la convección forzada las correlaciones son basadas de acuerdo al estudio de Sparrow en 1979 (EnergyPlus, 2013):

$$h_f = 2.537W_f R_f \left(\frac{PV_z}{A} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

Siendo W_f el componente del modificador de dirección del viento, P el perímetro de la superficie, V_z la velocidad local del viento calculada a la altura de la superficie sobre el

suelo del centroide de superficie y A el área de la superficie. Para los valores del multiplicador de rugosidad de la superficie R_f se consideran los mostrados en la Tabla 2.3, basados en el estudio de Walton en 1981 y ASHRAE Handbook of Fundamentals.

Tabla 2.3 Índice de rugosidad del método TARP

Índice de rugosidad	R_f	Material
Muy áspero	2.2	Estuco
Áspero	1.7	Ladrillo
Medio áspero	1.5	Concreto
Medio suave	1.1	Pino
Suave	1.1	Yeso
Muy suave	1.0	Vidrio

Por otra parte, para el componente de convección natural se utiliza la Ec. (2.6) considerando la correlación de una superficie vertical.

$$h_n = 1.310[\Delta T]^{1/3} \quad (2.6)$$

Modelo MoWITT

El modelo MoWITT es basado en pruebas térmicas experimentales de una ventana móvil. La correlación es aplicada a superficies muy lisas y verticales de edificios de poca altura. La Ec. (2.7) muestra el modelo MoWITT

$$h_c = \sqrt{[C_t(\Delta T)^{1/3}] + [aV_z^b]^2} \quad (2.7)$$

Donde C_t representa la constante de convección natural turbulenta. Para los valores de las constantes a , b y C_t se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Coeficientes MoWITT

Dirección del viento	a ($W/m^2 k^{4/3}$)	b	C_t ($W/m^2 k(m/s^b)$)
Barbolento	3.3	0.9	0.8
Sotavento	3.6	0.6	0.8

Modelo DOE-2

El método del modelo DOE-2 es una combinación entre los modelos MoWITT y BLAST (EnergyPlus, 2013). El coeficiente convectivo para superficies muy suaves se calcula con la Ec. (2.8) y para superficies menos suave su cálculo se realiza con la Ec. (2.9).

$$h_{c,vidrio} = \sqrt{h_n^2 + [aV_z^b]^2} \quad (2.8)$$

$$h_c = h_n + R_f(h_{c,vidrio} + h_n) \quad (2.9)$$

El valor de la constante b se define en la Tabla 2.4, mientras que los valores para R_f se encuentran en la Tabla 2.3.

Modelo de Algoritmo convectivo adaptable

Existe una numeración amplia de modelos de algoritmo convectivo variable, los cuales describen los coeficientes convectivos más utilizados en Los programas de simulación energética de edificio (Mirsadeghi *et al.*, 2013; EnergyPlus, 2013, Liu *et al.*, 2015)

Coefficientes de convectivo interior

Existen distintos modelos para los coeficientes de convección interior, de los cuales se enumerarán (Fisher y Pedersen, 1997) los siguientes. La Tabla 2.5 muestra las ecuaciones de los modelos comúnmente utilizados para coeficientes convectivos interiores en una edificación (EnergyPlus,2013).

Tabla 2.5 Algoritmo difusor para la envolvente de una edificación

Modelo	Ecuación	Número
Algoritmo difusor para techos	$h = 3.873 + 0.082 * ACH^{0.98}$	(2.10)
Algoritmo difusor para pisos	$h = 2.234 + 4.099 * ACH^{0.503}$	(2.11)
Algoritmo difusor para muros	$h = 1.208 + 1.012 * ACH^{0.604}$	(2.12)

2.1.2.3 Radiación

El tercer mecanismo de transferencia de calor es la radiación, en donde la energía emitida por la materia se transfiere en forma de ondas electromagnéticas (fotones) debido a los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constituyentes. Se produce entre dos superficies a distintas temperaturas. En una edificación, es la energía que le llega a la envolvente en forma de radiaciones solares. Una de las leyes aplicadas a este fenómeno es la ley de Stefan-Boltzmann, la cual establece que “La potencia emisiva de una superficie es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta de dicha superficie. El límite superior de potencia emisiva lo establece el cuerpo negro. El flujo de calor emitido por cualquier superficie es menor al del cuerpo negro de dicha temperatura” (Montes *et al.*, 2014). Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann cuyo valor es $5.67 \cdot 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4$, T_s^4 es la temperatura absoluta de la superficie y A es el área de la superficie.

$$Q_r = \sigma AT_s^4 \quad (2.13)$$

Sin embargo, esta radiación máxima corresponde a una radiación idealizada conocida como *cuerpo negro*, no obstante, la radiación que se emite en superficies reales es menor a la de un cuerpo negro a la misma temperatura.

$$Q_r = \varepsilon \sigma AT_s^4 \quad (2.14)$$

Donde ε es la *emisividad* cuyos valores son de $0 \leq \varepsilon \leq 1$, esta propiedad proporciona una medida de la eficiencia con que una superficie emite energía en relación con un cuerpo negro. La radiación puede incidir sobre una superficie desde sus alrededores. La radiación se origina desde una fuente espacial, por ejemplo, el sol o de otras superficies a la cual se encuentra expuesta la superficie de interés. Esta radiación incidente en las superficies se le conoce como *irradiación*. Una parte de la irradiación, o toda, puede ser absorbida por la superficie incrementando así la energía térmica del material. A la energía radiante que es absorbida por un área superficial se le conoce como *absortancia* cuyos valores son de $0 \leq$

$\alpha \leq 1$ (Incropera y DeWitt, 2002). Cuando una superficie pequeña a una temperatura T_s con una emisividad ε y un área superficial A es rodeada por una superficie más grande a una temperatura T_{aire} , separadas por un gas, la radiación neta de transferencia de calor es:

$$Q_r = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{aire}^4) \quad (2.15)$$

Por otra parte, el intercambio de calor neta por radiación entre dos superficies (T_s y T_{aire}) es:

$$Q_r = h_r A (T_s^4 - T_{aire}^4) \quad (2.16)$$

Donde h_r es el coeficiente de transferencia de calor por radiación, el cual se expresa como:

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{aire})(T_s^2 + T_{aire}^2) \quad (2.17)$$

Absortancia, Reflectancia y Transmitancia

Todas las superficies emiten energía de manera constante, la cuales es absorbida por las demás superficies que la rodean, es decir, que recibe radiación por todas las direcciones. Cuando la radiación choca contra una superficie, una parte de ella se refleja (1), otra parte se absorbe (2), y la parte restante, si existe se transmite (3).

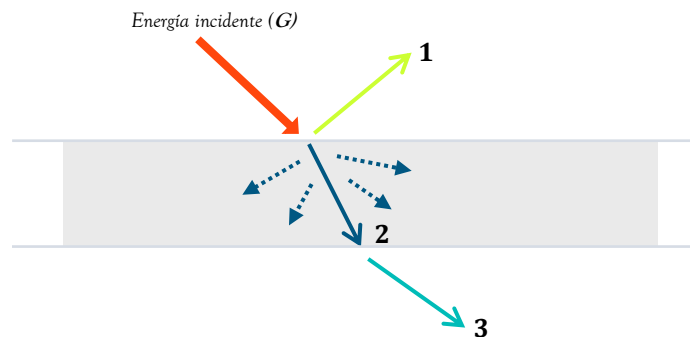


Figura 2.4 Descomposición de la energía incidente en una superficie

Cuando la superficie refleja una fracción de irradiación esta recibe el nombre de *reflectancia* (ρ), cuando la fracción de irradiación es absorbida por la superficie se le conoce como *absortancia* (α), mientras que la fracción de irradiancia es transmitida se le denomina como *transmitancia* (τ). La suma de estos tres componentes debe ser igual a 1, como se muestra en la Ec. (2.18).

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.18)$$

Por otra parte, para materiales opacos la radiación incidente no se transmite siendo el valor de $\tau = 0$.

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2.19)$$

La Tabla 2.6 muestra los valores de reflectividad y emisividad de algunos de los materiales de construcción de la edificación de estudio.

Tabla 2.6 Reflectividad y emisividad de los materiales de construcción

Materiales de construcción	Emisividad ϵ	Reflectancia ρ
Yeso	0.97	0.35
Tabique	0.93	0.44
Mortero	0.96	0.45
Impermeabilizante	0.91	0.30

2.1.3 Transferencia de calor a través de los materiales

La propagación de calor a través de los materiales se lleva a cabo por medio de los mecanismos de transferencia de calor *conducción*, *convección* y *radiación*. Por otra parte, esta propagación a través del material será diferente para cada uno ya que dependerá de las propiedades físicas y químicas, el espesor, la densidad, su textura, el color, la diferencia de temperatura entre las caras del material y la velocidad circundante (Morillón, 2007).

Todos los materiales son diferentes en composición química y propiedades físicas, lo cual hacen que la transmisión de calor se efectúe de forma diferente de acuerdo al material que

se utilice. A demás, que el espesor juega un papel importante, pues a mayor espesor menor será la cantidad de calor transmitida, y a menor espesor mayor es la cantidad de calor transmitida. La densidad de un material depende de que tan juntas se encuentran las partículas, por lo que, si las partículas se encuentran muy juntas, el material pesa más por unidad de volumen y esto hace que la transferencia de calor por conducción sea mayor. La textura y el color del material son de suma importancia para la transmisión de calor ya que superficies lisas permiten mayor transmisión que las rugosas, mientras que colores oscuros absorben más calor que los colores claros. A mayor diferencia de temperatura entre las caras del material, mayor es la transmisión de calor, por otra parte, la velocidad circundante del aire propiciara la mayor o menor transmisión.

El comportamiento térmico de un material se determina por medio de cuatro indicadores, que son la resistencia térmica, transmitancia, retraso y amortiguamiento térmico. Todos los fenómenos de la transferencia de calor, son directamente proporcionales a una fuente de calor que los favorece a una resistencia que se opone al flujo. En términos prácticos la resistencia térmica representa la capacidad de una distancia para evitar el flujo de calor a través de la misma.

2.1.4 Balance térmico en edificaciones

El balance térmico se realiza mediante una serie de cálculos considerando las pérdidas y ganancias de calor de cerramiento en una edificación. Las condiciones térmicas de una edificación son las que definen en gran parte el confort de sus habitantes. Si las ganancias de calor son mayores que las pérdidas, la edificación tenderá a calentarse, por otra parte, si las pérdidas de calor son mayores que las ganancias, el edificio tenderá a enfriarse. Para contrarrestar las situaciones de discomfort interior, se tiende a incorporar sistemas de climatización artificial (refrigeración y calefacción). En función de la época del año, el edificio pierde energía o la gana debido a las condiciones climatológicas exteriores, de tal manera que este se enfría o se calienta sin que podamos controlar este fenómeno natural. Por esta razón, los edificios están dotados de una envolvente que los protege de los agentes atmosféricos y de unas instalaciones térmicas para conseguir el confort de sus usuarios proporcionándoles una temperatura adecuada y aire limpio. En la Figura 2.5 se muestra los principales fenómenos que intervienen en el comportamiento térmico de un edificio.

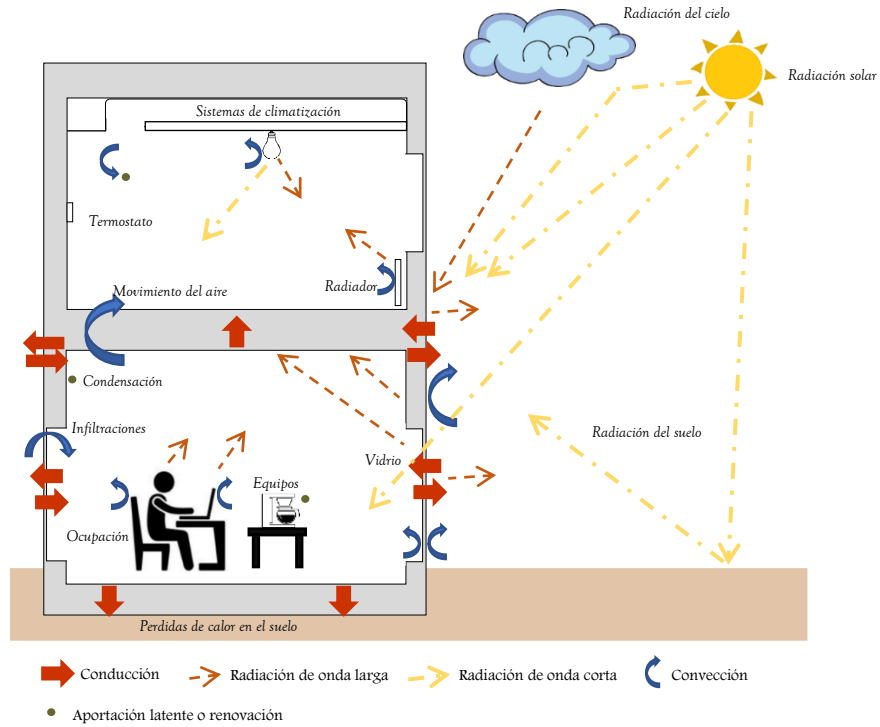


Figura 2.5 Transferencia de calor y masa en edificios

2.1.5 Ganancias y pérdidas de calor en edificaciones

Las ganancias o entradas de calor se deben a la emisión constante de calor de los ocupantes del ambiente, de los aparatos en funcionamiento y aparatos de iluminación artificial. Por otra parte, las pérdidas o salidas de calor dependen de la diferencia de temperaturas entre el ambiente a condicionar y el ambiente exterior. El cálculo del balance térmico por transmisión a través de los cerramientos exige del conocimiento del sistema de construcción y de los materiales empleados en la construcción del edificio. La Ec. (2.20) muestra la suma de las pérdidas y ganancias de calor que ocurren dentro de un edificio.

$$Q_s + Q_i \pm Q_c \pm Q_{vc} \pm Q_m - Q_e = 0 \quad (2.20)$$

donde,

- Q_s = Ganancias solares
- Q_i = Ganancias internas
- Q_c = Ganancias y pérdidas por conducción
- Q_{vc} = Ganancias y pérdidas por ventilación- convección
- Q_m = Ganancias y pérdidas mecánicas
- Q_e = Pérdidas evaporativas

Las ganancias solares se deben al aumento de la temperatura que se produce cuando la energía del sol pasa a través de ventanas o muros. Cuando las ganancias se dan a través de muros se denominan indirectas, mientras que, si ocurren a través de ventanas las ganancias se denominan directas. Por otra parte, las ganancias internas se deben en particular por el calor producido por los ocupantes, la iluminación artificial, los dispositivos electrónicos y electrodomésticos. Las ganancias y pérdidas por conducción existen cuando flujos de calor pasan a través del edificio, y dependiendo el sentido de la dirección del flujo se conocerá si existe pérdida o ganancia.

Las ganancias y pérdidas por ventilación- convección suceden cuando el aire del exterior ingresa y circula a través de la edificación, lo que lleva que el aire interior sea expulsado hacia a fuera. Las ganancias suceden cuando la temperatura del aire exterior es mayor que la del aire interior, si esto sucediera en inversa se tendrían pérdidas. Las ganancias y pérdidas mecánicas ocurren generalmente debido a los sistemas de climatización en una edificación. Las pérdidas evaporativas ocurren cuando el agua se evapora y se incorpora del aire del espacio interior.

2.1.6 Cargas térmicas

Se entiende por carga térmica a la demanda máxima de energía que hay que aportar para mantener las condiciones requeridas en las edificaciones. La carga térmica se utiliza para el dimensionado de instalaciones, como en los sistemas de producción de energía entre otros. Se dimensiona sobre todo para cargas de calefacción y refrigeración.

2.1.6.1 Cargas térmicas de calentamiento

Las cargas de calefacción o calentamiento son la potencia de calentamiento máxima necesaria (en condiciones desfavorables de invierno) para cerrar el balance de las pérdidas a través de los cerramientos y la ventilación. No se tienen en cuenta las ganancias internas, que reducen las necesidades de calefacción. El método de cálculo de las necesidades de calefacción, contempla la existencia de dos cargas térmicas, la carga térmica por transmisión de calor a través de los cerramientos hacia el exterior, y las cargas térmicas de enfriamiento por ventilación o infiltración al exterior.

Cargas térmicas de transmisión

La carga térmica por transmisión se determina con la ecuación siguiente:

$$Q = C_o \cdot C_i \cdot K \cdot S \cdot (T_{interior} - T_{exterior}) \quad (2.21)$$

donde,

- Q = Carga térmica por transmisión (kcal/h)
- C_o = Coeficiente de orientación del muro
- C_i = Coeficiente de intermitencia de la instalación
- K = Coeficiente global de transmisión de calor del muro (kcal/hm² °C)
- S = Superficie del muro expuesta a la diferencia de temperatura (m²)
- $T_{interior}$ = Temperatura proyectada en la edificación con calefacción (°C)
- $T_{exterior}$ = Temperatura del exterior o edificación sin calefacción (°C)

Cargas térmicas por ventilación o infiltración del aire exterior

La carga térmica por ventilación o infiltración del aire exterior se determina con la ecuación siguiente:

$$Q = V \cdot N \cdot 0.29(T_{interior} - T_{exterior}) \quad (2.22)$$

donde,

- V = Volumen de la edificación con calefacción (m^3)
 N = Número de renovaciones horarias (1/h)
 $T_{interior}$ = Temperatura proyectada en la edificación con calefacción ($^{\circ}C$)
 $T_{exterior}$ = Temperatura del exterior o edificación sin calefacción ($^{\circ}C$)

La constante con el valor 0.29 es el calor específico del aire referente al volumen de la edificación y sus unidades son en $kcal/m^3 \text{ } ^{\circ}C$.

2.1.6.2 Cargas térmicas de enfriamiento

Las cargas refrigeración o enfriamiento son la potencia máxima (condiciones desfavorables de verano) necesaria para vencer todas las ganancias de calor existentes en la edificación. estas cargas contemplan la existencia de cargas sensibles y cargas latentes.

Cargas sensibles

Las cargas térmicas sensibles se subdividen en: cargas por transmisión, cargas por radiación solar, cargas por ventilación o infiltración de aire exterior, por personas, por iluminación y por equipos electrónicos y electrodomésticos.

Cargas por transmisión a través de cerramientos opacos y traslucidos

El cálculo de la carga térmica por transmisión se calcula utilizando la ecuación siguiente:

$$Q = K \cdot S \cdot DTE \quad (2.23)$$

donde,

- Q = Carga térmica de transmisión (kcal/h)
- K = Coeficiente global de transmisión de calor del muro (kcal/hm²°C)
- S = Superficie del muro expuesta a la diferencia de temperatura (m²)
- DTE = Diferencias de temperatura según la orientación y su peso (°C)(opacos)
- DTE = Diferencias de temperatura entre la cara exterior del cerramiento y la cara interior (°C)(Translucidos)

Cargas por radiación solar

La radiación solar al atravesar las superficies translucidas y transparentes e incidir las superficies interiores de las edificaciones hace que estas superficies se calienten lo que hace que se incrementen la temperatura interior de la edificación.

$$Q = K \cdot S \cdot f \quad (2.24)$$

donde,

- Q = Carga térmica de transmisión (kcal/h)
- R = Radiación solar que atraviesa un vidrio sencillo tabulada para cada latitud (kcal/hm²)
- S = Superficie translucida expuesta a la radiación (m²)
- F = Factor de corrección de la radiación en función del tipo de vidrio, sombras

Cargas sensibles por ventilación o infiltración del aire exterior y por ocupación

Las cargas sensibles por ventilación o infiltración se calculan con la Ec. (2.22). Por otra parte, las cargas por ocupación se determinan multiplicando una valoración del calor sensible emitido por cada persona y por el número de ocupantes.

Cargas generadas por iluminación y equipos

En las cargas generadas por iluminación se considera que la potencia integrada se transforma en calor sensible.

Para las lámparas incandescentes el cálculo de la carga se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Q = Pot \cdot 860 \quad (2.25)$$

Mientras que para las lámparas de descarga se considera el cebador y el balasto por lo que, el valor obtenido se incrementará un 25%. El cálculo de las cargas de equipos electrónicos y electrodomésticos se calcula con la ecuación siguiente.

$$Q = 125Pot \cdot 860 \quad (2.26)$$

donde,

Q = Carga térmica de transmisión ($kcal/h$)

P = Potencia de la lámpara y equipos (kW)

Cargas latentes

Las cargas latentes se deben a la necesidad de condensar la humedad del aire tanto en interiores como los exteriores de la edificación. Este se subdivide en cargas por ventilación o infiltración y ocupantes.

Cargas latentes por ventilación o infiltración del aire exterior y por ocupantes

Las cargas por ventilación o infiltración del aire exterior se obtienen con la siguiente ecuación:

$$Q = V \cdot 0.72 \cdot \Delta w \quad (2.27)$$

donde,

Q = Carga térmica de transmisión ($kcal/h$)

V = Caudal del aire infiltrado o de ventilación (m^3/h)

Δw = Diferencia de humedad absoluta entre el ambiente exterior y el interior ($^{\circ}C$)

El valor de la constante 0.7 se obtiene mediante el producto de la densidad estándar del aire ($1.2 \text{ kg}/m^3$) por el calor latente de vaporización del agua ($0.6 \text{ kcal}/m^3$). las cargas por ocupación se determinan multiplicando una valoración del calor latente emitido por cada persona y por el número de ocupantes.

2.1.7 Geometría solar

La Tierra gira alrededor de su eje polar, el cual está inclinado aproximadamente 23.5° respecto a la perpendicular al plano de la eclíptica. Este ángulo permanece constante a lo largo del año, sin embargo, el ángulo formado por una línea que una los centros de la Tierra y el Sol y el plano ecuatorial varía cada día. Este ángulo se conoce como declinación solar y varía entre $\pm 23.5^{\circ}$.

Las cuatro estaciones están determinadas por cuatro posiciones principales en la órbita terrestre en su giro alrededor del Sol, que reciben el nombre de solsticios y equinoccios: solsticio de invierno, equinoccio de primavera, solsticio de verano y equinoccio de otoño como se muestra en la Figura 2.6. En el hemisferio norte, la declinación solar se anula en los equinoccios de primavera de otoño. En estos días, el Sol se encuentra en el ecuador, la duración del día es igual a la de la noche en toda la Tierra y las posiciones de salida y de puesta de Sol coinciden son el Este y el Oeste, respectivamente.

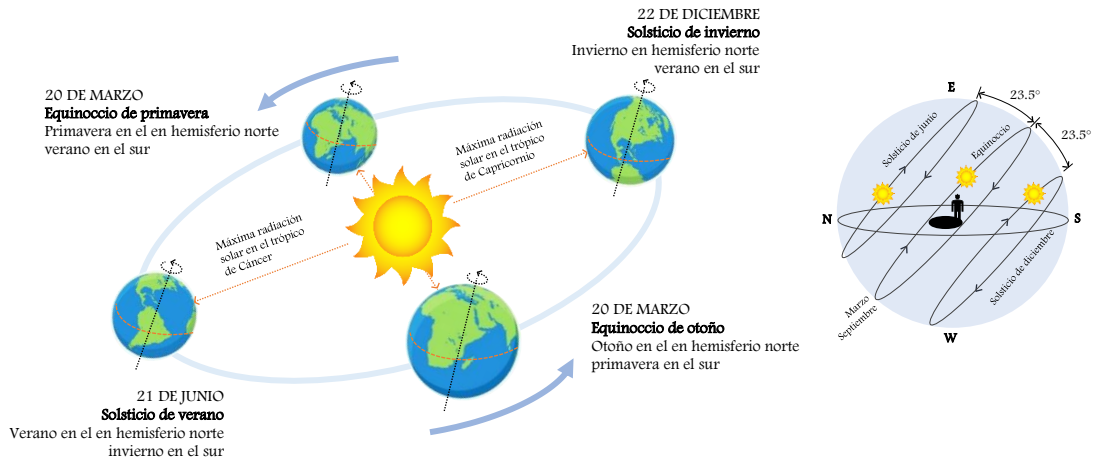


Figura 2.6 Trayectoria de la tierra alrededor del sol

Mediante un sistema de coordenadas podemos conocer la trayectoria del sol. Una línea imaginaria desde nuestro lugar y atraviesa la masa terrestre llamados Zenit o Cenit la cual tiene una dirección hacia arriba, y nadir, con una dirección hacia abajo, como se presenta en la Figura 2.7.

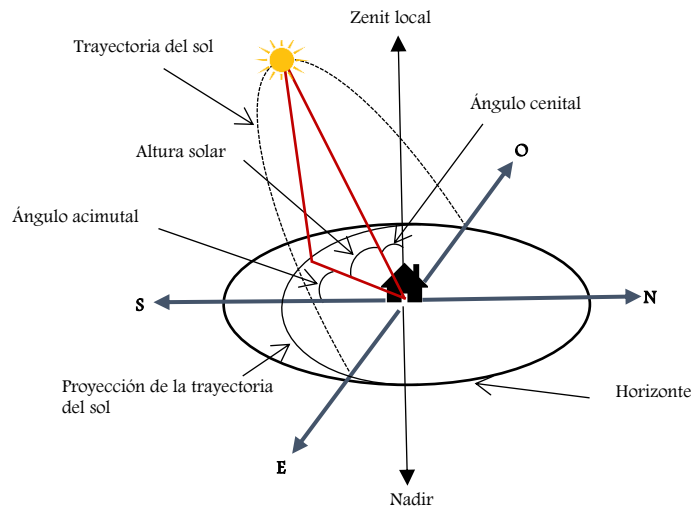


Figura 2.7 Ángulos y altura en la trayectoria del sol

El ángulo azimut es el que forma entre el sol y el norte, el cual se mide en sentido de rotación de las agujas del reloj alrededor del horizonte del observador. El ángulo azimut, varía todo el día a medida que la tierra rota alrededor del sol. El ángulo cenital está formado por la vertical y la línea del sol. Es el ángulo en el que la radiación incide directamente sobre una superficie horizontal. La altura solar corresponde al ángulo con el que vemos el sol (si lo miramos en su posición), tomando la horizontal formada por el suelo

2.1.8 Confort térmico

El confort se puede expresar como aquello que brinda comodidad y genera bienestar, el cual puede estar dado por algún objeto físico (un sillón, un colchón, un coche, entre otros) o por alguna circunstancia ambiental o abstracta (la temperatura apropiada, el silencio, la sensación de seguridad entre otros). Los factores personales tales como, la ropa, el tiempo de permanencia, la salud y el color de la piel, el historial lumínico, visual y acústico, el sexo, la edad, el peso, son los más utilizados para el análisis del confort, ya que es más fácil su medición. Existen distintos tipos de confort como: el lumínico, térmico, acústico, psicológico, olfativo, calidad del aire entre otros. De estos tipos de confort, el confort térmico es el principal influyente en la percepción de un individuo (Solana, 2011).

La mayoría de los estándares internacionales establecen que el confort térmico se puede definir como: *“aquella condición de la mente que proporciona satisfacción con el ambiente térmico”* (ASHRAE55, 1992; ISO7730, 1994). Por otra parte, las expectativas del confort térmico dependen de varias circunstancias, por ejemplo, el lugar donde se encuentre el ser humano, los motivos, la época del año entre otros. No obstante, aunque las condiciones del estilo de vida, la cultura y el tipo de clima son diferentes en todo el mundo, la temperatura de confort que eligen los ocupantes puede ser similar bajo las mismas condiciones de vestimenta, humedad relativa y velocidad del aire. Además que, el estudio del confort térmico integra varias ciencias como la filosofía, la física, la ingeniería mecánica y la psicología (ASHRAE, 2005).

Los parámetros que tienen efecto en el confort térmico:

- ✓ Actividad física
- ✓ Humedad relativa
- ✓ Temperatura radiante media y del aire
- ✓ Velocidad del aire
- ✓ Vestimenta

2.1.8.1 Actividad física

El metabolismo es el conjunto de cambios químicos y biológicos que se producen continuamente en los seres vivos. La actividad metabólica se puede definir como la cantidad de energía gastada en un cierto periodo de tiempo. El nivel de actividad está relacionado significativamente con la percepción de la sensación de confort térmico. El rango aceptable se encuentra entre 0.8 a 4.0 met (W/m^2), donde el valor de 1.0 met = 58.15 W/m^2 . La temperatura del aire es la temperatura a la que se encuentra el aire que rodea al individuo. La diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura de la piel de las personas determina el intercambio de calor entre el individuo y el aire, a este intercambio de calor se le denomina “intercambio de calor por convección” (Martínez *et al.*, 2016).

La energía es el combustible que el cuerpo humano necesita para vivir y ser productivo. La energía necesaria para vivir se obtiene de los alimentos. En el cuerpo humano los alimentos son transformados en sustancias nutritivas, este proceso produce energía que es la que utiliza el cuerpo para efectuar todas sus funciones. En condiciones normales, el cuerpo humano presenta una temperatura central de aproximadamente 37.0°C. Al estar, la mayoría de los casos, el cuerpo humano a mayor temperatura que su entorno, constantemente se estará produciendo una pérdida de calor hacia el entorno físico. A velocidad adecuada el cuerpo pierde calor obteniendo el confort térmico, a dicha velocidad se equilibran todos los intercambios energéticos que origina el cuerpo humano. A ese ritmo de pérdida de calor se denomina velocidad o actividad metabólica (Chevez, 1997).

La actividad del metabolismo y del resto de mecanismos de intercambio de energía entre el cuerpo y su entorno se cuantifican con la siguiente expresión:

$$M-W=\pm CV\pm R\pm CC\pm RS+ EV+D+A \quad (2.28)$$

Donde la M representa la velocidad del metabolismo, la W representa la energía mecánica efectiva exterior, el CV representa el intercambio por convección, R el intercambio por radiación y CC el intercambio por conducción, RS representa el intercambio de calor latente (evaporación respiratoria) y sensible de productos en la respiración, EV representa las pérdidas por evapotranspiración, D la difusión de vapor de agua desde la piel y A la energía acumulada.

Reduciendo la Ec. (2.29) eliminado los fenómenos de menor cuantía, los cuales se deben incluir cuando se necesite mayor precisión, por lo tanto, la ecuación queda de la manera siguiente:

$$M =\pm CV\pm R + EV \quad (2.29)$$

La convección y la radiación puede ser de distinto signo, positivo (pérdidas), cuando el entorno está a menor temperatura que el cuerpo, o negativo (ganancias), cuando está a mayor temperatura (Godoy, 2012). La Tabla 2.7 muestra los valores comunes de tasa metabólica basados en la ISO 7730.

Tabla 2.7 Tasa metabólica

Grado de actividad	Tasa metabólica (met)
Sentado, relajado	1.0
Sentado, trabajo ligero (oficina, casa, escuela, laboratorio)	1.2
De pie, trabajo ligero (Compras, laboratorio, trabajo ligero en fabrica)	1.6
De pie, trabajo moderado (ventas, tareas de hogar, operador de maquinaria)	2.0
Caminando 2 km/h	1.9
Caminando 3 km/h	2.4
Caminando 4 km/h	2.8
Caminando 5 km/h	3.4

2.1.8.2 Humedad relativa

La humedad relativa es un término utilizado para describir la cantidad de vapor de agua que se encuentra en el aire y se expresa en tanto por ciento (%). Cuanta mayor sea la humedad, menor es la transpiración. Una humedad relativa ideal se encuentra entre 30.0% y 70.0% (Taleghani *et al.*, 2013). En la Figura 2.8 se muestra el confort térmico en función de la temperatura del aire y la humedad relativa (Blender, 2015).

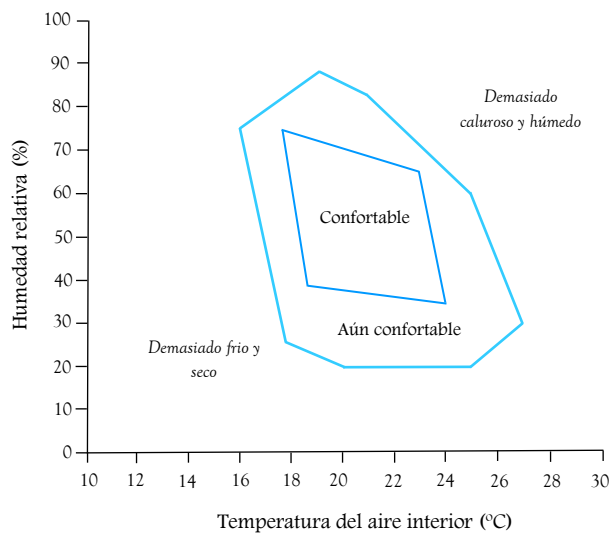


Figura 2.8 Confort térmico en función de la temperatura del aire y la humedad relativa

2.1.8.3 Temperatura radiante media y del aire

La temperatura media radiante (T_{mr}), corresponde al intercambio de calor por radiación entre el cuerpo y las superficies que lo rodean. La temperatura media radiante se calcula a partir de los valores medidos de la temperatura del globo (T_g), la temperatura seca del aire (T_{sa}) y la velocidad del aire (V_a) como se muestra en la Ec. (2.30) (Fanger, 1970). Otro factor usado en ambientes interiores es la temperatura operativa (T_o), la cual indica la

temperatura a la que se debe que tener el aire y las paredes de un recinto para que un individuo intercambie con el mismo calor sensible que en el local de origen (Godoy, 2012).

$$T_{mr} = T_g + 0.19 (T_a - T_{sa}) V_a^{1/2} \quad (2.30)$$

$$T_o = \frac{h_c * T_s + h_r * T_{mr}}{h_c + h_r} \quad (2.31)$$

donde, h_c y h_r son los coeficientes de convección y radiación respectivamente. La Figura 2.9 se muestra el confort térmico en función de la temperatura del aire interior y la temperatura de las superficies (Blender, 2015).

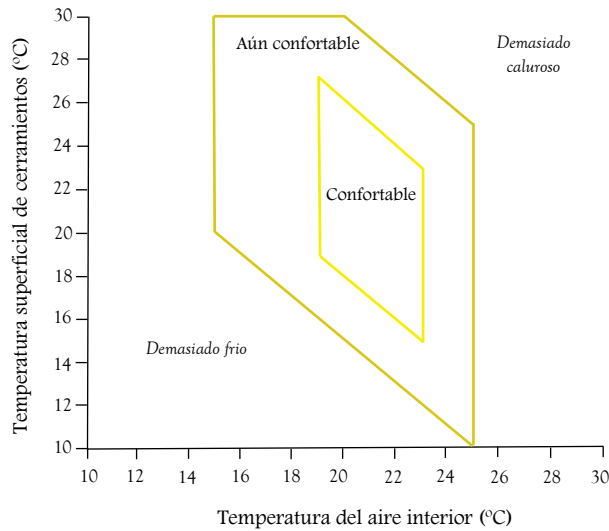


Figura 2.9 Confort térmico en función de la temperatura del aire y la temperatura de cerramientos

Otra fuente de percepción del calor es la radiación, el cual se presenta en el intercambio de calor entre unas y otras superficies del ambiente (piel, máquinas, cristales, paredes, techos, entre otras.). Si la temperatura de la piel es mayor que la temperatura radiante media, el cuerpo cede calor por radiación al ambiente; si es al revés, el organismo recibe calor del medio.

2.1.8.4 Velocidad del aire

La velocidad del aire interviene en la forma directa del balance térmico y la sensación térmica. A demás tiene un efecto térmico ya que puede aumentar la pérdida de calor por convección. Según sea la velocidad del aire, varia la capa del aire que aísla y por tanto aumenta la evaporación. Por otro parte, cuando los movimientos de aire en una zona térmica enfrían el cuerpo humano más allá de lo deseado genera corrientes desagradables. La cantidad de fluctuaciones de aire también es importante. En la Figura 2.10 se muestra el confort térmico en función de la temperatura del aire interior y la velocidad del aire (Blender, 2015).

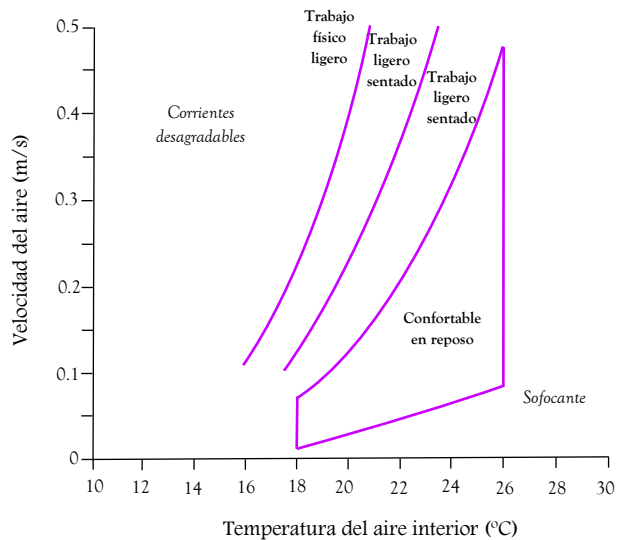


Figura 2.10 Confort térmico en función de la velocidad del viento y la temperatura del aire

2.1.8.5 Vestimenta

La vestimenta sirve para aislar de las condiciones ambientales y para evitar pérdidas de calor del cuerpo. La cantidad de ropa también afecta en el confort térmico, se expresa como Clo, y va desde 0 hasta 3 o 4. El valor de 1 Clo = 0.16 °C/W. la norma ISO 7730

proporciona gran variedad de factores de vestimentas, la Tabla 2.8 muestra un resumen de conjuntos de ropa comunes.

Tabla 2.8 Factor de vestimenta de diferentes conjuntos de ropa

Conjunto de ropa	Factor de ropa (clo)
Desnudo	0.0
Shorts	0.1
Ropa ligera de verano (pantalón largo y ligero, camisa de cuello abierto y manga corta)	0.5
Conjunto de trabajo ligero (shorts deportivos, calcetines de lana, camisa de trabajo de algodón, pantalones de trabajo)	0.6
Traje de negocios típico	1.0
Traje típico de negocios + abrigo de algodón	1.5
Ropa deportiva ligera al aire libre (camisa de algodón, pantalones, camiseta, pantalones cortos, calcetines, zapatos, chaqueta de popelina de una sola capa)	0.9
Traje de negocios europeo tradicional pesado	1.5

2.1.9 Enfoque estático y enfoque adaptativo

En la actualidad coexisten dos tipos de enfoques diferentes para la definición de confort térmico, cada uno con sus potenciales y límites: el enfoque estático, racional o de balance de calor y el enfoque adaptativo (Doherty y Arens, 1988).

2.1.9.1 Enfoque estático

El enfoque de balance de calor se basa en los experimentos de Fanger en una cámara climática, en la cual controló una muestra de 1396 jóvenes daneses utilizando un modelo de transferencia de calor de estado estable. El modelo de Fanger combina las teorías del equilibrio térmico con la fisiología de la termorregulación para determinar el rango de temperaturas de confort que los ocupantes se encontrarán cómodos. Las teorías indican que el cuerpo humano emplea procesos fisiológicos, por ejemplo, sudoración, escalofríos, regulación del flujo sanguíneo a la piel, para mantener el equilibrio entre el calor

producido por el metabolismo y la pérdida del cuerpo. Por lo tanto, Fanger llegó a la teoría de que: “el sistema de termorregulación del hombre es bastante eficaz y, por tanto, creará un balance de calor dentro de amplios límites de las variables ambientales, incluso si no existe comodidad.” (Charles, 2003; Djongyang et al. 2010).

La ecuación obtenida por Fanger describe el confort térmico como desequilibrio entre el flujo real del cuerpo en un entorno térmico dado y el flujo de calor requerido para que un confort sea optimo o neutral en una actividad determinada. La ecuación relacionó las condiciones de escala de sensación térmica de los siete puntos ASHRAE, la cual se conoció como PMV, el cual se incorporó al índice PPD. El modelo PMV se calcula de acuerdo al estándar ASHRAE. Por otra parte, la relación entre el PMV y el PPD se muestra de acuerdo a la Ec. (2.32) y la Ec. (2.33).

$$PMV = aT + bP_v - c \quad (2.32)$$

$$PPD = 100 - 95 \exp(-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)) \quad (2.33)$$

Los valores de los coeficientes a , b y c se consideran según el sexo y el tiempo de exposición al ambiente exterior. La Tabla 2.9 muestra los valores de los coeficientes.

Tabla 2.9 Valores de los coeficientes a , b y c

Tiempo	Sexo	a	b	c
1 hora	Hombre	0.220	0.233	5.673
	Mujer	0.272	0.248	7.245
	Ambos	0.245	0.248	6.475
2 horas	Hombre	0.221	0.270	6.024
	Mujer	0.283	0.210	7.694
	Ambos	0.252	0.240	6.859
3 horas	Hombre	0.212	0.293	5.949
	Mujer	0.275	0.255	8.620
	Ambos	0.243	0.278	6.802

El PMV consiste en considerar la opinión de las personas sobre la sensación térmica que experimentan durante estancias prolongadas en determinadas condiciones térmicas (Castilla *et al.*, 2010). El PMV se mide de acuerdo a la escala de los siete valores de sensación térmica como se muestra en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10 Relación entre el PMV y el PPD

PMV	PPD	Sensación Térmica
+3	99%	Muy calurosa
+2	77%	Calurosa
+1	26%	Ligeramente cálido
0	5%	Neutro
-1	26%	Ligeramente fría
-2	77%	Fría
-3	99%	Muy fría

El PPD predice el porcentaje de personas que sintieron cálidas o frías, utilizando la escala de los siete puntos de sensación térmica. El modelo PMV/PPD es útil solo para predecir respuestas de confort en estado estable.

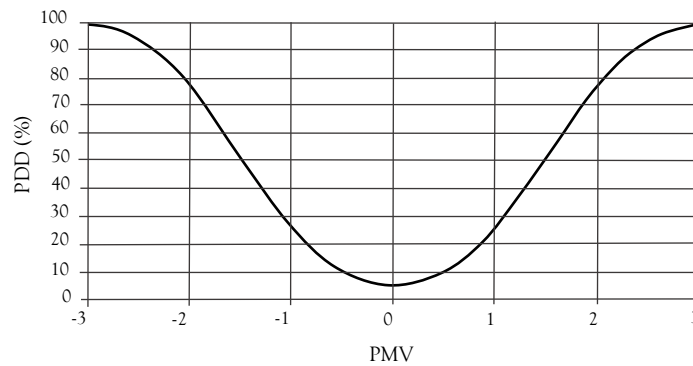


Figura 2.11 Relación entre el PMV y el PPD

2.1.9.2 Enfoque adaptativo

El segundo enfoque es el adaptativo, el cual se propuso por primera vez en la década de 1970 en respuesta a los enormes aumentos del precio del petróleo (Djongyang et al. 2010). Este enfoque se basa en el principio adaptativo que estipula “si se produce un cambio que produce malestar, las personas reaccionan de manera que tienden a restablecer su comodidad” (Humphreys, 1997; Nicol et al., 2012). El modelo adaptativo está basado en estudios de campo en edificios con ventilación natural, a partir de estos estudios, se establecieron regresiones lineales que relacionan las temperaturas operativas interiores con las temperaturas del aire exterior (Nicol y Humphreys, 1973; Auliciems, 1981; deDear et 1997).

2.2 Localización y caracterización climática

Para la selección del lugar se tomaron en cuenta tres variables las cuales fueron, el clima, el número de población por ciudad y selección del lugar por capacidad de AC recomendada en cada zona. A continuación, se describe cada uno de ellos.

2.2.1 Selección de tipo clima y número de población por ciudad

En nuestro planeta hay diferentes zonas térmicas. La variedad de climas se debe, tanto los movimientos de rotación y traslación como por la inclinación de la Tierra, los rayos solares no se proyectan con la misma intensidad sobre la superficie terrestre y, por lo tanto, no la calientan de manera uniforme. En el Ecuador los rayos solares llegan directamente a la Tierra, pero a medida que se llega a los polos los rayos se proyectan de forma oblicua, propiciando que esas partes de la Tierra reciban menos calor. Así, de manera general, la Tierra se divide en una zona cálida ubicada en la franja ecuatorial, dos zonas templadas una en cada hemisferio, entre la franja ecuatorial y los polos y dos zonas frías situadas entre los círculos polares y los polos (Acosta y Salinas, 2009).

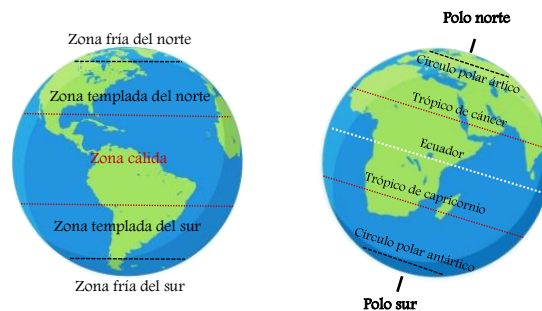


Figura 2.12 Zonas térmicas en el mundo

De acuerdo con el eje Ecuatorial, México se localiza en el hemisferio norte, y gran parte de su territorio está dividido a la mitad por el Trópico de Cáncer. México se extiende al norte en el paralelo $32^{\circ} 43' 06''$; al oeste en el meridiano $118^{\circ} 27' 24''$; al sur en el paralelo $14^{\circ} 32' 27''$ y al este con el meridiano $86^{\circ} 42' 36''$. El país cuenta con una gran diversidad climática, es el trópico de cáncer que lo divide en dos grandes zonas climáticas: las zonas templadas y las zonas tropicales, sin embargo, también se encuentran zonas frías en los

lugares montañosos (PROMEXICO, 2016). Los elementos del clima son los fenómenos meteorológicos que se producen en la atmosfera y que explican tanto el tiempo como el clima de un lugar y esto son la temperatura, la humedad, la presión atmosférica, el viento y las precipitaciones.

En México, es posible encontrar tres tipos de climas predominantes, los climas cálidos, los climas templados y los climas semifríos, cada uno con sus respectivos subgrupos como se muestra en la Figura 2.13.

El clima cálido se divide en seco-extremoso, seco, húmedo y semihúmedo. Los climas cálido seco-extremoso y seco se caracterizan por tener temperaturas extremadamente altas, hasta bajar a temperaturas frías en un mismo día. Estos climas se encuentran en la mayor parte del norte del país y en algunas partes del noroeste ocupando el 49.1% del territorio nacional. Se caracterizan por tener una temperatura promedio anual entre los 22.0 y 26.0°C en algunas regiones y de 18.0 y 22.0°C en otras regiones, sus precipitaciones anuales son de 100 a 300mm en promedio. Los climas cálido húmedo y semihúmedo se encuentran en mayor parte en el Golfo de México y algunas partes en la península de Yucatán y océano Pacífico ocupando el 27.7% del territorio nacional. Se caracterizan por tener una temperatura promedio anual entre los 22.0 y 26.0°C, y precipitaciones anuales promedio de 2000 a 4000 mm (INEGI, 2016).

El clima templado se divide en húmedo y seco. El clima templado seco es caracterizado por temperaturas medias anuales que rondan los 15.0°C y se registra precipitaciones anuales entre 500 y 1000mm en promedio, por otra parte, el clima templado húmedo se caracteriza por tener temperaturas entre los 18.0 y 22.0°C y sus precipitaciones se registran entre los 2000 y 4000mm anuales en promedio (INEGI, 2016). Este clima ocupa el 23.2% del territorio nacional, ubicándose en distintas regiones del país.

El clima semifrío se divide en seco y húmedo, este se encuentra en muy pocas partes de la República Mexicana, su temperatura promedio anual se registra entre los 5.0 y 12.0°C (INEGI,2016).

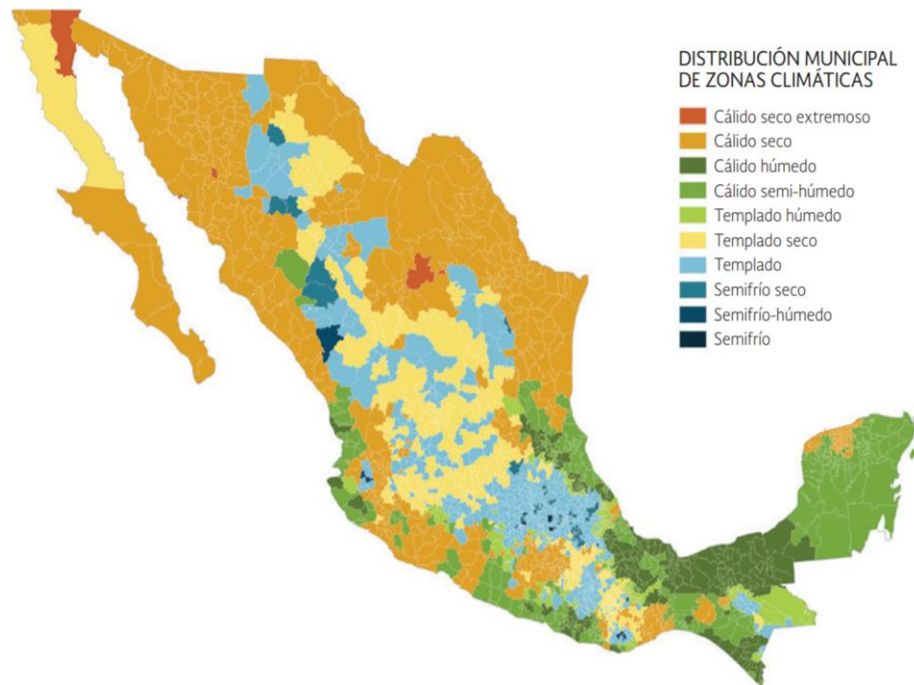


Figura 2.13 Distribución municipal de los climas en México, (Fuente: CONUEE,2016)

De lo anterior, se observa que en los climas cálidos se exhiben las temperaturas más altas entre los 18.0-26.0°C en promedio a lo largo del año, además que un alto porcentaje del territorio nacional se encuentra ubicado en el clima cálido. Por otra parte, en la temporada de verano, las temperaturas pueden llegar en promedio hasta los 43.0°C. Debido a estas altas temperaturas el uso de electricidad para satisfacer las demandas de confort térmico en zonas con clima cálido representa el 30.0% del consumo eléctrico en el sector residencial (CONUEE, 2016; Magaña *et al.*, 2013).

En el año 1989 McQuiston y Spitler determinaron que el clima con mayor impacto sobre el consumo y demanda de energía es aquel que impone mayores exigencias de climatización, lo que implica mayor costo económico sobre los consumidores del fluido eléctrico, debido al consumo extra por la climatización global. La Figura 2.14 muestra tres gráficas divididas por el tipo de vivienda en México y los climas cálidos. Una de las variables ambientales importantes para los cálculos térmicos es el tipo de clima, ya que impactan de manera significativa en la determinación de las ganancias térmicas en las edificaciones. El tipo de clima determina el porcentaje de humedad contenida en el aire y su promedio de lluvia anual. Como se observó en la Figura 2.14, el consumo anual en

climas cálidos es muy alto, por lo que, uno de los enfoques principales de este trabajo es considerar el clima cálido.

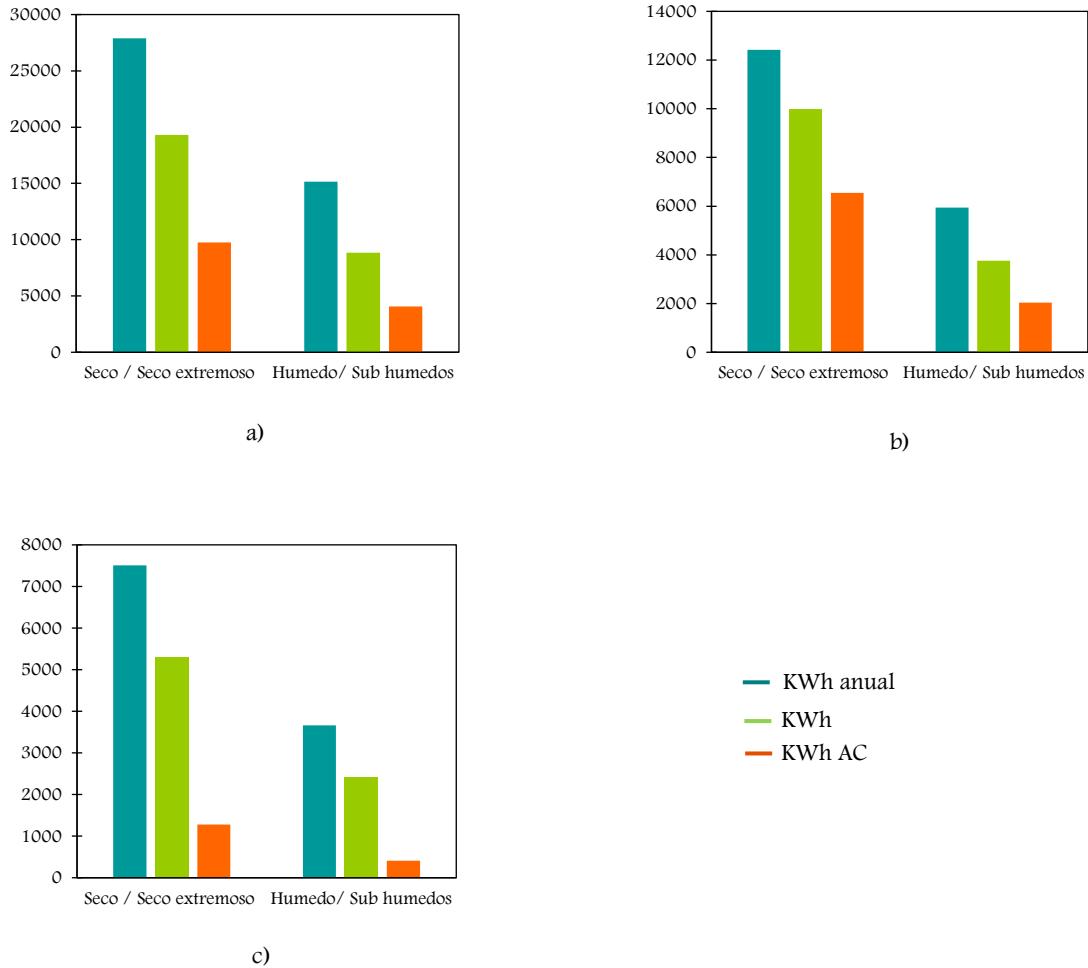


Figura 2.14 a) vivienda con alto consumo de energía, b) vivienda con mediano consumo de energía, c) vivienda con bajo consumo de energía

De acuerdo con lo anterior, y considerando la carta climática de la CONUEE (2016) se encontraron 62 ciudades representativas de acuerdo al número de habitantes con los distintos tipos de clima de México. Posteriormente, se seleccionó las ciudades con climas cálido, reduciendo el número de ciudades a 38. La Tabla 2.11 se muestran las ciudades seleccionadas y clasificadas por clima cálido húmedo, cálido semihúmedo, cálido seco y cálido seco extremo.

El último censo de población en México realizado en el año de 2017 registró una población de 119 millones 530 mil 753 habitantes (INEGI, 2017). México se ha caracterizado por contar con una población urbana creciente, derivada de la migración desde las zonas rurales a las ciudades en busca de mayores oportunidades de empleo y mejor calidad de vida. Esto ha impactado a las demandas de servicios y ha llevado al aumento del consumo de energía. La mayoría de la población de México se encuentra en las ciudades con climas cálidos. La Figura 2.15 muestra las ciudades divididas por el tipo de clima cálido y el número de pobladores en cada una de ella.

Tabla 2.11 Selección de ciudades con clima cálido

No.	Ciudad	Tipo de clima
1	Acapulco	Cálido húmedo
2	Villahermosa	Cálido húmedo
3	Tapachula	Cálido húmedo
4	Coatzacoalcos	Cálido húmedo
5	Ciudad del Carmen	Cálido húmedo
6	Ocosingo	Cálido húmedo
7	Poza Rica	Cálido húmedo
8	Playa del Carmen	Cálido húmedo
9	Minatitlán	Cálido húmedo
10	Palenque	Cálido húmedo
11	Cozumel	Cálido húmedo
12	Zapopan	Cálido semihúmedo
13	Mérida	Cálido semihúmedo
14	Cancún	Cálido semihúmedo
15	Veracruz	Cálido semihúmedo
16	Tuxtla Gutiérrez	Cálido semihúmedo
17	Tampico	Cálido semihúmedo
18	Campeche	Cálido semihúmedo
19	Puerto Vallarta	Cálido semihúmedo
20	Chilpancingo	Cálido semihúmedo
21	Chetumal	Cálido semihúmedo
22	Manzanillo	Cálido semihúmedo
23	Colima	Cálido semihúmedo
24	Tijuana	Cálido seco
25	Ciudad Juárez	Cálido seco
26	Monterrey	Cálido seco
27	Culiacán	Cálido seco
28	Chihuahua	Cálido seco
29	Guadalupe N.L.	Cálido seco
30	Torreón	Cálido seco
31	Reynosa	Cálido seco
32	Apodaca	Cálido seco
33	Mazatlán	Cálido seco
34	Los Cabos	Cálido seco
35	La Paz	Cálido seco
36	Guadalupe Zac.	Cálido seco
37	Mexicali	Cálido seco extremo
38	Hermosillo	Cálido seco extremo

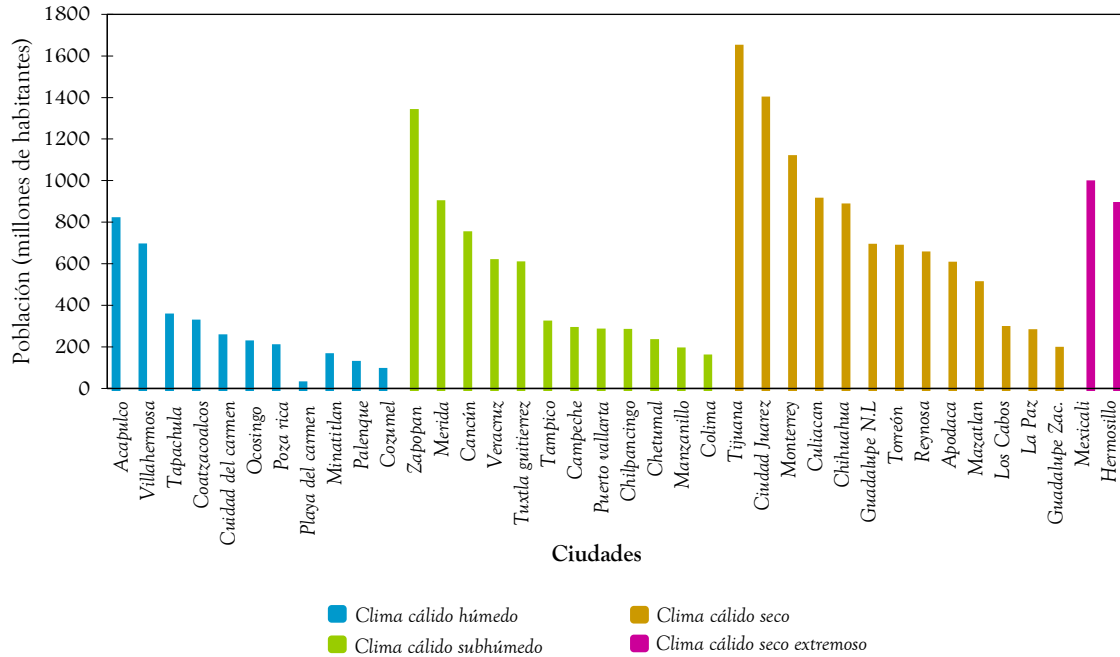


Figura 2.15 Número de habitantes de las ciudades con clima cálido de México

2.2.2 Selección por capacidad de AC recomendada por zona

La aplicación de un sistema AC se ha hecho indispensable en toda edificación y principalmente en los climas donde las altas temperaturas son poco favorables para la sensación de los ocupantes. Existen métodos básicos para realizar el cálculo de carga térmica que permite saber la capacidad del equipo. Sin embargo, para efectos prácticos se puede basar en la Tabla 2.12 que ayuda conocer la carga térmica del cuarto a acondicionar basándose en los metros cuadrados, así como la zona del país (LG, 2015).

Tabla 2.12 Clasificación de zonas de capacidad de BTU por m² de los Estados de la República

m ²	Zona 1 (BTU)	Zona 2 (BTU)	Zona 3 (BTU)	Zona 4 (BTU)
0 a 4	6000	5400	6600	7200
4 a 8	8000	7200	8800	9600
8 a 12	10000	9000	11000	12000
12 a 16	12000	10800	13200	14400
16 a 20	14000	12600	15400	16800
20 a 25	18000	16200	19800	21600
25 a 30	24000	21600	26400	28800



Figura 2.16 Clasificación de zonas por Estados de la República Mexicana

Siendo la zona 4 y la zona 3 las cuales tienen altas cargas térmicas en acondicionamiento de espacios por metro cuadrado, además que la mayoría de los climas cálidos se encuentran en mayor proporción en estas zonas como se muestra en la Figura 2.16. Con base en lo anterior y de acuerdo al tipo de clima, la población y la capacidad recomendada por zona, se eligieron para el estudio las ciudades mostradas en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13 Ciudades seleccionadas para el estudio

Ciudad	Tipo de zona (capacidad BTU)	Clima (Cálido)	Población (No de Habitantes)
Acapulco de Juárez Gro.	3	húmedo	810 669
Villahermosa Tab.	4	húmedo	684 847
Mérida Yuc.	4	semihúmedo	892 363
Cancún Q. Roo.	4	Semihúmedo	743 626
Tijuana B.C.	4	Seco	1 641 570
Ciudad Juárez Chih.	4	seco	1 391 180
Mexicali B.C.	4	seco extremoso	988 417
Hermosillo Son.	4	seco extremoso	884 273

2.2.3 Ubicación geográfica y condiciones climáticas de las ciudades de estudio

El clima es considerado un factor influyente en el consumo de energía de una edificación. El clima varía de acuerdo a la posición geográfica que se encuentre la ciudad, puesto que, presenta cambios en las variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento entre otras.

Existen distintas cartas climáticas que proporcionan información de las características del clima y la parte conforma dentro del territorio (INEGI, 2016). El informe de la CONUEE en 2016, presenta la división de climas por municipios (véase Figura 2.13), lo que hace, visualizar de manera precisa el clima perteneciente para cada lugar de estudio. Por otra parte, Köppen-Geiger realizó una carta climática que muestra la clasificación de acuerdo a la temperatura y precipitación anual, además, usando la vegetación denominó el tipo de clima. Los climas se dividen en cinco grupos principales los cuales los identifica con la letra mayúscula, del cual lo subdivide en grupos identificándolos de dos a tres letras. La Tabla 2.14 muestra la división climática de acuerdo a Köppen-Geiger.

Tabla 2.14 Clasificación de climas de acuerdo a la carta climática Köppen-Geiger

Clasificación	Definición	Subdivisión	Valor de cada subdivisión
A	Tropical	f- m -w	Ecuatorial, monzónico y sabana
B	Seco	S -W- h- k	Estepario, desértico, cálido y frío
C	Templado	s -w- f- a-b-c	Verano seco, invierno seco, húmedo, subtropical y templado, húmedo
D	Muy fríos	D	Inviernos extremadamente fríos
E	Polares	T	Tundra

Ciudades con clima cálido húmedo

La ciudad de Acapulco se encuentra ubicado entre 17° 14' y 16° 41' de latitud norte y entre 99° 29' y 100° 00' de longitud oeste. Al norte colinda con las ciudades de Chilpancingo Y Juan R. Escudero, al sur con el océano pacifico, al este con la ciudad de San Marcos y al Oeste con Coyuca de Benítez. De acuerdo con la carta climática de la CONUEE, Acapulco pertenece a un clima cálido húmedo, por otra parte, según la carta Köppen-Geiger se caracteriza por tener un clima tropical tipo sabana Aw, con veranos lluviosos y temperatura promedio anual de 26.4°C y precipitaciones anuales de 1175mm. La ciudad de Villahermosa se encuentra ubicado entre 17° 59' de latitud norte y entre 92° 55' de longitud oeste. Al norte colinda con las ciudades de Nacajuca y Centla, al Sur con Nacajuca, Centla y el Estado de Chiapas, al este con la ciudad de Centla, Jalapa y Macuspana con Coyuca de Benítez y a oeste con el Estado de Chiapas y con los municipios de Cunduacán y Nacajuca. Villahermosa pertenece a un clima cálido húmedo, por otra parte, según la carta Köppen-Geiger se caracteriza por tener un clima tropical tipo monzónico Am, con distintos meses lluviosos y temperatura promedio anual de 26.8°C y precipitaciones anuales de 1958mm.

La Tabla 2.15 muestra el comportamiento de las condiciones climáticas para cada ciudad fue evaluado en un periodo un año y dividido por meses.

Tabla 2.15 Condiciones climáticas de Acapulco y Villahermosa

Mes	T. Ambiente (°C)		HR (%)		Rad. Solar (W/m ²)		Vel. Viento (m/s)	
	ACA	VH	ACA	VH	ACA	VH	ACA	VH
Enero	25.7	23.8	71.1	79.3	189.13	157.35	2.5	3.1
Febrero	23.1	22.5	63.4	69.9	218.66	164.96	2.3	2.9
Marzo	25.4	27.2	70.0	70.4	262.48	232.45	2.8	3.3
Abril	25.4	27.7	69.1	67.3	271.53	252.63	2.7	3.2
Mayo	27.9	29.9	70.9	69.1	253.73	252.78	2.8	3.2
Junio	26.9	28.2	72.8	72.3	235.93	238.51	2.8	2.8
Julio	28.5	29.8	72.9	71.9	261.22	260.39	2.8	3.6
Agosto	28.3	29.3	75.6	74.3	244.06	233.34	2.8	3.1
Septiembre	26.3	27.3	75.9	77.3	220.56	212.76	2.6	2.4
Octubre	27.7	27.5	76.8	79.5	218.74	184.60	2.5	2.7
Noviembre	25.8	24.4	72.6	78.6	203.90	167.30	2.2	2.6
Diciembre	26.0	24.3	71.9	80.5	186.65	141.91	2.3	2.9
Prom. Anual	26.4	26.8	71.9	74.2	230.55	208.25	2.6	3.0

El comportamiento de las variables meteorológicas ilustradas en la Tabla 2.15 fue graficado como se muestra en la Figura 2.17. Las ciudades de Acapulco y Villahermosa muestran similitudes a lo largo del año en la temperatura ambiente, humedad relativa y radiación

solar, sin embargo, en la velocidad del viento la tendencia muestra diferencias, esto se puede ser debido a que, ambas ciudades de acuerdo Köppen-Geiger, aunque son tropicales varían de sabana a monzónico.

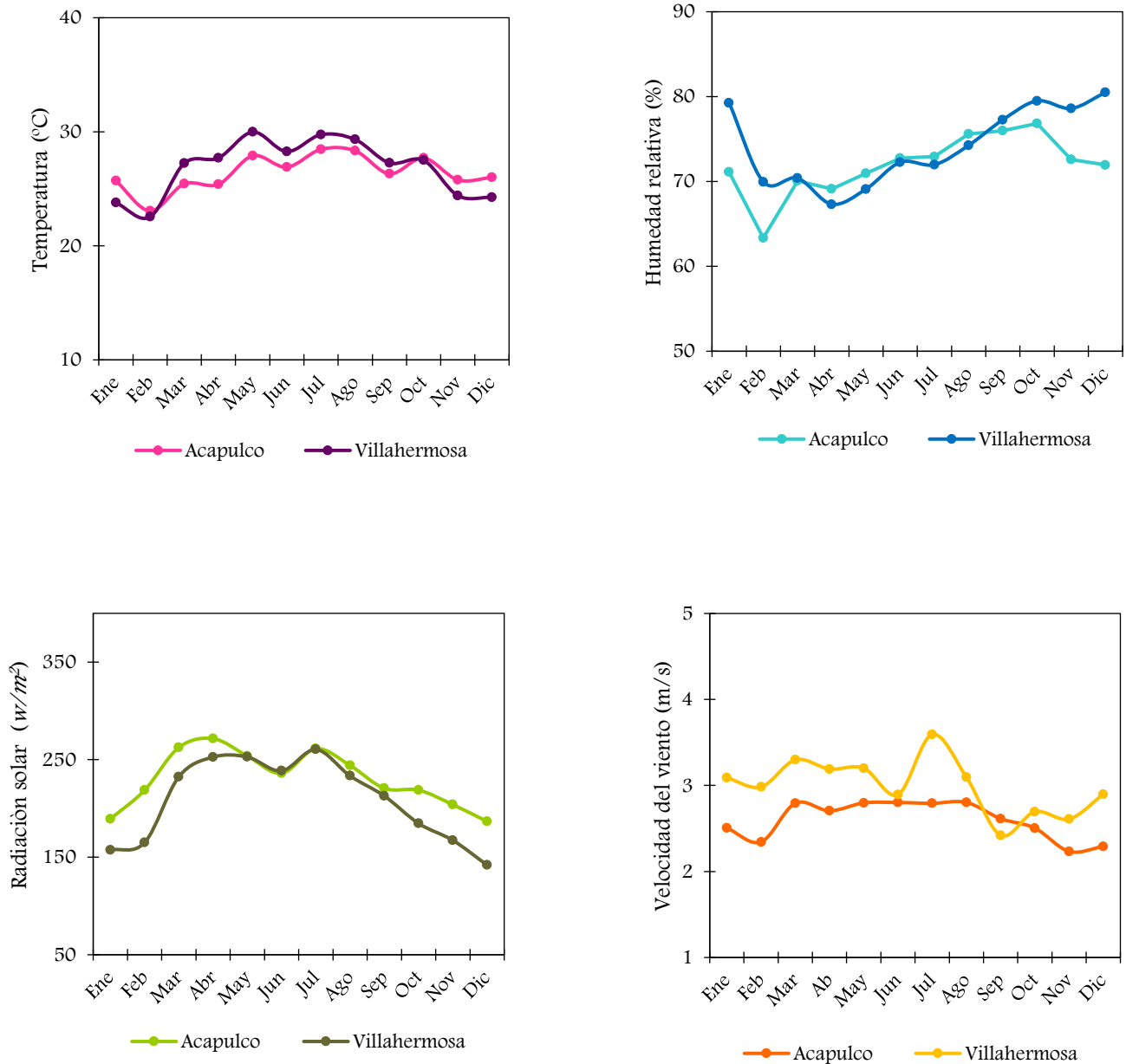


Figura 2.17 Comportamiento de las condiciones climáticas de Acapulco y Villahermosa

Ciudades con clima cálido semihúmedo

La ciudad de Cancún se encuentra ubicada en 21° 9' de latitud norte y 86° 50' de longitud oeste. Al norte se ubica las Islas Mujeres, al sur con el municipio de Solaridad, al este con el Mar Caribe y al oeste con Lázaro Cárdenas. De acuerdo con la carta climática de la CONUEE, Cancún pertenece a un clima cálido semihúmedo, por otra parte, según la carta Köppen-Geiger se caracteriza por tener un clima tropical tipo sabana Aw, con veranos lluviosos y temperatura promedio anual de 25.2°C y precipitaciones anuales de 1071mm. La ciudad de Mérida se encuentra ubicada en 20° 50' de latitud norte y 89° 00' de longitud oeste. Al norte colinda con las ciudades de Progreso, Chicxulub Pueblo y Conkal, al sur con Timucuy, Abalá y Umán, al este con las ciudades Conkal, Yaxkukul, Tixkokob, Tixpéhuatl, Kanasín y Timucuy y al oeste con Umán, Ucú y Progreso. Mérida pertenece a un clima cálido semihúmedo, por otra parte, según la carta Köppen-Geiger se caracteriza por tener un clima tropical tipo sabana Aw, con veranos lluviosos, temperatura promedio anual de 26.2°C y precipitaciones anuales de 959mm.

La Tabla 2.16 muestra el comportamiento de las condiciones climáticas para cada ciudad fue evaluado en un periodo un año y dividido por meses.

Tabla 2.16 Condiciones climáticas de Cancún y Mérida

Mes	T. Ambiente (°C)		HR (%)		Radiación (W/m ²)		Vel. Viento (m/s)	
	CAN	MER	CAN	MER	CAN	MER	CAN	MER
Enero	21.7	23.3	82.9	73.3	172.47	172.74	2.5	3.3
Febrero	20.7	22.3	73.5	64.0	185.55	178.35	2.3	3.3
Marzo	24.8	26.5	75.0	65.1	245.00	239.89	3.1	4.3
Abril	25.1	26.9	70.4	60.8	264.51	264.13	3.1	4.3
Mayo	28.2	29.5	71.9	64.5	271.23	257.08	3.2	4.3
Junio	27.4	27.3	75.0	75.1	245.87	235.88	2.6	3.5
Julio	28.9	28.5	75.7	77.7	279.16	261.12	2.1	3.1
Agosto	28.5	28.3	78.6	80.3	259.56	245.85	1.8	2.6
Septiembre	26.0	26.8	82.9	81.6	221.57	212.77	1.5	2.3
Octubre	26.2	27.2	84.3	80.6	191.23	192.90	2.1	2.7
Noviembre	22.7	23.6	81.2	77.9	167.30	168.51	1.9	2.6
Diciembre	22.6	23.7	84.8	77.9	156.25	151.98	2.2	2.8
Prom. Anual	25.2	26.2	78.0	73.2	221.64	215.10	2.3	3.2

El comportamiento de las variables meteorológicas ilustradas en la Tabla 2.16 fue graficado como se muestra en la Figura 2.18. Las ciudades de Cancún y Mérida muestran similitudes a lo largo del año en la temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento presentando las mismas tendencias en ambas ciudades. Esto se puede

interpretar, debido a que, y de acuerdo Köppen-Geiger, ambas ciudades son tropicales tipo sabana.

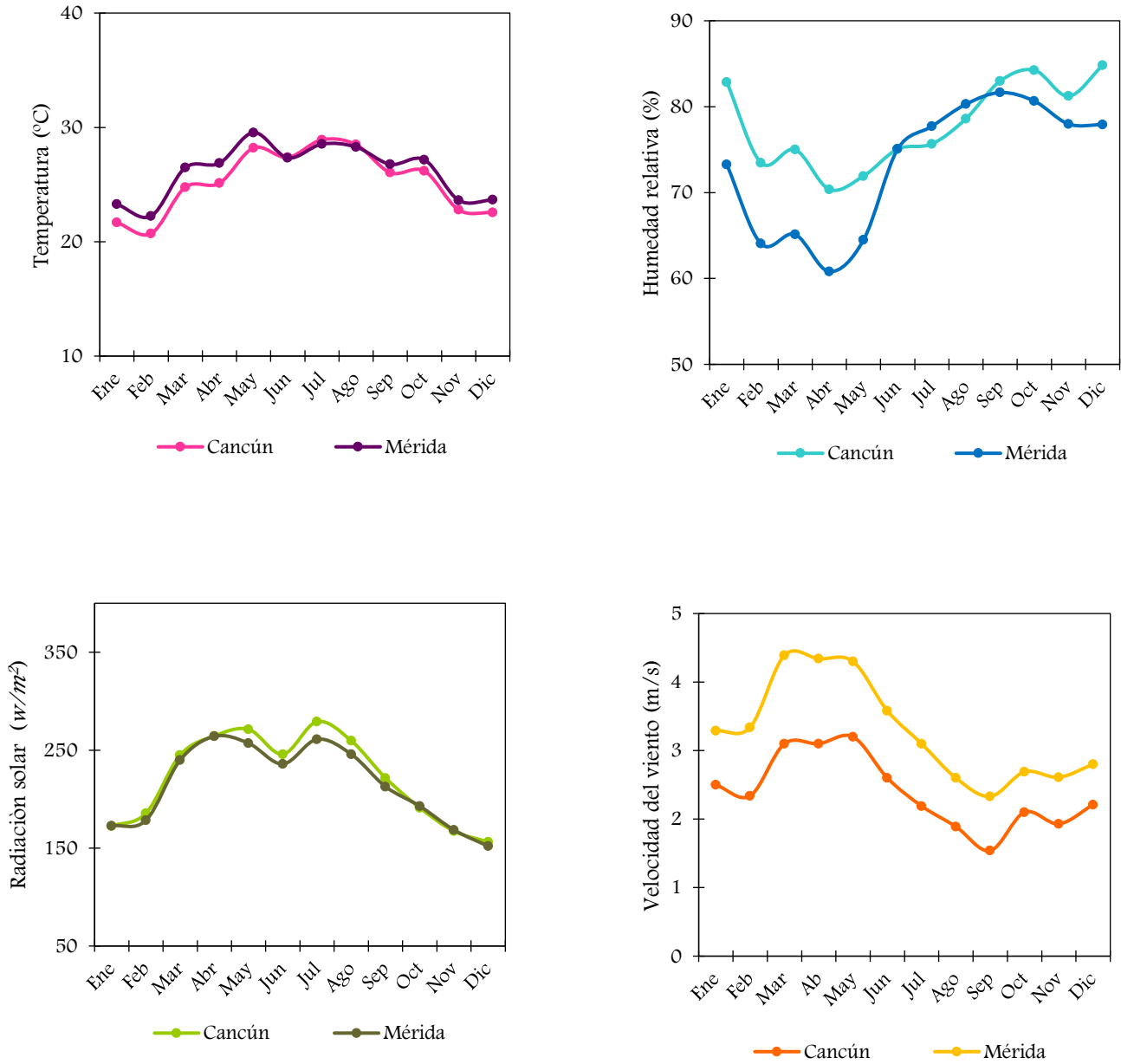


Figura 2.18 Comportamiento de las condiciones climáticas de Cancún y Mérida

Ciudades con clima cálido seco

Ciudad Juárez se encuentra ubicado en 31° 44' de latitud norte y 29° 13' de longitud oeste. Al norte colinda con Estados Unidos, al sur con el municipio de Ahumada, al este con el municipio de Guadalupe. De acuerdo, con la carta climática de la CONUEE, pertenece a un clima cálido seco, por otra parte, según la carta Köppen-Geiger se caracteriza por tener un clima tropical tipo sabana BWk, clasificado como desértico, con temperatura promedio anual de 18.4°C y precipitaciones anuales de 219mm. La ciudad de Tijuana se encuentra ubicado en 32° 31' de latitud norte y 117° 01' de longitud oeste. Al norte colinda con el condado de San Diego, al sur con las ciudades de Playa de Rosarito y Ensenada, al este con la ciudad de Tecate y al oeste con el Océano Pacífico. Tijuana cuenta con un clima cálido seco, por otra parte, según la carta Köppen-Geiger se caracteriza por tener un clima seco tipo árido BSk, con escasos meses lluviosos, temperatura promedio anual de 16.8°C y precipitaciones anuales de 214mm.

La Tabla 2.17 muestra el comportamiento de las condiciones climáticas para cada ciudad fue evaluado en un periodo un año y dividido por meses.

Tabla 2.17 Condiciones climáticas de Ciudad Juárez y Tijuana

Mes	T. Ambiente (°C)		HR (%)		Radiación (W/m ²)		Vel. Viento (m/s)	
	CDJ	TIJ	CDJ	TIJ	CDJ	TIJ	CDJ	TIJ
Enero	7.8	13.6	43.1	66.31	143.21	135.91	3.5	1.9
Febrero	9.3	12.2	33.0	63.05	162.84	139.96	3.6	2.2
Marzo	14.5	14.2	28.0	72.19	241.18	208.99	4.5	2.2
Abril	18.7	14.8	21.8	69.23	284.97	234.11	4.7	2.4
Mayo	25.1	17.4	21.6	73.70	319.33	270.98	4.6	2.6
Junio	27.6	18.1	25.1	73.86	324.19	273.87	3.9	2.6
Julio	28.9	21.3	38.5	75.01	291.62	284.94	3.5	2.8
Agosto	27.6	21.7	43.4	75.26	272.22	267.98	3.3	2.7
Septiembre	23.5	20.1	41.8	73.31	247.81	224.45	3.2	2.3
Octubre	19.0	18.6	42.3	68.77	196.51	167.91	3.4	2.2
Noviembre	11.4	15.5	40.6	64.17	155.61	137.39	3.2	1.9
Diciembre	6.7	13.2	45.2	67.03	135.51	120.97	3.3	2.1
Prom. Anual	18.4	16.8	35.4	70.2	231.25	205.62	3.7	2.3

El comportamiento de las variables meteorológicas ilustradas en la Tabla 2.17 fue graficado como se muestra en la Figura 2.19. Ciudad Juárez y Tijuana muestran diferencias a lo largo del año en la temperatura ambiente, humedad relativa, y velocidad del viento presentando distintas tendencias en ambas ciudades. Por otra parte, la radiación solar se muestra con una tendencia similar a lo largo del año. La diferencia del comportamiento de las variables

meteorológicas se debe a que ambas ciudades, aunque pertenecen a un clima seco, su subtipo indica que Ciudad Juárez es desértico y Tijuana es árido.

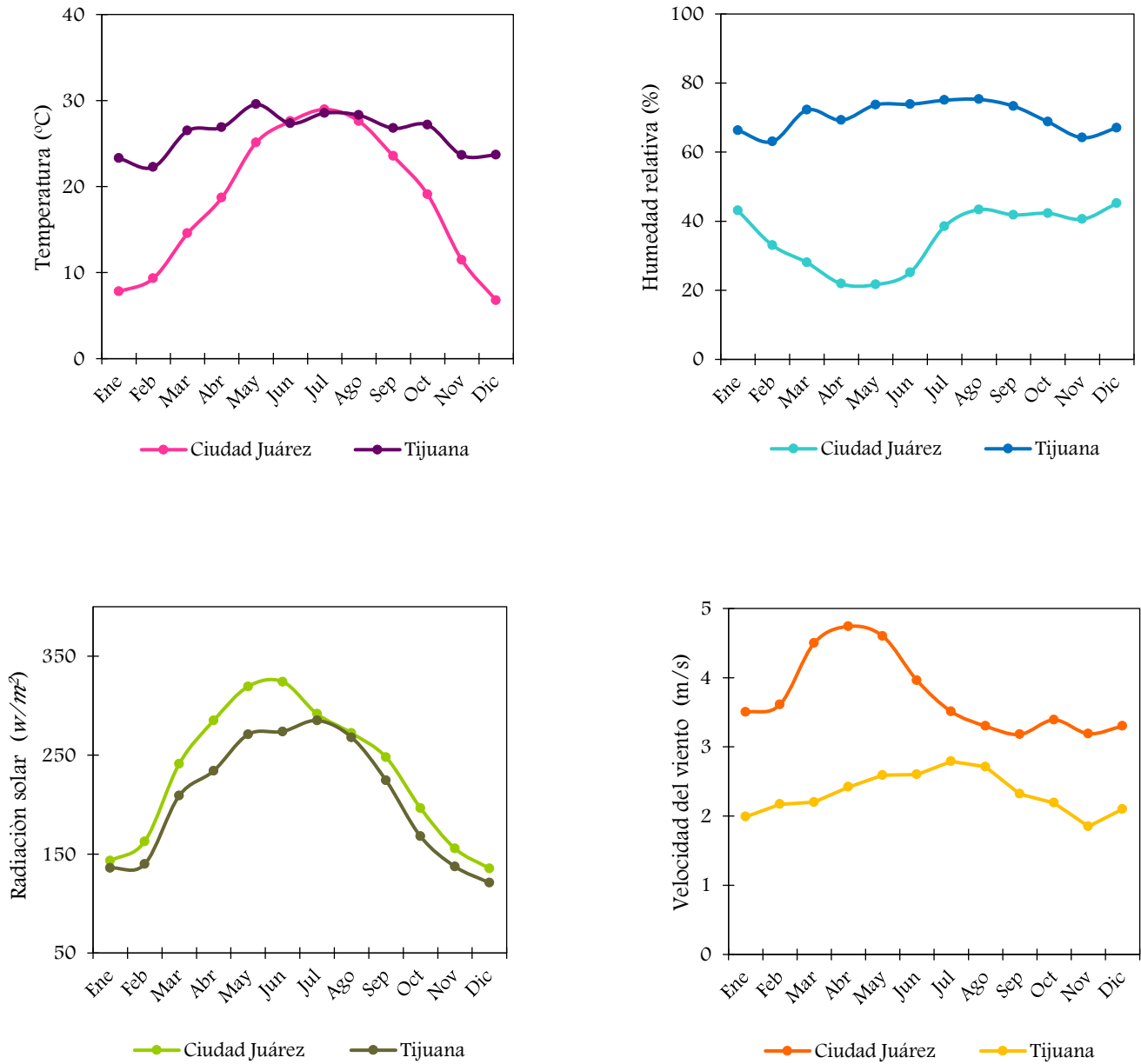


Figura 2.19 Comportamiento de las condiciones climáticas de Ciudad Juárez y Tijuana

Ciudades con clima cálido seco extremo

La ciudad de Hermosillo se encuentra ubicada en 29° 05' de latitud norte y en 110° 57' de longitud oeste. Al norte colinda con las ciudades de Carbó y San Miguel de Horcasitas, al sur con el municipio de Ahumada, al este con las ciudades de la Colorada y Guaymas y al oeste con el Golfo de California. De acuerdo, con la carta climática de la CONUEE, pertenece a un clima cálido seco extremo, por otra parte, según la carta Köppen-Geiger se caracteriza por tener un clima tropical tipo sabana BWh, clasificado como desértico, con temperatura promedio anual de 23.7°C y precipitaciones anuales de 280mm. La ciudad de Mexicali se encuentra ubicada en 32° 39' de latitud norte y 115° 28' de longitud oeste. Al norte colinda con Estados Unidos, al sur con el Golfo de California y la ciudad de Ensenada, al este con el estado de Sonora y el Golfo de California y al oeste con la ciudad de Ensenada y Estados Unidos. Mexicali cuenta con un clima cálido seco, por otra parte, según la carta Köppen-Geiger se caracteriza por tener un clima seco tipo desértico BSk, con casi nula la caída de lluvia, temperatura promedio anual de 22.8°C y precipitaciones anuales de 79mm.

La Tabla 2.18 muestra el comportamiento de las condiciones climáticas para cada ciudad fue evaluado en un periodo un año y dividido por meses.

Tabla 2.18 Condiciones climáticas de Hermosillo y Mexicali

Mes	T. Ambiente (°C)		HR (%)		Radiación (W/m ²)		Vel. Viento (m/s)	
	HER	MEXI	HER	MEXI	HER	MEXI	HER	MEXI
Enero	15.9	13.2	46.4	44.6	161.02	138.33	1.3	2.6
Febrero	15.4	13.4	38.3	38.4	177.90	155.41	1.4	2.7
Marzo	20.2	18.9	33.9	35.7	255.17	237.07	1.9	3.5
Abril	22.7	20.7	29.3	32.6	285.98	280.65	2.1	4.0
Mayo	28.1	27.0	27.5	29.3	322.55	321.63	2.5	3.8
Junio	30.1	29.8	32.7	26.5	313.20	315.31	2.6	3.7
Julio	32.2	34.4	47.7	32.7	292.84	302.50	2.6	3.7
Agosto	31.3	33.8	53.6	36.3	278.36	264.16	1.9	3.3
Septiembre	28.7	29.4	51.9	31.5	240.63	232.61	1.8	2.9
Octubre	25.4	23.9	45.9	34.8	216.72	194.54	1.5	3.0
Noviembre	19.2	16.7	43.3	37.7	162.11	144.76	1.4	2.5
Diciembre	15.3	12.4	47.4	44.0	151.74	124.99	1.2	2.4
Prom. Anual	23.7	22.8	41.5	35.3	238.18	226.00	1.8	3.2

El comportamiento de las variables meteorológicas ilustradas en la Tabla 2.18 fue graficado como se muestra en la Figura 2.20. las ciudades de Hermosillo y Mexicali muestran similitud a lo largo del año en la temperatura ambiente, humedad relativa, y velocidad del

viento. Esto se debe a que ambas ciudades, y de acuerdo a la carta Köppen-Geiger, presentan un clima seco tipo desértico.

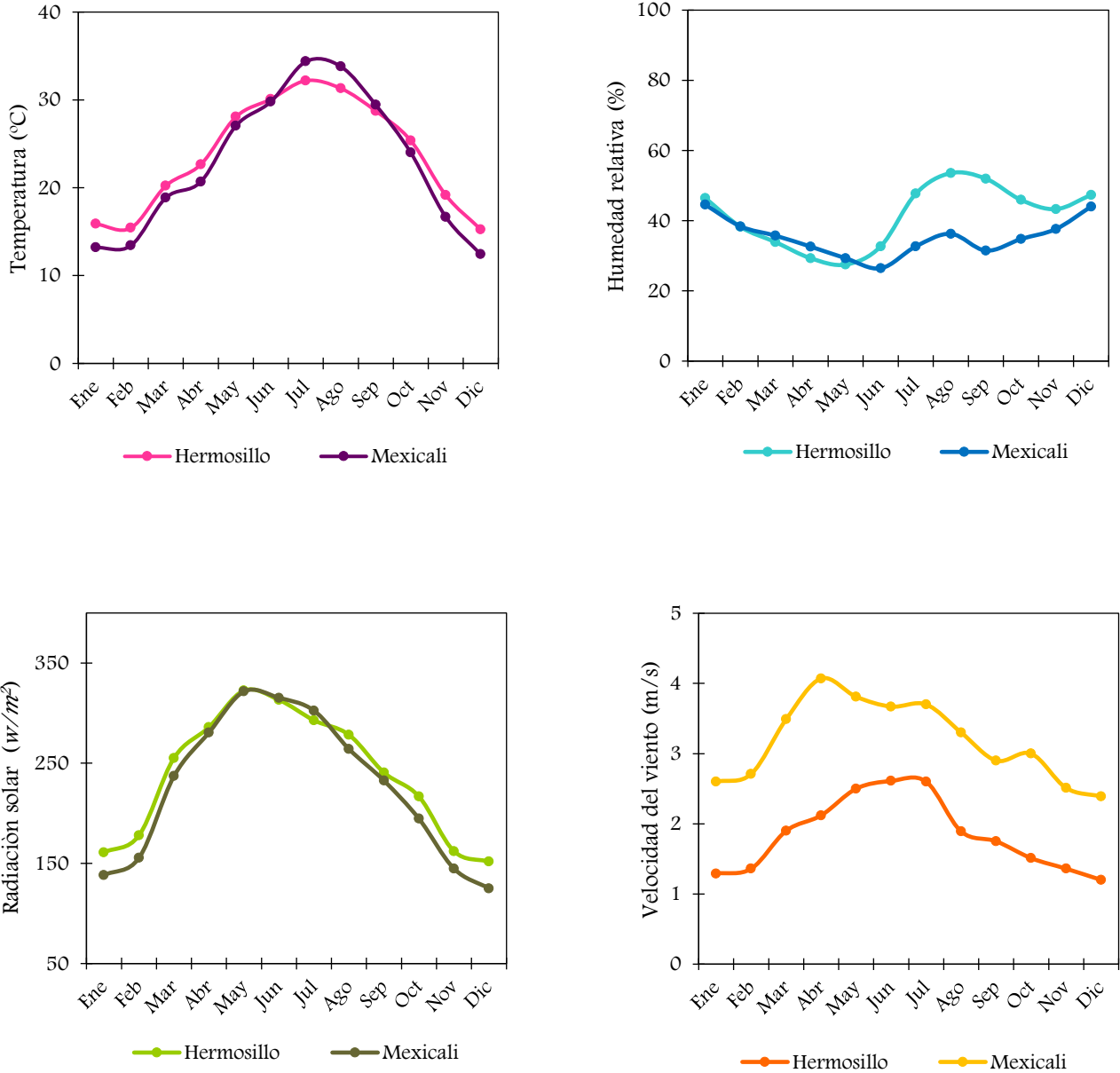


Figura 2.20 Comportamiento de las condiciones climáticas de Hermosillo y Mexicali

2.3 Edificación de estudio

En el siguiente apartado se muestra la información para la selección del tipo de edificación que servirá para el estudio de este proyecto. La edificación residencial seleccionada fue la edificación utilizada para la construcción de la NOM-020-ENER-2011. Por otra, se describen los materiales de construcción de la envolvente.

2.3.1 Selección de la edificación de estudio

La vivienda en México se clasifica, de acuerdo al el promedio de superficie construida y el valor que ésta tiene. Las viviendas de interés social se dividen en económicas, populares y tradicionales. Por otra parte, se encuentran las de tipo media, residencial y residencial plus, como se muestra en la Tabla 2.19.

Tabla 2.19 Clasificación por superficie construida y valor de la vivienda

Vivienda	Promedio de Construcción (m²)	Valor de la vivienda (Pesos Mexicanos)
Económica	Hasta 30	Hasta 205 977
Popular	De 31 a 45	De 205 978 - 349 114
Tradicional	De 45 a 55	De 349 115 - 610 949
Media	De 56 a 100	De 610 950 - 1 309 176
Residencial	De 101 a 200	De 1 309 176 - 2 618 352
Plus	Mas de 200	De 2 618 352 en adelante

Las viviendas que mayor demanda son las de interés social. El crecimiento de construcciones de viviendas de interés social está en aumento, debido a las facilidades de crédito que empresas constructoras proveen (Barona y Sánchez, 2005).

2.3.2 Edificación de estudio (vivienda de interés social)

Existen dos tipos de edificaciones: las residenciales y las no residenciales. En particular, las edificaciones residenciales presentan el más alto consumo de energía eléctrica (16.0%) en comparación con las edificaciones no residenciales (3.0%) (Griego *et al.*, 2015). Por lo tanto, para este estudio se considera una edificación residencial. La Secretaria de Energía (SENER) en colaboración con otras instituciones, en 2011 en el Diario Oficial de la

Federación (DOF), publicaron la norma oficial mexicana NOM-020-ENER-2011. El objetivo de esta norma es limitar las ganancias de calor a través de la envolvente, con objeto de racionalizar el uso de la energía en los sistemas de enfriamiento en edificaciones residenciales.

En 1993 Heard, elaboró el diseño de un prototipo de edificación residencial correspondiente a una vivienda de interés social, el cual serviría como base para la elaboración de la norma NOM-020-ENER-2011. Para 2014, Álvarez *et al* basándose en el estudio de Heard, reportaron el modelo geométrico del conjunto de viviendas de interés social como se muestra en la Figura 2.21.

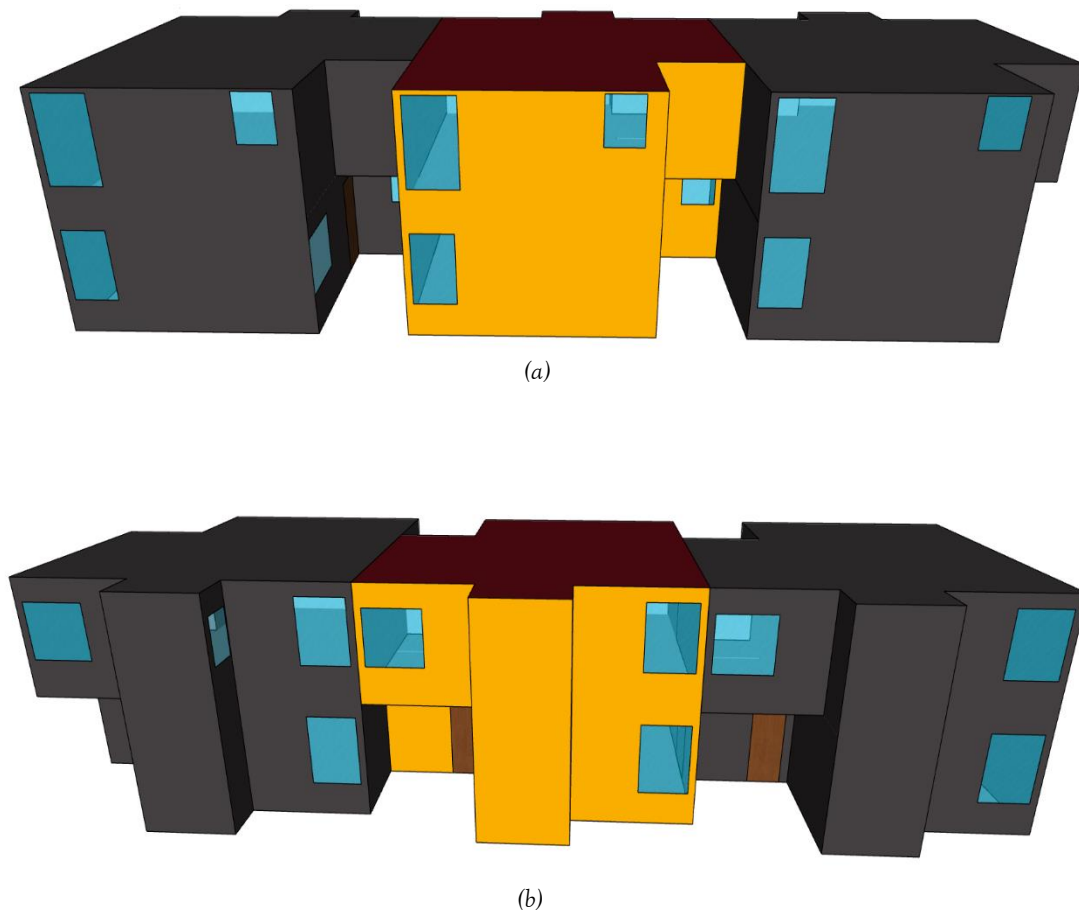


Figura 2.21 Conjunto de viviendas (a) fachada norte, (b) fachada sur

Los materiales de construcción juegan un papel determinante en el desempeño térmico de las edificaciones. La Tabla 2.20 muestra las especificaciones de los materiales de construcción de la edificación de estudio. Los muros están compuestos por tabiques, el cual se encuentra recubierto al exterior con una capa de mortero y al interior con una capa yeso. El techo y piso están contruidos por una base de concreto. El techo al exterior cuenta con una capa de impermeabilizante y al interior una capa de yeso, mientras que, el piso se encuentra recubierto con loseta. Por otra parte, el piso de la planta alta, está construido con una base de concreto; recubierto con yeso en la parte que hace contacto con la planta baja y loseta en la parte que hace contacto con su nivel.

Tabla 2.20 Especificaciones de los materiales utilizados para la construcción de la edificación de estudio

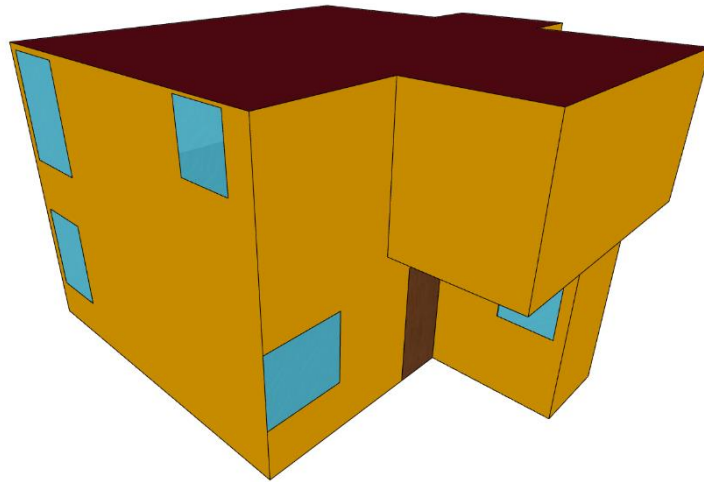
Elementos de la envolvente	Materiales utilizados	Espesor (m)	Factor U (W/m ² K)
Muros	Mortero/Tabique/ Yeso	0.170	2.481
Techo	Impermeabilizante/Concreto/Yeso	0.135	2.595
Piso	Concreto/Loseta	0.110	4.232
Piso planta alta	Yeso/Concreto/Loseta	0.125	3.616

La Tabla 2.21 muestra las propiedades termofísicas de cada uno de los materiales utilizados para la envolvente de la edificación.

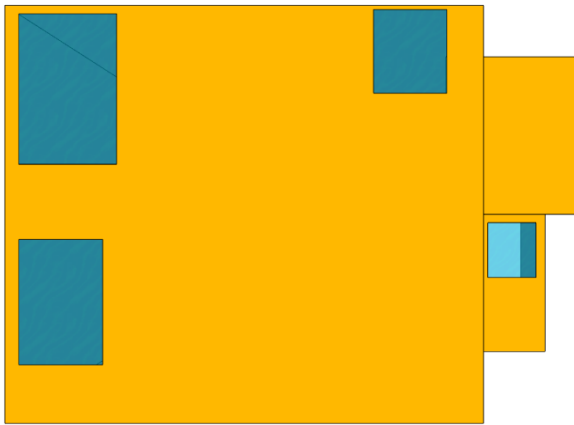
Tabla 2.21 Propiedades termofísicas de los materiales

Elementos de la envolvente	Conductividad (W/m K)	Densidad (Kg/m ³)	Calor específico (J/kg K)	Espesor (m)
Yeso	0.375	800	1000	0.015
Tabique	0.814	1600	800	0.140
Mortero	0.721	1890	837	0.015
Colado	1.740	2300	840	0.100
Impermeabilizante	0.170	1127	800	0.020
Loseta	1.136	2600	795	0.010

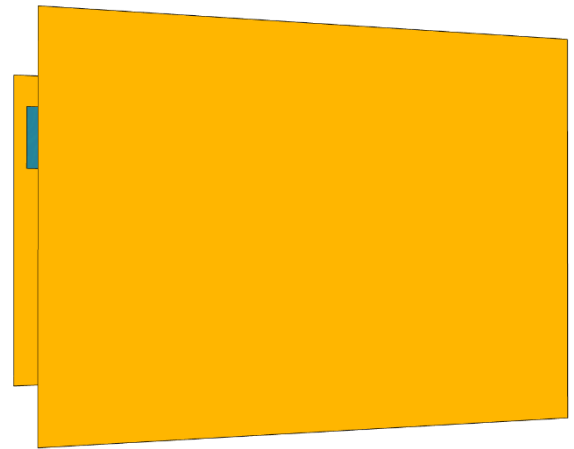
Para el desarrollo de este proyecto no se consideraron las viviendas en conjunto, como se aprecia en la Figura 2.21, sino que, únicamente se tomó en cuenta una edificación. La fachada principal de la edificación es hacia el norte. La edificación tiene un área total de la envolvente de 88.0 m² y una altura de 2.5 m por cada piso lo que la hace una vivienda de interés social de nivel medio. Figura 2.22 muestra la edificación de estudio y sus orientaciones.



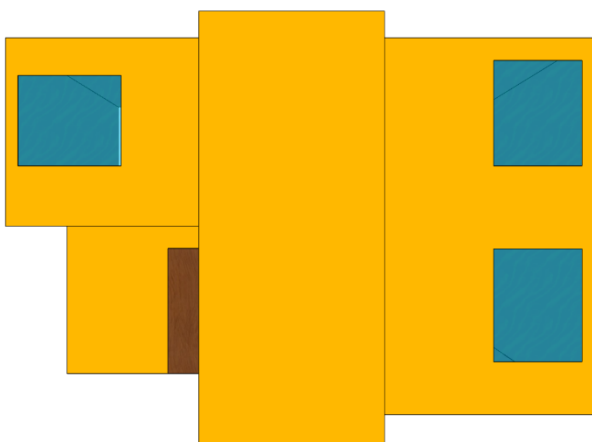
Vista isométrica



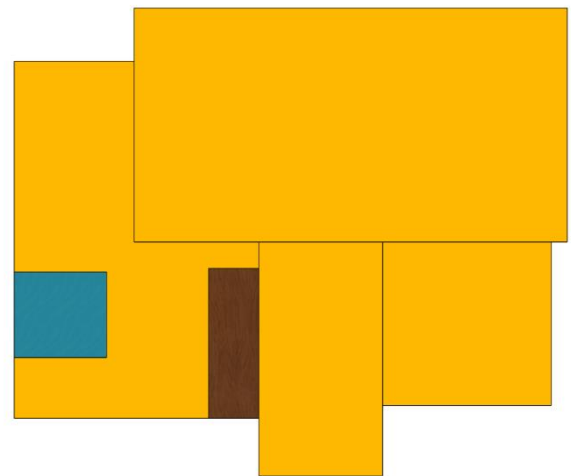
Norte: Vista frontal



Este: Vista izquierda



Sur: Vista trasera



Oeste: Vista derecha

Figura 2.22 Orientaciones de la edificación de estudio

Las ventanas son de vidrio simple y las puertas principal y trasera son de madera. La edificación en total cuenta con nueve ventanas distribuidas en distintas orientaciones. La fachada norte cuenta con cuatro ventanas, la fachada sur con tres ventanas y la puerta que permite el acceso a la parte trasera de la vivienda. La fachada oeste cuenta con una ventana y una puerta la cual permite el acceso a la vivienda. La fachada este cuenta con una sola ventana. La Tabla 2.22 describe la distribución de las aberturas y sus dimensiones.

Tabla 2.22 Descripción de las aberturas de la fachada

Fachada	Descripción	Dimensiones (m)	Área (m ²)	Factor U (W/m ² K)
Norte	Ventana 1	1.80 x 1.03	1.85	5.80
	Ventana 2	1.00 x 0.90	0.90	5.80
	Ventana 3	1.50 x 1.03	1.54	5.80
	Ventana 4	1.00 x 0.92	0.92	5.80
Sur	Puerta trasera	2.10 x 0.85	1.78	2.30
	Ventana 5	1.40 x 1.20	1.68	5.80
	Ventana 6	1.40 x 1.20	1.68	5.80
	Ventana 7	1.50 x 1.20	1.80	5.80
Oste	Puerta principal	2.10 x 0.85	1.78	2.30
	Ventana 8	1.35 x 1.20	1.62	5.80
Este	Ventana 9	1.00 x 0.75	0.75	5.80

2.3.3 Zonas térmicas

Las zonas térmicas se escogieron de acuerdo al tiempo de estancia de los ocupantes, esto debido para conocer el tiempo de uso del aire acondicionado La vivienda está conformada por cuatro miembros, los cuales tienen un horario de permanencia presentado de acuerdo a la norma NOM-020-ENER-2011.

La norma establece un horario de lunes a viernes de 1-9h a 15-24h, y sábado a domingo las 24h donde se encuentra activado el uso de aire acondicionado. La edificación se dividió en cinco zonas térmicas, de las cuales se estudiaron cuatro por separado. La Tabla 2.23 muestra el horario de permanencia de cada una de las zonas.

Tabla 2.23 Horario de permanencia de los ocupantes

	Lunes a viernes	Sábado a domingo
Planta baja	15-20h	9-20h
Recamara 1	1-9h a 20 a 24h	1-9h a 20-24h
Recamara 2	1-9h a 20 a 24h	1-9h a 20-24h
Recamara 3	1-9h a 20 a 24h	1-9h a 20-24h

La edificación consta de dos plantas. La planta baja esta dividida por la sala, el comedor, la cocina y la escalera. La planta alta se encuentra dividida por las recamaras, el baño y la escalera. En la planta alta, se estudiaron tres zonas térmicas (Recamara 1, Recamara 2, Recamara 3), y en la planta baja se estudió como una sola zona térmica, debido a que tiene espacios abiertos lo que hace que la temperatura se considere como uniforme. El baño y la escalera fueron omitidos. La Figura 2.23 muestra la división de las zonas térmicas.

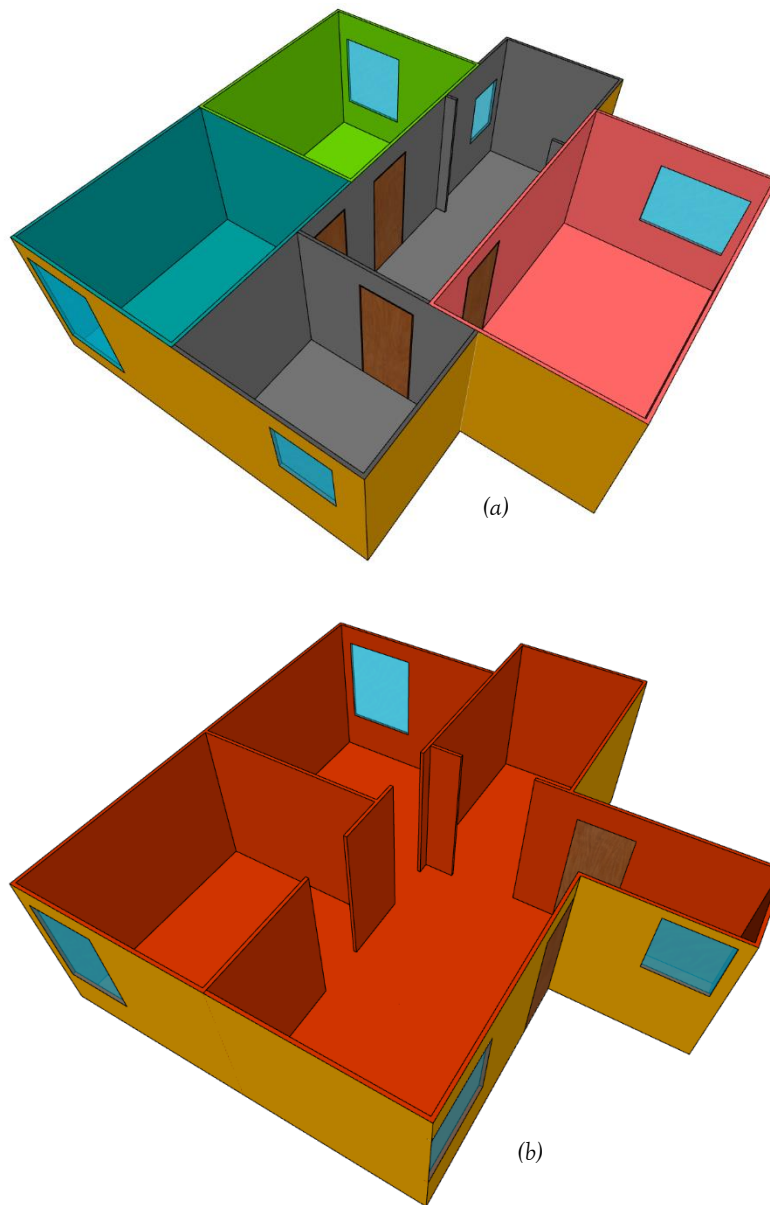


Figura 2.23 Zonas térmicas (a) planta alta (b) planta baja

La Tabla 2.24 muestra la descripción de cada una de las zonas térmicas de la edificación.

Tabla 2.24 Descripción de las zonas térmicas

	Descripción	Zona
<i>Planta alta</i>		
Gris	Pasillo/baño/escalera	ZT_0
Azul	Recamara 1	ZT_1
Verde	Recamara 2	ZT_2
Rosa	Recamara 3	ZT_3
<i>Planta baja</i>		
Naranja	Planta baja	ZT_4

En la Figura 2.24 y 2.25 se muestra los planos de la edificación el cual proporciona las distribuciones de las zonas térmicas en las plantas alta y baja.

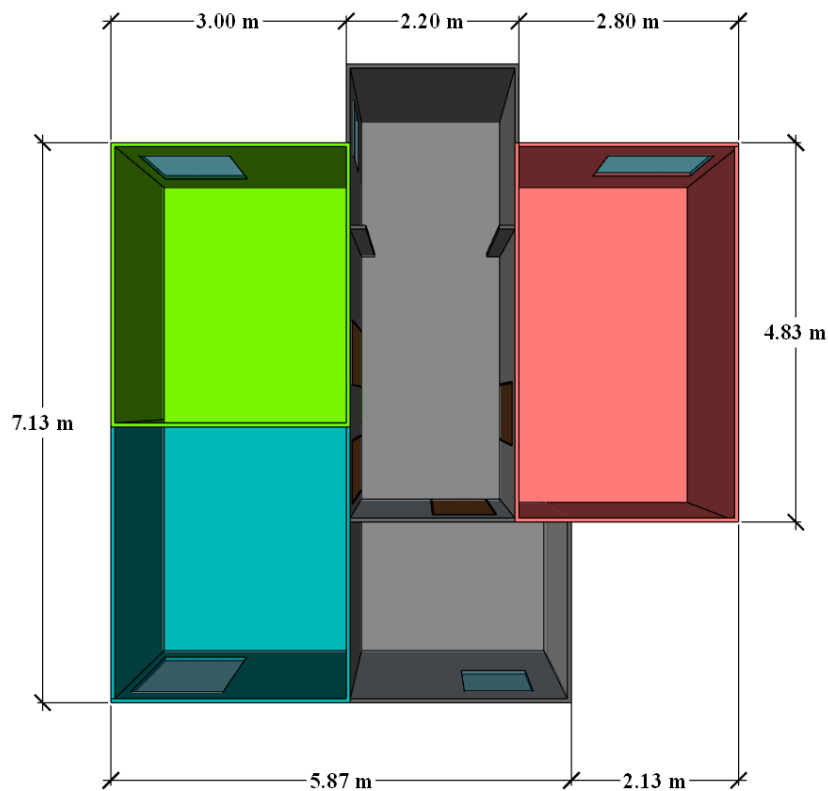


Figura 2.24 Dimensiones de las zonas térmicas de la planta alta

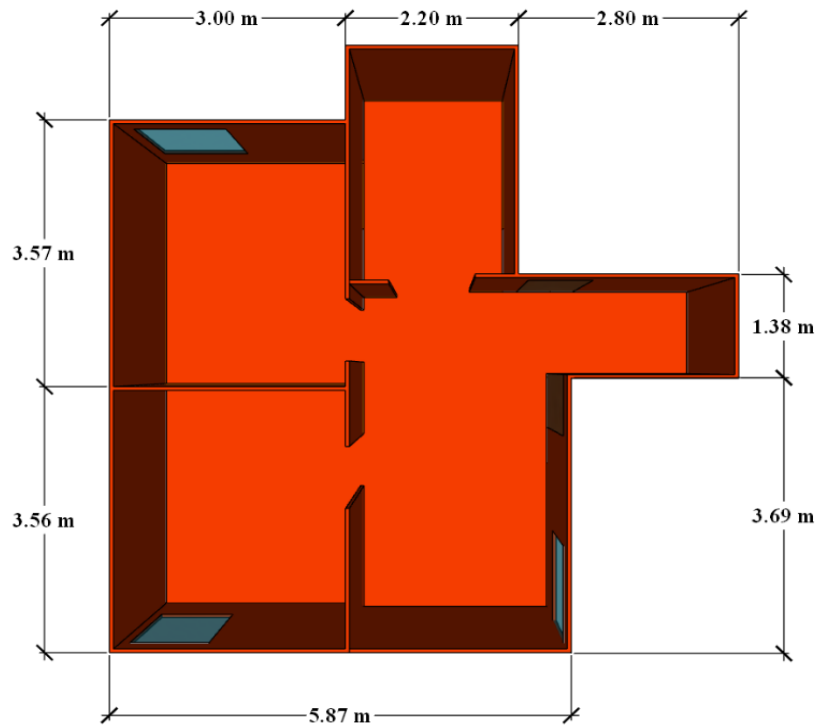


Figura 2.25 Dimensiones de las zonas térmicas de la planta baja

2.3.4 Ganancias internas

Las ganancias por aparatos electrodomésticos, equipos de cómputo e iluminación se determinaron de acuerdo a las especificaciones mostradas en la Tabla 2.25 obtenida de CFE (2019). La cual cuenta con los siguientes equipos básicos encontrados en una vivienda.

Tabla 2.25 Ganancias dentro de la vivienda

Equipos	Potencia (Watts)
Microondas	1200
Plancha	1000
Lavadora	500
Refrigerador	475
TV 22in	150
Licuadora	60
Luces	60

Las ganancias internas por personas fueron consideradas de acuerdo a la norma ISO 7730. El factor de ropa se consideró de 0.5 para ropa ligera de verano, la tasa metabólica de 1.2 met realizando trabajo ligero en casa. La infiltración fue de 2ACH.

CAPÍTULO III

Modelos de confort térmico y plataforma de simulación

En este Capítulo se presentan los modelos de confort térmico estáticos y adaptativos que se utilizarán para el estudio. También se describe la plataforma de simulación y las verificaciones realizadas.

3.1 Modelos de confort térmico

Los modelos de confort térmico en espacios interiores han dado lugar a la obtención de múltiples estándares y normas internacionales de referencia que delimitan los rangos aceptables según las características particulares de los estudios (Arballo *et al.*, 2016). Los modelos más encontrados en la literatura son los proporcionados por el estándar americano ASHRAE 55, el estándar europeo EN 15221, y la guía del Reino Unido CIBSE. Sin embargo, se han realizado modelos de confort locales, los cuales se encuentran de acuerdo al clima que pertenece la ciudad a estudiar. Existen dos tipos de enfoques en los cuales se basan los modelos de confort, el enfoque estático o de balance de calor y el enfoque adaptativo.

La obtención de los modelos de confort se realiza mediante recolección de datos de los ocupantes de un edificio estudiado, el cual se puede encontrar en libre funcionamiento o enfriado mecánicamente. deDear y Brager en 1990 realizaron los primeros estudios sobre el comportamiento de las personas cuando se encontraban en edificios en funcionamiento libre o enfriados mecánicamente. En sus resultados observaron que la relación para los edificios de libre funcionamiento fue muy lineal, mientras que la relación cuando se enfriaba mecánicamente era más compleja, puesto que las expectativas de las personas diferían unas de otras. La Figura 3.1 muestra el comportamiento de las temperaturas de confort en edificios en funcionamiento libre y en edificios enfriados mecánicamente, utilizando la base de datos ASHRAE de 1990 y las encuestas de Humphreys de 1970.

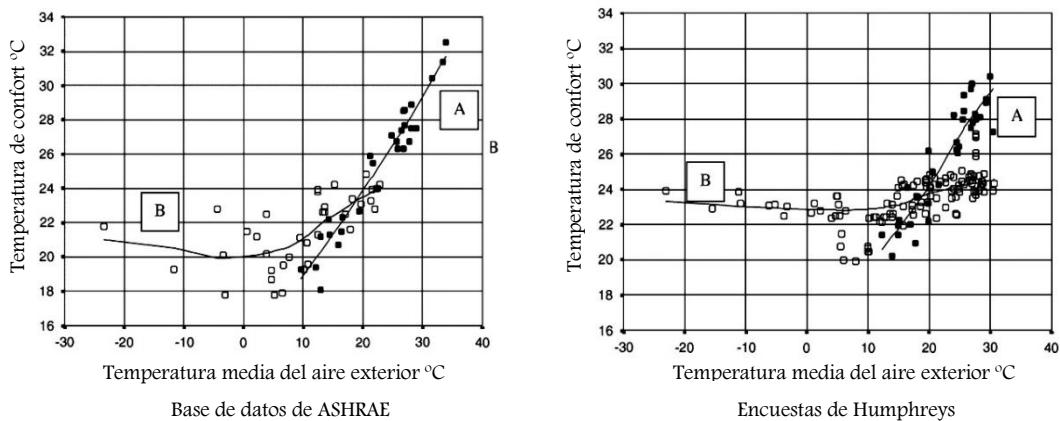


Figura 3.1 Temperatura de confort en función de la temperatura exterior en edificios en funcionamiento libre (a) y edificios acondicionado (b) (Fuente: Base de datos ASHRAE y Humphreys)

La Ec. (3.1) muestra la relación lineal entre la temperatura de confort y la temperatura exterior.

$$T_{co} = a \cdot T_{out} + b \quad (3.1)$$

donde,

T_{co} = Temperatura de confort (°C)

a, b = Constantes

T_{out} = Temperatura exterior (°C)

3.2 Modelo de confort térmico estático

En el siguiente apartado se describe el modelo de confort térmico basado en el enfoque estático. El modelo seleccionado fue el de la normal ASHRAE 55.

3.2.1 Modelo de confort térmico ASHRAE 55

El estándar ANSI/ASHRAE 55-2010 combina el estándar 55 en 2004 y diez adendas aprobadas y publicadas en 2004. Este estándar describe las condiciones en las que una fracción específica de los ocupantes encontrará el ambiente térmicamente aceptable. Por otra parte, especifica las combinaciones de parámetros ambientales térmicos interiores (temperatura, radiación térmica, humedad y velocidad del aire) y parámetros personales (aislamiento de la ropa y tasa de metabolismo) que en conjunto producen bienestar en la mayoría de los ocupantes (ASHRAE, 2010). En 1990, deDear y Brager recopilaron información de distintos estudios de campo de diferentes países: Tailandia, indonesia, Singapur, Pakistán, Grecia, Reino Unido, Estados Unidos, Canadá y Australia, del cual obtuvieron respuestas térmicas de los ocupantes en espacios de libre funcionamiento. El estudio mostró que las respuestas dependían en gran medida de la temperatura exterior, lo cual principalmente se debía a las diferentes experiencias térmicas, los cambios de la vestimenta, la disponibilidad de control y los cambios en las expectativas de los ocupantes (Taleghani *et al*, 2013). Además, la temperatura de confort óptima se calcula utilizando la

ET* mensual. Por otra parte, el comité SSPC 55 aceptó incluir el modelo de confort en la próxima revisión del estándar 55 de ASHRAE, sin embargo, llevaron a cabo varias modificaciones, una de ellas consistió en cambiar la variable independiente. La nueva ET* se sustituyó por la T_{ref} para el mes estudiado. La ET* original representa las transferencias de calor radiante, convectiva y latente, y se calcula utilizando el modelo de los dos códigos que tiene como objetivo calcular el flujo de calor intercambiado por el núcleo del cuerpo humano hacia el medio ambiente, pasando a través de la piel. Mientras que, T_{ref} es más accesible de obtener ya que se puede calcular a partir de datos meteorológicos típicos (Attia y Carlucci, 2015). Por lo tanto, con el cambio de la nueva variable el modelo de confort se expresa de la siguiente manera.

$$T_C^{ASHRAE55} = 0.31T_{ref} + 17.8^{\circ}\text{C} \quad (3.2)$$

Los límites de temperatura operativa permitidos se muestran en la Figura 3.2. Según el estándar ASHRAE, no se debe extrapolar a temperaturas exteriores por encima y superiores por debajo de los puntos finales de las curvas. Si la temperatura exterior media mensual es inferior a los 10°C (50°F) o superior a los 33.5°C (92.3°F), existiría un cambio de comodidad, puesto que se volverían irrealistas las temperaturas permisibles.

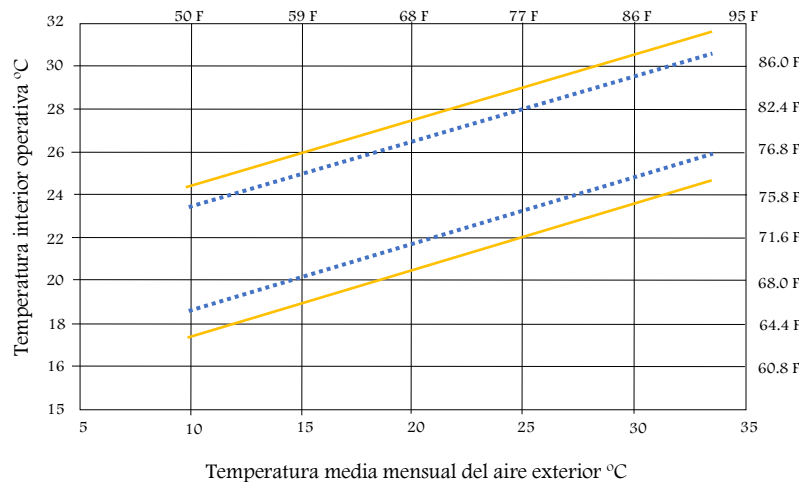


Figura 3.2 Ancho de banda de confort ASHRAE 55 -2010

La Figura 3.2 incluye dos conjuntos de límites de temperatura operativa: uno para un 80% de aceptabilidad y otro para un 90% de aceptabilidad. Los límites de aceptabilidad del 80% son para aplicaciones típicas y el 90% se puede usar cuando se desea un estándar más alto de confort térmico.

3.3 Modelos de confort térmico adaptativos

En el siguiente apartado se describen los modelos de confort térmico basados en el enfoque adaptativo. Los modelos seleccionados fueron los de las normas EN 15251 y CIBSE Guide A. Por otra parte, se describen los modelos locales que fueron elegidos para cada una de las ciudades con clima cálido.

3.3.1 Modelo de confort térmico EN 15251

La norma EN 15251 especifica los parámetros de entrada ambiental interior para el diseño y la evaluación del rendimiento energético de los edificios que abordan la calidad del aire interior, el entorno térmico y acústico. Además, especifica como se puede establecer y utilizar los criterios de diseño para el dimensionamiento de sistemas. La norma establece los principales parámetros que se deben utilizar como entrada para el cálculo de la energía de la construcción y la evaluación a largo plazo del ambiente interior (Olsen, 2012).

De acuerdo con la norma europea, las temperaturas de confort aceptables realmente dependen del tipo de sistema utilizado para proporcionar confort. Por lo que, si un sistema activo proporciona refrigeración, las temperaturas interiores deben respetar las temperaturas definidas por el modelo de Fanger (Attia y Carlucci, 2015).

Las reglas sobre el confort térmico que presenta esta norma se basan en el proyecto SCAT, el cual tiene como objetivo general proporcionar un método para reducir el consumo de energía en edificios con AC, mediante el desarrollo de sistemas de control que pudieran utilizar los principios de la teoría de comodidad adaptativa (McCartney y Nicol 2002). Con base al proyecto SCAT, el comité europeo de normalización obtuvo el modelo adaptativo para el estándar EN 15251:2007. La temperatura óptima de confort operativo se calcula conociendo la temperatura media diaria del aire del bulbo seco al aire.

$$T_C^{EN1521} = 0.33T_{rm} + 18.8^{\circ}\text{C} \quad (3.3)$$

Donde la T_{rm} es la temperatura media en funcionamiento y se calcula con la Ec. (3.4)

$$T_{rm} = (1 - \alpha)T_{ed-1} + \alpha T_{rm-1} \quad (3.4)$$

donde:

- α = Constante de referencia
- T_{rm} = Temperatura media en funcionamiento del día actual
- T_{rm-1} = Temperatura media en funcionamiento del día anterior
- T_{ed-1} = Media diaria de la temperatura exterior del día anterior

La norma recomienda 0.8 para el valor de la constante sustituido en la Ec. (3.5) por lo que el cálculo conduce:

$$T_{rm} = (1 - 0.8)T_{ed-1} + 0.8T_{rm-1} \quad (3.5)$$

La norma expresa las suposiciones de aceptabilidad para diferentes categorías de edificios. La Tabla 3.1 muestra la temperatura optima de confort y los limites superior e inferior de las categorías de confort.

Tabla 3.1 Aplicabilidad sugerida para las categorías y sus rangos de temperatura aceptables asociados

Categoría EN 15251	Descripción	Límite de desviación (°C)	Rango de aceptabilidad (%)
I	Alto nivel de expectativas para usuarios muy sensibles y frágiles (hospitales...)	±2	90
II	Nivel de expectativas normal y debe utilizarse para nuevos edificios y renovaciones	±3	80
III	Nivel de expectativa aceptable y moderado para edificios existentes	±4	65
IV	Valores fuera de criterio para las categorías anteriores. Esta categoría solo debe ser aceptada por un límite de año	±>4	<65

Por otra parte, los anchos de banda de confort se basan en el algoritmo de confort y el rango permitido para diferentes rangos de aceptabilidad como se muestra en la Figura 3.3.

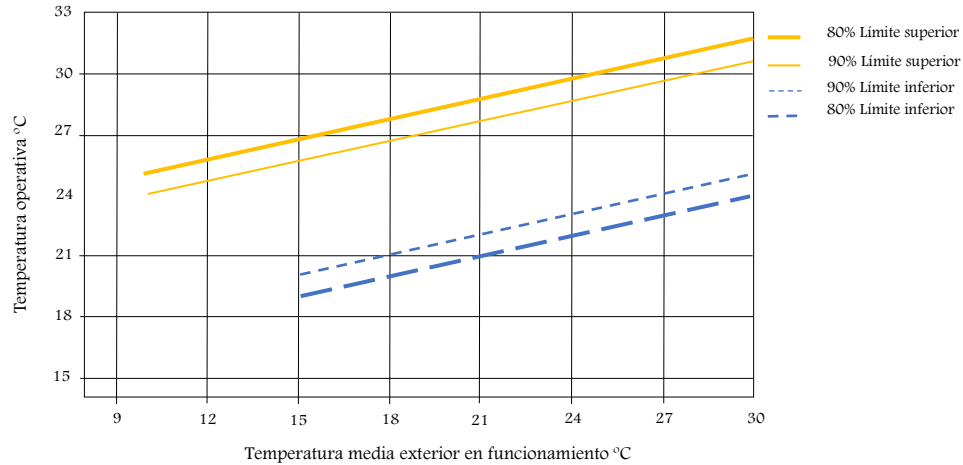


Figura 3.3 Ancho de banda de confort EN 15251

3.3.2 Modelo de confort térmico CIBSE GUIDE A

En los últimos años el Reino Unido ha enfocado sus estudios en mayor énfasis en la sostenibilidad y el diseño ecológico. La institución CIBSE fue fundada en 1985 cuyo objetivo principal fue el enfoque del sector de la construcción. CIBSE ha publicado varias guías para el diseño de servicios de construcción, que incluye varios criterios y estándares de diseño recomendados, algunos de los cuales se citan dentro de las regulaciones de construcción del Reino Unido, entre ellos presentó la guía A. CIBSE Guide A, se enfoca principalmente en el diseño ambiental de las edificaciones, considerando la adaptación térmica de los ocupantes como una variable importante. La adaptación es asistida por la provisión del control sobre el ambiente térmico, la cual se puede proporcionar mediante ventiladores de techos y ventanas que se pueden abrir en verano o mediante controles de temperatura en invierno.

El enfoque adaptativo para el confort térmico fue desarrollado a partir de estudios de campo, El método de adaptación, a diferencia del método de intercambio de calor, no requiere conocimiento del aislamiento de la ropa y la tasa metabólica para establecer la

temperatura requerida para el confort térmico. Más bien, es un enfoque conductual, y se basa en la observación de que las personas en la vida cotidiana no son pasivas en relación con su entorno, sino que tienden a sentirse cómodas, dado el tiempo y la oportunidad. Este método se realiza mediante ajustes.

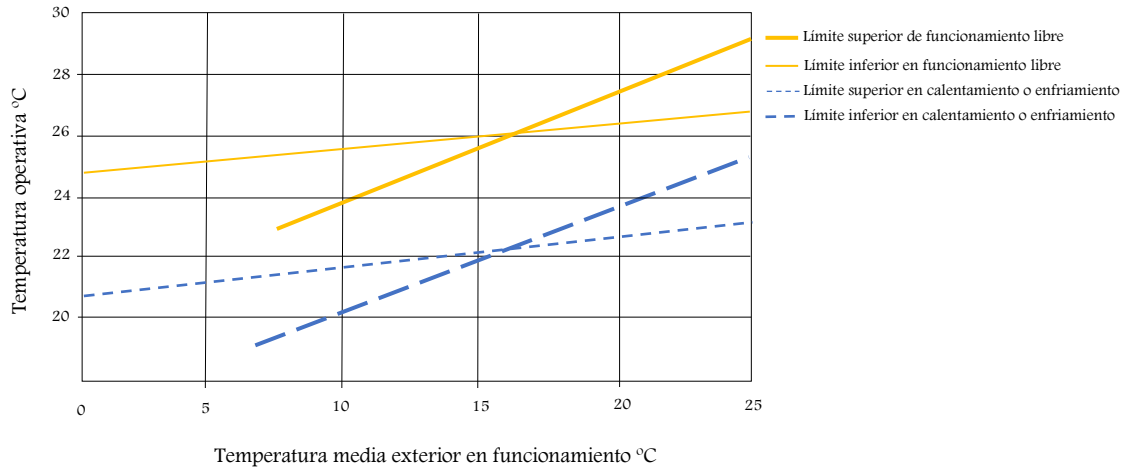


Figura 3.4 Ancho de banda de confort de CIBSE Guide A

La Ec. (3.6) obtiene la temperatura de confort de acuerdo a la CIBSE Guide A.

$$T_C^{CIBSE} = 0.09T_{rm} + 22.6^{\circ}\text{C} \quad (3.6)$$

3.3.3 Modelos de confort térmico adaptativo locales

Los modelos de confort térmico locales son realizados por estudios de campo considerando las condiciones climáticas de una ciudad en particular, por lo tanto, son adaptables para el estudio de ciudades con condiciones climáticas similares del cual fue obtenido. La obtención de los modelos locales es basada en el enfoque adaptativo. Algunos estudios de modelos locales fueron realizados por Nicol y Humphreys (2002), Indraganti (2010), Indraganti *et al.* (2014), Manu *et al.* (2016), estos especialmente en ciudades con clima cálido. En México, los modelos encontrados fueron realizados por López *et al.* (2017) y Oropeza *et al.*, (2017), para ciudades con climas cálido húmedo, semihúmedo, seco y muy seco.

El modelo local elaborado por López *et al.* en 2017, fue realizado bajo las condiciones climáticas (clima cálido semihúmedo) de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez en edificios educativos climatizados con AC y VN. Las variables medidas en los edificios fueron: la temperatura del aire, la humedad relativa, la temperatura del globo y la velocidad del aire. La determinación de la temperatura neutra para edificios con AC y VN lo realizaron mediante el método univariable de medias por intervalos de sensación térmica. El método consistió en agrupar por niveles del voto de sensación térmica y la temperatura del aire, obteniendo así la temperatura media y la desviación estándar, correspondiente a cada nivel. La construcción del modelo de confort adaptativo lo obtuvieron correlacionando la temperatura operativa de confort con la temperatura exterior.

Los modelos de confort térmico adaptativo se describen en la Ec. (3.7) y (3.8).

$$T_C = 0.13T_{rm} + 22.70^{\circ}\text{C} \quad (3.7)$$

$$T_C = 0.32T_{rm} + 18.45^{\circ}\text{C} \quad (3.8)$$

La Ec. (3.7) es válida para edificios con aire acondicionado, mientras que la Ecuación (3.8) es válida para ventilación natural.

Los modelos presentados por Oropeza *et al.* en 2017 se basaron en estudios de campo en cuatro climas predominantes en México, clima cálido seco, cálido muy seco o seco extremo, cálido húmedo y templado. El estudio contempló edificios con enfriamiento pasivo y enfriamiento activo. Oropeza *et al.*, utilizaron el método de regresión lineal con base a las respuestas de los cuestionarios de la temperatura de confort y la temperatura exterior. Los modelos de confort térmico adaptativo se describen en las Ec. (3.9), (3.10) y (3.11) para clima cálido húmedo, seco y seco extremo respectivamente.

$$T_C = 0.47T_{rm} + 9.07^{\circ}\text{C} \quad (3.9)$$

$$T_C = 0.96T_{rm} - 3.60^{\circ}\text{C} \quad (3.10)$$

$$T_C = 0.59T_{rm} + 9.60^{\circ}\text{C} \quad (3.11)$$

3.4 Modelos de confort térmico para ciudades de estudio

Los modelos de confort térmico seleccionados para las ciudades de estudio se clasificaron de acuerdo a las condiciones climáticas de cada una de ellas como se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Selección de los modelos de confort térmico para cada tipo de clima

Ciudad	Clima	Modelo
Acapulco, Guerrero	Cálido húmedo	$T_C^{ASHRAE55} = 0.31T_{ref} + 17.8^\circ\text{C}$
Villahermosa, Tabasco		$T_C^{EN1521} = 0.33T_{rm} + 18.8^\circ\text{C}$ $T_C^{CIBSE} = 0.09T_{rm} + 22.6^\circ\text{C}$ $T_C = 0.47T_{rm} + 9.07^\circ\text{C}$
Cancún, Quintana Roo	Cálido semihúmedo	$T_C^{ASHRAE55} = 0.31T_{ref} + 17.8^\circ\text{C}$
Merida, Yucatan		$T_C^{EN1521} = 0.33T_{rm} + 18.8^\circ\text{C}$ $T_C^{CIBSE} = 0.09T_{rm} + 22.6^\circ\text{C}$ $T_C = 0.13T_{rm} + 22.7^\circ\text{C}$
Ciudad Juárez	Cálido seco	$T_C^{ASHRAE55} = 0.31T_{ref} + 17.8^\circ\text{C}$
Tijuana, Baja California		$T_C^{EN1521} = 0.33T_{rm} + 18.8^\circ\text{C}$ $T_C^{CIBSE} = 0.09T_{rm} + 22.6^\circ\text{C}$ $T_C = 0.96T_{rm} - 3.6^\circ\text{C}$
Hermosillo, Sonora	Cálido seco extremoso	$T_C^{ASHRAE55} = 0.31T_{ref} + 17.8^\circ\text{C}$
Mexicali, Baja California		$T_C^{EN1521} = 0.33T_{rm} + 18.8^\circ\text{C}$ $T_C^{CIBSE} = 0.09T_{rm} + 22.6^\circ\text{C}$ $T_C = 0.59T_{rm} + 9.6^\circ\text{C}$

3.5 Evaluación del confort térmico

El confort térmico es esa sensación de la mente que encuentra neutralidad con el ambiente térmico en el que el cuerpo humano se encuentra. La sensación de bienestar de una persona dentro de una habitación depende principalmente de una serie de factores externos. La radiación provocada por las paredes, ventanas o corrientes de aire dentro de una habitación influyen significativamente en la sensibilidad de las personas.

Por otra parte, los factores que muestran mayor dominio en el confort térmico son la temperatura del aire, la temperatura media radiante, la velocidad del aire y la humedad relativa. Sin embargo, tanto la actividad y la vestimenta forman parte fundamental en la evaluación del confort térmico. El valor PMV es un índice que predice la sensación de confort, por otra parte, el índice PPD muestra una predicción cuantitativa del número de

personas que se encontraran insatisfechos en un determinado lugar. La Tabla 3.3 muestra la relación entre el índice PMV y el índice PPD.

Tabla 3.3 Relación entre PMV/PPD

PMV	PPD	Sensación Térmica
+3	99%	Muy calurosa
+2	77%	Calurosa
+1	26%	Ligeramente cálido
0	5%	Neutro
-1	26%	Ligeramente fría
-2	77%	Fría
-3	99%	Muy fría

Para este estudio, en la evaluación del confort térmico se tomaron en cuenta las consideraciones de la ISO 7730. Por lo tanto, se consideró a las personas sentadas, con trabajo ligero de acuerdo a las especificaciones para habitantes de oficinas, viviendas, escuelas y laboratorios. El un factor del tipo de vestimenta fue 0.5, considerando vestimenta ligera.

3.6 Evaluación del costo de la energía eléctrica

Para el estudio del costo de la energía eléctrica anual, el valor de las cargas de enfriamiento anuales obtenidas en $MWh\text{-año térmicas}$ se multiplican por el valor de 2.50 del coeficiente de rendimiento (COP), del cual se obtiene $MWh\text{-año eléctricos}$. Posteriormente, se multiplica por la tarifa correspondiente proporcionada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), que este caso por ser una edificación residencial el precio es de $2.802 \frac{\$}{MWh}$. Por último, el valor del costo anual y de acuerdo a las especificaciones proporcionados por la CFE (2019) para los servicios de media y alta tensión el impuesto al valor agregado IVA es del 16.0%.

$$\text{costo de la energía eléctrica} = \left(MWh * 2.802 \frac{\$}{MWh} \right) * 0.16 \quad (3.12)$$

3.7 Verificación de la plataforma de simulación

En este apartado se muestra el comparativo de los resultados de las verificaciones de los casos de referencia y la edificación de estudio. Para ello, se realizaron dos casos de referencias presentados por BESTest. El primer caso corresponde al ejercicio 900FF, el cual simula energéticamente la temperatura de la edificación en evolución libre. El segundo caso corresponde al ejercicio 900, el cual obtiene la demanda anual de energía del recinto, calculando las cargas de enfriamiento y calentamiento. Por otra parte, se presenta la verificación de la plataforma de simulación para la edificación de estudio NOM-020-ENER-2011. La verificación contempló los datos proporcionados por el reporte de Álvarez *et al.* en 2014.

3.7.1 Verificación de los casos BESTest 900FF y 900

El proyecto BESTest fue desarrollado por un grupo cooperativo que involucró a miembros del IEA, SHC, BCS y NREL entre otros. El objetivo principal fue desarrollar un método que probara sistemáticamente softwares de simulación energética de edificios realizando una validación con estudios de campo. Los ejercicios BESTest se clasifican por el tipo de serie al que corresponden, sean de baja masa o gran masa. Los casos 600 a 650 corresponden a baja masa, y los casos 900 a 990 a gran masa. Por otra parte, realizaron ejercicios en evolución libre, los cuales lo identificaron con las letras *FF*. Para este estudio se seleccionó el caso 900FF que permite conocer la temperatura en el interior de una habitación y el caso 900 que permite conocer las cargas de enfriamiento y calentamiento.

El modelo geométrico de la habitación se muestra en la Figura 3.5. El modelo es base de estudio para los casos 900FF y 900. La habitación consta de dos ventanas orientadas al sur.

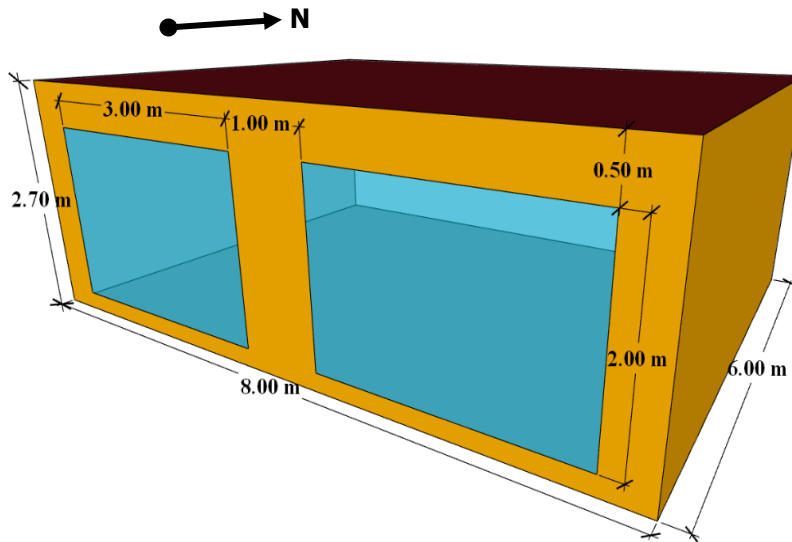


Figura 3.5 Modelo BESTest para los casos 900FF y 900

Los datos del clima y la ubicación del lugar se muestran en la Tabla 3.4, los cuales pertenecen a la ciudad de Denver, Colorado ubicada en los Estados Unidos de América. El formato para los datos fue en TMY, proporcionados por Meteonorm. La infiltración es 0.5 ACH y las ganancias internas por equipos, personas, luminarias entre otras es de 200W.

Tabla 3.4 Resumen del lugar y el clima

Propiedad	Valor
Tipo de clima	Invierno frío claro/ Verano cálido seco
Formato de archivo del clima	TMY
Latitud	39.8° Norte
Longitud	104.9° Oeste
Altitud	1609m
Reflectividad de la tierra	0.2
Velocidad media anual del viento	4.02 m/s
Velocidad máxima anual del viento	14.89 m/s
Reflexión del suelo	0.2
Temperatura del suelo	10 °C
Temperatura media anual de bulbo seco	9.71 °C
Temperatura mínima anual de bulbo seco	-24.39 °C
Temperatura máxima anual de bulbo seco	35 °C
Grados día de calentamiento (base 18.3 °C)	3636.2 °C
Grados día de enfriamiento (base 18.3 °C)	487.1 °C
Temperatura de rocío de promedio anual	-1.44°C
Relación de humedad promedio anual	0.0047
Radiación solar global total anual	1831.82 kWh/m ² -año
Radiación solar directa total anual	2353.58 kWh/m ² -año
Radiación solar horizontal directa	1339.48 kWh/m ² -año

La Tabla 3.5 y la Tabla 3.6 muestra las especificaciones de los materiales y las propiedades de las ventanas y vidrios que se utilizaron para la construcción del modelo.

Tabla 3.5 Especificaciones de los materiales

Nombre	Conductividad $\lambda \left(\frac{W}{mK} \right)$	Cp $\left(\frac{kJ}{kgK} \right)$	Densidad $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$	Espesor (m)
Paredes				
Bloque de concreto	0.51	1.00	1400	0.1000
Aislamiento	0.04	1.40	10	0.0615
Capa de madera	0.14	0.90	530	0.0090
Piso				
Losa de concreto	0.13	1.00	1400	0.0800
Aislamiento	0.04	1.40	10	1.0070
Techo				
Aislamiento	0.04	1.00	1400	1.0070
Fibra de vidrio	0.04	0.84	12	0.1118
Capa de madera	0.14	0.90	530	0.0190

Tabla 3.6 Propiedades de las ventanas y vidrios

Propiedades	Valor
Coefficiente de extinción	0.0196
Numero de vidrios	2
Espesor (mm) $\lambda \left(\frac{W}{mK} \right)$	3.175 mm
Grosor de la capa de aire	13 mm
Coefficiente radiativo-convectivo en el espacio de aire	6.297 W/m ² K
Coefficiente superficial exterior combinado	21 W/m ² K
Coefficiente superficial interior combinado	8.29 W/m ² K

3.7.1.1 BESTest 900FF: simulación de la temperatura interior

Para la verificación del modelo BESTest 900FF, se utilizó el software TRNSYS 16. La plataforma de simulación para el estudio energético de la habitación consiste de los siguientes componentes mostrados en la Figura 3.6.

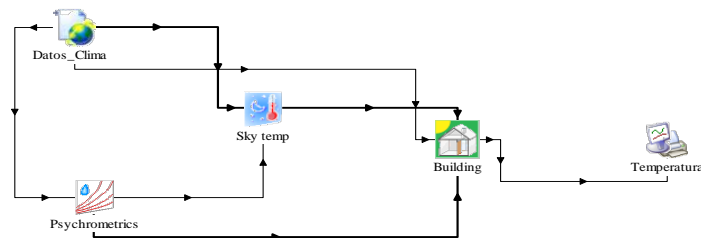


Figura 3.6 Componentes para la plataforma de simulación del caso 900FF

La plataforma de simulación fue dividida en tres etapas. En la etapa uno, se recaban los datos del clima de la ciudad de estudio por medio del type15-2 (Datos_Clima). En la misma etapa se utilizaron los types 33 y 69 (Psychrometric, Sky temp) los cuales recaban información climatológicos y evitan la saturación del type 15-2.

En la etapa dos fue construida la habitación de acuerdo a las características proporcionadas para el caso 900FF. Para ello se utilizó el type 56 (Building). En este componente se agregaron las propiedades de los materiales y ventanas las ganancias internas, la infiltración. La temperatura fue evaluada en periodo de un año dividida por meses.

La etapa tres consistió en graficar los resultados de la simulación de la temperatura en evolución libre de la habitación. El type 65d permite graficar el comportamiento de la temperatura u otra variable que se requiere conocer. Por otra parte, envía a información obtenida de la simulación a un programa de base de datos, para su mejor apreciación.

La temperatura máxima en el interior del recinto obtenida en el presente trabajo fue de 37.4°C y la temperatura mínima es de -6.4°C. La Tabla 3.7 muestra el comparativo de los resultados obtenidos en el presente trabajo y con distintos softwares de simulación energética de edificaciones. De acuerdo a los datos apreciados en la Tabla 3.7 la verificación de la plataforma de simulación mostró una diferencia promedio del 8.3%, mostrándose como la comparación más cercana a los resultados de BESTest.

Tabla 3.7 Comparación de resultados del caso 900FF de BESTest.

Autores/Software	BESTest	Presente trabajo	EnergyPlus	CoDyBa	Design Builder
Año de simulación	1993	2018	2006	2004	2006
Temperatura máxima (°C)	41.8	37.4	43.3	42.2	43.3
Temperatura mínima (°C)	-6.4	-6.4	-2.6	-4.2	-2.6
Temperatura promedio (°C)	24.6	21.0	26.0	24.6	26.0
Diferencia promedio	0%	8.3%	13.3%	11.6%	13.3%

La Figura 3.7 muestra el comportamiento de la temperatura en evolución libre de la habitación 900FF en un periodo de un año y dividida por meses. Los resultados mostrados de acuerdo a la Tabla 3.7 y la Figura 3.7 la verificación se desempeñó con un 8.3% de diferencia porcentual y se aprecia que el comportamiento de ambos resultados tiene una tendencia muy similar, a diferencia de una ligera acepción de picos.

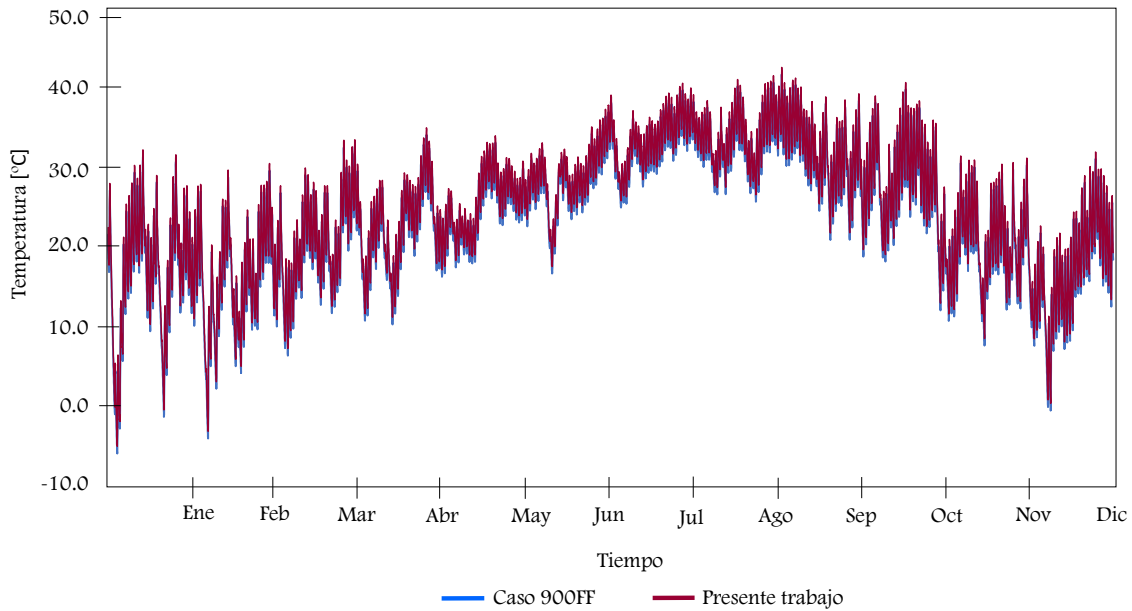


Figura 3.7 Comparativo de las temperaturas interiores del caso 900FF con el presente trabajo

Con lo anterior, se muestra que la plataforma tiene un adecuado desempeño ya que se observa concordancia entre lo reportado por BESTest con los resultados del presente trabajo. Por otra parte, se considera aceptable dado que, la diferencia porcentual promedio de las temperaturas es menor al 10.0%.

3.7.1.2 BESTest 900: simulación de las cargas térmicas

Para la verificación del modelo BESTest 900, se utilizó el software TRNSYS en su Versión 16. Los componentes principales utilizados para la simulación energética son los mostrados en la Figura 3.8.

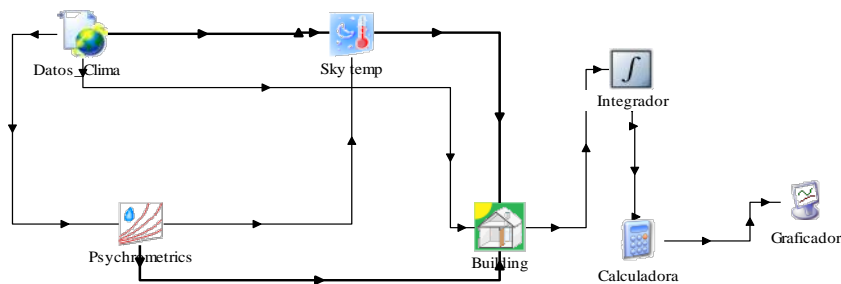


Figura 3.8 Componentes para la plataforma de simulación del caso 900

La plataforma de simulación fue dividida en cuatro etapas. En la etapa uno se utilizó los Types 15-2, Psychometric y Sky_Temp, los cuales recaban la información de clima de la ciudad de estudio. En la etapa dos se construyó la habitación de estudio utilizando el type 56. En el type 56 se agregan los materiales y las propiedades termofísicas de cada uno de ellos, por otra parte, se indican las ganancias internas. La temperatura de calentamiento y enfriamiento fue de 20-27°C. En la etapa tres se desarrollan los cálculos de las cargas térmicas, integrando la demanda de energía a lo largo de un año. Los resultados de las cargas térmicas anuales obtenidos en el presente trabajo fueron comparados con resultados de distintos autores y softwares como se muestra en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Comparación de resultados del caso 900 de BESTest.

Cargas térmicas (MWh)	BESTest 900	Presente trabajo	ESP-UK-DMU	BLAS US/IT	DOE2 USA	SRES/S UN USA	SERIRES UK-BRE	S3PAS SPAIN	TRNSYS BEL/UK
Calentamiento	1.22	1.16	1.17	1.61	1.87	1.89	1.98	1.73	1.65
Enfriamiento	2.58	2.68	2.13	2.60	2.45	3.16	3.41	2.57	2.48

La Figura 3.9 muestra los resultados de los distintos softwares y autores. De acuerdo al comparativo del presente trabajo con el caso BESTest 900, se aprecia una diferencia porcentual promedio de 4.5% por lo tanto se concluye que los ejercicios han sido verificados satisfactoriamente

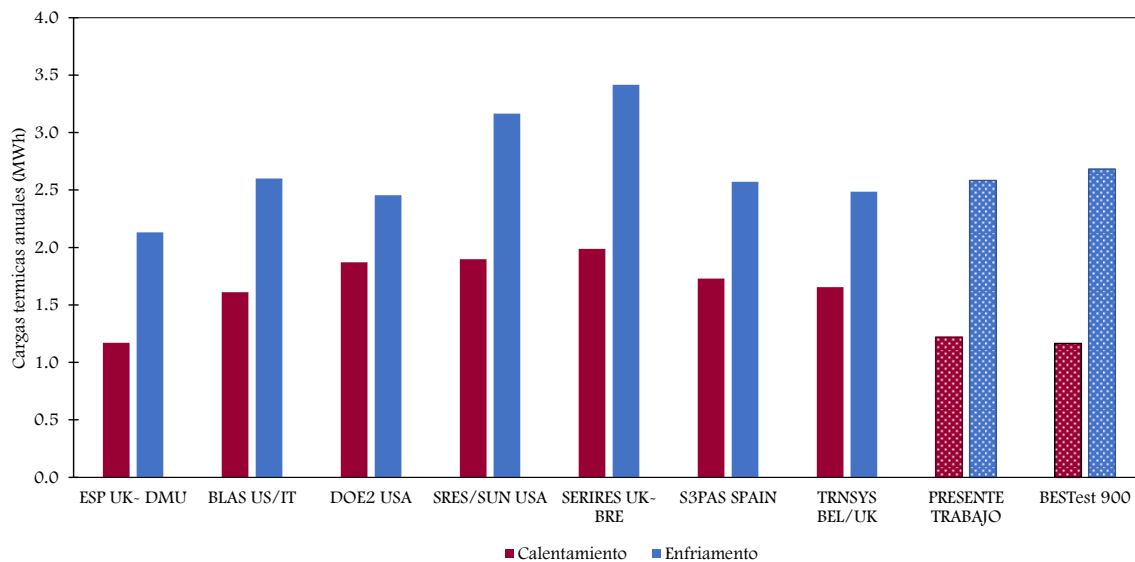


Figura 3.9 Comparativo de las cargas de enfriamiento entre el caso 900 con distintos autores/softwares y el presente trabajo

3.7.2 Verificación de la edificación de estudio (vivienda de interés social)

La verificación de la plataforma de simulación se realizó con la finalidad de comprobar que se encuentra funcionando adecuadamente para el desarrollo del proyecto. La edificación de estudio fue construida considerando las especificaciones del reporte realizado por Álvarez *et al.* en 2014. Para la verificación de la edificación se utilizaron los softwares Google SketchUp V.14 y TRNSYS V.17. En la Figura 3.10 se presenta un diagrama de flujo del proceso de construcción y simulación de la edificación de estudio entre los dos softwares.

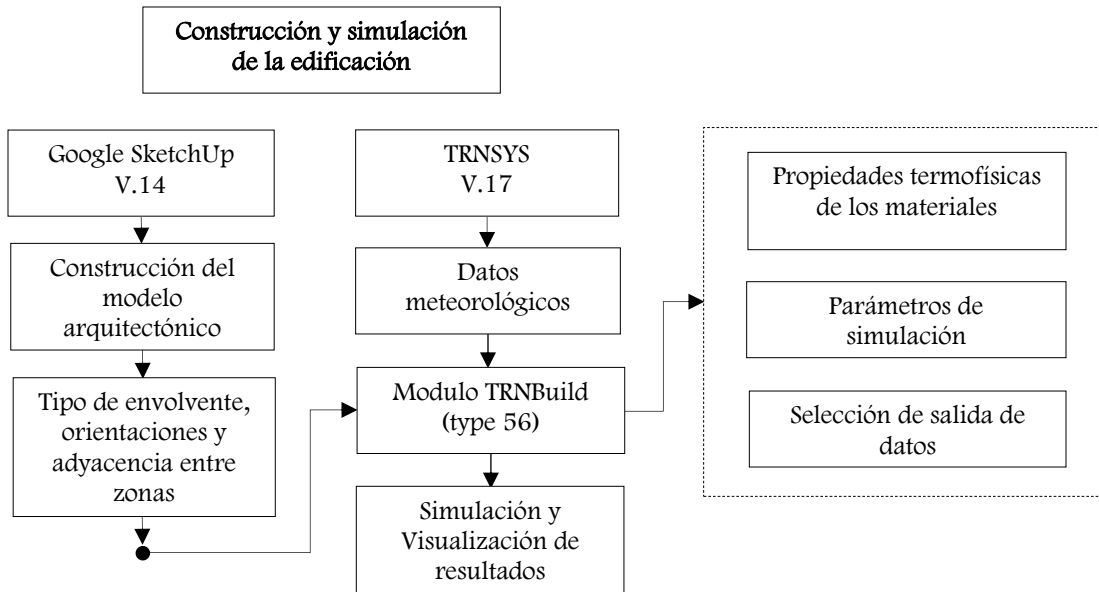


Figura 3.10 Proceso de construcción y simulación de la edificación NOM-020-ENER-2011

Las zonas térmicas fueron seleccionadas de acuerdo a las especificaciones que se describen en el apartado 2.3.3 Zonas térmicas. En Google SketchUp, a través de la opción Plugin se crean cada una de las zonas térmicas. Por otra parte, se indica la orientación de la edificación y adyacencias entre zonas, esto debido a que la información agregada en el modelo será transferida a la plataforma de simulación. La Figura 3.11(a) muestra la construcción de una zona térmica; la Figura 3.11(b) indica la posición y las adyacencias con las otras zonas.

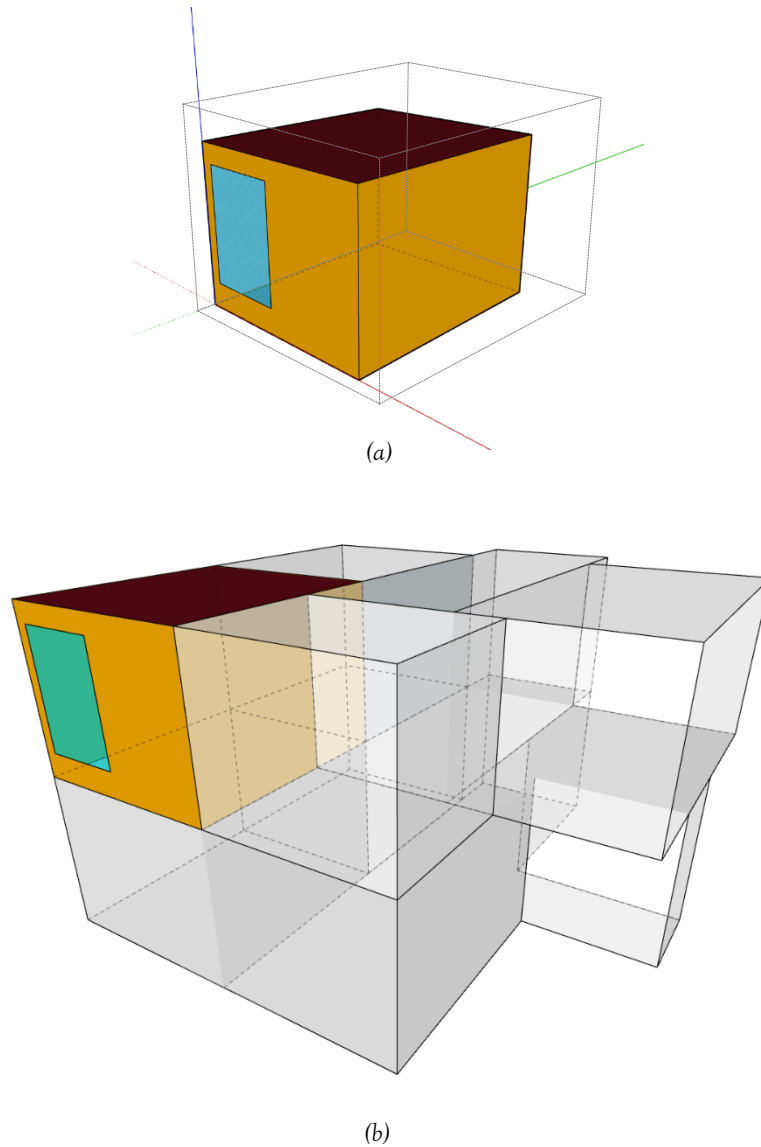


Figura 3.11 (a) construcción de una zona térmica a través del Plugin, (b) conjunto de zonas térmicas de la edificación de estudio

Cada una de las zonas térmicas presentan adyacencias con zonas vecinas, ya sea por muros o entre pisos. Para cada zona, existen muros internos adyacentes y muros exteriores. Para algunas zonas se tienen, techos adyacentes, pisos y techos externos. las aberturas de ventanas y puertas son consideradas de acuerdo a la orientación. La Tabla 3.9 se muestran los contactos entre zonas térmicas. Una vez indicada los contactos entre zonas y plantas, así como el techo y el suelo, la información es exportada con extensión IDF.

Tabla 3.9 Datos generales de la edificación de estudio

Zona	Norte	Sur	Este	Oeste	Techo	Piso
ZT_0	M_Ext	M_Ext	A_ZT_1,2	A_ZT_3	T_Ext	PA_ZT_4
ZT_1	M_Ext	A_ZT_2	M_Ext	A_ZT_0	T_Ext	PA_ZT_4
ZT_2	A_ZT_1	M_Ext	M_Ext	A_ZT_0	T_Ext	PA_ZT_4
ZT_3	M_Ext/A_ZT_0	M_Ext	A_ZT_0	M_Ext	T_Ext	PA_ZT_4
ZT_4	M_Ext	M_Ext	M_Ext	M_Ext	T_ZT_0,1,2,3	S_PB

M_Ext muro exterior, A_ZT muro adyacente, T_Ext techo exterior, PA_ZT piso planta alta, T_ZT techo planta baja, S_PB suelo

La simulación se realiza a través de módulos que se encuentran relacionados entre ellos, los cuales requieren información de variables de entrada y de salida El formato IDF guarda la información realizada en Google SketchUp, y ésta es importada a la plataforma de TRNSYS y recibida en TRNBuild (type 56). En TRNBuild se ingresan las propiedades termofísicas de los materiales, propiedades de las ventanas, infiltración, ganancias internas por equipo o personas. Los valores de cada una de las propiedades de materiales y ventanas se encuentran en la sección 2.3.2 *Edificación de estudio (vivienda de interés social)*. Las descripciones de los datos de la edificación se presentan en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Datos generales de la edificación de estudio

Descripción	Valor
Número de plantas	2
Altura de cada piso	2.5
Área total	88 m ²
Numero de ciudad evaluadas	6
Relación ventana-pared	Diferente para cada muro
Relación de aspecto	No aplica
Índice de ventilación	Sin ventilación
Infiltración	2ACH
Albedo pared	0.1
Albedo techo	0.9
Setpoint de temperatura	25°C
Ocupación del edificio	4 personas con actividad ligera
Ganancias de calor	Electrodomésticos y computo

La salida de datos del módulo de TRNBuild son las cargas térmicas de enfriamiento anuales. Las ciudades evaluadas para el estudio son Mérida, Villahermosa, Monterrey, Hermosillo, CDMX y Tulancingo. Los climas representativos de las ciudades de estudio fueron cálido, seco y templado. En la Figura 3.12 se muestran los resultados de la simulación del presente trabajo comparados con el estudio reportado de Álvarez *et al.* en 2014.

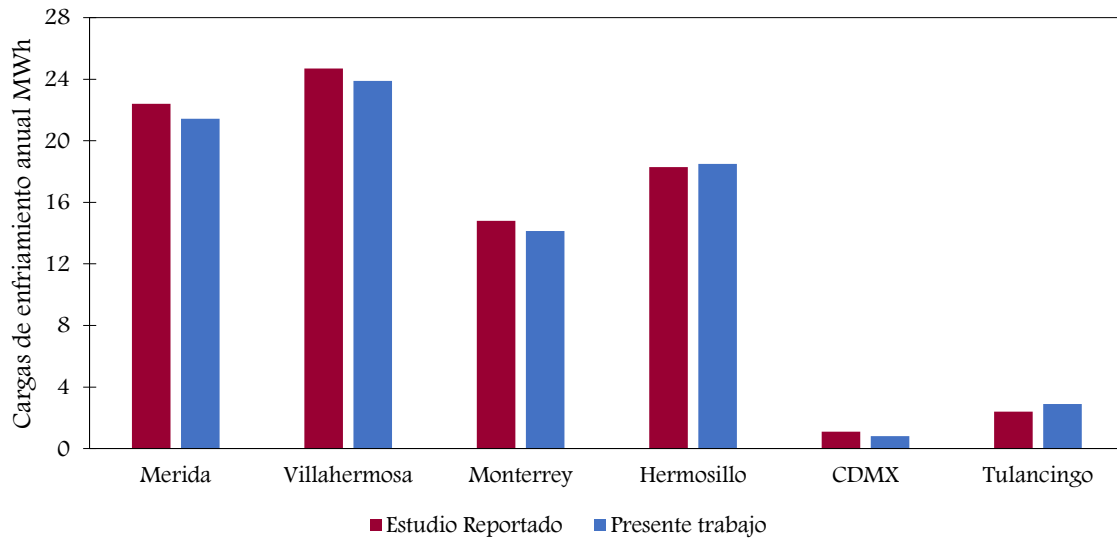


Figura 3.12 Comparativo de las cargas de enfriamiento entre el estudio reportado con el presente trabajo

De acuerdo al estudio reportado, las ciudades que presentan mayores cargas de enfriamiento anuales con 22.40 y 24.70 *MWh* son Mérida y Villahermosa respectivamente, ambas con clima cálido. Las ciudades de Monterrey y Hermosillo presentan cargas de enfriamiento anuales de 14.80 y 18.30 *MWh* respectivamente ambas con seco. Las ciudades que presentan menores cargas de enfriamiento anuales son CDMX y Tulancingo con 1.10 y 2.40 *MWh*, ambas con clima templado.

Tabla 3.11 Comparación de los resultados para la verificación de la plataforma

	Mérida	Villahermosa	Monterrey	Hermosillo	CDMX	Tulancingo
Estudio reportado <i>MWh</i>	22.40	24.70	14.80	18.30	1.10	2.40
Presenta trabajo <i>MWh</i>	21.40	23.80	14.10	18.50	0.80	2.90
Diferencia porcentual	4.5%	3.3%	4.5%	1.1%	26.5%	20.9%

La Tabla 3.11 muestra la diferencia porcentual que existe entre el estudio reportado y el presente trabajo. En los climas cálidos la diferencia porcentual promedio fue de 3.9%, en los climas secos presentó una diferencia porcentual promedio de 2.8%, mientras que, en los climas templados la diferencia porcentual promedio fue 23.7%. Por lo tanto, se puede observar que la plataforma de simulación presenta mejor desempeño para las ciudades con

climas cálidos y secos. Con lo anterior se observa que la plataforma simulación permite encontrar los resultados adecuados para el estudio de este proyecto.

CAPÍTULO IV

Resultados y discusión

En este Capítulo se muestran los resultados obtenidos de cada uno de los modelos de confort térmico en las viviendas de interés social y para diferentes ciudades con climas cálidos. En el estudio de los modelos de confort térmico se evaluaron las cargas térmicas de enfriamiento, además que se encontró el PMV y PPD

4.1 Resultados y discusión

En este apartado se muestran los resultados para cada uno de los modelos de confort térmico, analizando un periodo de un año. Los resultados obtenidos de cada modelo, se compararon con los resultados de climatizar a 25.0°C como especifica la norma NOM-020-ENER-2011.

4.1.1 Clima cálido húmedo

Las ciudades de Acapulco y Villahermosa cuentan con clima cálido húmedo (CONUE, 2016). En la Tabla 4.1 se presenta la nomenclatura utilizada para cada una de las ciudades.

Tabla 4.1 Nomenclatura de las ciudades con clima cálido húmedo

Nomenclatura	Significado
ACA	Acapulco
VH	Villahermosa
MCT	Modelo de confort térmico

La Figura 4.1 muestra el comparativo de las cargas térmicas obtenidas mediante el uso de los modelos de confort térmico estático y adaptativos, y la relación de la sensación térmica evaluada de acuerdo a los niveles de confort térmico por el modelo PMV/PPD, para las ciudades de Acapulco y Villahermosa.

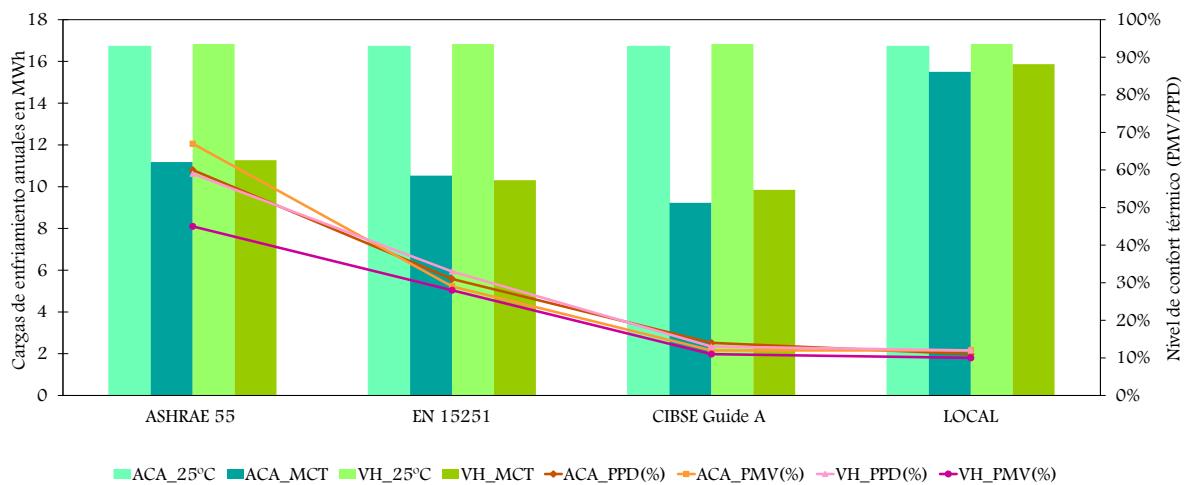


Figura 4.1 Comparación de los modelos de confort térmico en ciudades con clima cálido húmedo

Los resultados de las cargas de enfriamiento de cada uno de los modelos de confort térmico estático y adaptativos fueron comparados con los resultados obtenidos por el modelo a 25.0°C recomendado por la NOM-020-ENER-2011. Las cargas de enfriamiento del modelo ACA_25°C fue de 16.72 *MWh-año*, por otra parte, para VH_25°C fue de 16.83 *MWh-año*.

Las cargas de enfriamiento obtenidas por el modelo de confort térmico estático ASHRAE 55 fue de 11.18 *MWh-año*, para ACA_MTC y 11.27 *MWh-año*, para VH_MTC. El modelo estático muestra un potencial de ahorro de energía del 33.1% y logra disminuir hasta el 5.55 *MWh-año*, de las cargas térmicas de enfriamiento. El nivel del confort térmico que muestra el modelo estático ASHRAE 55, para ACA fue un valor del PMV del 2.01 y un porcentaje del PPD del 60.0% teniendo una sensación térmica de ligeramente cálido a cálido. Por otra parte, para la VH fue un valor del PMV de 1.34 y un porcentaje del PPD del 59.0% teniendo una sensación térmica de ligeramente cálido a cálido. El modelo muestra un buen desempeño en términos del potencial de ahorro de energía, sin embargo, en la sensación térmica se muestra poco desfavorable para su aplicación en climas cálido húmedo, esto puede ser, debido a que el modelo se basa en el enfoque estático.

Los resultados del modelo de confort térmico adaptativo EN 15251 fueron de 10.53 y 10.31 *MWh-año*, para ACA_MTC y VH_MTC respectivamente. El modelo adaptativo EN 15251, muestra un potencial de ahorro de energía del 37.9% logrando disminuir hasta el 6.35 *MWh-año*, de las cargas de enfriamiento. El nivel del confort térmico que muestra el modelo adaptativo EN 15251, para ACA fue un valor del PMV del 0.87 y un porcentaje del PPD del 29.0% teniendo una sensación térmica de neutro a ligeramente cálido. Por otra parte, para la VH fue un valor del PMV de 0.85 y un porcentaje del PPD del 26.0% teniendo una sensación térmica de neutro a ligeramente cálido. El modelo muestra menor desempeño del potencial de ahorro de energía en comparación del modelo estático, sin embargo, en la sensación térmica muestra neutralidad, no obstante, se aprecia un alto porcentaje de personas insatisfechas, lo que hace que el modelo no sea el más recomendable para el clima cálido húmedo.

El modelo de confort térmico adaptativo CIBSE Guide A muestra un consumo de energía de 9.23 y 9.85 *MWh-año* para ACA_MTC y VH_MTC respectivamente, logrando tener un potencial de ahorro de energía del 43.1% y una disminución de las cargas térmicas del 7.23 *MWh-año*. El nivel del confort térmico que muestra el modelo adaptativo CIBSE Guide

A, para ACA fue un valor del PMV del 0.37 y un porcentaje del PPD del 14.0% teniendo una sensación térmica de neutro a ligeramente cálido. Por otra parte, para VH fue un valor del PMV de 0.34 y un porcentaje del PPD del 13.0% teniendo una sensación térmica de neutro a ligeramente cálido. El desempeño del modelo de confort térmico se muestra alto en comparación del modelo estático ASHARE 55 y el modelo adaptativo EN 15251, mientras que en la sensación térmica llega al estado de neutralidad y teniendo el menor porcentaje de personas insatisfechas, por lo tanto, el modelo CIBSE Guide A es recomendable para el clima cálido húmedo.

El modelo de confort térmico local muestra un consumo de energía del 15.5 *MWh-año* en ACA_MTC y 15.87 *MWh-año* en VH_MTC. El modelo local presenta un potencial de ahorro de energía del 6.5% y la aplicación ayuda a reducir solo 1.09 *MWh-año*. El nivel del confort térmico que muestra el modelo adaptativo local para ACA fue un valor del PMV del -0.36 y un porcentaje del PPD del 11.0% teniendo una sensación térmica de neutro a ligeramente frío. Por otra parte, para VH el valor del PMV fue de -0.31 y un porcentaje del PPD del 12.0% teniendo una sensación térmica de neutro a ligeramente frío. El modelo local, muestra el menor desempeño teniendo el menor ahorro de energía en comparación con los modelos anteriores, por otra parte, en la sensación térmica presenta neutralidad y un número bajo de personas insatisfechas, por lo que el modelo no es recomendable para el uso en clima cálido húmedo.

El modelo de referencia a 25°C muestra un costo de la energía eléctrica anual de \$21,738.14 y \$21,881.15 para ACA y VH siendo el costo más alto y esto debido a que el modelo presenta el mayor número de cargas de enfriamiento anuales. La Tabla 4.2 muestra el comparativo del costo del consumo de la energía eléctrica para ciudades con clima cálido húmedo.

Tabla 4.2 Comparativo del costo de la energía eléctrica en ciudades con clima cálido húmedo

Modelo	ACA_25°C	ACA_MTC	Diferencia	VH_25°C	VH_MTC	Diferencia
ASHRAE 55	\$21,738.14	\$14,535.43	\$7,202.71	\$21,881.15	\$14,652.44	\$7,228.71
EN 15251	\$21,738.14	\$13,690.35	\$8,047.79	\$21,881.15	\$13,404.32	\$8,476.83
CIBSE G. A	\$21,738.14	\$12,000.18	\$9,737.96	\$21,881.15	\$12,806.26	\$9,074.89
LOCAL	\$21,738.14	\$20,151.98	\$1,586.16	\$21,881.15	\$20,633.03	\$1,248.12

El modelo estático ASHRAE 55 presentó un ahorro económico de \$7,000.00 pesos al año, mostrándose como una alternativa para su aplicación en el clima cálido húmedo, sin embargo, en términos del confort térmico se encuentra poco favorable para la satisfacción de los ocupantes de viviendas. Los modelos de confort térmico adaptativos EN 15251 y CIBSE Guide A muestran el mayor ahorro en el costo económico de la energía eléctrica logrando ahorrar desde \$8,000.00 hasta casi \$10,000.00 pesos al año y esto debido a que dichos modelos presentan menores cargas de enfriamiento. Por otra parte, el modelo Local, solo logra ahorrar \$1,500.00 pesos al año, mostrándose como el modelo más desfavorable para su aplicación para viviendas ubicadas en el clima cálido húmedo.

Los modelos de confort térmico aplicados para las ciudades con clima cálido húmedo mostraron un potencial de ahorro energético al modelo de referencia a 25°C entre el 6.0-43.0%, y sensaciones térmicas desde ligeramente cálido hasta ligeramente frío.

Tabla 4.3 Comparativo de los modelos en términos del potencial de ahorro de energía, sensación térmica y costo económico en ciudades con clima cálido húmedo

Modelos	Potencial de ahorro de energía	Sensación térmica	Costo de la energía eléctrica anual
ASHRAE 55	33.1%	Ligeramente cálido a cálido	\$14,593.94
EN 15251	37.9%	Neutro a ligeramente cálido	\$13,547.33
CIBSE G. A	43.1%	Neutro a ligeramente cálido	\$12,403.22
LOCAL	6.5%	Neutro a ligeramente frío	\$20,392.51

Los resultados de la Tabla 4.3 se aprecia el promedio de las dos ciudades con clima cálido húmedo usadas para este estudio. De acuerdo a los resultados, el modelo de confort térmico adaptativo CIBSE Guide A se muestra con mejor desempeño con el mayor ahorro energético y una sensación térmica de neutra a ligeramente cálido teniendo solo el 14.0% de personas insatisfechas.

Las ciudades de Acapulco y Villahermosa se caracterizan por tener temperaturas ambientes anual entre los 26.4-26.8°C, con una humedad relativa anual 75.0%, una velocidad del viento anual 2.8 m/s y una radiación solar anual de 219.00 W/m². Los climas cálido húmedo requieren en mayor tiempo el uso de sistemas de climatización debido a las condiciones climáticas que se encuentran a lo largo del año, haciendo que, en las viviendas se demande más el consumo de energía, y para los ocupantes la satisfacción en el confort térmico. El modelo de confort térmico seleccionado para las ciudades con clima cálido

húmedo consideradas en el estudio fue el presentado por la CIBSE Guide A basado en el enfoque adaptativo. El modelo adaptativo CIBSE, determina las temperaturas de confort las cuales y de acuerdo a la evaluación térmica de la edificación y considerando ocupantes en el interior de ella, fue aceptable teniendo solo el 12.0% de insatisfacción en la sensación térmica. En la evaluación energética el modelo adaptativo CIBSE, mostró alto porcentajes de ahorro de energía llevando así a posicionarse como el modelo recomendado para su aplicación en viviendas que se encuentren ubicadas en ciudades con clima cálido húmedo o condiciones ambientales similares.

4.1.2 Clima cálido semihúmedo

Las ciudades de Cancún y Mérida cuentan con clima cálido semihúmedo (CONUE, 2016). En la Tabla 4.4 se presenta la nomenclatura utilizada para cada una de las ciudades.

Tabla 4.4 Nomenclatura de las ciudades con clima cálido semihúmedo

Nomenclatura	Significado
CAN	Cancún
MER	Mérida
MCT	Modelo de confort térmico

La Figura 4.2 se muestra el comparativo de las cargas de enfriamiento en MWh anuales, en relación de la sensación térmica evaluada de acuerdo a los niveles de confort térmico por el modelo PMV/PPD, para las ciudades de Cancún y Mérida.

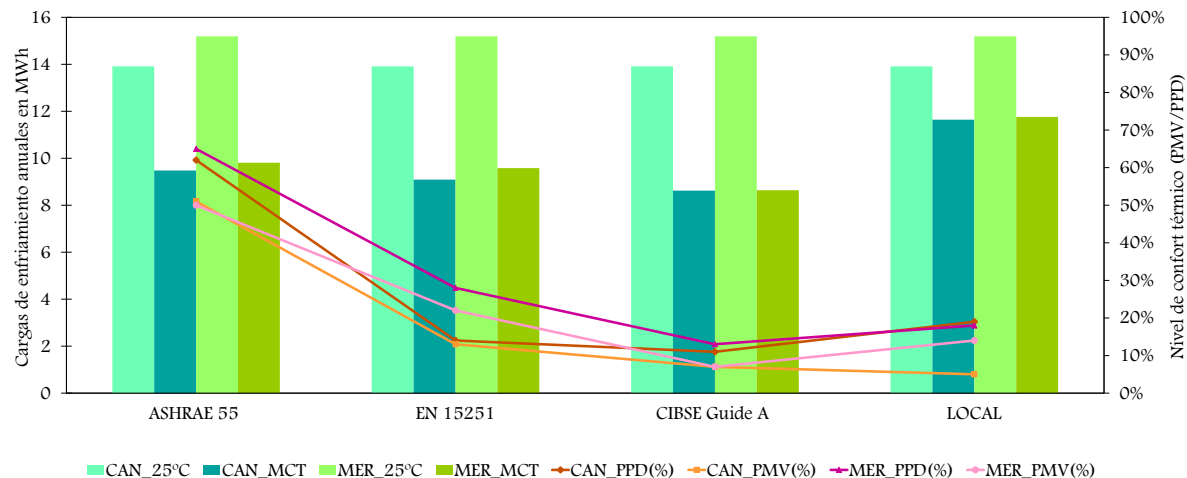


Figura 4.2 Comparación de los modelos de confort térmico en ciudades con clima cálido semihúmedo

Los resultados de las cargas de enfriamiento obtenidas mediante el modelo de referencia de 25°C fueron de 13.91 y 15.19 *MWh-año* para CAN y MER. Los resultados de los modelos de confort térmico fueron comparados con los resultados del modelo a 25°C, y se encontró el potencial de ahorro de energía de cada uno de ellos.

El modelo ASHRAE 55, basado en el enfoque estático, muestra un consumo de energía del 9.48 y 9.81 *MWh-año* en CAN_MTC y MER_MTC respectivamente. La comparación de dicho consumo de energía con los modelos CAN_25°C y MER_25°C, el modelo estático muestra un potencial de ahorro energético del 33.6%, logrando disminuir 4.90 *MWh-año* de las cargas de enfriamiento. El nivel del confort térmico que presenta el modelo estático para CAN_PMV fue de 1.54 y un CAN_PPD del 62.0% de personas insatisfechas, mostrando una sensación térmica de ligeramente cálido a cálido. Por otra parte, para MER_PMV fue de 1.51 con un MER_PPD del 65.0% de personas insatisfechas, presentando una sensación térmica de ligeramente cálido a cálido. El rango de temperatura de confort indicada por el modelo oscila entre 25.3-26.7°C a lo largo de un año. El desempeño que muestra el modelo de confort térmico estático es alto en términos del ahorro del consumo de energía, sin embargo, la sensación térmica es poco favorable para los ocupantes de viviendas ubicadas en clima cálido húmedo.

Los resultados del modelo de confort térmico adaptativo EN 15251, fue de 9.09 y 9.58 *MWh-año* para CAN_MTC y MER_MTC respectivamente. El potencial de ahorro de energía que presenta el modelo es de 35.8% logrando disminuir el 5.22 *MWh-año* de las cargas de enfriamiento. El nivel de confort térmico que presenta el modelo adaptativo para CAN_PMV fue de 0.38 con un CAN_PPD del 14.0% de personas insatisfechas, mostrando una sensación térmica de neutro a ligeramente cálido. Para MER_PMV fue de 0.67 con un MER_PPD del 23.0% de personas insatisfechas, presentando una sensación térmica de neutro a ligeramente cálido. El modelo adaptativo EN 15251, presenta un buen desempeño para viviendas en climas cálido semihúmedos en términos del consumo energético, además que la sensación térmica es aceptable por el 71.0% de ocupación en promedio.

El modelo de confort térmico adaptativo CIBSE Guide A, presenta cargas de enfriamiento de 8.62 y 8.64 *MWh-año* para CAN_MTC y MER_MTC, mostrando un potencial de ahorro de energía 40.6% logrando disminuir las cargas de enfriamiento hasta 5.92 *MWh-año*. El nivel de confort térmico que presenta el modelo adaptativo CIBSE Guide A, fue un

CAN_PMV de 0.21 con un CAN_PPD del 11.0% de personas insatisfechas, mostrando una sensación térmica de neutro a ligeramente cálido. Para, MER_PMV fue de 0.21 con un MER_PPD del 13.0% de personas insatisfechas, por lo tanto, la sensación térmica que muestra es de neutro a ligeramente cálido. Por lo tanto, el modelo adaptativo CIBSE Guide A, exhibe el mejor desempeño en términos del potencial de ahorro de energía y la sensación térmica en comparación a los modelos presentados anteriormente, por lo tanto, el modelo se presenta como una alternativa para el ahorro de energía y confort térmico en viviendas ubicadas en ciudades con clima cálido semihúmedo.

Los resultados de las cargas de enfriamiento utilizando el modelo de confort térmico adaptativo local fue de 11.64 y 11.76 *MWh-año* para CAN_MTC y MER_MTC, mostrando un potencial de ahorro de energía del 19.5% logrando disminuir el 2.85 *MWh-año* de las cargas de enfriamiento. El nivel de confort térmico que muestra el modelo local fue para CAN_PMV de 0.16 con un CAN_PPD de 19.0% de personas insatisfechas, teniendo así una sensación térmica de neutro a ligeramente cálido. Mientras que, para MER_PMV y MER_PPD de 0.42 y un 18.0% de personas insatisfechas, respectivamente, exhibiendo una sensación térmica de neutro a ligeramente cálido. El modelo de confort térmico local presenta un bajo desempeño en términos del ahorro de energía, sin embargo, en términos de la sensación térmica presenta un estado de neutralidad a un porcentaje de 81.5% de personas satisfechas. Por lo tanto, el modelo es recomendable para proporcionar confort térmico aceptable por los ocupantes, sin embargo muestra carencia en el ahorro energético en viviendas ubicadas en el clima cálido semihúmedo.

El modelo de referencia a 25°C muestra un costo de la energía eléctrica anual de \$18,084.78 y \$19,748.94 para CAN y MER respectivamente. La Tabla 4.5 muestra el comparativo del costo del consumo de la energía eléctrica para ciudades con clima cálido semihúmedo.

Tabla 4.5 Comparativo del costo de la energía eléctrica en ciudades con clima cálido semihúmedo

Modelo	CAN_25°C	CAN_MTC	Diferencia	MER_25°C	MER_MTC	Diferencia
ASHRAE 55	\$18,084.78	\$12,325.21	\$5,759.57	\$19,748.94	\$12,754.26	\$6,994.68
EN 15251	\$18,084.78	\$11,818.16	\$6,266.62	\$19,748.94	\$12,455.23	\$7,293.71
CIBSE G. A	\$18,084.78	\$11,207.10	\$6,877.68	\$19,748.94	\$11,233.11	\$8,515.83
LOCAL	\$18,084.78	\$15,133.49	\$2,951.29	\$19,748.94	\$15,289.51	\$4,459.43

En los modelos de confort térmico estático ASHRAE 55 y adaptativo EN 15251 se logra un ahorro económico hasta de \$7,000.00 pesos con el modelo adaptativo y \$6,000.00 con el modelo estático, aunque su ahorro es considerable, la sensación térmica en cada uno de ellos es poco favorable para los ocupantes de viviendas en clima cálido semihúmedo. El modelo de confort térmico CIBSE Guide A muestra el menor costo de la energía eléctrica logrando ahorrar desde \$6,000.00 hasta \$8,000.00 pesos al año, gracias a que el modelo presenta el mayor potencial de ahorro de energía en comparación a los demás modelos, además presenta el menor número de personas insatisfechas. Por otra parte, en. El modelo de confort térmico local, exhibe un ahorro en el costo económico hasta \$4,000.00 pesos al año, siendo el modelo con el menor ahorro.

Los modelos de confort térmico aplicados para las ciudades con clima cálido semihúmedo mostraron un potencial de ahorro energético al modelo de referencia a 25°C entre el 19.0-40.0%, sensaciones térmicas desde ligeramente cálido hasta ligeramente frío.

Tabla 4.6 Comparativo de los modelos en términos del potencial de ahorro de energía, sensación térmica y costo económico en ciudades con clima cálido semihúmedo

Modelos	Potencial de ahorro de energía	Sensación térmica	Costo de la energía eléctrica anual
ASHRAE 55	33.6%	Ligeramente cálido a cálido	\$12,539.74
EN 15251	35.8%	Ligeramente cálido a cálido	\$12,136.70
CIBSE G. A	40.6%	Neutro a ligeramente cálido	\$11,220.11
LOCAL	19.5%	Neutro a ligeramente cálido	\$15,211.50

Los resultados que se aprecian en la Tabla 4.6, muestran el promedio de las dos ciudades con clima cálido semihúmedo elegidas para este estudio. De acuerdo a los resultados, el modelo de confort térmico adaptativo CIBSE Guide A se muestra con mejor desempeño con el mayor ahorro energético y una sensación térmica de neutra a ligeramente cálido teniendo solo el 12.0% de personas insatisfechas. Las ciudades de Cancún y Mérida se caracterizan por tener temperaturas ambientes anual entre los 25.4-26.2°C, con una humedad relativa anual 73.0%, una velocidad del viento anual 2.8 m/s y una radiación solar anual de 218.37 W/m^2 . Los climas cálidos semihúmedos al igual que los climas húmedos, presentan altas valores en las variables climáticas a lo largo del año, por lo tanto, los ocupantes de viviendas ubicadas en este tipo de clima, requieren en mayor tiempo el uso de los sistemas de climatización. En las viviendas, los ocupantes demandan satisfacción en el confort térmico, ya que éstas en su interior la sensación de calor es insatisfactoria,

puesto a las condiciones climatológicas a la que se encuentran expuestas. El modelo de confort térmico seleccionado para las ciudades con clima cálido semihúmedo consideradas en el estudio fue el presentado por la CIBSE Guide A basado en el enfoque adaptativo. El modelo adaptativo CIBSE, determina las temperaturas de confort, con base a estas, en la evaluación térmica se encontró el 12.0% de insatisfacción de parte de los ocupantes, mientras que, en la evolución energética, el modelo logró los más altos ahorro de energía, por lo tanto, el modelo se muestra como recomendable para su aplicación en viviendas ubicadas en ciudades con clima cálido semihúmedo o condiciones similares.

4.1.3 Clima cálido seco

Ciudad Juárez y Tijuana cuentan con clima cálido seco (CONUE, 2016). En la Tabla 4.7 se presenta la nomenclatura utilizada para cada una de las ciudades.

Tabla 4.7 Nomenclatura de las ciudades con clima cálido seco

Nomenclatura	Significado
CDJ	Ciudad Juárez
TIJ	Tijuana
MCT	Modelo de confort térmico

La Figura 4.3 muestra el comparativo de las cargas de enfriamiento de los modelos de confort térmico adaptativo y estático respecto al modelo a 25°C, y la relación del nivel de confort térmico utilizando el modelo PMV/PPD en Ciudad Juárez y Tijuana.

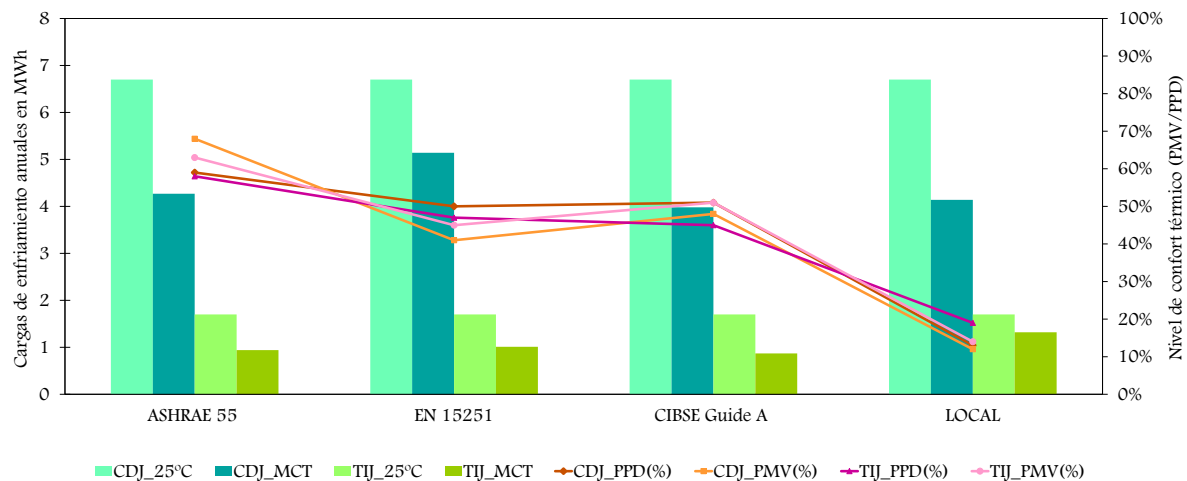


Figura 4.3 Comparación de los modelos de confort térmico en ciudades con clima cálido seco

Los resultados de las cargas de enfriamiento del modelo a 25°C para CDJ fue de 6.70 *MWh-año*, mientras que, para TIJ fue de 1.70 *MWh-año*. Los valores de las cargas de enfriamiento encontradas con el modelo a 25°C, se compararon con cada uno de los modelos de confort térmico adaptativo y estático.

El modelo de confort térmico estático ASHRAE 55, exhibe cargas de enfriamiento para CDJ_MTC de 4.27 *MWh-año*, y para TIJ_MTC de 0.94 *MWh-año*, teniendo un potencial de ahorro de energía del 40.5%, logrando disminuir las cargas de enfriamiento hasta 1.59 *MWh-año*. Por otra parte, el nivel de confort térmico que presenta el modelo fue de -2.03 para CDJ_PMV con un 59.0% para CDJ_PPD, mostrando una sensación térmica fría con tendencias a una sensación muy fría. Para TIJ_PMV se obtuvo un valor de -1.51 con un TIJ_PPD del 50.0%, mostrando una sensación térmica de ligeramente fría a fría. El modelo de confort térmico, basado en el enfoque estático muestra un alto potencial de ahorro de energía, considerando que los modelos de confort logran ahorrar entre el 10.0-50.0% del consumo de energía (Godoy, 2012; Attia y Carlucci, 2015), sin embargo, en la sensación térmica se muestra desfavorable para los ocupantes de viviendas en clima cálido seco.

Las cargas de enfriamiento obtenidas mediante el modelo de confort térmico adaptativo EN 15251, para CDJ_MTC fue de 5.14 *MWh-año*, y para TIJ_MTC fue de 1.01 *MWh-año*, por lo tanto, el modelo logra disminuir el 1.13 *MWh-año* en promedio, de las cargas de enfriamiento, teniendo un potencial de ahorro de energía del 31.9% en el clima cálido seco. Los niveles de confort térmico que muestra el modelo, para CDJ_PMV un valor de -1.23 con un 50.0% para CDJ_PPD, por lo que, la sensación térmica que presenta el modelo para esta ciudad es de ligeramente fría a fría. Por otra parte, para TIJ_PMV fue de -1.35 con 47.0% para TIJ_PPD, teniendo así una sensación térmica de ligeramente fría a fría. El modelo de confort térmico, basado en el enfoque adaptativo y presentado por el estándar europeo EN 15251 muestra buen desempeño en términos del ahorro del consumo energético, por otra parte, en la sensación térmica difiere por la preferencia de los ocupantes para viviendas ubicadas en clima cálido seco.

Los resultados de las cargas de enfriamiento encontradas por el modelo de confort térmico adaptativo CIBSE Guide A, para CDJ_MTC y TIJ_MTC fueron de 3.98 y 0.87 *MWh-año*, mostrando un potencial de ahorro de energía del 44.7%. El modelo logra disminuir el 1.77

MWh-año de las cargas de enfriamiento. El nivel de confort térmico mostrado por el modelo fue de -1.45 con un 51.0% para CDJ_PMV y CDJ_PPD respectivamente, teniendo una sensación térmica de ligeramente fría a fría. Por otra parte, el nivel de confort térmico encontrado con el modelo para TIJ_PMV fue de -1.54 con un 45.0% en TIJ_PPD, mostrando una sensación térmica de ligeramente fría a fría. Los resultados muestran que el modelo de confort térmico adaptativo CIBSE Guide A, tiene un buen desempeño en términos del ahorro energético, sin embargo, la sensación térmica desfavorece su aplicación para viviendas ubicadas en ciudades con clima cálido seco.

El modelo de confort térmico adaptativo local muestra un consumo de energía de 4.14 y 1.47 *MWh-año* para CDJ_MTC y TIJ_MTC respectivamente. La aplicación del modelo muestra un potencial de ahorro de energía del 30.3% consiguiendo disminuir hasta el 1.97 *MWh-año* de las cargas de enfriamiento. El nivel de confort térmico que presenta el modelo para CDJ_PMV fue de -0.37 con un CDJ_PPD de 13.0%, exhibiendo una sensación térmica neutra a ligeramente fría. Por otra parte, para TIJ_PMV se obtuvo un valor de -0.41 con un TIJ_PPD del 19.0%, alcanzando una sensación térmica de fría a ligeramente fría. El modelo de confort térmico local basado en el enfoque adaptativo, aplicado a viviendas ubicadas en el clima cálido seco muestra una buena sensación térmica obtenido el 84.0% satisfacción para los ocupantes, por otra parte, en términos del consumo de energía el modelo presenta alto desempeño logrando ahorrar hasta el 30.0%. Por lo tanto, el modelo es recomendable para viviendas ubicadas en clima cálido seco.

El modelo de referencia a 25°C muestra un costo de la energía eléctrica anual de \$8,710.86 y \$2,210.22 para CDJ y TIJ respectivamente. La Tabla 4.8 muestra el comparativo del costo del consumo de la energía eléctrica para ciudades con clima cálido seco.

Tabla 4.8 Comparativo del costo de la energía eléctrica en ciudades con clima cálido seco

Modelo	CDJ_25°C	CDJ_MTC	Diferencia	TIJ_25°C	TIJ_MTC	Diferencia
ASHRAE 55	\$8,710.86	\$5,551.55	\$3,159.31	\$2,210.22	\$1,222.12	\$9,88.10
EN 15251	\$8,710.86	\$6,682.66	\$2,028.20	\$2,210.22	\$1,313.13	\$8,97.09
CIBSE G. A	\$8,710.86	\$5,174.51	\$3,536.35	\$2,210.22	\$1,131.11	\$1,079.11
LOCAL	\$8,710.86	\$5,382.53	\$3,328.33	\$2,210.22	\$1,716.17	\$494.05

El modelo de confort térmico estático ASHRAE 55 muestra un ahorro económico en el costo de la energía eléctrica de \$900.00 hasta \$3,000.00 para las ciudades con clima cálido, sin embargo, este modelo no se muestra como una alternativa viable para el confort térmico. El modelo de confort térmico adaptativo EN 15251, logra ahorrar hasta \$2,000.00 pesos al año, sin embargo, al igual que el modelo estático, la sensación térmica se muestra desfavorable para los ocupantes, presentando 51.5% de insatisfacción. El modelo de confort térmico CIBSE Guide A muestra el menor costo de la energía eléctrica logrando ahorrar desde \$1,000.00 hasta \$3,000.00 pesos al año, gracias a que el modelo presenta el mayor potencial de ahorro de energía en comparación a los demás modelos, sin embargo, en la sensación térmica el modelo de confort se muestra desfavorable exhibiendo hasta el 52.0% de insatisfacción. En contraste, el modelo de confort térmico adaptativo local muestra el menor potencial de ahorro de energía, en comparación con los modelos ASHRAE 55, EN 15251 Y CIBSE Guide A, sin embargo, muestra un desempeño favorable para su aplicación puesto que permite ahorrar hasta \$3,000.00 pesos anuales.

Los modelos de confort térmico aplicados para las ciudades con clima cálido seco mostraron un potencial de ahorro energético al modelo de referencia a 25°C entre el 30.0-44.0%, sensaciones térmicas desde ligeramente cálido hasta ligeramente frío.

Tabla 4.9 Comparativo de los modelos en términos del potencial de ahorro de energía, sensación térmica y costo económico en ciudades con clima cálido seco

Modelos	Potencial de ahorro de energía	Sensación térmica	Costo de la energía eléctrica anual
ASHRAE 55	40.5%	Ligeramente frío a frío	\$3,386.84
EN 15251	31.9%	Ligeramente frío a frío	\$3,997.90
CIBSE G. A	44.7%	Ligeramente frío a frío	\$3,152.81
LOCAL	30.3%	Neutro a ligeramente frío	\$3,549.35

Los resultados que se aprecian en la Tabla 4.9, muestran el promedio de las dos ciudades con clima cálido seco elegidas para este estudio. De acuerdo a los resultados, el modelo de confort térmico adaptativo CIBSE Guide A se muestra con mejor desempeño con el mayor ahorro energético, sin embargo, su sensación puede llegar a ser fría para los ocupantes, por lo cual, no es viable su aplicación. Por otra parte, el modelo local, expone una sensación térmica neutra para los ocupantes, y aunque se encuentra con el menor ahorro de energía, su potencial de ahorro energético no difiere de los demás modelos de confort, por lo tanto, el modelo es viable para la aplicación en viviendas en clima cálido seco.

Ciudad Juárez y Tijuana se caracterizan por tener temperatura ambiente anual entre los 16.8-18.4°C, con una humedad relativa anual 52.0%, una velocidad del viento anual 3.0 *m/s* y una radiación solar anual de 218.43 *W/m²*. Los climas cálidos secos presentan altas y bajas temperaturas a lo largo del año, bajas temperaturas en invierno y altas temperaturas en verano. Los ocupantes de viviendas ubicadas en estos tipos de climas, necesitan en mayor tiempo el uso de sistemas de refrigeración y calefacción, lo que lleva a altos costos de energía eléctrica para satisfacer sus demandas de confort térmico.

El modelo de confort térmico seleccionado para las ciudades con clima cálido seco consideradas en el estudio fue el modelo local basado en el enfoque adaptativo. El modelo adaptativo local, determina las temperaturas de confort, en las cuales los ocupantes de viviendas, sentirán comodidad, tanto el confort como en el consumo de energía ya que las temperaturas de confort operativas afectan en el costo económico al utilizar sistemas de climatización. De acuerdo al modelo adaptativo local en la evaluación térmica se encontró el 16.0% de insatisfacción de parte de los ocupantes, mientras que, en la evaluación energética, el modelo logró considerables ahorros de energía, por lo tanto, el modelo se muestra como recomendable para su aplicación en viviendas ubicadas en ciudades con clima cálido seco o condiciones similares.

4.1.4 Clima cálido seco extremoso

Las ciudades de Hermosillo y Mexicali cuentan con clima cálido seco (CONUE, 2016). En la Tabla 4.10 se presenta la nomenclatura utilizada para cada una de las ciudades.

Tabla 4.10 Nomenclatura de las ciudades con clima cálido seco extremoso

Nomenclatura	Significado
HER	Hermosillo
MEXI	Mexicali
MCT	Modelo de confort térmico

La Figura 4.4 muestra el comparativo de las cargas de enfriamiento de los modelos de confort térmico adaptativo y estático respecto al modelo a 25°C, y la relación del nivel de confort térmico utilizando el modelo PMV/PPD para Hermosillo y Mexicali.

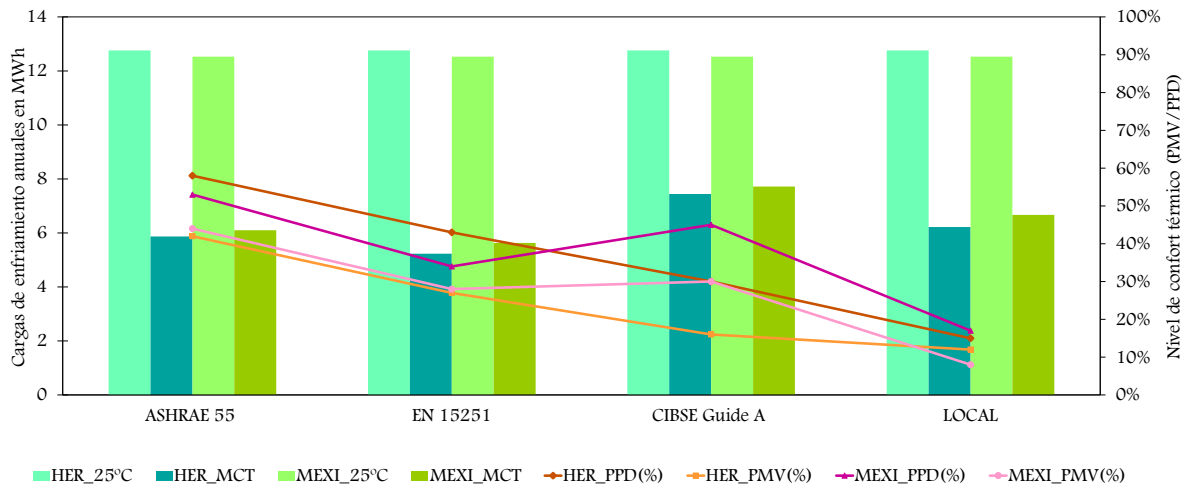


Figura 4.4 Comparación de los modelos de confort térmico en ciudades con clima cálido seco extremo

Las cargas de enfriamiento encontradas por cada uno de los modelos de confort térmico estático y adaptativo fueron comparado con las cargas de enfriamiento obtenidas mediante el modelo a 25°C. Los resultados del modelo HER_25°C fue de 12.76 *MWh-año*, por otra parte, para MEXI_25°C fue de 12.53 *MWh-año*.

Las cargas de enfriamiento obtenidas por el modelo de confort térmico estático ASHRAE 55 fue de 6.63 *MWh-año*, para HER_MTC y 7.10 *MWh-año*, para MEXI_MTC. El modelo basado en el enfoque estático muestra un potencial de ahorro de energía del 45.7% y logra reducir hasta el 5.43 *MWh-año*, de las cargas térmicas de enfriamiento. El nivel del confort térmico que muestra el modelo estático ASHRAE 55, para la HER_PMV fue un valor de -1.27 y un valor para HER_PPD del 53.0% teniendo una sensación térmica de ligeramente frío a frío. Por otra parte, para MEXI_PMV fue de -1.32 con un valor MEXI_PPD del 58.0% teniendo una sensación térmica de ligeramente frío a frío. El modelo muestra un buen desempeño en términos del potencial de ahorro de energía, sin embargo, en la sensación térmica se muestra poco desfavorable para su aplicación en viviendas en climas cálido seco extremo.

El modelo de confort térmico basado en el enfoque adaptativo EN 15251, muestra las cargas de enfriamiento para HER_MTC de 10.23 *MWh-año* y para MEXI_MTC de 10.63 *MWh-año*, presentando un potencial de ahorro de energía de 17.5%, logrando disminuir hasta el

2.22 *MWh-año*, de las cargas de enfriamiento. El nivel del confort térmico que muestra el modelo adaptativo EN 15251, para HER fue un valor del PMV del -0.80 y un porcentaje del PPD del 43.0% teniendo una sensación térmica de neutro a ligeramente fría hasta fría. Por otra parte, para la MEXI fue un valor del PMV de -0.85 y un porcentaje del PPD del 34.0% teniendo una sensación térmica de neutro a ligeramente fría hasta fría. El modelo muestra menor desempeño del potencial de ahorro de energía en comparación del modelo estático, sin embargo, en la sensación térmica muestra neutralidad, sin embargo, puede llegar a tener una sensación fría, por otra parte, se aprecia un alto porcentaje de personas insatisfechas, lo que hace que el modelo no sea el más recomendable para el clima cálido seco extremoso.

Los resultados del modelo de confort térmico adaptativo CIBSE Guide A, fueron de 7.44 y 7.72 *MWh-año* para HER_MTC y MEXI_MTC, mostrando un potencial de ahorro de energía 40.0% logrando disminuir las cargas de enfriamiento hasta 5.06 *MWh-año*. El nivel de confort térmico que presenta el modelo adaptativo CIBSE Guide A, fue un HER_PMV de -0.47 con un CAN_PPD del 30.0% de personas insatisfechas, mostrando una sensación térmica de neutro a ligeramente fría hasta fría. Para, MEXI_PMV fue de -0.91 con un MEXI_PPD del 45.0% de personas insatisfechas, por lo tanto, la sensación térmica que muestra es de neutro a ligeramente fría hasta fría. Por lo tanto, el modelo adaptativo CIBSE Guide A, exhibe un buen desempeño en términos del potencial de ahorro de energía, sin embargo, la sensación térmica puede llegar a ser fría, teniendo hasta 38.0% de insatisfacción por parte de los ocupantes de viviendas ubicadas en clima cálido seco extremoso.

Los resultados de las cargas de enfriamiento utilizando el modelo de confort térmico adaptativo local fueron de 6.67 y 6.53 *MWh-año* para HER_MTC y MEXI_MTC, mostrando un potencial de ahorro de energía del 47.8% logrando disminuir el 6.05 *MWh-año* de las cargas de enfriamiento. El nivel de confort térmico que muestra el modelo local fue para HER_PMV de 0.35 con un HER_PPD de 15.0% de personas insatisfechas, teniendo así una sensación térmica de neutro a ligeramente cálido. Mientras que, para MEXI_PMV y MEXI_PPD de 0.24 y un 17.0% de personas insatisfechas, respectivamente, exhibiendo una sensación térmica de neutro a ligeramente cálido. El modelo de confort térmico local presenta el más alto desempeño en términos del ahorro de energía, mientras que, en

términos de la sensación térmica presenta un estado de neutralidad con un porcentaje de 84.0% de satisfacción.

El modelo de referencia a 25°C muestra un costo de la energía eléctrica anual de \$16,589.63 y \$16,290.90 para HER y MEXI respectivamente. La Tabla 4.11 muestra el comparativo del costo del consumo de la energía eléctrica para ciudades con clima cálido semihúmedo.

Tabla 4.11 Comparativo del costo de la energía eléctrica en ciudades con clima cálido seco extremoso

Modelo	HER_25°C	HER_MTC	Diferencia	MEXI_25°C	MEXI_MTC	Diferencia
ASHRAE 55	\$16,589.63	\$8,619.85	\$7,969.78	\$16,290.90	\$9,230.91	\$7,059.69
EN 15251	\$16,589.63	\$13,300.30	\$3,289.33	\$16,290.90	\$13,820.36	\$2,470.24
CIBSE G. A	\$16,589.63	\$9,672.95	\$6,916.68	\$16,290.90	\$10,023.91	\$6,266.61
LOCAL	\$16,589.63	\$8,498.84	\$8,099.79	\$16,290.90	\$8,671.85	\$7,618.75

En los modelos de confort térmico estático ASHRAE 55 y los adaptativos EN 15251 y CIBSE Guide A, se logra un ahorro económico hasta de \$7,000.00 pesos con el modelo estático y \$3,000.00 hasta \$6,000.00 con los modelos adaptativos, presentando ahorros considerables, por otra parte, la sensación térmica en cada uno de ellos es poco favorable para los ocupantes de viviendas en clima cálido semihúmedo. El modelo de confort térmico local, exhibe un ahorro en el costo económico hasta \$7,000.00 pesos al año, al igual que el modelo estático, sin embargo, su sensación térmica es mayormente favorable para los ocupantes.

Los modelos de confort térmico aplicados para las ciudades con clima cálido semihúmedo mostraron un potencial de ahorro energético al modelo de referencia a 25°C entre el 17.0-40.0%, sensaciones térmicas desde ligeramente cálido hasta ligeramente frío.

Tabla 4.12 Comparativo de los modelos en términos del potencial de ahorro de energía, sensación térmica y costo económico en ciudades con clima cálido seco extremoso

Modelos	Potencial de ahorro de energía	Sensación térmica	Costo de la energía eléctrica anual
ASHRAE 55	45.7%	Ligeramente frío a frío	\$8,925.38
EN 15251	17.5%	Neutro a frío	\$13,560.34
CIBSE G. A	40.0%	Neutro a frío	\$9,848.47
LOCAL	47.8%	Neutro a ligeramente cálido	\$8,580.85

Los resultados que se aprecian en la Tabla 4.12, muestran el promedio de las dos ciudades con clima cálido seco extremoso elegidas para este estudio. De acuerdo a los resultados, el modelo de confort térmico adaptativo local se muestra con mejor desempeño con el mayor ahorro energético y una sensación térmica de neutra a ligeramente cálido teniendo solo el 16.0% de personas insatisfechas.

Las ciudades de Hermosillo y Mexicali se caracterizan por tener temperatura ambiente anual entre los 22.8-23.7°C, con una humedad relativa anual 38.0%, una velocidad del viento anual 2.5 *m/s* y una radiación solar anual de 232.09 *W/m²*. Los climas cálidos secos extremosos, al igual que los climas secos presentan altas y bajas temperaturas a lo largo del año, bajas temperaturas en invierno y altas temperaturas en verano. Para satisfacer las demandas de confort, debido a las altas condiciones climáticas anuales, los ocupantes de viviendas, utilizan sistemas de climatización lo que conlleva a altos costos eléctricos y por ende costos económicos. El modelo de confort térmico seleccionado para las ciudades con clima cálido seco extremoso consideradas en el estudio fue el modelo local basado en el enfoque adaptativo. El modelo adaptativo local, determina las temperaturas de confort, en las cuales los ocupantes de viviendas, sentirán comodidad, tanto el confort como en el consumo de energía ya que las temperaturas de confort operativas afectan en el costo económico al utilizar sistemas de climatización. De acuerdo al modelo adaptativo local en la evaluación térmica se encontró el 17.0% de insatisfacción de parte de los ocupantes, mientras que, en la evaluación energética, el modelo logró considerables ahorros de energía, por lo tanto, el modelo se muestra como recomendable para su aplicación en viviendas ubicadas en ciudades con clima cálido seco o condiciones similares.

En general el modelo de confort térmico adaptativo CIBSE Guide A mostró ser el modelo con mejor adaptabilidad en ciudades con clima cálido húmedo y semihúmedo esto debido a que las condiciones que presentan son similares. Para ciudades con clima cálido seco el modelo CIBSE mostró mayor potencial, sin embargo, adolece de buena sensación térmica. Por otra parte, el modelo local en el clima cálido seco y seco extremoso mostró ser el recomendable ya que ayuda a disminuir el consumo de energía y exhibe la mejor sensación térmica, esto se debe a que los modelos fueron obtenidos mediante condiciones climáticas similares.

CAPÍTULO V

Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presenta las conclusiones del proyecto, así mismo, las recomendaciones para trabajos futuros.

5.1 Conclusiones

En este trabajo se realizó un estudio comparativo entre los modelos de confort térmico estático y adaptativo en términos del potencial de ahorro de energía, la sensación térmica y el costo de la energía eléctrica anual, de lo cual se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- ✓ Se realizó el estudio comparativo entre el modelo de referencia a 25°C y los modelos de confort térmico estático (ASHRAE 55) y adaptativos (EN 15251, CIBSE Guide A y local) en términos del potencial de ahorro de energía, la sensación térmica y el costo económico para los cuatro climas cálidos de México.
- ✓ Las ciudades de Acapulco, Villahermosa, Cancún, Mérida, Tijuana, Ciudad Juárez, Hermosillo y Mexicali, se seleccionaron para representar el clima cálido húmedo, semihúmedo, seco y seco extremoso respectivamente.
- ✓ La edificación seleccionada para el estudio fue la reportada por Heard en 1993 y Álvarez *et al.*, en 2014 la cual consistió en un prototipo de vivienda de interés social que sirvió como base para la elaboración de la norma NOM-020-ENER-2011.
- ✓ El modelo de confort térmico estático ASHRAE 55, en ciudades con clima cálido húmedo (Acapulco y Villahermosa) y clima cálido subhúmedo (Cancún y Mérida) mostró tener un alto potencial anual de ahorro de energía con el 33.0% de disminución en las cargas de enfriamiento. En el costo económico de la energía eléctrica logró reducir entre \$6,000.00 a \$7,000.00 pesos anuales. Sin embargo, en el confort térmico, el modelo presentó un 62.0% de disconfort en los ocupantes. Por lo tanto, el modelo no es recomendable para ocupantes de viviendas de interés social en condiciones climáticas cálidas húmedas y semihúmedas.
- ✓ El modelo de confort térmico estático ASHRAE 55, en ciudades con clima cálido seco (Ciudad Juárez y Tijuana) y clima cálido seco extremoso (Hermosillo y Mexicali) exhibió un buen potencial de ahorro de energía de 40.5-45.7%. Por otra parte, en el costo económico de la energía eléctrica, el modelo de confort redujo desde \$2,000.00 hasta \$7,000.00 pesos anuales. El modelo presenta un 57.0% de

insatisfacción en el confort térmico. Aunque sí, el modelo estático ASHRAE 55 presenta ahorros significativos en la energía, carece de una buena sensación térmica para los ocupantes, por lo tanto, se vuelve no recomendable para su aplicación en viviendas de interés social ubicadas en condiciones climáticas similares.

- ✓ El modelo de confort térmico adaptativo EN 15251, en ciudades con clima cálido húmedo (Acapulco y Villahermosa) y clima cálido subhúmedo (Cancún y Mérida), mostró un desempeño de 35.0-37.0% en el potencial de ahorro de energía anual. El modelo logró ahorrar \$6,000.00 a \$8,000.00 pesos anuales del costo económico de la energía eléctrica. Por otra parte, en el confort térmico presentó el 29.0% de insatisfacción en la sensación térmica de los ocupantes. Por lo tanto, el modelo adaptativo presentado por el estándar EN 15251 se vuelve poco favorable para su aplicación en viviendas de interés social ubicadas en condiciones climáticas cálidas húmedas y semihúmedas.

- ✓ El modelo de confort térmico adaptativo EN 15251, en ciudades con clima cálido seco (Ciudad Juárez y Tijuana) y clima cálido seco extremoso (Hermosillo y Mexicali) mostró un desempeño en el potencial de ahorro de energía de 17.5-31.9%. Por otra parte, en el costo económico de la energía eléctrica, el modelo de confort redujo desde \$1,000.00 hasta casi \$3,000.00 pesos anuales. El modelo presenta un 44.0% de insatisfacción en el confort térmico. Por lo tanto, el modelo adaptativo EN 15251, para viviendas en condiciones climáticas cálidas secas y secas extremosas puede mostrar bajos ahorro de energía, y sensaciones térmicas desfavorables para los ocupantes siendo no recomendable para su aplicación.

- ✓ El modelo de confort térmico adaptativo CIBSE Guide A, en ciudades con clima cálido húmedo (Acapulco y Villahermosa) y clima cálido subhúmedo (Cancún y Mérida) exhibió un potencial de ahorro de energía anual de 40.6-43.1%. En el costo económico de la energía eléctrica logró reducir entre \$7,000.00 hasta casi \$10,000.00 pesos anuales. En el confort térmico, el modelo presentó un 13.0% de disconfort en los ocupantes. Por lo tanto, el modelo se vuelve el recomendable para su aplicación en viviendas de interés social en condiciones climáticas cálidas húmedas y semihúmedas.

- ✓ El modelo de confort térmico adaptativo CIBSE Guide A, en ciudades con clima cálido seco (Ciudad Juárez y Tijuana) y clima cálido seco extremo (Hermosillo y Mexicali) demostró un potencial de ahorro de energía de 40.0-44.7%. Por otra parte, en el costo económico de la energía eléctrica, el modelo de confort redujo desde \$2,000.00 hasta casi \$7,000.00 pesos anuales. El modelo presenta un 43.0% de insatisfacción en el confort térmico. El modelo adaptativo de acuerdo al ahorro de energía se muestra como una alternativa viable para su aplicación, no obstante, al carecer de satisfacción adecuada para los ocupantes de viviendas de interés social se vuelve poco recomendable.
- ✓ El modelo de confort térmico adaptativo local, en ciudades con clima cálido húmedo (Acapulco y Villahermosa) y clima cálido subhúmedo (Cancún y Mérida), presentó un desempeño del 6.5-19.5% en el potencial de ahorro de energía anual. El modelo mostró los más bajos ahorros en el costo económico de la energía eléctrica siendo de \$1,000.00 a \$3,000.00 pesos al año. Por otra parte, en el confort térmico presentó el 16.0% de insatisfacción en la sensación térmica de los ocupantes. Por lo tanto, el modelo adaptativo se mostró como una alternativa para un adecuado confort en los ocupantes, sin embargo, para su viabilidad generó pocos ahorros económicos, siendo no recomendable para su aplicación.
- ✓ El modelo de confort térmico adaptativo local, en ciudades con clima cálido seco (Ciudad Juárez y Tijuana) y clima cálido seco extremo (Hermosillo y Mexicali) mostró un desempeño en el potencial de ahorro de energía de 30.3-47.8%. En el costo económico de la energía eléctrica redujo entre \$1,000.00 hasta casi \$8,000.00 pesos anuales. En el confort térmico, el modelo presentó un 16.0% de disconfort en los ocupantes. El modelo adaptativo local fue el recomendable para su aplicación en viviendas de interés social ubicadas en climas calados secos y secos extremos.
- ✓ El modelo adaptativo CIBSE Guide A, mostró tener alto desempeño en disminución de las cargas de enfriamiento, satisfacción favorable para los ocupantes y el más bajo costo de la energía eléctrica en las viviendas de interés social ubicadas en ciudades con climas cálidos húmedos y semihúmedos.

- ✓ El modelo adaptativo local, mostró tener un buen desempeño en disminución de las cargas de enfriamiento, satisfacción favorable para los ocupantes y ahorros considerables en el costo de la energía eléctrica en las viviendas de interés social ubicadas en ciudades con climas cálidos secos y secos extremosos.
- ✓ La aplicación del modelo de confort térmico estático mostró un potencial de ahorro de energía de casi el 40.0%, mientras que, los modelos de confort térmico adaptativos mostraron potenciales de ahorro de energía del 26.0-47.0%. Por otra parte, los modelos adaptativos muestran alto desempeño en sensación térmica llegando a la sensación neutra teniendo un máximo de insatisfacción del 11.0%, mientras que, el modelo estático muestra sensaciones desde frío hasta caluroso teniendo un máximo de insatisfacción del 64%. Por lo tanto, los modelos adaptativos presentan mejor desempeño en comparación a los modelos estáticos.

5.2 Recomendaciones

De acuerdo a los resultados obtenidos se plantean las siguientes recomendaciones para trabajos futuros.

- ✓ Validación en campo de los potenciales de ahorro de energía y del incremento en el confort térmico de acuerdo a lo obtenido en este trabajo.
- ✓ Realizar un estudio similar para edificaciones no residenciales, de acuerdo a la edificación a la que hace referencia la NOM-008-ENER-2001.
- ✓ Estudiar el impacto que presentan los modelos de confort térmico en viviendas ubicados en climas templados.
- ✓ Estudiar el impacto que presentan los modelos de confort térmico en el uso de sistemas de calefacción aplicados en viviendas ubicadas en climas fríos de México.

- ✓ Aplicar métodos pasivos en edificios residenciales y no residenciales en conjunto con modelos de confort térmico adaptativos para VN, estudiando el ahorro energético que en conjunto generan, la sensación térmica y el costo de la energía eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta García, M.C., Salinas Montes, A. (2009). “Geografía Quinto grado”. *Secretaría de educación pública*.
- Agencia Europea del Medio Ambiente (2015). “*Emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo*”.
- Álvarez García, G.S., Shah, B., Rubin, F., Gilbert, H.E., Martín Domínguez, I.R., Shickman, K. (2014). “Assesing energy savings from "Cool Roofs" on residential and non-residential buildings in Mexico”. CONUEE.
- Allouhi, A., El Fouih, Y., Kousksou, T., Jamil, A., Zeraouli, Y., Mourad, Y. (2015). “Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends”. *Journal of Cleaner Production* 109, 118–130.
- Amasyali, K., El-gohary, N. M. (2016). “Energy-related values and satisfaction levels of residential and of office building occupants”. *Building and Environment*, 95, 251–263.
- Amin, R., Teli, D., James, P., Bourikas, L. (2016). “The influence of a student’s “home” climate on room temperature and indoor environmental controls use in a modern hall of residence”. *Energy and Buildings*, 119, 331–339.
- Araújo V. M. D., Araújo E. H. S. (1999) The applicability of ISO 7730 for the assessment of the thermal conditions of users of the buildings in Natal-Brazil. *Raw, C. Aizlewood and P. Warren, editors. Proc Indoor Air '99. Edinburgh*, 2,148-153.
- Arballo, B., Kuchen, E., Alaminio Naranjo, Y., Alonso Frank, A. (2016). “Evaluación de modelos de confort térmico para interiores”. *Desarrollo tecnológico regionalmente sustentable*.
- ASHRAE (1989). “1989 ASHRAE Handbook –Fundamentals, Atlanta”. American Society of Heating, Refrigerating, and Air–Conditioning Engineers, Inc.
- ASHRAE 55 (1992). “Condiciones ambientales térmicas para la ocupación humana”. Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado.
- ASHRAE (2005). “2005 ASHRAE Handbook–Fundamentals”. American Society of Heating, Refrigerating, and Air–Conditioning Engineers, Inc.
- ASHRAE (2010). “Norma ASHRAE 55–2010, en Condiciones ambientales térmicas para la ocupación humana”. *ASHRAE Atlanta, GA*.
- Attia, S., Carlucci, S. (2015). “Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in Hot Climate”. *Energy and Buildings*, 102, 117–128.
- Auliciems, A. (1981). “Towards a Psycho-Physiological Model of Thermal Perception”. *Department of Geography, University of Queensland*, 25, 109–122.
- Azizpour, F., Moghimi, S., Salleh, E., Mat, S., Lim, C.H., Sopian, K., (2013).” Thermal comfort assessment of large-scale hospitals in tropical climates: A case study of

- University Kebangsaan Malaysia Medical Centre (UKMMC)". *Energy and Buildings*, 64, 317–322.
- Barona Díaz, E., Sánchez Rodríguez, F. (2005). "Características de la vivienda de interés básica, social y económica urbana en Puebla-México".
- Barbhuiya, S., Barbhuiya, S. (2013). Thermal comfort and energy consumption in a UK educational building. *Building and Environment*, 68,1–11.
- Bastide, A., Lauret, P., Garde, F., Boyer, H. (2006) "Building energy efficiency and thermal comfort in tropical climates". *Energy and Buildings*, 38(9) 1093–1103.
- Blender, M. (2015). "Arquitectura y Energía". *Portal de eficiencia energética y sostenibilidad en arquitectura y edificación*.
- Briceño Bernad, I. (2018). "Prototipo de sistema de torre de viento para enfriamiento híbrido en clima cálido. Caso de estudio vivienda urbana en Sinaloa México".
- Brooks, J., Kumar, S., Goyal, S., Subramany, R., Barooah, P. (2015). "Energy-efficient control of under-actuated HVAC zones in commercial buildings". *Energy and Buildings*, 93, 160–168.
- Castilla, M., Alvarez, J.D., Berenguel, M., Pérez, M., Guzmán, J.L. (2010). "Técnicas de control del confort en edificaciones". *Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial RIAI*, 7, 5–24.
- Cengel, Y. (2007). "Transferencia de Calor y Masa". 3rd ed. Mc Graw Hill.
- Chatellier L., McNeil M. (2019). "Consumo de electricidad de edificios no residenciales en México: La importancia del sector de servicios". CONUEE.
- Charles, K.E. (2003). "Fanger's thermal confort and draught models". *Institute for research in construction*.
- Chenari, B., Dias Carrilho, J., & Gameiro da Silva, M. (2016). "Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1426–1447.
- Cheung, T., Schiavon, S., Parkinson, T., Peixian, L. (2019). "Analysis of the accuracy on PMV – PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II". *Building and Environment*, 153, 205–217.
- Chevez Delgado, S. (1997). "Guías alimentarias para la educación nutricional en Costa Rica", 1ra ed. San José.
- CIBSE Guide A: Environmental Design. (2006). "The Chartered Institution of Building Services Engineers". CIBSE Editorial England.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (2016). "Uso de aire acondicionado en viviendas de interés social".
- Consejo Nacional de Población (2013). "Proyecciones de la población de México 2010-2050 y estimaciones 1990-2009".
- Damiati, S.A., Zaki, S., Rijal, H., Wonorahardjo, S. (2016). "Field study on adaptive thermal comfort in office buildings in Malaysia, Indonesia, Singapore, and Japan during hot and humid season". *Building and Environment*, 109, 208–223.

- Danés Shah, M. S., Tomonobu, S., Ibrahim Martin, A., Ahmadi, M., Montin Howlader, A. (2019). “A managed framework for energy-efficient building”. *Journal of Building Engineering*, 21, 120–128.
- deDear, R., Brager, G., Cooper, D. (1997). “Developing an adaptive model of thermal comfort and preference”. *Final Report ASHRAE RP*, 884.
- deDear, R., Brager, G. (1998) “Developing an adaptive model of thermal comfort and preference”. *ASHRAE Trans.* 104,145–167.
- Djongyang, N., Tchinda, R., Njomo, D. (2010). “Thermal comfort: A review paper”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2626–2640.
- Doherty, T.J., Arens, E. (1988). “Evaluation of the physiological bases of thermal comfort models”. *Center for the Built Environment*.
- EN 15251 (2007). "Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics". CEN, Brussels, Belgium.
- Energy Plus. (2013). EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations.
- Enescu, D. (2017) “A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79,1353-1379.
- Fanger, P.O. (1970). “Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering”. Danish Technical Press, Copenhagen.
- Fisher, D. E., C. O. Perderson (1997). “Convective Transfer in Building Energy and Thermal Load Calculations”, *ASHRAE Transactions*; 103;2.
- Godoy Muñoz A. (2012). “El confort térmico adaptativo. Universidad Politécnica de Cataluña”.
- Griego, D., Krarti, M., Hernández Guerrero, A. (2015). “Energy efficiency optimization of new and existing office buildings in Guanajuato, Mexico”. *Sustainable Cities and Society*, 17, 132–140.
- Heard, C. (1993). “Notes on the typical house description as used with SUNCODE”.
- Hernández Castillo, P. (2016). “Análisis Térmico del Efecto de la Razón de Aspecto Área Vidriada-Pared (RAVP) en el Consumo Energético de Edificaciones No Residenciales”. *Tesis de maestría, Ing. Mecánica*, CENIDET, México.
- Humphreys, M.A. (1997). “An adaptive approach to thermal comfort criteria”. *Naturally ventilated buildings: buildings for the senses, the economy and society*.
- Incropera, F., DeWitt, D. (2002). “Fundamentos de transferencia de calor”. 4a. ed. Prentice Hall.
- Indraganti, M. (2010). “Using the adaptive model of thermal comfort for obtaining indoor neutral temperature: Findings from a field study in Hyderabad, India”. *Building and Environment*, 45, 519–536.

- Indraganti, M., Ooka, R., & Rijal, H. B. (2013). Field investigation of comfort temperature in Indian office buildings: A case of Chennai and Hyderabad. *Building and Environment*, 65, 195–214.
- Indraganti, M., Ooka, R., Rijal, H. B., Brager, G. S. (2014). “Adaptive model of thermal comfort for offices in hot and humid climates of India”. *Building and Environment*, 74, 39–53.
- International Energy Agency. (2014). “Key world energy statistics”.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2016). “Indicadores de Población en México”.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017). “Indicadores de Población en México”.
- Ionescu, C., Baracu, T., Vlad, G.-E., Necula, H., Badea, A. (2015). “The historical evolution of the energy efficient buildings”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 243–253.
- ISO7730 (1994). “Ambiente térmico moderado. Determinación de los índices PMV y PPD y especificación de las condiciones de confort térmico”. *Organización Internacional de Normalización*.
- Jingyi W., Zhe, W., deDear, R., Maohui, L., Ghahramani, A., Borong, L. (2018). “The uncertainty of subjective thermal comfort measurement”. *Energy and Buildings*, 181, 38–49.
- Kuchen, E. (2009). “EEC – Eficiencia Energética Y Confort En El Espacio de Trabajo.” *Andinas Digital*. Vol. 01.
- LG Electronics (2015). “Zonas geográficas para la elección de Aire acondicionado LG” CDMX, <https://www.lg.com/mx/soporte/ayuda-producto/CT30015000-1396561935064>
- Liu, J., Heidarinejad, M., Gracik, S., Jelena, S., (2015). “The impact of exterior surface convective heat transfer coefficients on the building energy consumption in urban neighborhoods with different plan area densities”. *Energy and Buildings*, 86, 449–463.
- López Pérez, L. A., Flores Prieto, J. J., Ríos Rojas, C. (2017). Modelo de confort térmico adaptativo en Tuxtla Gutiérrez. *Semana nacional de energía solar*.
- López Pérez, L.A, Flores Prieto, J. J., Ríos Rojas, C. (2019). “Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid climate”. *Building and Environment*, 150, 181–194.
- Magaña Almaguer, H.D., Pérez Tello, C., Suástegui, J.A., Campbell, H., Barrios Núñez, A. (2013). “El clima y su impacto en el consumo de energía eléctrica en las viviendas de México”. *Ecodiseño y sostenibilidad*, 66-73.
- Manu, S., Shukla, Y., Rawal, R., Thomas, L. E., de Dear, R. (2016). “Field studies of thermal comfort across multiple climate zones for the subcontinent: India Model for Adaptive Comfort (IMAC)”. *Building and Environment*, 98, 55–70.
- Mayagoitia, F. (2011). “Edificación residencial sustentable en América del Norte- Documento4”. Edificación Sustentable.

- Mayer, E. (1997). A new correlation between predicted mean votes (PMV) and predicted percentages of dissatisfied (PPD). *Proc Healthy Buildings/IAQ '97, Bethesda*, 2, 189-194.
- Martínez, M. A., Tort, A.I., Cho, S., Vivancos, J.L. (2016). “Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 70–85.
- McCartney, K.J., Nicol F., J. (2002). “Developing an adaptive control algorithm for Europe” *Energy and Buildings*, 34, 623-635.
- Mirsadeghi, M., Cóstola, D., Blocken, B., Hensen, J. (2013). “Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty”. *Applied Thermal Engineering*. 56; 134–151.
- Mishra Kumar, A., Ramgopal, M., (2015). “An adaptive thermal comfort model for the tropical climatic regions of India (Köppen climate type A)”. *Building and Environment*, 85, 134–143.
- Montes, F. M., Muñoz, D. M., Rovira, A. A. (2014). “Ingeniería térmica”. Ed UNED.
- Morillón Gálvez, D. (2007). “Habitabilidad térmica en la vivienda”. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*.
- Nguyen, A.T., Singh, M.K., Reiter, S. (2012). “An adaptive thermal comfort model for hot humid South-East Asia”. *Building and Environment*, 56,291-300.
- Nicol, J.F., Humphreys (2002). “Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings”. *Energy and Buildings*, 34, 563–572.
- Nicol, J.F., Humphreys, M. A. (1973). “Thermal comfort as part of a self-regulating system”. *Building research and practice*, 1, 174–179.
- Nicol, J.F., Humphreys, M. A., Roaf, S. (2012). “Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice, Routledge, Abingdon”.
- Nicol, J.F., Roaf, S. (1996). “Pioneering new indoor temperature standards: the Pakistan project”. *Energy and Buildings*, 23, 169–174.
- Olsen, B., W. (2012). “Revision of EN 15251: Indoor Environmental Criteria”. *Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark*.
- Oropeza, P. I. (2016) “Comparative economic assessment of the energy performance of air-conditioning within the Mexican residential sector”. *Energy reports*, 2, 147–154.
- Oropeza, P. I., Petzold Rodríguez, A. H., Bonilla López, C., (2017). “Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling”. *Energy and Buildings*, 145, 251–258.
- Özisik, M. N. (1980). “Heat Conduction. Wiley–interscience”.
- Pasquevich, D. (2016). “La creciente demanda mundial de energía frente a los riesgos ambientales”. *Asociación Argentina para el progreso de la ciencia*.

- Perez, L. L., Ortiz, J., Pout, C. (2008). "A review on buildings energy consumption information". *Energy and Buildings*, 40, 394–398.
- PROMÉXICO (2016). "Geografía y clima".
- Quiston, M., F., Splitter, J. (1989). "Cooling and Heating Load Calculation Manual. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineerin". *Segunda Edición. Atlanta, Georgia. USA.*
- Ramírez, G. (2018). "Diferencia entre edificación y construcción". *Arquitectura Hotelera*.
- Rincón, J., Bojórquez, G., Calderón, C., Fuentes, V. (2017) "Thermal comfort indoors: A factor that influences the environmental perception of the occupants (Case study: Student community of the Autonomous University of Baja California)". *Modern Journal of Language Teaching Methods*.
- Rodríguez, M. N., Nájera, T. M., Alarcón, H.O., Martín, D. I. (2015). "Análisis térmico de edificaciones mediante el uso de simulaciones dinámicas". ANES XXXIX Semana Nacional de Energía solar.
- Rupp Forgianari, R., Vásquez Giraldo, N., Lamberts, R. (2015). "A review of human thermal comfort in the built environment". *Energy and Buildings* 105, 178–205.
- Saladié, O. (2019). "Módulos Universitarios en ciencia del desarrollo sostenible". *Desenvolupament sostenible*.
- Secretaria de Energía (2017) Balance Nacional de Energía 2017.
- Solana Martínez, L. (2011). "La percepción del confort. Análisis de los parámetros de diseño y ambientales mediante Ingeniería Kansei: Aplicación a la biblioteca de Ingeniería del Diseño (UPV)". *Universidad Politécnica de Valencia*.
- Sparrow, E.M., J. W., Ramsey, E. A., Mass. (1979). "Effect of Finitive Width on Heat Transfer and Fluid Flow about an Inclined Rectangular Plate". *Journal Heat Transfer*, 101;204.
- Taleghani, M., Tenpierik, M., Kuvers, S., van den Dobbelsteen, A. (2013). "A review into thermal comfort in buildings". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 201–215.
- Toe, D.H.C, Kubota, T. (2013). "Development of an adaptive thermal comfort equation for naturally ventilated buildings in hot-humid climates using ASHRAE RP-884 database". *Frontiers of Architectural Research*, 2, 278–91.
- Torres, Aguilar, C., Serrano Arellano, J., Macias Melo, E., Trejo Torres, B. (2016). "Simulación energética de prototipo de Vivienda de interés social para evaluar el confort térmico". *Aplicaciones de la Ingeniería*, 3, 83–89.
- Vakiloroaya, V., Samali, B., Fakhari, A., Pishghadam, K. (2014) "A review of different strategies for HVAC energy saving". *Energy Conversion Management* 77, 738-754.
- Walton, G. N. (1981). "Passive Solar Extension of the Building Loads Analysis and System Thermodynamics (BLAST) Program". Technical Report, United States Army Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, IL.

- Wei, S., Li, M., Lin, W., Sun, Y. (2010). "Parametric studies and evaluations of indoor thermal environment in wet season using a field survey and PMV–PPD method". *Energy and Buildings*, 42(6), 799–806.
- Yoon, D.W., Sohn, J. Y., Cho, K. H. (1999). "The comparison on the thermal comfort sensation between the results of questionnaire survey and the calculation of the PMV values". *G. Raw, C. Aizlewood and P. Warren, editors. Proc Indoor Air '99. Edinburgh, 2*, 137–141.
- Young Yun, G. (2018). "Influences of perceived control on thermal comfort and energy use in buildings". *Energy and Buildings*. 158, 822–830.