



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Cuantificación del Ahorro Energético de una
Vivienda de Bajo Consumo

presentada por

Ing. Luis Rey González Vergara

como requisito para la obtención del
grado de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Mecánica**

Director de tesis
Dra. Yvonne Chávez Chena

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto de 2018.

Cuernavaca, Mor., 28/junio /2018

OFICIO No. DIM/184/2018

Asunto: Aceptación de documento de tesis

C. DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Ing. Luis Rey González Vergara con número de control M16CE063, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "**Cuantificación del ahorro energético de una vivienda de bajo consumo**" y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS



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

REVISOR 1



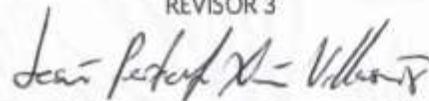
DR. JESÚS ARCE LANDA
Doctor en Ingeniería
6170951

REVISOR 2



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

REVISOR 3



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

C.p. Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Estudiante
Expediente

Iniciales JD/secretaría

Cuernavaca, Mor. 29 de junio de 2018
OFICIO No. SAC/314/2018

Asunto: Autorización de impresión de tesis

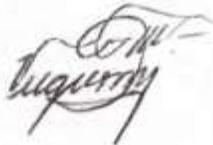
ING. LUIS REY GONZÁLEZ VERGARA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "**Cuantificación del ahorro energético de una vivienda de bajo consumo**", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

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

ATENTAMENTE

EXCELENCIA EN EDUCACIÓN TECNOLÓGICA®
"CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DE MÉXICO"



DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



SEP TecNM
CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA

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

GVGR/mcr

DEDICATORIAS

A mi familia:

Muy en especial a mi señor padre **Jesús González** y mi señora madre **M. Eugenia Vergara** por ser quienes fueron la principal razón de éste propósito de vida, gracias infinitamente... que el Señor siempre los guarde. A mis hermanos **Arturo González** y **Moisés González** por brindarme su apoyo y estimular e impulsar esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al **Señor** por darme las fuerzas, la perseverancia y la voluntad para seguir en cada día.

A **mis padres** por su esfuerzo y compromiso que tuvieron conmigo al conducirme de la mejor manera en la vida.

A la **Dra. Ivonne Chávez Chena**, por permitirme realizar y llevar a cabo este trabajo de investigación, por el cual le agradezco también por los comentarios, sugerencias y el tiempo dedicado en el seguimiento del desarrollo del mismo.

Al comité revisor: **Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor, Dr. Jesús Arce Landa y Dr. Efraín Simá Moo**, de igual manera les agradezco por cada comentario, sugerencia, con los cuales se permitió llevar a cabo este trabajo de la mejor manera. Y como docentes, les agradezco por el conocimiento cultivado a través de sus clases impartidas.

A mis compañeros y amigos de generación, en especial a **Miguel, Alan, David y Tomas** quienes compartimos en esta osadía de la vida, momentos inolvidables; gracias por brindarme su amistad.

A **Rocío**, Secretaría del Departamento de Ingeniería Mecánica del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), por brindarme el apoyo relacionado en cuestiones académicas.

Al **Sistema Meteorológico Nacional (SMN)**, por proporcionar información sobre las variables meteorológicas de acuerdo al sitio de estudio de este trabajo, con las cuales se permitió llevar a cabo el desarrollo.

Al **Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET)** por darme la oportunidad de formarme y ser parte de su familia.

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

CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VI
NOMECLATURA.....	VII
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1:	3
1 INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 ANTECEDENTES DE LA HUMANIDAD Y LAS DIFERENTES FUENTES ENERGÉTICAS.....	4
1.2 SITUACIÓN ENERGÉTICA EN EL MUNDO	5
1.3 SITUACIÓN ENERGÉTICA EN MÉXICO	9
1.4 IMPACTO AMBIENTAL.....	14
1.5 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL SECTOR DE EDIFICACIONES	16
1.6 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	18
1.7 CONCLUSIÓN DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	25
1.8 OBJETIVOS.....	26
1.8.1 <i>Objetivo general</i>	26
1.8.2 <i>Objetivos particulares</i>	26
1.9 ALCANCE.....	26
CAPÍTULO 2:	27
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	28
2.1 TRABAJO.....	28
2.2 CALOR	28
2.3 SISTEMA	28
2.4 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	29
2.4.1 <i>Transferencia de calor por conducción</i>	29
2.4.2 <i>Transferencia de calor por convección</i>	30
2.4.3 <i>Transferencia de calor por radiación</i>	31
2.5 BALANCE DE ENERGÍA EN EDIFICACIONES	32
2.5.1 <i>Cargas térmicas por transferencia de calor al exterior (Q_{op})</i>	33
2.5.2 <i>Cargas térmicas por radiación a través del vidriado (Q_w)</i>	33
2.5.3 <i>Cargas térmica por ventilación o infiltración de aire (Q_{ve})</i>	34
2.5.4 <i>Cargas térmica sensibles por aportaciones internas ($Q_{int,s}$)</i>	34
2.5.5 <i>Cargas térmica por los elementos transparentes (Q_s)</i>	35
2.5.6 <i>Cargas térmica debido a la envolvente de la edificación (Q_b)</i>	35
2.6 ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA	35
2.6.1 <i>Evaluación climática</i>	35
2.6.2 <i>Evaluación biológica</i>	35
2.6.3 <i>Implementación de tecnologías</i>	35
2.6.4 <i>Expresión arquitectónica</i>	36
2.7 GEOMETRÍA SOLAR.....	36
2.7.1 <i>Constante solar</i>	36
2.7.2 <i>Declinación</i>	37
2.7.3 <i>Bóveda celeste</i>	38

2.8	CONFORT	38
2.8.1	<i>Confort térmico</i>	39
2.9	DESARROLLO DE MÉTODOS PARA CONFORT TÉRMICO	42
2.9.1	<i>Teoría del balance térmico e índices PMV/PPD</i>	43
2.9.2	<i>Modelo adaptativo</i>	44
2.10	CONFORT LUMÍNICO	45
2.10.1	<i>Niveles de iluminación en interiores y exteriores en edificaciones</i>	47
2.10.2	<i>Fuentes de iluminación artificial</i>	47
2.10.3	<i>Eficiencia lumínica</i>	48
2.10.4	<i>Color y temperatura de color</i>	49
2.10.5	<i>Índice de Reproducción Cromática</i>	49
2.10.6	<i>Flujo luminoso (lx)</i>	50
2.10.7	<i>Intensidad luminosa (cd)</i>	50
2.10.8	<i>Iluminancia (lx)</i>	50
2.10.9	<i>Luminancia (cd/m²)</i>	50
CAPÍTULO 3.....		51
3	SIMULACIÓN NUMÉRICA CON TRNSYS.....	52
3.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN TRNSYS	52
3.2	DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN TRNSYS	53
3.2.1	<i>Ambiente Simulation Studio de TRNSYS</i>	53
3.2.2	<i>Interfaz del programa TRNBuild</i>	54
3.3	METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN PARA EL CASO DE ESTUDIO	55
3.3.1	<i>Type 9 (lector de datos meteorológicos)</i>	55
3.3.2	<i>Type 16 (procesador de radiación solar)</i>	55
3.3.3	<i>Type 69 (temperatura ficticia de cielo)</i>	56
3.3.4	<i>Type 33 (psicometría)</i>	56
3.3.5	<i>Type 56 (edificación)</i>	56
3.3.6	<i>Type 34 (voladizos/muro vertical)</i>	56
3.3.7	<i>Impresión de resultados, Type 28 (impresora/integrador combinado) y Type 65 (impresión en pantalla)</i>	57
3.4	DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA	59
3.4.1	<i>Zona térmica/nodo de aire</i>	59
3.4.2	<i>Flujo de calor convectivo al nodo de aire</i>	59
3.4.3	<i>Flujos de calor radiativos en pared y ventanas</i>	60
3.4.4	<i>Comportamiento térmico en muros o ventanas</i>	61
3.4.5	<i>Radiación de onda larga</i>	62
3.5	VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL SOFTWARE TRNSYS (CASO 630)	65
3.6	CONFIGURACIÓN DEL CASO 630 (PROTECCIÓN SOLAR EN VENTANAS CON ORIENTACIÓN ESTE Y OESTE)	65
3.7	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	66
3.8	RESULTADOS DEL TEST COMPARATIVO.....	67
CAPÍTULO 4.....		68
4	CASO DE ESTUDIO.....	69
4.1	UBICACIÓN Y GEOGRAFÍA DEL CASO DE ESTUDIO.....	69
4.2	CONDICIONES AMBIENTALES DEL SITIO	70
4.3	VARIABLES AMBIENTALES MÁXIMAS Y MÍNIMAS PROMEDIAS	72
4.4	DESCRIPCIÓN DE LA VIVIENDA	72
4.5	DIMENSIÓN Y ORIENTACIÓN DE LOS SISTEMAS PASIVOS DE SOMBREADO	75
4.6	MATERIALES INTEGRADOS EN LA ENVOLVENTE DE LA VIVIENDA	75

4.6.1	<i>Configuración del vidriado</i>	75
4.6.2	<i>Configuración del piso PB y PA</i>	76
4.6.3	<i>Configuración de muros</i>	76
4.6.4	<i>Configuración del techo</i>	76
4.7	ZONAS TÉRMICAS	78
4.8	TEMPERATURA DE ZONA DE CONFORT	78
4.9	CONSIDERACIONES	80
CAPÍTULO 5		81
5	RESULTADOS	82
5.1	DEFINICIÓN DE GANANCIAS INTERNAS POR FUENTES DE ILUMINACIÓN ARTIFICIAL	82
5.1.1	<i>Definición del número de fuentes de iluminación artificial</i>	82
5.1.2	<i>Ganancias internas por tipo de fuente de iluminación artificial</i>	84
5.1.3	<i>Configuraciones a estudiar</i>	84
5.2	COMPORTAMIENTO TÉRMICO AL INTERIOR DE CADA ZONA TÉRMICA	85
5.3	COMPORTAMIENTO TÉRMICO AL INTERIOR DE LOS ESPACIOS DE MAYOR INTERÉS	89
5.4	CUANTIFICACIÓN DE ENERGÍA POR CARGAS TÉRMICAS	93
5.5	ANÁLISIS COSTO BENEFICIO	97
5.5.1	<i>Análisis costo-beneficio</i>	101
CAPÍTULO 6		106
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
6.1	CONCLUSIONES.....	107
6.1.1	<i>Comportamiento térmico al interior de cada zona térmica</i>	107
6.1.2	<i>Comportamiento térmico al interior de los espacios de mayor interés</i>	108
6.1.3	<i>Cuantificación de energía por cargas térmicas e iluminación</i>	108
6.1.4	<i>Análisis económico</i>	109
6.2	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	111
REFERENCIAS		112
ANEXOS		117
ANEXO A: DISEÑO DE ILUMINACIÓN EN INTERIOR MEDIANTE EL MÉTODO DE LUMEN.		117
ANEXO B: CUANTIFICACIÓN DE ENERGÍA POR CARGAS TÉRMICAS EN LAS CONFIGURACIONES		121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Producción de energía eléctrica en el mundo, 2014 (TWh).	6
Figura 1.2. Generación de energía eléctrica por diferente fuente a nivel mundial, 2014 (%). ...	7
Figura 1.3. Consumo de energía en el mundo por región, a) 2000-2010 (%), b) Consumo de energía en el 2010, 17 871 TWh.	7
Figura 1.4. Consumo de energía a nivel mundial, 2014 (%).	8
Figura 1.5. Consumo de energía per cápita mundial, 2014 (MWh).	8
Figura 1.6. Generación de energía eléctrica por tipo de tecnología, 2015 (%).	10
Figura 1.7. Consumo final energético por sector en México, 2015 (%).	11
Figura 1.8. Consumo de energía por usos finales 2008 (%).	12
Figura 1.9. Consumo energético total en los aparatos, 2008 (%).	13
Figura 1.10. Evolución del consumo de energía eléctrica en el sector residencial de acuerdo al número de usuario y el tipo de climas presentados en México, (Millos de kWh).	14
Figura 2.1. Solsticios y equinoccios debido a la declinación de la Tierra.	37
Figura 2.2. Ángulo cenital, azimutal y altura solar.	38
Figura 2.3. Gráfica del PMV-PPD de Fanger.	43
Figura 2.4. Curva de eficiencia luminosa de acuerdo a la cantidad de luz captada por el ojo humano.	46
Figura 3.1. Diagrama de flujo para la metodología de solución.	55
Figura 3.2. Modelado de la vivienda en ambiente <i>Simulation Studio</i> . a) sin la consideración de efectos de sombreado. b) con la consideración de efectos de sombreado por mismo diseño en la vivienda y c) al integrar los sistemas pasivos de sombreado.	58
Figura 3.3. Balance de energía térmica en un nodo de aire de un espacio.	59
Figura 3.4. Flujo de energía radiativo sobre una pared en un nodo de temperatura superficial.	60
Figura 3.5. Interacción de temperaturas y flujos de calor en una superficie.	61
Figura 3.6. Red en estrella para un espacio.	63
Figura 3.7. Isométrico del caso 630 (protección solar en ventanas con orientación Este y Oeste).	65
Figura 4.1. Climas predominantes en el estado de Morelos.	69
Figura 4.2. Variables ambientales promedios mensuales del sitio de estudio. a) velocidad del viento (m/s), b) temperatura ambiente (°C), c) HR (%), d) radiación solar (W/m ²).	71
Figura 4.3. Dimensiones y espacios característicos de la PB.	73
Figura 4.4. Dimensiones y espacios característicos de la PA.	73
Figura 4.5. Modelo de la vivienda en 3D.	74
Figura 4.6. Vistas de las fachadas de la vivienda. a) orientación Norte, b) orientación Sur, c) orientación Este y d) orientación Oeste.	74
Figura 4.7. Sistemas pasivos de sombreado integrados en la fachada de la vivienda. a) Fachada principal orientada al Oeste, b) Fachada posterior orientada al Este.	75
Figura 4.8. Zonas térmicas.	78
Figura 5.1. Temperaturas promedios mensuales para cada zona térmica en la configuración CB_SPS_SI.	85
Figura 5.2. Temperaturas promedios mensuales para cada zona térmica en la configuración CSPS_ICONV.	86
Figura 5.3. Temperaturas promedios mensuales para cada zona térmica en la configuración CCPS_ICONV.	87
Figura 5.4. Temperaturas promedios mensuales para cada zona térmica en la configuración	

CCPS_ILED.	88
Figura 5.5. Temperaturas correspondientes al interior de la Sala/Comedor para el día más caluroso de Mayo.	90
Figura 5.6. Temperaturas correspondientes al interior de la Recámara 3 PA para el día más caluroso de Mayo.	91
Figura 5.7. Temperaturas correspondientes al interior de la Sala PA para el día más calurosos de Mayo.	92
Figura 5.8. Demanda de energía por cargas térmicas para cada zona térmica correspondiente a la configuración CB_SPS_SI. a) cargas por enfriamiento, b) cargas por calentamiento.	93
Figura 5.9. Demanda de energía por cargas térmicas para cada zona térmica correspondiente a la configuración CSPA_ICONV. a) cargas por enfriamiento, b) cargas por calentamiento.	94
Figura 5.10. Demanda de energía por cargas térmicas para cada zona térmica correspondiente a la configuración CCPS_ICONV. a) cargas por enfriamiento, b) cargas por calentamiento.	95
Figura 5.11. Demanda de energía por cargas térmicas para cada zona térmica correspondiente a la configuración CCPS_ILED. a) cargas por enfriamiento, b) cargas por calentamiento.	96
Figura 5.12. Demanda energética por cargas térmicas para cada configuración de la vivienda.	97
Figura 5.13. Análisis de sensibilidad al variar la TMAR y el efecto en el VPN y el TRI.	100
Figura 5.14. Comparación de las configuraciones de mínimo costo anual en relación a la demanda energética por cargas térmicas.	105
Figura 5.15. Comparación del tipo de fuente de iluminación con el mínimo costo anual por consumo de energía eléctrica en relación al costo de inversión.	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Consumo total de energía en el mundo, por región y tipo de combustible, 1990-2030 (millones de BTU).....	9
Tabla 2.1. Intervalos de temperatura para el confort térmico de ciudades de la República Mexicana.	40
Tabla 2.2. Sensaciones caudadas en un individuo en relación a velocidades de aire.....	41
Tabla 2.3. Factor de vestimenta de acuerdo tipo de prenda puesta en un individuo.	41
Tabla 2.4. Razón metabólicas en relación a estado o actividad realizado por un individuo.	42
Tabla 2.5. Valores de los coeficientes a, b y c en función del tiempo para cada sexo del individuo.	44
Tabla 2.6. Niveles de iluminación para diferentes espacios de acuerdo a la NOM-025-STPS-2008.	47
Tabla 2.7. Eficiencia energética en la principales luminarias (lum/W).	48
Tabla 2.8. Temperatura de acuerdo al color de la luz emitida por una luminaria.	49
Tabla 2.9. Índice de reproducción de cromática para los diferentes colores emitidos por una fuente luminosa.	49
Tabla 3.1. Propiedades termofísicas de los muros, piso y techo para la zona del caso 630.	66
Tabla 3.2. Propiedades termofísicas en el vidriado de la zona.	66
Tabla 3.3. Comparación de resultados del test correspondientes a las cargas térmicas de enfriamiento.....	67
Tabla 3.4. Comparación de resultados del test correspondientes a las cargas térmicas de calentamiento.....	67
Tabla 3.5. Comparación de superficies vidriadas en el test.	67
Tabla 4.1. Variables ambientales del sitio de estudio.	71
Tabla 4.2. Variables ambientales máximas y mínimas promedio del sitio de estudio.	72
Tabla 4.3. Propiedades termofísicas del tipo de vidriado integrado en la vivienda.	76
Tabla 4.4. Configuración de muros y sus propiedades termofísicas.	77
Tabla 4.5. Temperaturas óptimas y valores límites para la zona de confort en el sitio de estudio.	79
Tabla 5.1. Número de lámparas requeridas en la vivienda.....	83
Tabla 5.2. Perfil de uso en el sistema de iluminación.	83
Tabla 5.3. Consumo de energía eléctrica por iluminación.	84
Tabla 5.4. Temperaturas promedio mensuales para cada zona térmica en la configuración CB_SPS_SI.	86
Tabla 5.5. Comparación de temperaturas para cada zona térmica al considerar las ganancias internas debidas a la iluminación de tipo incandescente.....	87
Tabla 5.6. Comparación de temperaturas para cada zona térmica al considerar las ganancias internas por el tipo de fuente de iluminación de tipo incandescente y los efectos de sombreado.	88
Tabla 5.7. Comparación de temperaturas para cada zona térmica al considerar los efectos de sombreado y la sustitución del tipo de fuente de iluminación de tipo incandescente por LED.	89
Tabla 5.8. Beneficios obtenidos al implementar las estrategias de ahorro y eficiencia energética en la vivienda.....	89
Tabla 5.9. Indicadores de evaluación financieros para la configuración CB_SPS_SI.	101
Tabla 5.10. Indicadores de evaluación financieros para la configuración CSPS_ICONV.	102
Tabla 5.11. Indicadores de evaluación financieros para la configuración CCPS_ICONV.	102
Tabla 5.12. Indicadores de evaluación financieros para la configuración CCPS_ILED.....	104

NOMECLATURA

Símbolos

A	Área superficial (m^2).
$C_{p\ air}$	Calor específico del aire ($1012\ J/kg^{\circ}C$).
C_u	Coefficiente de utilización.
C_p	Calor específico (kJ/kgK).
CT	Carga térmica.
CTC	Carga térmica de calentamiento.
CTE	Carga térmica de enfriamiento.
DPEA	Densidad de Potencia Eléctrica para Alumbrado (W/m^2).
E_m	Niveles de iluminancia (lux).
F	Fuerza (N).
FM	Factor de mantenimiento.
h_{conv}	Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m^2K).
ICR	Índice de Reproducción Cromática.
k	Término de la serie temporal.
lx	Flujo luminoso (lm/m^2).
PA	Planta alta.
PB	Planta baja.
P_v	Presión de vapor de agua en el ambiente (kPa).
$\dot{Q}_{conv,i}$	Flujo de calor convectivo al interior del espacio (W).
$\dot{q}_{c,s,i}$	Flujo de calor por convección desde la superficie interior al aire de la zona (W).
$\dot{q}_{c,s,o}$	Flujo de calor por convección de la superficie exterior hasta la frontera/ambiente (W).
$\dot{Q}_{cplg,i}$	Ganancia debido al flujo de aire (conectivo) del nodo de aire I o condición de frontera (W).
$\dot{Q}_{g,c,i}$	Ganancia debido al flujo de aire (conectivo) del nodo de aire I o condición de frontera (W).
\dot{Q}_{g,r,i,w_i}	Ganancias radiativas internas recibidas por la pared del espacio (W).
$\dot{Q}_{inf,i}$	Ganancia por infiltración (sólo por flujos de aire del exterior) (W).
$Q_{ISHCCL,i}$	Radiación solar absorbida en todos los dispositivos de sombreado internos de la zona y transferida directamente como una ganancia convectiva al aire interno.
\dot{Q}_{long,w_i}	Intercambio radiativo de onda larga entre esta pared y todas las demás paredes y ventanas ($\epsilon_i = 1$) (W).
Q_{op}	Cargas térmicas por transferencia de calor al exterior (W).
$\dot{q}_{r,s,i}$	Transferencia de calor radiativa total (de todas las superficies) dentro de la zona.
$\dot{q}_{r,s,o}$	Transferencia de calor radiativa total en todas las superficies exteriores.
\dot{Q}_{r,w_i}	Ganancias radiativas por el nodo de temperatura en la superficie de la pared (W).
$\dot{q}_{s,i}$	Flujo de calor por conducción desde la pared en la superficie interior (W).
$\dot{q}_{s,o}$	Flujo de calor por conducción desde la pared en la superficie exterior (W).
$Q_{solar,i}$	Fracción de radiación solar que ingresa a un nodo de aire a través de ventanas externas que se transfiere inmediatamente como una ganancia convectiva al aire

	interno.
$\dot{Q}_{surf,i}$	Ganancia convectiva por las superficies (W).
\dot{Q}_{sol,w_i}	Ganancia solar a través de las ventanas de la zona (W).
Q_{ve}	Cargas térmicas por ventilación e infiltración de aire (W).
$\dot{Q}_{vent,i}$	Ganancia por ventilación (debido a un sistema mecánico) (W).
Q_w	Cargas térmicas por radiación a través del vidriado (W).
$\dot{q}_{w,g,i}$	Flujo de calor definido por el usuario en una superficie (pared o ventana) (W).
$\dot{Q}_{wall-gain}$	Flujo de calor definido por el usuario en la superficie de paredes o ventanas (W).
R	Resistencia térmica (m^2K/W).
Ra	Índice de reproducción cromática.
S	Superficie del muro o techo expuesto a temperatura ambiente (m^2).
$S_{s,i}$	Flujo de calor por radiación absorbido en la superficie interior (ganancia solares y radiativas) (W).
$S_{s,o}$	Flujo de calor por radiación absorbido en la superficie exterior (ganancia solar) (W).
SMN	Sistema Meteorológico Nacional.
T_n	Temperatura neutra ($^{\circ}C$).
TMA	Temperatura media anual ($^{\circ}C$).
$T_s - T_{\infty}$	Diferencias de temperaturas corresponden a la de la superficie y del fluido respectivamente ($^{\circ}C$).
TWh	TeraWatts- hora.
V	Caudal de aire por infiltración o ventilación (m^3/s).
v	Volumen del espacio (m^3).
P	Potencia (J/s).
PMV	Voto Promedio Previsto.
PPD	Porcentaje Predicho de Insatisfechos.
W	Trabajo físico (J).
z	Ángulo acimutal.
Z_c	Temperatura de zona de confort ($^{\circ}C$).

Símbolos griegos

α	Absortancia.
ϵ	Emitancia.
η	Rendimiento lumínico.
λ	Conductividad térmica (W/mK)
ρ	Densidad (kg/m^3)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann $5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$.
ϕ	Ángulo cenital.
ϕ_{lum}	Flujo luminoso de la fuente (lum).
Φ_T	Flujo luminoso total (lum).

Resumen

En este trabajo de investigación, se presenta un estudio de la cuantificación del ahorro energético al implementar estrategias de ahorro y eficiencia energética en una vivienda residencial-plus, ubicada en el municipio de Temixco, Morelos, México. La vivienda se encuentra construida en dos plantas con un área total de 396 m² y con orientación Este-Oeste, donde la relación pared-vidriado se presentan en mayor proporción; y en cuanto a la envolvente, presenta materiales de construcción con alta masa térmica. El estudio realizado compara cuatro configuraciones de la vivienda al ir incorporando las estrategias de ahorro y eficiencia energética. Estrategias que consisten en la sustitución de sistema de iluminación de tipo incandescente por uno de bajo consumo energético y alto rendimiento lumínico (LED); y por otro lado, la incorporación de sistemas pasivos de sombreado en sus fachadas (Este-Oeste) de la vivienda. El estudio se realiza mediante el software comercial TRNSYS[®], para predecir el comportamiento térmico-energético para un año de modelación. En las configuraciones, se analizan cuatro zonas térmicas donde se consideran: las dimensiones y características de construcción, el tipo de vidriado simple, las orientaciones, los efectos de sombreado y las ganancias internas por iluminación artificial de acuerdo a un perfil de uso.

De los resultados obtenidos de la simulación, se obtuvieron que para el mes más caluroso (Mayo), al implementar las estrategias de ahorro y eficiencia energética en la vivienda se pudo abatir la temperatura al interior en promedio de 11.3%. Y en cuanto a los espacios donde se encuentran incorporados los elementos de sombreado, correspondientes a la Sala/Comedor de la planta baja, Recámara 3 y la Sala de TV en la planta alta; para el día más caluroso del año (3 de Mayo), se pudo reducir la temperatura al interior a un 14.8, 7.9 y 5.0% respectivamente, con las cuales inclusive se alcanzó una temperatura aún menor que la del medio exterior. Por lo que la estimación de la demanda energética por cargas térmicas de manera global y anual se redujeron a un 47.2%, con lo cual se determinó una demanda de 9.61 MWh/año; de modo que las emisiones por contaminantes también se disminuyeron de 10.6 a 5.6 tCO₂/año. En cuanto a los ahorros obtenidos en términos monetarios por cargas térmicas, al implementar las estrategias se obtuvieron ahorros de hasta \$ 13, 037.40 pesos (MXN) de manera anual. Por otro lado, en cuanto a los ahorros por consumo de energía eléctrica al sustituir el tipo de fuente de iluminación, se tuvo un ahorro de \$ 27, 575.57 pesos anuales, esto debido a la alta eficiencia y bajo consumo energético de la lámpara tipo LED; con dichos ahorros se permitió definir el rendimiento de la inversión, el cual se tuvo un relación beneficio-costos de 1.17, lo que indica que por cada peso invertido (por los sistemas pasivos de sombreado e iluminación) se tienen ganancias de \$ 0.17 centavos por cada peso invertido del cotos capital total. Y de acuerdo a éstos ahorros obtenidos, el tiempo requerido para recuperar la inversión por los sistemas pasivos de sombreado es de aproximadamente 16.86 años, mientras que para el sistema de iluminación es de 4.66 años.

Abstract

In this research work, a study on the quantification of energy savings when implementing energy saving strategies on a high-value residential building is presented. The building is located in Temixco, a city in the State of Morelos in Mexico. The property is a 396 square meters two dwelling house in which the main façades are East-West oriented and include the largest wall-glass ratios. As for the house envelope, the construction materials have high thermal mass. The study was carried out for up to four configurations, one for the simplest model without any strategy and the remaining by combining one or two energy saving strategy, which consisted on the substitution of the incandescent lighting system for another of low energy consumption and high light output (LED), and the use of passive shading systems on the main façades. The study was performed using the commercial software TRNSYS® in order to determine the thermal-energetic performance for one year of modeling. In the configurations four thermal zones were defined, where dimensions, construction details, simple glazing, orientations and the effect of shading and internal gains due to lightning according to a usage profile were taken into account.

The simulations were analyzed in two fronts: the use of passive shading systems and the substitution of the lightning system. From the first one, the results showed that in the warmest month (May), the inside temperature was reduced by 11.3% average. Regarding rooms in the corresponding thermal zones where the shading passive systems were implemented, that is the living/dining room, one of the bedrooms and the studio, the inside temperature was reduced 14.8, 7.9 and 5.0 % respectively in the warmest day of the month (May 3rd), reaching at one point of the day, temperatures lower than the ambient. With this action, the total energy demand due to thermal loads was reduced 47.2% getting an annual rate of 9.61 MWh/year; this way, the contaminants emission was lowered from 10.6 to 5.6 tCO₂/year. As for the monetary savings due to thermal loads at implementing the strategies, the annual saving was \$ 13, 037.40 pesos (MXN). On the other hand, the annual savings on energy consumption when replacing the lightning system was \$ 27, 575.57 pesos (MXN), since the LED replacement lights are highly efficient and low consumption; due to these savings, there was a cost-benefit ratio of 1.17, as an indication that for each peso invested (by the passive shading system and lighting system), was a profit of \$ 0.17 for each peso invested in the total capital cost. According to the monetary savings results, the payback period in the passive shading systems is 16.86 years, while in the lighting system is 4.66 years, which is highly profitable.

Capítulo 1:

Introducción

En este capítulo se menciona una breve historia de la humanidad en relación al desarrollo de las diferentes formas de obtención y aprovechamiento de las diferentes formas de energía. Asimismo se presenta una reseña sobre la Revolución Industrial y el impulso que dio al desarrollo económico y social en el mundo. Por otro lado, se menciona el panorama del estado energético en el mundo, tanto la producción y consumo de energía eléctrica de los principales países a través de las diferentes tecnologías, así como las emisiones de gases contaminantes derivado de ello y los diferentes organismos o instituciones gubernamentales o no gubernamentales que intentan predecir y mitigar la contaminación; de manera análoga, se describe la situación energética en México, enfocándose principalmente sobre el consumo de energía eléctrica sobre los diferentes sectores en el país, y con ello, presentando los principales indicadores en el sector residencial en términos de consumo de energía eléctrica final. Añadiendo que en este sector, se aluden los diferentes factores que influyen en los altos consumos de energía eléctrica. Por último, se realiza la revisión bibliográfica sobre elementos pasivos de sombreado y los efectos que tienen éstos sobre el ahorro energético por cargas térmicas en la arquitectura bioclimática, y con ello el planteamiento de los objetivos y los alcances para el desarrollo de este tema de tesis.

1 Introducción

1.1 Antecedentes de la humanidad y las diferentes fuentes energéticas

Desde épocas remotas, uno de los homínidos más reconocidos en la historia de la humanidad fue el Homo Sapiens, se sabe que para su supervivencia y sustento contaba con sólo dos fuentes para obtener energía: la primera, era la de su propia fuerza de su musculatura con la que hace aproximadamente 400 000 años A.C. obtuvo el fuego, el que le permitía alumbrarse y calentarse por las noches; y la segunda, las ramas y/u hojas secas que se encontraba en su entorno con la que alimentaba al fuego (García, 1996).

Posteriormente a fines del periodo paleolítico, este ser empezó a obtener capacidades de razonamiento y apariencias físicas muy similar a la de nosotros alojándose en cuevas o cavernas o en la intemperie y desarrollando técnicas de caza para obtener sus alimentos mediante objetos que usaba como herramientas elaborados con piedras filosas, huesos o palos, los que además, usaba para coleccionar fruta, semillas o raíces; asimismo, estos objetos le permitían defenderse de los ataques de aquellos animales salvajes con los que se encontraba a su paso.

Al transcurso de los años, el hombre no sólo usaba el fuego para calentarse o alumbrarse por las noche, sino que además ya hacía uso de éste para llevar a cabo la cocción de sus alimentos y hacerlos más digeribles; por otro lado, hizo el perfeccionamiento de las técnicas de caza mediante objetos hechos a partir de arpones, dardos que él inventaba; y asimismo, ya empezaba a practicar el tiro con arco. Por lo tanto, al poseer estas herramientas y capacidades, al hombre se le permitía sobrevivir en pequeños grupos donde se alojaban en lugares o zonas que les contenía la subsistencia; sin embargo, el aumento de sus poblaciones y el desabasto de alimentos, fueron obligados a trasladarse de un lugar a otro en busca de mejores oportunidades de sobrevivir volviéndose de esta manera nómadas.

Para el periodo Neolítico, el hombre empezó a aprovechar los recursos naturales, tales como las corrientes de agua y aire para producir trabajo o ya sea para moler granos, así como también, el aprovechamiento de las tierras donde aprendió las técnicas de la agricultura; además, empezó a domesticar algunos animales (como vacas, cabras, caballos) con los que obtenía algunos beneficios como carne o leche y sus pieles que les servían a la vez de vestimenta o abrigos; asimismo, de estos animales ocupaba su fuerza para realizar trabajos como cultivar y transportar sus alimentos. En cuanto a los espacios donde se alojaban para dormir, empezaron a construir chozas o pequeñas cabañas donde se protegían de las condiciones ambientales. De esta manera el grupo de personas ya se establecían por mucho más tiempo en aquellos lugares en donde veían la posibilidad de asegurar el sustento de alimentos y por ende, más posibilidades de sobrevivir.

Un invento que revoluciona la historia, fue la rueda, donde hace unos 5 000 años, los mesopotámicos construyeron una rueda de madera (que en aquellos años era el material ideal para su construcción), con el tiempo fue perfeccionada hasta llegar a optar un eje móvil, y posterior a un eje fijo donde éste se movía independientemente de la rueda. Con esta nueva invención, construyeron un tipo de trineos y por tanto ocupaban la tracción de caballos o bueyes, y con ello se facilitaba mucho mejor su transporte. Además de eso, empezaron a dominar las aguas, donde construyeron un tipo de canoas huecas hechas con troncos de árboles; al transcurrir el tiempo, empezaron a construir un tipo de barco y posteriormente la vela para impulsar y dirigir la navegación. La creación de estos medios de transporte hizo que se establecieran conexiones sociales más sólidas entre los pobladores, y con el crecimiento paulatino de la humanidad hizo que se impulsara el comercio de alimentos y ganado.

Para el siglo XII, los chinos habían inventado un tipo de carreta a la cual ya ataban varios caballos mediante una collera. Asimismo, entre los siglos XII y XVI habían inventado la pólvora.

Por lo tanto, el mejoramiento de la natalidad y calidad de la vida en aquel entonces iba gradualmente mejorando, tal fue el caso en Inglaterra, que para el siglo XVIII ya había aumentado un 40% y para las primeras tres décadas de este siglo un 50%.

La estructura de la sociedad hasta el momento ya había evolucionado; sin embargo, el surgimiento de la Revolución Industrial en el siglo XVIII marcó un parte aguas en el desarrollo de la humanidad, impactando principalmente sobre los avances tecnológicos, socio-económicos y culturales; época donde se había inventado la principal máquina de vapor, cuya fuente de energía fue el carbón (Asthon, 1946).

Por otro lado, un cambio que marcó la dirección e historia de la humanidad, fue la perforación del primer pozo petrolero en el mundo en Titusville Pensilvania, Estados Unidos por Edwin Drake en 1859, que con los primeros procesos de fraccionamiento del petróleo, se logró conseguir el queroseno que fue empleado para las lámparas. Con el descubrimiento de nuevos yacimientos de petróleo en el mundo, surgieron empresas petroleras de tipo privadas en la que sometían al crudo a procesos para la obtención de los diferentes combustibles y otros derivados del petróleo.

Para el año 1895, se construyeron los primeros automóviles alimentados por gasolina. Siendo así, el impulso que demandó la producción de este combustible, fue por el diseño y construcción y venta en el mercado del nuevo vehículo “T” que había lanzado Henry Ford en 1922. Con el paso del tiempo, los motores de turbinas fueron implementados para la aviación alimentada por queroseno altamente purificado.

Otra mezcla de hidrocarburos obtenida por fraccionamiento del crudo, fue el gasoil o gasóleo el cual sustituyó al carbón mineral en aquellas maquinas que consumían este combustible, esto debido a su alto poder calorífico (de 43.932 kJ/kg del gasóleo contra 29.288 kJ/kg del carbón). Por otro lado, Rudolph Diesel, había inventado el motor a diésel, aplicado a medios de transporte para trabajos pesados (Olano, 2015).

No obstante, el uso del gasóleo no fue empleado sólo para el transporte, si no que ya se empleaba para la generación de energía eléctrica a partir de las centrales termoeléctricas, las cuales reemplazaron aquellas pequeñas centrales que utilizaban generadores impulsados con motores de vapor. Posteriormente, se obtuvo generación de energía eléctrica a partir de turbinas de gas o turbogas alimentadas con gas natural, que incluso para hacerlas aún más eficientes, hasta hoy en día su aplicación se ha llevado en ciclos combinados (turbinas de gas y turbinas de vapor). Sin embargo, la generación de energía eléctrica no sólo se puede enfocar en los combustibles fósiles, pues en la actualidad ya se pueden encontrar centrales eléctricas que son producidas o derivadas por fuentes renovables (solar, hidráulica, eólica, entre otras).

1.2 Situación energética en el mundo

Generación de energía eléctrica en el mundo

La producción de energía eléctrica per cápita a nivel mundial, para el año de 1973, se registraron tres de los países pioneros en la generación de energía eléctrica: Estados Unidos con 1097 terawatts-hora (TWh), Japón con 465.39 TWh y Alemania con 374.35 TWh, los cuales en los siguientes 25 años se mantuvieron

como principales países productores de energía eléctrica (IEA, 2017). Por lo que para ese año, más de la cuarta parte de la energía eléctrica producida en el mundo fue a partir del petróleo. Sin duda, el crecimiento mundial y económico, la demanda de energía aumentó en un 39% entre el periodo de 1973 y 1987, por lo tanto, para finales de este año ya se habían consumido 38 millones de barriles diarios. Sin embargo, el consumo de energía no fue constante, hubo descenso por periodos cortos debido al alza del petróleo para los años 1973-1974 y 1979. Por otra parte, también se atribuye a la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables (OIEA, 1990).

En este sentido, las fuentes de energías renovables que reportaron una mayor generación de energía eléctrica en el decenio del 2000 al 2010, fueron los sistemas eólicos y fotovoltaicos con 27 y 42% respectivamente; y en el caso de la hidroeléctrica en el 2010, esta reportó un 16%.

Y para los combustibles fósiles, en el 2012 el gas natural sustituyó al carbón al cubrir la demanda energética de 25.8% volviéndose en este sentido, como segundo principal recurso energético en el mundo, por lo que el carbón tuvo una participación del 19.4% al suplir la demanda en aquel año (IEA, 2014).

Para el 2015, como se muestra en la Figura 1.1, tres de los países principales en producción de energía eléctrica per cápita a nivel mundial fueron: China 567 mil TWh, seguido de Estados Unidos con 432 mil TWh, e India con 129 mil TWh.



Figura 1.1. Producción de energía eléctrica en el mundo, 2014 (TWh).

Fuente: IEA, 2017.

Generación de energía eléctrica por tipo de tecnología

La generación de energía eléctrica de acuerdo al tipo de tecnología para el 2014, como se puede observar en la Figura 1.2, fue a partir de centrales termoeléctricas (carbón, gas natural y nuclear) las cuales representaron un valor aproximado del 86% en todo el mundo; por otro lado, la generación de energía eléctrica por energías renovables representó el 14% (IEA, 2017).

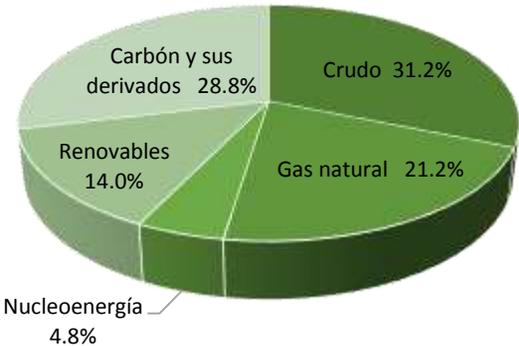


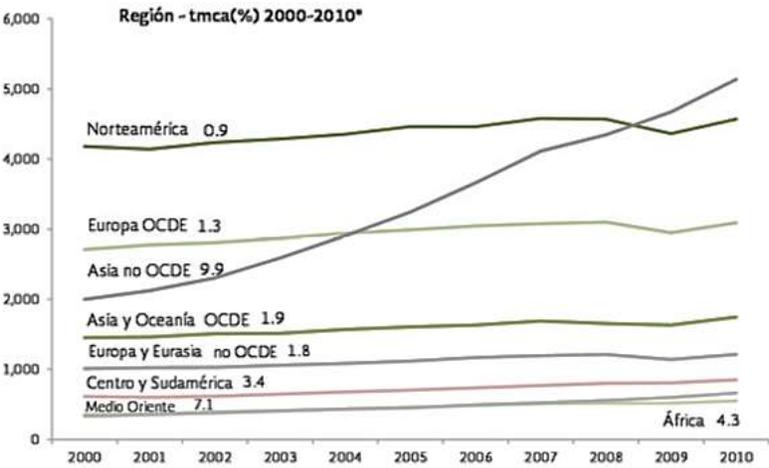
Figura 1.2. Generación de energía eléctrica por diferente fuente a nivel mundial, 2014 (%).

Fuente: World Energy Balance, IEA, 2016.

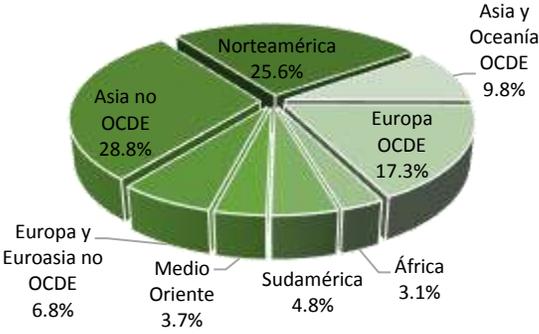
Cabe mencionar, que debido a la baja de combustibles fósiles y las fuentes renovables, para el periodo del 2013 al 2014, los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (la OCDE) tuvieron un efectos sobre la producción de energía eléctrica que condujo a la caída del 0.8%, los cuales generaron un total de 10.712 TWh (IEA, 2014); pero por otro lado, la producción de energía a partir de sistemas fotovoltaicos se registró un aumento del 17.3 % en los países europeos de la OCDE.

Consumo de energía eléctrica en el mundo

El consumo de energía eléctrica en el mundo durante el decenio del 2000 al 2010, como se muestra en la Figura 1.3, tuvo un aumento promedio anual de 3.5%, equivalente a 17 871.8 TWh, el cual fue debido al crecimiento potencial económico en países en vías de desarrollo tales como: Asia, Medio Oriente y África, cuya tasas promedios reportaron 9.9, 7.1 y 4.3% respectivamente. En el caso del 2010, se obtuvo un consumo de 28.7%, correspondientes a países asiáticos como China e India (países no miembro de la OCDE) y para Europa OCDE tuvo un crecimiento constante de 1.3% (IEA, 2013).



a)



b)

Figura 1.3. Consumo de energía en el mundo por región, a) 2000-2010 (%), b) Consumo de energía en el 2010, 17 871 TWh.

Fuente: World Energy Balance, IEA, 2013.

Consumo de energía a partir de las diferentes fuentes energéticas

Con respecto al consumo de energía mediante las diferentes fuentes energéticas, para el 2014, como se muestra en la Figura 1.4, tuvo un enfoque principalmente sobre: el carbón y sus derivados, los cuales tuvieron un aumento del 2.3%, asimismo para el caso de los petrolíferos que reportaron un 1.8% y para la electricidad 1.7%, reflejándose así un aumento de 1.3% sobre el consumo mundial. Y para el caso de las energías renovables, los que mayor impacto tuvieron, fueron la energía solar y eólica con un crecimiento de 28.59%.

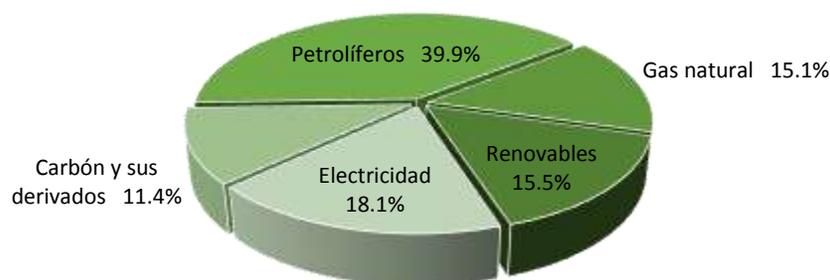


Figura 1.4. Consumo de energía a nivel mundial, 2014 (%).

Fuente: World Energy Balance, IEA, 2016.

Consumo de energía mundial por sector

El consumo de energía mediante los diferentes sectores a nivel mundial, en el 2014 el sector que obtuvo la mayor demanda de energía fue el industrial con 29.2%, seguido por el sector transporte con 27.9% y por último el de tipo residencial consumiendo un 22.7% (IEA, 2016).

Datos reportados hasta el momento (correspondientes al 2014) por la Agencia Internacional de la Energía o IEA (por sus siglas en inglés), demostró que tres países con mayor consumo de energía eléctrica per cápita a nivel mundial, correspondieron a: Islandia, Noruega y el Reino de Bahrain con 53.90, 23 y 19.22 MWh respectivamente, tal como se muestra en la Figura 1.5.

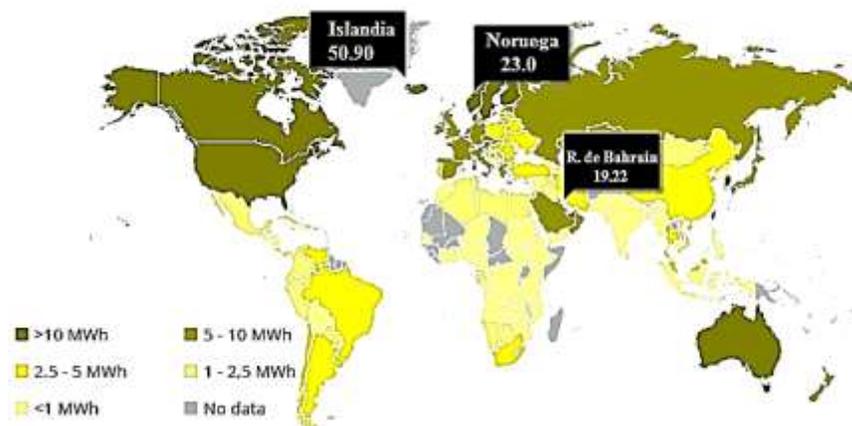


Figura 1.5. Consumo de energía per cápita mundial, 2014 (MWh).

Fuente: IEA, 2017.

De acuerdo a la proyecciones por la IEA en términos de consumo de energía en el mundo, como se muestra en la Tabla 1.1, demuestra que tanto en los países miembros y no miembros de la OCDE y en tan sólo en el lapso del 2004 al 2030, el mayor aumento en el consumo por combustibles fue y será de tipo fósiles, seguido por las energías alternas.

Tabla 1.1. Consumo total de energía en el mundo, por región y tipo de combustible, 1990-2030 (millones de BTU).

Región	Año					Aumento porcentual anual 2004-2030
	1990	2004	2010	2020	2030	
Países de América del Norte pertenecientes a la OCDE	100.8	120.9	130.3	145.1	161.6	1.1
Países de la Europa pertenecientes a la OCDE	69.9	81.1	84.1	86.1	89.2	0.4
Países de la Asia pertenecientes a la OCDE	26.6	37.8	39.9	43.9	47.2	0.9
Países de la Europa y Euroasia no pertenecientes a la OCDE	67.2	49.7	54.7	64.4	71.5	1.4
Países de la Asia no pertenecientes a la OCDE	47.5	99.9	131.0	178.8	227.6	3.2
Cercano Oriente	11.3	21.1	26.3	32.6	38.2	2.3
África	9.5	13.7	16.9	21.2	24.9	2.3
América Central y del Sur	14.5	22.5	27.7	34.8	41.4	2.4
Total de países pertenecientes a la OCDE	197.4	239.8	254.4	275.1	298.0	0.8
Total de países no pertenecientes a la OCDE	150.0	206.9	256.6	331.9	403.5	2.6
Tipo de combustible						
Petróleo	136.2	168.2	183.9	210.6	238.9	1.4
Gas Natural	75.2	103.4	120.6	147.0	170.4	1.9
Carbón	89.4	114.5	136.4	167.2	199.1	2.2
Nuclear	20.4	27.5	29.8	35.7	39.7	1.4
Otros	26.2	33.2	40.4	46.5	53.5	1.9
Total mundial	347.3	446.7	511.1	607.0	701.6	1.8

Fuente: EIA, 2014.

Con base a estas proyecciones, el consumo de energía para los países en desarrollo se incrementara a un promedio anual del 3% para el decenio 2004 al 2020; y para los países industrializados y con economías sólidas y con un crecimiento en su población lento, la demanda de energía tendrá un aumento por debajo del 0.9% anual.

1.3 Situación energética en México

A principios de la década de los setenta, México presentó un déficit en la producción de petróleo, esto debido a su prioridad, que para el año de 1965 era la de abastecer al mercado interno así como también sus derivados de éste, por lo que se dejó de importar y exportar; presentando ésta situación entre los años 1973 a 1974 y compitiendo ante el mercado internacional y el crecimiento económico mundial; el gobierno se obligó a reconocer que en el país existían grandes estancamientos y rezagos en la economía. En consecuencia, se llevó a cabo el replanteamiento sobre la política económica y energética, y con ello el desarrollo de la industria petrolera lo cual permitió el impulso de la incrementación de las reservas y el reinicio de la exportación de petróleo para 1974.

Con el impulso del replanteamiento sobre la política energética, el país presentó una tasa de crecimiento del 27.3% en la producción de crudo en 1974. Con el roll desempeñado por PEMEX, se permitió superar los desajustes por exploración y explotación y con ello se llevó al desarrollo de esta industria hacia un horizonte, y por otro lado, la incursión de petróleo en el mercado internacional sujeto a precio y demanda que le fueron favorables. Por ende, para el decenio de 1970 a 1980 se registró una tasa de crecimiento media anual del 16.3% sobre la producción de crudo. Sin embargo, para los periodos de 1983 a 1988 la producción de crudo no fue tan significativo, pues se registró una caída promedio anual de -1.2%, pero no siendo a así para el periodo de 1989 a 1994 el cual tuvo un incremento del 1.3% (CEFP, 2001).

Para el 2000, se registró un incremento sobre la producción de petróleo del 9.1% comparado con el año anterior. Obteniéndose por lo tanto, una tasa promedio anual de 6.9% en la producción en el periodo de 1970 al 2000 (CEFP, 2001). Y en el caso del año 2000 al 2004 se generó 2.95%, teniéndose posteriormente incrementos menores de -4.7% hasta el 2008 debido a los nuevos esquemas de contratación de las nuevas reformas energéticas (CIEP, 2013).

En cuanto al consumo de petróleo; a partir de las nuevas reservas de hidrocarburos se condujo a un aumento en la tasa de crecimiento sobre el gasto del energético. Esto debido principalmente a la rapidez con que se explotaron las reservas durante la década de los 70's, y por ende, un aumento en el consumo por el sector energético y así como también, por el bajo precio de los energéticos (en comparación con los precios internacionales). Presentando en este sentido, para el año de 1978 una celeridad en el consumo de petróleo del 12.7% a causa del precio bajo de las gasolinas (CEFP, 2001).

Datos reportados por la OCDE en el periodo de 1970 a 1999, México demostró una tasa media de crecimiento en el consumo de petróleo de 4.85%. Siendo para la década de 1970 a 1980 con mayor consumo de 9.8%, y para 1990 a 1999 presentó un menor incremento de 1.8%.

Generación de energía eléctrica

La producción de energía eléctrica, para el periodo de 1970 al 2000 la tasa media de crecimiento sobre la generación de electricidad, fue de 6.9%, por lo que para finales del 2000 se obtuvo una generación de 213 mil gigawatts-hora (GWh).

De acuerdo a información generada hasta el momento por la SENER (correspondiente a finales del 2015), se generaron 309 553 GWh, 2.7 puntos porcentuales más que en el año 2014. De ésta energía eléctrica total generada, el 79.7% se produjo a partir de tecnologías convencionales, produciéndose el resto de esta a partir de las energías renovables, tal como se puede observar en la Figura 1.6. Registrándose, por lo tanto, un incremento del 4.4% en la generación a partir de centrales convencionales, y para la fuentes renovables se obtuvo un 3.7%; de los cuales, para las centrales eólicas, cogeneración eficiente, hidroeléctricas y nucleoelectrica se reportaron 36.1, 31.2, 20.6 y 19.6% respectivamente (SENER, 2017).

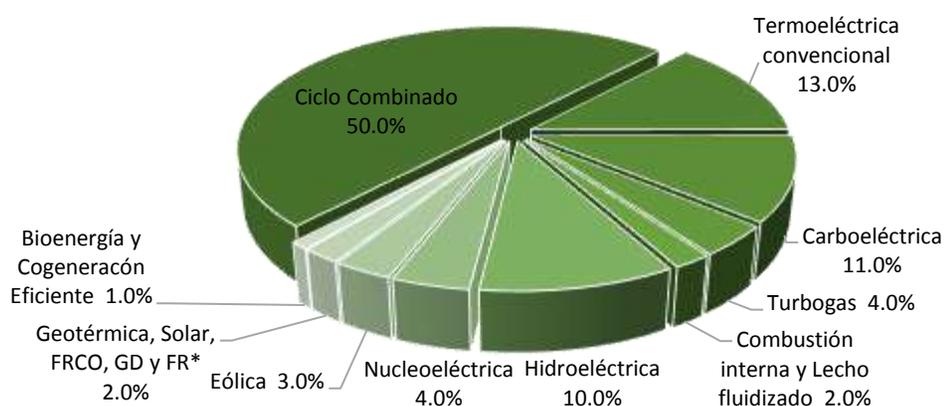


Figura 1.6. Generación de energía eléctrica por tipo de tecnología, 2015 (%).

*Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), Generación Distribuida (GD) y Frenos Regenerativos (FR).
Fuente: SENER, 2017.

En cuanto a los estados con mayor participación en la generación de energía eléctrica al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) en 2015 fueron: Tamaulipas, Veracruz, Coahuila, Guerrero y Baja California los cuales generaron el 43.4%; por el contrario, para los estados de Aguascalientes, Morelos, Quintana Roo, Zacatecas y Tlaxcala aportaron un 0.3% en el país.

Consumo de energía eléctrica

Para el 2005 se registró un aumento sobre el consumo de energía eléctrica de 169 757 GWh, lo que equivalió a una tasa promedio anual de 4.1% en el periodo 1995 al 2005 (CFEP, 2006). Y en cuanto al 2011, el consumo alcanzó 229 318 GWh, lo que representó un aumento del 7.2% en relación al 2010 (SENER, 2012).

Información proporcionada por el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) en el 2015; se consumieron 288 232 GWh, representando el 2.91% más que en el 2014. Siendo así, y de acuerdo las áreas operativas administradas por el Sistema Interconectado Nacional (SIN), las que reportaron un mayor consumo fueron: el área Occidental con 22.6% (equivalentes a 65 220 GWh), el área Central con 18.6% (53 649 GWh) y el área Oriental con 16.2% (46 587 GWh). Sin embargo, para el área Peninsular registró un 4.0% (11 617 GWh)¹. Y para los sistemas o áreas aisladas de Baja California y Baja California Sur reportaron un 5.4%.

Consumo de energía por sector

Para el país, los sectores con mayor consumo de energía final en el 2015, como se muestra en la Figura 1.7, fueron: el sector transporte, el cual tuvo un consumo del 46.4%, seguido del industrial con 31.4%, el residencial, comercial y público con el 18.7%, y por último el agropecuario que registró un consumo de 3.5% (SENER, 2016).

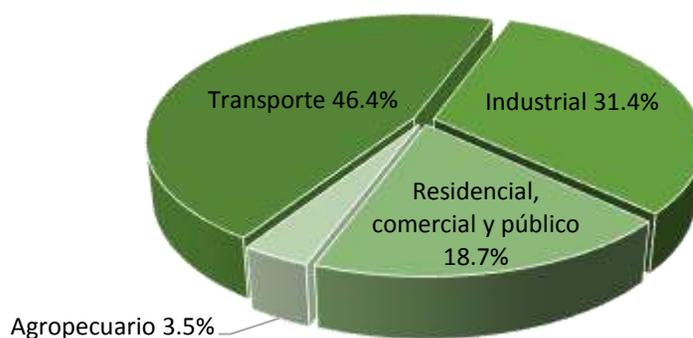


Figura 1.7. Consumo final energético por sector en México, 2015 (%).

Fuente: SIE, 2015.

¹ Para el área Occidental: Nayarit, Jalisco, Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato, Colima, Michoacán, Guerrero, Querétaro. Central: Zona Metropolitana. Peninsular: Sonora, Sinaloa, Coahuila, Tamaulipas, Nuevo León. Oriental: Veracruz, Puebla, Guerrero, Oaxaca, Tabasco, Chiapas.

Consumo de energía final en el sector residencial

Una estimación sobre el consumo de energía final en el sector residencial y mediante datos reportados sólo hasta el 2008, fue determinado por las actividades donde el recurso energético tiene un uso en las viviendas. Por lo tanto, la estimación del consumo en este sector estuvo relacionado por factores como: el comportamiento y costumbres de la población, la región, asimismo como el número de habitantes en cada vivienda, las dimensiones de la vivienda, los electrodomésticos, su consumo energético (potencia) y su horario de uso. Es así pues, para la estimación del consumo de energía final en el sector residencial, y a través de indicadores propuestos por la IEA, así mismo con la información de la Secretaría de Energía (SENER), Encuesta Nacional de Ingresos y Gasto de los Hogares (ENIGH), la Comisión Federal de Electricidad (CFE), y la Encuesta de Uso del Tiempo (ENUT); los indicadores fueron: calentamiento y enfriamiento de espacio, calentamiento de agua, cocción de alimentos, iluminación y aparatos de uso domésticos (refrigeradores, congeladores, lava trastes, lavadoras y secadoras de ropa, televisión y entretenimiento, computación y tecnologías de información y comunicación y otros aparatos).

Los datos reportados en este año como se muestra en la Figura 1.8, tres de los indicadores con un mayor consumo de energía por usos finales en viviendas, fueron: calentamiento de agua con el 47%, seguido de para la cocción de alimentos con 27.5% y por refrigeración con 9.9%.

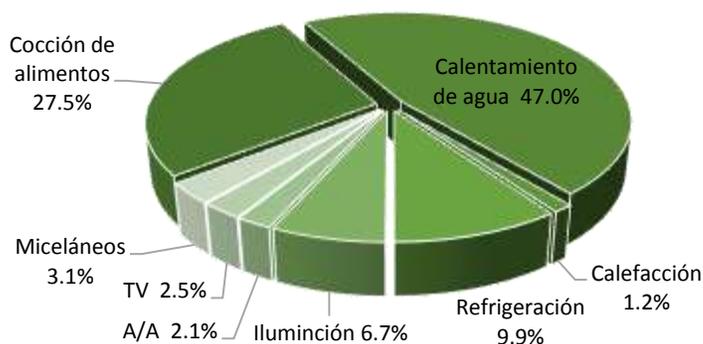


Figura 1.8. Consumo de energía por usos finales 2008 (%).

Fuente: SENER, 2008.

Consumo de energía eléctrica por aparatos electrodomésticos en el sector residencial

Por otro lado, el consumo de energía por aparato de acuerdo a la SENER, se reportaron tres de los principales con mayor consumo, los cuales fueron: refrigeradores con un promedio de 40.3%, focos con 27.2% y televisores con el 12.5%, tal como se muestran en la Figura 1.9.

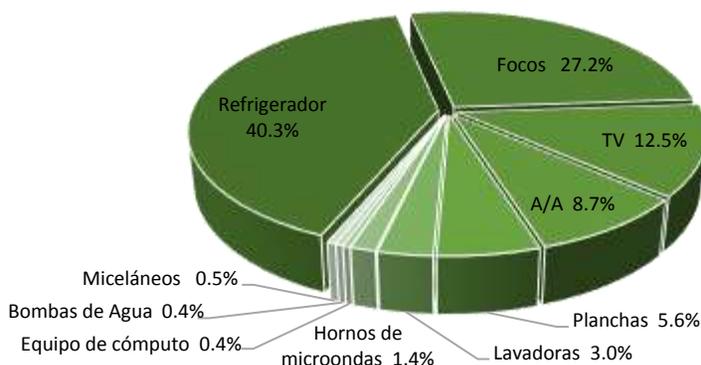


Figura 1.9. Consumo energético total en los aparatos, 2008 (%).

Fuente: SENER, 2008.

Consumo de energía eléctrica por tipo de clima

En cuanto al consumo de energía por el tipo de clima que presenta México; en el país predomina una gran variedad de climas debido a que su ubicación geográfica, que de acuerdo al Ecuador, se encuentra en el hemisferio norte, y de acuerdo al meridiano de Greenwich, en el hemisferio Occidental. Lo cual permite que el Trópico de Cáncer atraviese el territorio y por ende, hace que el país se extienda por dos zonas térmicas: la templada y la calurosa; sin embargo, debido a que existen grandes cadenas montañosas y zonas con grandes alturas; hacia el sur del Trópico se pueden encontrar el clima templado, y para el caso de las costas, presentan un clima tropical; y en cuanto a la parte norte del Trópico se presentan climas áridos y secos (INEGI, 2017), los cuales determina el tipo de climatización y con ello en consumo de energía eléctrica.

En relación a esto, la CFE realizó un análisis donde demostró los comportamientos del consumo de energía eléctrica por el tipo de clima que presentó en el país en el periodo de 1982 al 2014, los cuales estuvieron en función al número de usuarios, así como también por el tipo de tarifa. Registrándose de esta manera, que para este lapso de análisis, las ventas de electricidad en el sector residencial demostraron un crecimiento de 12 500 a 54 000 GWh, y en cuanto al número de usuarios se registró un crecimiento de 9.6 a 34 millones de usuarios. En la Figura 1.10 se muestra la evolución del consumo de energía eléctrica respecto al número de usuarios y a los dos tipos de climas presentados en el país, se puede distinguir un mayor comportamiento del consumo en 1995 para los usuarios de clima cálido, registrándose posteriormente hasta alcanzar una relación de 3 a 2 mayor para los usuario de clima cálido (CONUEE, 2016). De acuerdo a el análisis realizados, esta variación de consumo de energía se debió al aumento promedio de electrodomésticos por hogar (INEGI, 2016).

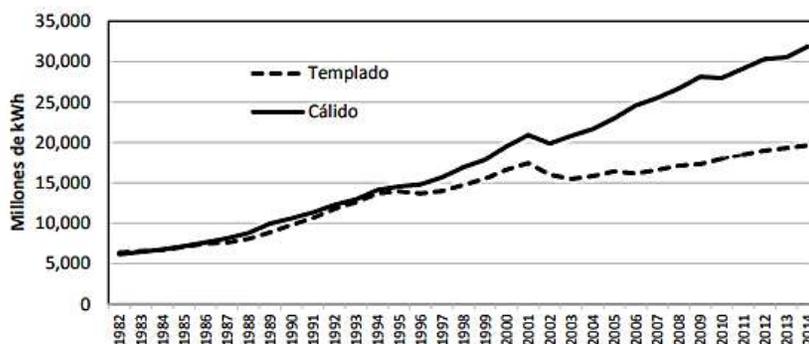


Figura 1.10. Evolución del consumo de energía eléctrica en el sector residencial de acuerdo al número de usuario y el tipo de climas presentados en México, (Millones de kWh).

Fuente: CFE, 2016.

1.4 Impacto ambiental

La demanda y quema de combustibles fósiles se hizo presente desde antes de la Revolución Industrial, lo que hasta el momento y debido a las necesidades de la población se han consumido cantidades enormes de combustible fósil en sus diferentes formas y a través de las diferentes tecnologías (centrales termoeléctricas) para la generación de energía eléctrica, y así como también en los diferentes sectores que requieren de los combustibles para el uso final para llevar a cabo las actividades en la sociedad.

Datos reportados por la IEA en 2014 a nivel mundial, demostraron que la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) emitidos por la quema de estos combustibles alcanzó 32 381 millones de toneladas de CO₂ (MtCO₂), registrándose por lo tanto un 58% más desde el periodo de 1990. Estas cantidades de emisiones fueron principalmente debido a la quema de combustibles por carbón, el cual tuvo una participación del 46%, seguido del petróleo con 34% y una menor cantidad de emisiones por gas natural, con 19% (IEA, 2007).

La disminución de los índices de emisiones de CO₂ emitidos hacia el ambiente son un desafío ante los países desarrollados y subdesarrollados, debido a que la sociedad depende fuertemente de “la energía confiable y segura”(generada a partir el combustible fósil), la cual ha creado sólidamente las bases para el crecimiento de la industria y la economía, así como también, la creación fuertemente sobre la dependencias de los combustible en el sector transporte que impiden hasta el momento independizarse de ello; sin embargo, en los últimos años se han empezado a abatir el consumo de combustible debido al lanzamiento de vehículos eléctricos o híbridos en el mercado para disminuir la demanda consumo de combustibles.

Aunado a los grandes excesos de emisiones de CO₂ por la quema de estos combustibles, existe la manera no antropogénica, la cual contribuye a la emisión de los gases de efecto invernadero (GEI) los cuales traen como consecuencias no sólo problemas ambientales, sino que también efectos sobre la salud. Es por ello que la lucha contra el cambio climático se ha convertido en un tema de interés altamente preocupante y alarmante, en las que se han establecido estrategias sobre políticas de eficiencia energéticas, a través de organizaciones o instituciones gubernamentales o no gubernamentales que intentan predecir y proyectar la severidad y consecuencias del calentamiento global debido al efecto invernadero.

En este sentido y por mencionar algunos de las principales organizaciones que están en constancia y pendientes ante la problemática del cambio climático, es la IEA, la cual está trabajando con países de todo el mundo para apoyar una innovación segura y económica a sistemas de energía de baja emisión de CO₂. Así mismo, La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) que establece una serie de mecanismos, cuyo propósito consiste en estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera para permitir el desarrollo sustentable. Al igual que otras organizaciones como Greenpeace que fija la atención del público hacia los problemas ambientales e impulsa a dar soluciones requeridas para un futuro con bajas emisiones de GEI; asimismo el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el cual impulsa la participación hacia el cuidado del medio ambiente y por ende, a mejorar la calidad de vida para el futuro de las generaciones; así como también, existen instituciones tales como World Nature Organization (WNT) que se enfoca a promover las tecnologías renovables para mitigar las emisiones de CO₂; por otro lado, se exploran opciones para lograr un futuro sostenible que se enfoque en una mayor eficiencia energética mediante tecnologías renovables y con menos emisiones, esto a través del Escenario 2°C (2DC), el cual se centra en la identificación de las opciones tecnológicas y las políticas energéticas que garanticen las probabilidades de limitar hasta un 80 puntos porcentuales las probabilidades del incremento de la temperatura a 2°C a nivel mundial a largo plazo (IEA, 2012). La lista de las instituciones u organizaciones frente al cambio climático es muy extensa; sin embargo, todas se enfocan hacia la conservación del medio ambiente a través de alguna u otra manera para mitigar los efectos de cambio climático para ser de esta manera sustentables ante el ambiente.

En cuanto a México, para combatir el cambio climático, se han establecido estrategia en cuanto a la conservación de la biodiversidad y ecosistemas y con ello el aprovechamiento de manera sustentable en el país, esta función es llevada a cabo por el Sector Ambiental Federal denominada Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y en conjunto con las subsecretarías, las cuales emplean acciones y programas para la protección y conservación de los recursos naturales y permita el desarrollo sustentable.

Por otro lado y desde el punto de vista de la eficiencia energética, se encuentran organismos administrativos que tienen como objetivo a diseñar y aplicar programas para lograr un uso más eficiente de la energía. Entre estos sistemas administrativos se encuentra el Fideicomiso (FIDE), que tiene como objetivo principal reducir el impacto ambiental, promover y desarrollar programas y proyectos sobre el ahorro, conservación y uso eficiente de la energía, así como también, el aprovechamiento de energías renovables. Por otra parte, el Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico (PAESE) el cual lleva e impulsa programas en los que se promueven el ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica; cuya función es la de evaluar las tecnologías para el alumbrado público, donde son sometidas a pruebas en laboratorio (certificado) bajo normas y mirar su eficiencia; y de esta manera determinar si la tecnología es satisfactorio se certificará como ahorradora de energía. Otro organismo que surgió por parte de la CFE, y Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (BANOBRAS), es el Programa de Ahorro Sistemático Integral (ASI), que tiene como propósitos hacia regiones del país (como Baja California, Baja California Sur y parte del Noroeste de Sonora) fomentar la cultura el ahorro de energía, la disminución de la energía eléctrica, contribuir sobre la conservación del medio ambiente y así como también a la implementación de programas para la sustitución de aparatos de mayor eficiencia; asimismo, facilita financiamiento para aislar térmicamente techos y muros para reducir las cargas térmicas y con ello el cuidado del consumo de energía y medio ambiente. Como último, se encuentra la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) que tiene como objetivo principal, promover la eficiencia energética y aprovechamiento sustentable de la energía, entre las funciones principales realizada por este organismo se encuentran promover el uso óptimo de la energía, poner por escrito las

Normas Oficiales de Mexicanas relacionadas con la eficiencia energética.

1.5 Factores que influyen en el consumo de energía eléctrica en el sector de edificaciones

A nivel mundial, el sector de edificaciones en el 2015 consumió alrededor del 40% de la energía en el mundo, y en cuestiones de contaminación, emitieron aproximadamente un tercio de las emisiones de GEI. En relación al consumo de energía eléctrica, en el caso de los edificios tanto residenciales como comerciales consumieron aproximadamente un 60%. Una estimación de acuerdo al escenario realizado por la ONU, demostró que la contaminación relacionada a las emisiones provenientes por este sector se duplicarán para el año 2050 (UNEP, 2016).

En México, éste sector se ubicó como el tercer consumidor de energía eléctrica después del sector Transporte e Industria. En el caso de las edificaciones residenciales demandaron aproximadamente el 33.6% en energía eléctrica final (SENER, 2016).

La demanda de energía eléctrica en el sector de edificios se ha visto influenciada por diferentes factores, por ejemplo:

La geometría de la edificación

Se consideran varias características tales como: la forma, volumetría, y agrupación de elementos arquitectónicos de fachadas que son factores determinantes para el comportamiento del consumo de energía eléctrica, pues de ello depende si se requiere o no la implementación de algún sistema mecánico para la climatización del ambiente interno en la edificación.

Tipo de clima

La característica o tipo de clima de la región según sea el caso, está en función con las condiciones ambientales tales como la temperatura, la humedad, la velocidad del viento, la radiación solar y las precipitaciones; los cuales traen como resultado, la implementación o el uso de climatización para mantener el confort al interior de la edificación, además de otros electrodomésticos requeridos por aquellos habitantes de una región con clima determinado.

Tipo de edificación

Otro de los factores que influye en la demanda del consumo de energía eléctrica en éste sector, son las características de construcción y los tipos de tecnología renovables que pueden integrarse a las estructura de las edificaciones. Para ello, la arquitectura bioclimática se ha encargado de vincular ambos conceptos para tener de esta manera una edificación sustentable con el medio ambiente.

En este sentido, se pueden considerar los sistemas activos y pasivos con los que se puede aprovechar el recurso energético del sol, y por ende, conseguir las condiciones requeridas en el interior de la edificación valiéndose únicamente del aprovechamiento de los recursos naturales del entorno, obteniéndose de esta manera un diseño bioclimático.

Sistemas activos

Los sistemas activos son aquellas tecnologías que permiten transformar la energía proveniente de los

rayos del sol en las diferentes formas, ya sea en forma de electricidad o calor, entre ellos se encuentra la fotovoltaica y fototérmica.

Sistemas pasivos de climatización

Los sistemas pasivos de climatización se enfocan en el control de las variables climáticas para lograr u obtener el confort térmico en el interior de las edificaciones para el bienestar de los ocupantes, esto mediante las configuraciones de la envolvente arquitectónica, tales como: los materiales implementados en pisos, techos o muros, así como sus orientaciones, las relaciones pared/ventana y el tipo de vidriado, los cuales se encuentran bajo control de alguna norma nacional o internacional para determinar la eficiencia energética en las edificaciones; de igual manera, se implementa el uso de vegetación en techos o paredes para actuar como una barrera ante la radiación solar. Además del aprovechamiento de la luz natural mediante los diseños bioclimáticos, se aprovecha las corrientes de aire a través de las orientaciones de las paredes, techos o ventanas para conseguir de esta manera una ventilación natural.

Iluminación artificial

El consumo de energía eléctrica por iluminación artificial también resulta ser un factor importante en la demanda de energética en las edificaciones, pues al rededor del 35% del total de la energía eléctrica consumida en el mundo por edificaciones corresponde a iluminación (IEA, 2016).

En la actualidad, existe una amplia gama y marcas de luminarias disponibles para uso en edificaciones, que van desde las clásicas lámparas incandescentes hasta las halógenas, fluorescentes compactas y de diodo emisor de luz o LED (por sus siglas en inglés *Lighting Emitting Diode*). El funcionamiento de cada una de ellas, están de acuerdo a las disposiciones o avances tecnológicos en los que se han aplicado para sacar su diseño en el mercado. Por ejemplo, por mencionar algunas, las luminarias de tipo incandescente se basan en la construcción de un filamento (generalmente de tungsteno) en el interior de un la bombilla, el cual contiene un gas inerte (kriptón) que impide que se queme el filamento debido a las altas temperaturas (3200 K) que puede alcanzar después de incidir un flujo de corriente eléctrica a través de dicho filamento. Su eficiencia es mucho menor en comparación con otras lámparas, pues sólo del 15 al 20% se transforma en energía luminosa del total de la energía eléctrica consumida mientras, que el resto es emitido en forma de calor (Philips, 2015). Con respecto a las iluminarias de tipo LED estas son las más novedosas hasta el momento, basadas en el efecto fotoeléctrico (a través del material semiconductor con que están contruidos) se permite obtener la energía luminosa como respuesta al aplicarles un flujo de corriente eléctrica; el proceso de que lleva en transformar la energía eléctrica en luz a través del semiconductor, se genera un ligero calentamiento, obteniéndose de esta manera una mayor eficiencia al emitir un flujo de energía luminoso que en calor. Por lo tanto, al considerar la disipación del calor por cualquier tipo de luminaria en el interior de una edificación, repercute seriamente en el consumo de energía para remover las cargas térmicas generadas a causa de los procesos en qué es transformada la luz artificial.

En el presente trabajo de investigación, se estudia el efecto de una terraza como sistema pasivo de sombreado sobre el consumo de energía eléctrica por cargas térmicas para una vivienda de interés social de bajo consumo. El estudio del comportamiento térmico de la edificación se lleva a cabo mediante simulación dinámica, en la que se consideran las propiedades termofísicas y ópticas de los materiales integrados en la construcción, así como la orientación de la edificación; y por otro lado, se toman en cuenta las ganancias debido a cargas internas (sensibles) por iluminación (de acuerdo a un perfil de horario u ocupación). Por otra parte, el estudio comprende un análisis de costo-beneficio en el que se

recupera el tiempo de retorno de inversión del sistema pasivo de sombreado por la atribución de la disminución del consumo de energía por las cargas térmicas, considerando de esta manera, la ausencia de un sistema mecánico para climatizar el interior de la edificación. Así mismo, para el sistema de iluminación, se analiza la implementación de dos tipos de luminarias (incandescentes y LED) tomando en cuenta parámetros relacionados con la apariencia de la luz emitida, y con ello el análisis costo-beneficio sobre el consumo de energía y el consecuente tiempo de retorno de inversión de las fuentes de iluminación. Mejorando así el confort térmico y visual en el interior de la edificación.

1.6 Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica llevada a cabo, consiste en estudios relacionados con sistemas o elementos de sombreado ya sea internos y/o externos, y sus efectos sobre la reducción de la demanda energética por cargas térmicas en el sector de edificaciones; asimismo se hace la revisión bibliográfica, sobre el tipo de fuente de iluminación artificial al considerarlas como ganancias internas y su impacto sobre dichas cargas térmicas.

Torres y Evans (1999) realizaron un estudio numérico sobre el diseño de aventanamiento y su influencia en el consumo de energía de una edificación en Gran Buenos Aires. El modelo a estudiar, consistió en una habitación con dimensiones de 5 m de lado, aislada en toda su envolvente excepto la fachada donde se ubica la ventana. La iluminación para el estudio se fijó a 300 lux. Para analizar el comportamiento energético en relación a las cargas y la influencia directa e indirecta de la iluminación natural, se utilizó el software Energy-10. Las evaluaciones se hicieron para diferentes orientaciones considerando el aumento del aventanamiento en intervalos de 5 a 100% con pasos de 5 % bajo condiciones climáticas del sitio. Se hicieron rotaciones de 45° en las orientaciones de la fachada. También se consideró un voladizo a diferentes dimensiones para estudiar su efecto en los consumos por las tres cargas. Los resultados demostraron que a mayor superficie de ventana disminuye el consumo de energía por iluminación artificial hasta un 40%, pero por otro lado, provoca mayores pérdidas térmicas en invierno y excesivas ganancias en verano. En cuanto a las orientaciones, se observó que en el N y S se generaron los consumos globales menores de energía en relación a los porcentajes de aventanamiento evaluados, siendo en las orientaciones desfavorables para E y O. Y en cuanto a la evaluación del voladizo, se observó un descenso sobre el consumo de energía por cargas de enfriamiento y en menor medida por cargas térmicas, siendo constantes para las cargas de iluminación. Los autores concluyeron que, en los espacios interiores sin iluminación natural directa requieren más energía que espacios naturalmente iluminados ubicados a menos de 5 metros de la fachada. Por otro lado, la reducción de consumo de energía por cargas de enfriamiento que se da hacia el 10%, el cual también puede ser atribuida al aporte de la iluminación natural, ya que al faltar ésta, el excesivo consumo de iluminación artificial genera ganancias internas que aumentan las cargas de enfriamiento.

Li y Lam (2001) realizaron mediciones de campo sobre iluminación natural en un edificio de oficinas climatizados en Hong Kong. Se consideraron dos orientaciones norte y sur para el estudio. Se instalaron un total de 180 W de carga eléctrica (más consumo de auxiliares) por iluminación fluorescente. Se utilizaron dos controladores de salida de luz en las luminarias (uno cerca de la ventana y el otro para el resto de las luminarias) para ajustar los niveles de iluminación. El estudio se realizó en dos etapas, en la primera se investigó los niveles de iluminación por las luminarias que utilizaron balastos convencionales y electrónicos regulables. En la segunda etapa se registró el gasto de electricidad por las luminarias con y sin control de iluminación natural. El estudio también consideró el factor promedio de iluminación para proporcionar los niveles de luminosidad en las dos instalaciones (balastos convencionales y electrónicos

regulables). Se obtuvo el flujo de luz que incide en las ventanas y el flujo de luz absorbido por las superficies internas, y asimismo el factor de iluminación natural vertical. Los resultados demostraron que la iluminación con las luminarias con balastos convencionales fue de 480 Lm (menor a 500 Lm para un ambiente de oficina general) y 640 Lm para las otras. Para el factor de iluminación natural vertical dentro de las oficinas orientadas hacia el norte y sur fueron de 3.6 y 2.8% respectivamente, éstos debido a variaciones en la transmitancia del vidriado y la reflectividad de las superficie interna. Para la distribución de frecuencia acumulada de iluminación natural entre el 20 y 30%, se obtuvo una iluminación interna de 500 Lm proporcionados por la luz natural en ambas orientaciones bajo el control de encendido y apagado. Los ahorros de energía bajo el control de carga y a diferentes niveles de iluminación natural, fueron de 0.3 kWh/m² por semana y 15.7 kWh/m² anual. Los autores concluyeron que se puede obtener más ahorro de electricidad debido a la reducción de la disipación del calor por las luminarias, lo que ayuda a reducir el consumo de energía por cargas de enfriamiento. También, indicaron que los diseños de iluminación natural pueden resultar en un ahorro sustancial de energía en Hong Kong si se incorporan sistemas de iluminación natural apropiados.

Bodart y De Herde (2002) realizaron un estudio numérico referente al efecto del control de iluminación en función de la luz natural sobre el consumo de energía global en una edificación en Bélgica. El estudio realizado comparó las configuraciones de fachadas correspondientes a nueve formas de ventanas y nueve tipo de vidriados; asimismo la evaluación de tres casos para el coeficiente de reflexión en paredes (claro, gris y oscuro) y tres para el conjunto piso/pared/techo aplicados en los cuatro puntos cardinales (N, S, E y O). Se modeló la geometría tomando aspectos como construcción, cargas internas: de iluminación, electrodomésticos y horarios de ocupación. Se utilizaron los paquetes de cómputo ADELIN y TRNSYS para calcular el consumo anual de energía por iluminación, los valores horarios por cargas internas de iluminación y el consumo de energía global. Los resultados demostraron que el coeficiente de transmitancia, las configuraciones de fachadas, las orientaciones, espesores y el coeficiente de reflexión en paredes, influye sobre el consumo de energía por iluminación artificial. Los autores concluyeron que se puede lograr un ahorro de energía en un intervalo de 50 a 80% por implementación de pocas luminarias debido a un coeficiente de transmitancia del 60% en el vidriado. También se tiene un consumo de energía por iluminación sobre el consumo global de energía en el intervalo de 40 a 50% cuando no está involucrada la luz del sol, y de un 7 a un 40% cuando está disponible.

Franzetti et al. (2004) realizaron un estudio numérico, en la investigación se estudió un análisis global sobre las necesidades energéticas en una edificación tomando en cuenta el acoplamiento de iluminación (natural y artificial) y el sistema HVAC, en Francia. El estudio consideró la interacción entre iluminación y cargas térmicas, correspondientes a la luz complementaria (natural/artificial) e interacción (iluminación/cargas térmicas). El estudio se realizó mediante el código computacional CA-SIS y LIGTH. En la cuantificación complementaría la iluminación interior se calculó en el centro de cada zona del plano de trabajo, el cual es dividido en nueve zonas. En la interacción, la iluminación y el sistema HVAC se evaluaron en relación a las necesidades energéticas y a catorce parámetros de eficiencia. Se estudiaron dos situaciones, con disponibilidad de la luz del día y sin ella. Las necesidades energéticas anuales obtenidas con CA-SIS + LIGTH, demuestran que sin la valoración de la luz natural, las necesidades de enfriamientos son más importantes que las necesidades de calentamiento. En cuanto a la valoración de la luz natural, implica una reducción de las necesidades energéticas incluso por el uso de un dispositivo de control de iluminación. Los autores concluyeron que algún dispositivo de control de iluminación es justificado para una reducción de consumo de energía, no sólo por iluminación artificial, sino que también por un consumo de global incluyendo de calentamiento y enfriamiento, confort visual, balance de iluminación que también son relacionados en el ahorro de energía.

Tzempelikos y Athienitis (2006) realizaron un estudio numérico sobre el impacto en conjunto de la superficie del vidriado y, del tipo y control de sombreado sobre la demanda de energía por cargas de enfriamiento e iluminación natural. El estudio fue realizado a partir de un modelo de oficina de dimensiones de 4x4 y 3 m de altura en Montreal. Se seleccionaron las relaciones de ventana-pared (WWR) así como sus orientaciones. Los factores como la disponibilidad de la luz natural (diurna), la reducción de las cargas térmicas máximas y el consumo de energía fueron criterios principales. Para el control del sistema de iluminación artificial, se consideraron dos opciones: pasivo (luces encendidas en horas de trabajo) y activo (luces encendidas por sensores de acuerdo a la ocupación e iluminación natural). El dispositivo de sombreado fue una cortina de rodillo con propiedades ópticas características. El estudio se realizó para un año típico meteorológico. El modelo de la edificación fue simulada mediante el software comercial TRNSYS, donde a través del procesador de radiación se obtuvieron los valores horarios de irradiancia solar horizontal para su posterior implementación en las superficies inclinadas del modelo. De la simulación, se obtuvieron 8760 datos relacionados a la iluminancia sobre el plano de trabajo, de acuerdo a la WWR y las orientaciones. Una relación de la disponibilidad diurna (DAR) es calculada en función de la WWR y la orientación. DAR fue definida como la fracción de tiempo de trabajo anual durante el cual se dispone de luz de día suficiente (500 lux para el caso de estudio) en la superficie del plano de trabajo. Los resultados demostraron que el 30% de la WWR y con fachadas orientadas hacia el sur, se pueden asegurar niveles de iluminación casi completos (un DAR); y en cuanto al consumo de energía eléctrica, con el control de iluminación activo se puede alcanzar un 77 y un 16% sobre la demanda de energía por iluminación y enfriamiento respectivamente considerando una WWR del 30%.

Nikolaou et al. (2007) realizaron un estudio numérico donde investigaron el efecto de los dispositivos de sombreado sobre las cargas de enfriamiento y el consumo de energía anual en el sureste de Europa. El estudio consistió en el análisis de diez edificaciones ubicadas en Atenas. Dos tipos de dispositivos de sombreado fueron investigados para el estudio, tipo horizontal y vertical. Se recopilaron datos analíticos de las diez edificaciones divididos en cuatro cuestionarios. El primero cuestionario consistió en información general sobre los edificios y sus ocupantes. El segundo, sobre información específica sobre la envolvente del edificio. El tercero sobre información detallada en relación a los sistemas de calefacción, refrigeración e iluminación. Y el cuarto, consistió en el consumo anual total de energía. Se utilizó el software TRNSYS para la simulación del comportamiento térmico en las diez edificaciones. Los datos analíticos fueron introducidos en el modelo utilizado por TRNbuil. Los modelos fueron ejecutados para determinar las cargas por calefacción y enfriamiento de cada edificio y su consumo de energía anual total. Los resultados demostraron que con los dispositivos de sombreado de tipo horizontal orientados hacia el sur, se obtuvieron promedios de reducción del 18% sobre las cargas de enfriamiento y un promedio del 8.7% en el consumo anual de energía. Para los dispositivos de muro verticales (partesol) se obtuvo un promedio de 7.6% de reducción sobre las cargas de enfriamiento y un promedio de 1.4% en el consumo de energía. Los autores concluyeron que el empleo de los dispositivos pasivos de sombrado de horizontal resultan más eficientes, generando ahorros de energía que los de muro vertical. Asimismo, con el diseño apropiado de dispositivos de sombreado, se puede lograr una reducción del coste de inversión así como una reducción del coste operativo de los sistemas de enfriamiento en una edificación.

Roisin et al. (2008) realizaron un estudio numérico-experimental donde compararon el potencial de ahorro de energía por iluminación para una oficina típica mediante tres sistemas de control de iluminación en Europa. Los sistemas de control de iluminación se instalaron y compararon tomando en cuenta el consumo real y de los sistemas auxiliares, la disponibilidad de la luz natural en todo el año, la orientación de la oficina y el sitio. El estudio se realizó mediante el método basado en simulación llamada

DAYSIM. La metodología combina mediciones eléctricas y fotométricas y simulaciones computacionales. Las mediciones eléctricas y fotoeléctricas se realizaron a nivel laboratorio sobre los tres sistemas de control de iluminación. Se propuso un modelo de oficina con medidas y vidriado característicos evaluados en sus cuatro orientaciones (N, S, E y O) y analizados para tres sitios: Brúcelas, Atenas y Estocolmo. El estudio demostró que los ahorros por iluminación artificial son altos cuando es regulada la iluminación de acuerdo a la disponibilidad de la luz natural y una ligera dependencia por el sitio evaluado. El autor concluyó que la mejor configuración de la simulación es la orientación sur en la ciudad de Atenas, tenido un ahorro potencial de 60% sobre el consumo anual, y para el peor caso de orientación es en el norte en Estocolmo con el 45%.

Kim et al. (2012) realizaron un estudio numérico sobre una propuesta de un dispositivo de sombreado externo para su aplicación en departamentos de Corea del Sur. El dispositivo de sombreado se diseñó con el objetivo de minimizar los consumos de energía por cargas térmicas (enfriamiento y calentamiento), al considerar la disponibilidad de la luz natural. La eficiencia del modelo propuesto, fue comparado con otros dispositivos de sombreado (al variar sus inclinaciones): voladizo convencional, persiana y estante ligero. Para la estimación del consumo de energía, se estableció un prototipo de edificio residencial. La superficie del modelo del edificio fue de 145 m² por 2.3 m de alto, con fachadas principales al sur donde se consideró 90% de vidriado. El estudio fue llevado a cabo a través el software comercial IES VE. Para la simulación, se emplearon los datos meteorológicos de la zona. Por otro lado, se consideraron las propiedades, espesores, y dimensiones de los materiales de muros, pisos, techos y del vidriado. Así mismo, las variables de: la temperatura de referencia para el confort térmico (24 a 26°C), humedad relativa (30-70%), ganancias de energía (calor sensible y latente) por persona (4 por nivel), así como el patrón de uso y los cambios de aire al interior del edificio. Los resultados revelaron que el mejor consumo de energía por cargas de enfriamiento fue el propuesto (con un 11%) a 60°, seguido del estante fijo (20%) a 0°, el de voladizo (con 18%) a 0° y por último el de persianas (95.96%) a -70°.

Akash et al. (2014) realizaron un estudio numérico sobre el efecto de dos tipos sombreado en la reducción del consumo de energía por cargas térmicas de una edificación ubicada en Asansol, India. Los tipos de sombreado estudiados fueron: fijos y móviles. El estudio se realizó para un edificio en forma de “U”, que constó de tres alas (N, S y E), donde cada ala tuvo tres niveles. Cada nivel contó con dos voladizos como sombreados fijos para la protección solar de las habitaciones, y se aplicó un sistema de sombreado móvil en la ala E. La superficie de la base del edificio tuvo un área de 1465.68 m². El modelo en 3D se importó a TRNSYS para el estudio del comportamiento térmico. En el modelo, se analizaron 3 zonas térmicas para cada ala donde se consideraron cuatro tipos de materiales de construcción correspondientes a: pisos, muros externos e internos y techos con espesores y propiedad termofísicas característicos; y asimismo con un tipo de vidriado simple. A demás, se consideró la infiltración y ventilación en el interior de cada zona; así como, las ganancias de calor internas por: equipos eléctricos, iluminación y número de ocupantes, todos estos en relación a un horario de ocupación. Los datos meteorológicos se obtuvieron a partir de la estación meteorológica más cercana para el análisis del mes de Julio. Los resultados demostraron que los sombreados fijos (fachadas norte-sur) no tuvieron resultados significativos debido a su correcta construcción de la edificación; en cuanto a los dispositivos de sombreado móviles (fachada este-oeste), se obtuvo una reducción del 8% (5 148 kWh) en el consumo de energía global anual por enfriamiento.

Candanedo et al. (2014) realizaron un estudio numérico, la investigación consistió en un diseño preliminar de una edificación de bajo consumo en Bélgica. El diseño comprendió dos planta, una alta y una baja, con seis cuartos en cada nivel. Se evaluaron doce zonas térmicas bajo siete parámetros de diseño relacionados con la envolvente. Se consideró un estudio de iluminación y la selección del tipo de

iluminaria, y se realizaron tres estimaciones: el primero sobre el consumo de energía por dispositivos eléctricos, el segundo para la demanda de energía por agua caliente y el último para determinar el valor óptimo de confort térmico. Se incluyó un sistema fotovoltaico (PV) para reducir las demandas de energía eléctrica. El modelo se llevó a cabo con Gen Opt. El software permite optimizar las zonas térmicas con altas cargas térmicas mediante el cambio de envolvente. Para la iluminación del edificio se usó el DIALux evo tomando en consideración los valores recomendados de iluminación para cada zona. El consumo de energía por calentamiento de agua se estimó en función de las temperaturas del agua y del ambiente y asimismo por el número de ocupantes. La generación de energía por PV se simuló a través del TRNSYS 3D para una correcta instalación en el techo considerando el efecto “sombra”. Los resultados demostraron que existen múltiples soluciones que garantizan reducir las cargas de calor a 15 kWh/(m² año). Del software DIALux evo se obtuvieron los valores óptimos de iluminación en cada zona. Los autores concluyeron que en las simulaciones, es posible alcanzar un consumo cero de energía en la edificación con la contribución de generación de energía con un sistema PV.

Lai et al. (2014) realizaron un estudio numérico sobre el prototipo en edificación residencial con eficiencia energética, en China. El prototipo se basó sobre el concepto de construcción MIDMUD, concepto de construcción de densidad media integrada con varias técnicas. Para el estudio, el prototipo fue dividido en seis zonas diferentes. Se consideraron los espesores y transmitancias térmicas en la envolvente, asimismo tres parámetros relacionados con: el modelo, ventilación e infiltración de aire para cada zona; y por otro lado, las ganancias térmicas en función al número de ocupantes y dispositivos. Se empleó un sistema complejo de vidriado de ventanas (CFS), el cual consta de doble vidriado con componente de sombreado de rejillas. Se instalaron diferentes sistemas de enfriamiento para el techo, y calentamiento en paredes. Se utilizó un modelo de referencia para evaluar el rendimiento energético del prototipo a partir de cuatro configuraciones relacionadas con: la envolvente del edificio, horas de ocupación, ganancias de calor interno y el sistema HVAC. El modelo de referencia y el prototipo fueron modelados mediante el software TRNSYS. Los resultados demostraron que el mejor sistema de HVAC es el sistema de calefacción/refrigeración radiante (HRH/C), el cual redujo el consumo total de energía eléctrica en un 36.17%; y en cuanto a la al sistema CFS, se obtuvo una disminución en el consumo total de energía de 6.79%, en comparación con una ventana convencional. Los autores concluyeron que el impacto del sistema CFS sobre el sombreado en la ventana no es tan bueno como se esperaba; por lo que, el siguiente estudio será sobre la mejor condición de aplicación del sistema CFS y la mejora del sistema térmico interior.

Shan (2014) realizó un estudio numérico para proponer un método de optimización de variables de construcción en fachadas en edificaciones, para reducir al mínimo el consumo y costos de energía anual por cargas de calentamiento, enfriamiento e iluminación para una oficina en Michigan. Las variables estudiadas y optimizadas fueron las dimensiones de las rejillas de las ventanas y la profundidad del dispositivo de sombreado. El método de optimización implementado fue el algoritmo genético. El método con algoritmos permite encontrar la combinación óptima de parámetros de simulación para el diseño de la arquitectura. El modelo de estudio consistió en una habitación con dimensiones características. El modelo tiene fachada principal hacia el sur, el cual contiene sistemas de sombreados verticales y horizontales. Se implementaron siete parámetros de entrada para el caso de estudio relacionados con el sitio, las dimensiones, la absorbancia en paredes, iluminación artificial y temperaturas. Para determinar el control de iluminación artificial, se utilizó el programa Daysim. En el Daysim, se determinó el criterio de optimización para luz natural de 500 lux, en función de las dimensiones de la ventana y profundidad del dispositivo de sombreado. Los resultados de Daysim se importaron en un programa de simulación dinámica TRNSYS, para obtener la demanda anual de energía para la oficina. En el TRNSYS se consideró la función-objetivo como un el costo total (C_{total}) en función

a los tres tipos de cargas (Q_{heat} , Q_{cool} y Q_{light}). Se obtuvieron un alto número de variables de soluciones, por lo que se implementó el método de optimización. Como resultados se observó que el método de algoritmo genético, reduce los efectos antagónicos sobre el ahorro de energía, donde las variables pueden tener efectos opuestos sobre el costo de energía anual por ganancia de calor solar y luz natural al interior en invierno y provocando problemas de sobrecalentamiento durante el verano. El autor concluyó que, el algoritmo genético es una manera rápida y precisa de encontrar soluciones óptimas para el problema de diseño de fachadas, proporcionando pautas para hacer más eficientes las decisiones arquitectónicas de diseño temprano.

Camarano et al. (2015) realizaron un estudio numérico de las diferentes soluciones de iluminación natural sobre la demanda de energía global en una habitación en Italia y Alemania. En la investigación, se hizo un estudio de la disponibilidad de la luz natural en una habitación y su influencia de su cosecha sobre la demanda anual de energía por iluminación artificial, calefacción y refrigeración. Así mismo, se ensayaron diferentes estrategias de control y atenuación de la luz artificial. Se evaluó el rendimiento de iluminación de interiores de acuerdo a la referencia llamada Autonomía Espacial de Luz Solar ($sDA_{300/50\%}$). El modelo de estudio consistió en una habitación con dimensiones de 12 m de ancho por 3 m de alto evaluado en dos sitios de Italia: Turín, Catania y en Berlín capital de Alemania. Para el estudio de problema se siguió una metodología basada en un estudio paramétrico mediante simulaciones dinámicas para evaluar la disponibilidad de la luz natural y la demanda de energía en relación a las características arquitectónicas. Las simulaciones fueron realizadas mediante los paquetes Daysim y EnergyPlus. En el Daysim se calculó el perfil de iluminación anual en cada configuración y la demanda anual de iluminación eléctrica, asimismo se calcularon los valores correspondientes para sDA. En el EnergyPlus se realizó el análisis paramétrico, junto con un gráficoador de interfaz (jEPlus) que permitió establecer los valores alternativos para cada parámetro y ejecutar múltiples simulaciones. Cinco variables de diseño se usaron para el estudio paramétrico, los cuales corresponden a la orientación, fondo de la oficina, la relación ventana/pared y la transmitancia en el vidriado. Normas italianas se implementaron para establecer el número de personas y la proporción de cambio de aire, así como también las cargas térmicas generadas por personas y equipos, y las temperaturas estacionales. Los resultados demostraron que la cantidad de luz natural dentro de los espacios estuvo fuertemente influenciada por las configuraciones arquitectónicas, ya que una profundidad en la habitación y una disminución en la relación ventana/pared se obtuvieron una disminuciones en valores de $sDA_{300/50\%} < 55\%$, lo que se considera que en el espacio se encontró insuficientemente iluminado por la luz natural y por ende, un aumento en la demanda de energía por iluminación. En los casos favorables de iluminación natural, se obtuvieron una reducción sustancial en la demanda de energía por iluminación eléctrica ($sDA_{300 / 50\%} \geq 75\%$) debido al sistema de atenuación sensible a la luz natural. Los autores concluyeron que el ahorro en términos de demanda global de energía se puede lograr un ahorro promedio del 31% en espacios con alta disponibilidad diurna ($sDA_{300 / 50\%} \geq 75\%$) cuando se considera un sistema de control sensible a la luz del día en lugar de un peor caso, con luces siempre encendidas.

Khin et al. (2015) realizaron un estudio numérico sobre tres tipos de dispositivos de sombreado y los requerimientos energéticos por enfriamiento en una fachada de una edificación en Malasia. En la investigación, se estudiaron los efectos de los dispositivos de sombreado aplicados en diferentes orientaciones de la fachada y el consecuente ahorro de energía por cargas de enfriamiento; asimismo, aplicando diferentes configuraciones y rendimientos térmicos sobre los vidriados de la fachada. Los dispositivos de sombreados estudiados fueron: horizontales, verticales y horizontal-vertical. Cada dispositivo de sombreado, fue evaluado par el edificio de Kuala Lumpur en Malasia. El edificio consta de 41 niveles con envolvente exterior construido con muros de paneles de doble vidriado de baja emisividad en sus cuatro orientaciones. El caso de estudio fue modelado y simulado mediante el software

IES. En la construcción del modelado se consideraron un total de siete especificaciones relacionados a materiales de construcción, ventanas, vidriados e iluminación. En las simulaciones, los tres tipos de dispositivos de sombreado se aplicaron por separado en las cuatro orientaciones (N, S, E y O) de las fachadas. En las configuraciones del doble vidriado en la fachada, se remplazaron de alto rendimiento por simple de bajo rendimiento, con coeficiente de sombreado de 0.9 y una transmitancia térmica de $6.38 \text{ W/m}^2\text{K}$. Se realizaron las simulaciones de los tres tipos de dispositivos de sombreado en el doble vidriado y vidriado simple. Los resultados demostraron, que para el ahorro de energía anual por cargas de enfriamiento a través del modelo de doble vidriado y dispositivos de sombrado de horizontal-vertical en todas las fachadas fue del 9.9%, siendo para los dispositivos de sombreado horizontales del 7.4% y para los dispositivos de sombreado verticales se obtuvo un 5.0%. Cuando se utilizó el vidriado único y los dispositivos de sombreado horizontal-vertical aplicado en todas la fachadas se obtuvo un ahorro anual de energía por refrigeración del 10.4%, en cuanto a los dispositivos de sombreado horizontales fue del 7.8% y para los dispositivos de sombreado verticales se obtuvo un 5.6%.

Lee et al. (2015) realizaron un estudio numérico sobre dos tipos de dispositivos pasivos de sombreado integrados a una fachada de doble capa (DSF), y sus efectos en el rendimiento de ventilación natural y eficiencia energética en Kansas. La estructura de DSF consistió en un corredor de un piso de altura en el cual están integrados dispositivos de sombreados horizontales y verticales, así como también, una cavidad de aire en la DSF con dimensiones de 16 m de longitud por 8 m de ancho y 4 m de altura. El modelado de DSF se llevó a cabo con el software de simulación para CFD llamado FLoVENT, y para la simulación en relación a la eficiencia energética se usó el paquete Sefaira. Se analizaron las relaciones de los patrones del flujo, velocidad y temperatura del aire mediante FLoVENT; asimismo, el consumo de energía a través de Sefaira por calefacción y refrigeración durante todo el año, éstos en relación a los cuatro escenarios en las configuraciones (horizontales y verticales) de los dispositivos pasivos dentro de la cavidad de aire en la DSF. En las dos configuraciones se analizaron cuatro inclinaciones: 0, 30, 60 y 90°. En el análisis de simulación, se necesitaron siete parámetros relacionados a: las condiciones ambientales del lugar, materiales y dimensiones y las propiedades del doble vidriado. Los resultados demostraron que en los dispositivos de sombrado horizontal y vertical en el ángulo de 0° contribuyeron a una distribución de temperatura del aire en la cavidad de ambos lados debido a corrientes convectivas verticales en el lugar. Siendo en los dispositivos de sombreado horizontal a 90° produjo un aumento de calentamiento de aire en la cavidad, debido a la irradiancia solar transmitida a través del vidriado, por la cual el aire caliente fue estancado entre el espacio estrecho de los dispositivos y el vidriado exterior. Las velocidades medias del aire dentro de la cavidad en ambos dispositivos de sombreado en los ángulos de 90° fueron mayores que en las inclinaciones de 0°. Para las temperaturas del aire en la cavidad de aire de la parte exterior de los dispositivos de sombreado horizontal fue mucho mayor que en el revestimiento interior. El ahorro anual de energía por los dispositivos de sombreado horizontal a 30, 60, 90° se obtuvo un ahorro del 0.4, 2.6 y 6.4% respectivamente. Los autores concluyeron que los dispositivos de sombreado horizontales son más eficaces en el ahorro de energía por calefacción y enfriamiento que los dispositivos de sombreado verticales, pero una cavidad de aire del lado exterior de dispositivos de sombreado horizontales sería susceptible de sobrecalentamiento causando malestar térmico y por ende una demanda de energía por cargas de enfriamiento.

Torres et al. (2016) realizaron un estudio numérico enfocado a la evaluación del confort térmico al variar los materiales de construcción y la consideración de elementos de sombreado para una vivienda de interés social en Pachuca, Hidalgo. El diseño de construcción de la vivienda es característico del sitio (de una sola planta) así como sus dimensiones; conformada de dos habitaciones, con una cocina, sala-comedor y un baño. El diseño cuenta con dos puertas, cuatro ventanas y dos elementos de sombreados (por una marquesina y por efecto de una vivienda). Para predecir el comportamiento térmico en el interior de la

vivienda, se simuló el diseño con el software comercial TRNSYS. Para la simulación, se obtuvieron los datos meteorológicos de la región, que permitieron a su vez, la evaluación para una semana de modelación (168 h). En la simulación, se tomó en cuenta la orientación y dimensión de la vivienda, las propiedades termofísicas del vidriado y de los muros (materiales actuales y para la simulación). En el interior de la geometría modelada, no se consideraron la distribución de las habitaciones. Dos configuraciones fueron llevadas a cabo: en la primera (C1), con muros de ladrillo con un revestimiento de mortero gris; y en la segunda (C2), con muros de roca natural porosa. Los resultados demostraron que para la configuración C1, las temperaturas promedio al interior de la vivienda fueron de 14.5°C comparadas con las del exterior de 26.5°C; y en cuanto a la configuración C2, las temperatura promedio al interior fueron de 9.7°C. Además de las configuraciones en los materiales, los resultados fueron influenciados por la fachada principal hacia el sur, ya que se consideró en ambas configuraciones, el elemento de sombreado orientado hacia esta dirección. Los autores recomendaron que la mejor configuración es la C2 para su aplicación en climas cálidos, debido a que no se implementarían sistemas mecánicos para obtener valores cercanos al confort térmico.

Hashemi y Khatami (2017) realizaron un estudio numérico en el que evaluaron diversas estrategias de sombreados y su efecto sobre las ganancias de calor y el confort térmico en una vivienda de bajo consumo en Uganda, África. Las estrategias de sombreado que se evaluaron fueron: cortinas, voladizos de techos y ventana, así como el sombreado por árboles. Para el estudio y análisis de las estrategias de sombreado y su efecto, se realizaron simulaciones térmicas dinámicas mediante el software EnergyPlus. Para la simulación, se modeló la geometría de la vivienda típica de la región (unifamiliar para cuatro personas). El modelo consistió en una sola zona térmica con dimensiones de 9 m² de superficie por 3 m de altura, una ventana orientada al sur (1 m²) y una puerta (2 m²) con un área de apertura efectiva del 80%. Así mismo se consideraron los espesores y propiedades de los muros, piso, techo y del vidriado, así como la ventilación e infiltración natural en aberturas. Se fijó un perfil de horario de ocupación en la vivienda. Se realizaron un total de 30 simulaciones con escenarios combinados (5 de geometría y 6 con horarios) bajo el enfoque adaptativo para evaluar las condiciones de confort térmico. Los resultados mostraron que de los diferentes escenarios de sombreado estudiados, ninguno fue lo suficientemente efectivo para cumplir con el criterio de confort térmico, pues sólo mejoraron las condiciones del confort en el interior de la vivienda, esto debido a que el sol se encuentra en el cenit al medio día solar todo el año debido a que el lugar de estudio se encuentra en el plano ecuatorial terrestre. Sin embargo, las estrategias de sombreados son más eficientes durante los periodos más calurosos del año, reduciendo el sobre calentamiento hasta el 52%. Por lo tanto, los autores recomiendan una orientación de un edificio norte sur con aberturas principales en el lado norte para reducir las ganancias de calor solar y por ende, la reducción del riesgo de sobrecalentamiento.

1.7 Conclusión de la revisión bibliográfica

Con base en la revisión bibliográfica, se concluye que los dispositivos pasivos de sombreado incorporados en fachadas ya sea para edificaciones residenciales o no residenciales, se implementaron de manera vertical y/u horizontal; en los que se estudiaron la influencia sobre los consumos de energía eléctrica por cargas térmicas. Sin embargo, en la revisión bibliográfica no se encontraron estudios sobre terrazas como sistemas pasivos de sombreado en viviendas residenciales-plus y su efecto sobre la reducción de las cargas térmicas por enfriamiento. Por otro lado, tampoco se han hecho estudios, en este tipo de viviendas, sobre el impacto que se tiene en dichas cargas térmicas, al considerar las ganancias internas por fuente de iluminación artificial de tipo incandescente, y la sustitución por un de bajo consumo energético y alto rendimiento lumínico.

Es por ello que se han planteado en este trabajo de investigación los siguientes objetivos, tanto particulares como generales, así como los alcances.

1.8 Objetivos

1.8.1 Objetivo general

Cuantificar el gasto energético y el consecuente ahorro económico de una vivienda que ha sido diseñada para minimizar el consumo de energía eléctrica.

1.8.2 Objetivos particulares

1. Definir el modelo de vivienda que se va a analizar.
2. Familiarizarse con el uso del paquete de cómputo TRNSYS.
3. Realizar el análisis de las cargas térmicas de la vivienda modelo a la cual, debido a su diseño, ha sido necesario incorporarle unos sistemas pasivos de sombreado (terrazas).
4. Cuantificar el consumo energético de la vivienda modelo usando focos incandescentes y comparar el ahorro energético al sustituirlas por luminarias de muy bajo consumo eléctrico (LED's).
5. Realizar un estudio de costo-beneficio al incorporar los elementos anteriores.

1.9 Alcance

1. Se obtendrá el ahorro energético y monetario de la vivienda modelo, considerando la incorporación de una terraza como sistema pasivo de sombreado.
2. Se obtendrá el ahorro energético y monetario de la vivienda modelo al substituir los focos incandescentes por luminarias de muy bajo consumo.
3. Se analizará el costo de recuperación de la inversión en la terraza, así como de la substitución de los focos incandescentes por luminarias de bajo consumo.

Capítulo 2:

Fundamentos teóricos

En este capítulo se describen algunos conceptos básicos relacionados al tema de estudio de esta tesis. La descripción de los conceptos se enfoca los diferentes mecanismos de transferencia de calor, así como el balance de energía en el interior de una edificación, la descripción de la arquitectura bioclimática. Por otro lado, se describe también los conceptos relacionados a geometría solar donde se detalla las posición de la Tierra debido el movimiento de rotación y traslación durante todo el año, así como la relación y su efecto de la radiación solar y el movimiento aparente del sol, de acuerdo a la superficie horizontal terrestre, el ángulo azimutal y cenital a través de la bóveda celeste. Así mismo, se describe las teorías principales para la determinación del concepto del confort térmico en el interior de una edificación, mencionando algunos balances de energía en el cuerpo humano involucrados en este concepto. Por último, se explica el concepto de confort lumínico, confort visual y demás relacionado al sistema de iluminación artificial en interiores en el sector de edificaciones.

2 Fundamentos teóricos

2.1 Trabajo

Para realiza un trabajo físico, se requiere de una fuerza sobre un cuerpo, el cual tendrá como resultado un desplazamiento por dicha fuerza. El valor obtenido del trabajo (W) es por lo tanto, la fuerza aplicada (F) por el desplazamiento realizado (d).

$$W = F * d \quad (2.1)$$

Su unidad del trabajo en el SI es Jules (J), que es el trabajo realizado al desplazar un objeto a una distancia de un metro con 1 Newton (N) de fuerza requerida.

La potencia (P) puede ser definida como el trabajo (W) por unidad de tiempo (t), esto es:

$$P = \frac{W}{t} \quad (2.2)$$

siendo su unidad de medida el Watt, lo que equivale a J/s.

2.2 Calor

Se le llama calor a la influencia que se transmite de un cuerpo a otro al ponerse en contacto, por el hecho de disponer diferencias de temperaturas, lo cual puede generar un trabajo, lo que significa que tiene carácter energético. Como el calor se manifiesta en forma de energía, éste se mide en Jules o en termias.

2.3 Sistema

Un sistema es un objeto o una colección de objetos en los que se realiza un estudio o análisis. Un sistema se caracteriza por tener un límite o frontera definida, llamada precisamente condición de frontera, la cual se elige y es definida al comienzo del análisis. Definido el sistema con las condiciones de frontera a evaluar, todo lo exterior a él es considerado como entorno o ambiente. Por lo tanto, toda materia y energía que sale del sistema ingresa al entono, pero puede suceder de manera inversa.

Sin embargo, existen algunos sistemas seriamente estrictos en relación a su condición de frontera o en relación a la interacción del ambiente en la que se está operando, en ellos se encuentra el sistema abierto, en el que puede intercambiar tanto materia, calor y trabajo con el ambiente. Pero para un sistema cerrado, en él sólo se puede intercambiar calor y trabajo con su entorno. Para el caso de los sistemas aislados, en ellos no se puede tener interacción o intercambio de calor, trabajo o materia con el entorno.

Es de suma importancia, definir el estado en el que se encuentra el sistema, pues en él involucra un sinfín de variables como la temperatura, presión, composición total de materia, posición y entre otros, los cuales hacen referirse o caracterizar al estado del sistema para el análisis.

El estado de un sistema puede cambiar, ya sea por el aumento o reducción del valor de alguna de las variables; en este sentido el concepto que define a este cambio se le llama función de estado o propiedades del estado, en el que el cambio de las propiedades del sistema dependen del estado inicial y final del proceso, por lo que el cambio que se efectuara en el sistema será de estado final menos el inicial.

2.4 Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor, es la ciencia que no sólo permite realizar estudios para la determinación de la predicción de la cantidad de energía, sino también para la rapidez de ésta debido a una diferencia de temperaturas entre dos cuerpos. Dicha energía por definición común, es el calor; la termodinámica permite determinar qué cantidad de ésta energía es requerida para que un sistema puede ser llevado desde un estado a otro; sin embargo, la termodinámica no proporciona la información de la rapidez con que se llevara a cabo la propagación o trayectoria de esta energía (Cengel, 2011).

El proceso de transferencia de calor se presenta cuando la temperatura de un cuerpo o entre dos cuerpos es diferente, es decir, el calor fluye de un sólido o fluido en el que sus átomos o moléculas se encuentren más excitadas (energizadas) hacia medios donde los átomos o moléculas se encuentren menos excitados.

Por lo tanto, la transferencia de calor, es la energía desplazada a consecuencia de una diferencia de temperaturas.

La transferencia de calor, se puede llevar a cabo mediante mecanismos donde se requieren medios de transporte (sólidos o fluidos) o inclusive en el vacío. En un ambiente existen tres mecanismos de transferencia de calor, que son: conducción, convección y radiación. Se hace referencia a la conducción o llamada también difusión, cuando se tiene un gradiente de temperatura en un medio estacionario, ya sea en un sólido o en un fluido. En cuanto a la convección, la transferencia de calor se lleva a cabo entre una superficie o cuerpo y un fluido cuando se encuentran a diferentes temperaturas. Para el caso de la transferencia de calor por radiación, todo cuerpo o superficie con temperatura finita por encima del cero absoluto, emite energía mediante ondas electromagnéticas, por ende, no se requiere un medio para propagar el calor, y la transferencia total de calor por este mecanismo sucede entre dos cuerpos o superficies a diferentes temperaturas (Incropera, 1999).

2.4.1 Transferencia de calor por conducción

El mecanismo de transferencia de calor por conducción, es llevado a cabo a nivel microscópico, donde los átomos y moléculas se encuentran en actividad debido a que algunas de ellas están más energizadas que otras. Cuando se presentan altas temperaturas en un cuerpo sólido o en una superficie, éstas están relacionadas directamente a los átomos, donde éstos tienen mayor carga o energía, y por tanto tienen mayor capacidad de ceder energía a otras y así de manera sucesiva hasta alcanzar un estado permanente, durante este proceso, existe el choque o movimiento vibratorio de las partículas.

Cuando existe un gradiente de temperatura, la dirección de la transferencia de calor por conducción ocurrirá desde la zona de mayor temperatura a la de menor temperatura.

El proceso de la cantidad de energía que se requiere para ser cedido desde un extremo hacia otro, es posible cuantificarla mediante ecuaciones o modelos. La expresión que permite cuantificar este fenómeno es conocida como Ley de Fourier (Sears, 2008):

$$q_{cond} = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.3)$$

Esta ley establece que la cantidad de transferencia de calor por conducción en una dirección dada es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y el gradiente de temperatura en la dirección

considerada. El flujo de calor está en función a una propiedad llamada conductividad térmica (λ) característica de cada material, la cual permite definir con qué rapidez se distribuye la energía. Presentándose mayores valores para metales puros y menores en el caso de los gases. Por otro lado, la conductividad térmica varía de acuerdo a la temperatura en la que está expuesto el material, por ejemplo, en los metales puros, esta propiedad decrece, pero no siendo así para los gases o materiales aislantes donde la conductividad térmica aumenta.

El signo menos en la ecuación (2.3) representa el sentido de la dirección de la transferencia del calor, es decir en su forma decreciente.

Un concepto de resistencia térmica (que es análogo a la resistencia eléctrica) es ocupado para determinar el flujo de calor a través de una pared compuesta de diferentes capas de materiales (Ozisik, 1985); por lo tanto, considerando un espesor (L) en la ecuación de la ley de Fourier que da expresada como:

$$q_{cond} = Aq = A\lambda \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2.4)$$

Reacomodando términos de acuerdo al concepto de resistencia térmica para determinar la transferencia de calor en una pared compuesta por varios materiales, es determinada como:

$$q_{cond} = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (2.5)$$

siendo:

R la resistencia térmica que presenta la pared cuando el flujo de calor atraviesa una área a una diferencia de temperaturas.

Y como cada capa del material de la pared cuenta con una conductividad térmica propia; de la ecuación 2.5 la R es expresada en términos de conductividad térmica.

$$R = \frac{L}{A\lambda} \quad (2.6)$$

2.4.2 *Transferencia de calor por convección*

La transferencia de calor por convección se origina por una diferencia de temperaturas entre un cuerpo sólido y un fluido.

El efecto convectivo en un medio se lleva a cabo mediante dos mecanismos, el primero está relacionado a nivel molecular, donde ocurre la vibración de moléculas debido a la energía (calor), es el momento en el que ocurre la conducción-convección; en el segundo, se origina el movimiento global o macroscópico del flujo del fluido.

En otras palabras, este mecanismo de transferencia de calor sucede cuando una superficie o cuerpo que se encuentra a mayor temperatura en relación al fluido del ambiente o entorno, por lo que las partículas del fluido adyacentes y más cercanas a la fuente de calor (ya sea una superficie o cuerpo), adquieren una ganancia de energía ocasionando un cambio en la densidad del fluido y por ende, un movimiento vertical o ascendente, posteriormente reemplazándose el fluido calentado por fluido de menor temperatura y por

tanto un desplazamiento de flujo de fluido en esa zona. En este sentido, se emplean dos términos para referirse a este mecanismo de transferencia, el primero es convección, que hace referencia al transporte acumulado; y en el caso de advección cuando el transporte de del fluido es de manera volumétrica (Incropera, 1999).

La clasificación de la transferencia de calor por convección, se centra en la manera en que un fluido calentado es desplazado; para una convección libre o natural el flujo es causado por un empuje debido a la diferencia de densidades como consecuencia de cambios en la temperatura del propio fluido. En el caso de convección forzada, en él se necesita un agente externo para mover el flujo de fluido (ya sea una fuente de corriente de aire natural, ventilado o una bomba). En la mayoría de estos casos, la energía que es transferida es energía sensible o energía interna del fluido. Sin embargo, en algunos mecanismos de convección involucran intercambio de calor latente (para cambiar de un estado al fluido).

El proceso de transferencia de calor por convección es establecida por la Ley de enfriamiento de Newton:

$$q_{conv} = h_{conv}(T_s - T_{\infty}) \quad (2.7)$$

siendo:

q_{conv} el flujo de calor por convección (W).

h_{conv} el coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m²K).

$T_s - T_{\infty}$ las diferencias de temperaturas corresponden a la de la superficie y del fluido respectivamente (°C).

El h_{conv} es dependiente de la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento de fluido y propiedades termodinámicas y de transporte del fluido.

2.4.3 *Transferencia de calor por radiación*

Toda superficie sólida, así como fluidos presentan una temperatura finita en el espacio y por tanto emiten radiación térmica. De modo que, en cualquier estado de la materia, la radiación es debida a los cambios en la última orbita de la configuraciones de los átomos donde se adquieren las ganancias de energía. La energía emitida por radiación es transportada mediante partículas pequeñas llamadas fotones o común mente llamadas ondas electromagnéticas a velocidad de la luz. Por lo tanto en este mecanismo de transferencia no se requiere de algún medio material para transportar la energía, en comparación con los mecanismos anteriormente mencionados. Siendo el vacío el mejor medio en que se propaga la energía por radiación.

La velocidad con que es emitida la cantidad de energía por una superficie por unidad de área (W/m²) se denomina potencial emisiva superficial, la cual es la máxima potencia emisiva que puede tener un cuerpo, para un cuerpo negro es establecida por la ley de Stefan-Boltzmann como:

$$E_{cuerpo} = \sigma T_s^4 \quad (2.8)$$

siendo:

T_s la temperatura absoluta o superficial (K).

σ la constante de Stefan-Boltzmann 5.67×10^{-8} W/m²K⁴.

Por lo que una superficie o cuerpo con estas características, se llama radiador ideal o cuerpo negro; por otro lado, el flujo de calor emitido por una superficie real, es mucho menor comparada a la del cuerpo

negro a las mismas condiciones de temperaturas, esto es expresado como:

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.9)$$

siendo:

ϵ la propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad, cuyos valor se encuentra entre el rango de $0 \leq \epsilon \leq 1$.

La emisividad proporciona una medida de la eficiencia con que la superficie emita energía por radiación en relación a un cuerpo o negro. Este valor está en función al tipo de material y acabado de la superficie.

Se denomina irradiación (G) a la velocidad con que toda la radiación (emitida por cualquier fuente) incide sobre una área unitaria de la superficie. Ya sea que la mayor parte de la irradiación sea absorbida por la superficie o sólo una parte, la cantidad de energía en la superficie del material se ve afectada al incrementar su temperatura; por lo tanto, la velocidad con que la energía radiante es absorbida por unidad de área superficial es determinada a partir de una propiedad radiativa denominada absorptividad (α):

$$G_a = \alpha G \quad (2.10)$$

Los valores para la absorptividad en un material se encuentran en entre el rango de $0 \leq \alpha \leq 1$. Para una superficie con valor menor a uno y con característica opaca, parte de la irradiación es reflejada. Pero si la superficie es semitransparente, entonces parte de la irradiación también es transmitida a través de ella.

Para una superficie gris (donde $\alpha = \epsilon$), la velocidad neta de transferencia de calor a una temperatura de la superficie (T_s) a un cuerpo negro que lo rodea a una temperatura (T_a) expresada por unidad de área, es determinada por:

$$q_{rad} = \epsilon E_{ideal}(T_s) - \alpha G = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4) \quad (2.11)$$

Esta expresión permite diferenciar la energía térmica que es liberada y absorbida por la radiación.

Otra maneras en que se puede expresar la velocidad de transferencia de calor por radiación, es como:

$$q_{rad} = h_{rad}(T_s - T_a) \quad (2.12)$$

siendo el h_{rad} el coeficiente de transferencia de calor por radiación definido como:

$$h_{rad} = \epsilon \sigma (T_s - T_a)(T_s^2 + T_a^2) \quad (2.13)$$

2.5 Balance de energía en edificaciones

Una edificación normalmente está expuesta a condiciones ambientales como radiación solar, temperatura ambiente y humedad relativa, que varían durante el transcurso del día, por lo que el interior se ve afectado por esas variables climáticas que pueden generar un ambiente térmico poco agradable para los ocupantes, obligándolos a implementar sistemas mecánicos para lograr y mantener la temperatura conveniente para su comodidad; sin embargo, el uso de estos sistemas requiere de un alto consumo de energía eléctrica aun cuando su uso sea intermitente en el transcurso del año.

Una manera de contrarrestar los consumos de energía eléctrica y vencer el uso de los sistemas mecánicos para la climatización, es a través de un balance energético de las cargas térmicas sensibles en la edificación, donde además de considerar como ganancias o pérdidas de energía relacionadas a las condiciones climáticas, son tomados en cuenta otros factores como las propiedades termofísicas y ópticas de los materiales con que está integrada la envolvente; así como también las ganancias que interactúan en los espacios internos, tales como: el metabolismo² de los ocupantes, iluminación y aparatos eléctricos, así como la infiltración.

Por lo tanto, de manera global, el balance energético está dado por la siguiente expresión correspondiente a la sumatoria de las pérdidas o ganancias térmicas debido a los factores internos y externos:

$$Q_{total} = \pm Q_{op} \pm Q_w \pm Q_{ve} + Q_{int,s} + Q_s + Q_b \quad (2.14)$$

Describiendo las ganancias o pérdidas según sea el caso de manera particular:

2.5.1 Cargas térmicas por transferencia de calor al exterior (Q_{op})

Representan la energía perdida o ganada por transferencia de calor al exterior a través de superficies opacas (muros y techos).

El modelo que permite cuantificar las cargas térmicas por transferencia de calor al exterior es:

$$Q_{op} = \lambda S(T_{out} - T_{int}) \quad (2.15)$$

siendo:

Q_{op} la carga térmica debido a la transferencia de calor al exterior en muros y techos externos (W).

λ la conductividad térmica del material con que está compuesto el muro o techo (W/ m²°C).

S la superficie del muro o techo expuesto a temperatura ambiente (m²).

T_{int} la temperatura a la que se encuentra en el interior del espacio (°C).

T_{out} la temperatura del exterior del espacio (°C) solar a

2.5.2 Cargas térmicas por radiación a través del vidriado (Q_w)

Es la energía perdida o ganada por transferencia de calor al exterior debido al vidriado. El haz de los rayos solares que inciden en una ventana (como onda corta), son atravesados al otro extremo incidiendo sobre una superficie y provocando su calentamiento, éstas a su vez, debido al incremento de su temperatura emiten energía (como onda larga) al interior, por ende el aumento de la temperatura.

La expresión para la determinación de las cargas térmicas por vidriados, es:

$$Q_w = SRF \quad (2.16)$$

siendo:

Q_w la carga térmica por radiación solar a través del vidriado (W).

S la superficie del vidriado (m²).

² Proceso bioquímico en el que el cuerpo genera su energía y mantiene el funcionamiento de sus funciones vitales.

R la radiación solar que atraviesa el vidriado en W/m^2 , correspondiente a la orientación, mes y latitud del sitio de estudio.

F el factor de corrección de la radiación en función del tipo de vidriado y el efectos de sombra que pueden existir.

2.5.3 Cargas térmica por ventilación o infiltración de aire (Q_{ve})

Es la energía intercambiada por ventilación o infiltración de aire.

El modelo que permite determinar las cargas por ventilación o infiltraciones de aire es:

$$Q_{ve} = V\rho C_{p\ air} \Delta T \quad (2.17)$$

siendo:

Q_{ve} la carga térmica por ventilación o infiltración de aire (W).

V el caudal de aire por infiltración o ventilación (m^3/s).

ρ la densidad del aire ($1.18\ kg/m^3$).

$C_{p\ air}$ el calor específico del aire ($1012\ J/kg^\circ C$).

Por otro lado, el flujo de calor por ventilación de aire es expresado en función al número de cambios de aire por hora, como:

$$V = \frac{Nv}{3600} \quad (2.18)$$

siendo:

V la ventilación (m^3/s)

N el número de cambios de aire

v el volumen del espacio (m^3).

Para una ventilación cruzada, es expresada como (Olgyay, 1963):

$$V = (\text{sen}\theta)rAv \quad (2.19)$$

siendo:

V la ventilación (m^3/s).

θ el ángulo de incidencia de la corriente de aire con respecto a la normal de la ventana, la relación entre la abertura de entrada y salida.

A la superficie de la ventana (m^2).

v la velocidad de la corriente de aire en (m/s).

2.5.4 Cargas térmica sensibles por aportaciones internas ($Q_{int,s}$)

Es la energía obtenida por ganancias internas de personas, iluminación y equipos que al final ocupan y realizan una función en el recinto o espacio (que más adelante se describirán estos procesos).

La expresión que permite determinar las ganancias internas por cargas térmicas sensibles es:

$$Q_{int,s} = Q_l + Q_p + Q_e \quad (2.20)$$

siendo

Q_l las cargas térmicas internas relacionadas con la iluminación (W).

Q_p las cargas térmicas internas relacionadas con los ocupantes en el interior de la edificación (W).

Q_e las cargas térmicas internas relacionada con los equipos eléctricos (W).

2.5.5 Cargas térmica por los elementos transparentes (Q_s)

Q_s es la ganancia solar total que se da a través de los elementos transparentes (W).

2.5.6 Cargas térmica debido a la envolvente de la edificación (Q_b)

Q_b es la energía que se almacena en la envolvente de la edificación (en W); es decir, es el calor almacenado en la masa térmica comprendida por las capas o materiales en muros, techos y pisos. Las ganancias de energía por éste Q_b están directamente relacionado a las propiedades termofísicas de los materiales de la envolvente, tales como la conductividad térmica, el calor específico y la densidad.

2.6 Arquitectura bioclimática

La arquitectura bioclimática se enfoca en armonizar y principalmente crear las condiciones óptimas de condiciones de confort en los espacios interiores de las edificaciones y con ello al desarrollo integral del hombre y de sus actividades considerando las variables climáticas y ambientales.

Al seleccionar adecuadamente los materiales implementados en la envolvente de una edificación, así como el diseño de espacios adecuados, es posible disminuir o inclusive evitar el uso de climatización para el interior de una edificación.

Es necesario precisar parámetros a partir de los elementos de la envolvente para manipular los valores óptimos del confort al interior de la edificación, tales elementos son: la forma, dimensiones de muros, techos y ventanas.

Los requerimientos para la construcción de una edificación climáticamente balanceada están enfocados en cuatro principales rubros que son: el análisis climático, la evaluación biológica, implementación de tecnologías y expresiones arquitectónicas (Bowen, 1984).

2.6.1 Evaluación climática

Aquí se hace la evaluación de los datos climatológicos de la localidad; y por otro lado, se lleva a cabo un análisis de los recursos energéticos (sol y aire) con un tiempo mínimo de un año.

2.6.2 Evaluación biológica

Se hace referencia en la determinación del confort en el interior de una edificación para permitir un estado de equilibrio en relación a las sensaciones percibidas por el hombre, de acuerdo a normas estándares establecidas, ya sea internacionales o de alguna región que establezca sus normas en relación a sus condiciones climáticas características. El confort puede ser higrotérmico, lumínico, acústico o térmico.

2.6.3 Implementación de tecnologías

Se emplean las tecnologías renovables tales como sistemas fotovoltaicos, colectores solares o eólicos que se pueden integrar a la edificación, que para ello se realizan estudios previos para su aplicación en

relación a la orientación, determinación de sombras y formas en la edificación; considerando también, el recurso energético (solar o eólico) para la fiabilidad del sistema.

2.6.4 *Expresión arquitectónica*

Con los análisis de resultados de las evaluaciones de los rubros anteriormente analizados, se llevan cabo la edificación climáticamente balanceada, y por lo tanto, se define el concepto de la arquitectura bioclimática.

2.7 Geometría solar

A través de la geometría solar, se permite obtener información de la trayectoria o movimiento aparente del sol en una determinada latitud o longitud en la Tierra, y así conseguir los beneficios del recurso energético del sol (tanto térmica y/o lumínica) mediante las orientaciones, para determinar que parte de la techos, muros, fachada o espacios interiores del diseño de la arquitectura se desea calentar, sombrear o iluminar con el objetivo de obtener el confort interno en la edificación.

La cantidad de radiación emitida por el sol, llega hasta la Tierra en su forma de fotones, los cuales están compuesta por un conjunto de ondas electromagnéticas denominada espectro electromagnético. El espectro electromagnético está compuesto de una gran gama de frecuencias y longitudes de onda, las cuales van desde los rayos gama, con longitudes de onda de 10^{-6} nm, pasando por los rayos X, los rayos ultravioleta, la región del visible, la región del infra-rojo, las micro-ondas y toda la frecuencias de ondas de radio y televisión que pueden alcanzar los 100 km de longitud de onda. El hombre, puede ver o sentir sólo una parte este espectro. En este sentido sólo la región del visible es la que el ojo humano es capaz de percibir, el espectro visible o simplemente luz visible se encuentra desde el color ultra violeta (400 nm) hasta el color rojo (750 nm). Por otro lado, la fracción infrarroja (a 750 nm) (IA, 2016) es la región que el hombre puede percibirla a través de sus sensores térmicos (sistema nervioso).

2.7.1 *Constante solar*

El flujo energético proveniente del sol, el cual incide sobre una superficie normal a la dirección en que es emitida la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre a una distancia media entre la Tierra y el sol, se le llama constante solar (G_{sc}). Muchos estudios han reportado la variación del valor de ésta constante; sin embargo, se ha llegado a la conclusión de que el valor empleado para ello sea de 1370 W/m^2 con un valor de incertidumbre del $\pm 1.5\%$ (Leyva, 1986).

Unos de los factores con que se presentan variaciones en la intensidad de radiación y así como también en la temperatura del planeta, es debido a la excentricidad de la órbita (0.01674) que describe la Tierra al desplazarse alrededor del sol, definiéndose de esta manera una forma casi circular (Beltrán, 1937); y por otro lado, la inclinación del eje de rotación terrestre (ε) con respecto al plano de la órbita elíptica (66.55°). Así mismo, se encuentran otros efectos debido a la excentricidad de la órbita, tales como la velocidad orbital Tierra que varía con el transcurso del año, y por ende, el tiempo solar aparente varia ligeramente en el tiempo. Esta variación es definida como ecuación del tiempo. La ecuación del tiempo permite obtener valores aproximados de ésta en relación al día del año.

Por lo tanto, la excentricidad trae como resultado que la velocidad orbital de la Tierra se más rápida que su velocidad media del año (para los meses de Octubre a Marzo) y más lenta que su velocidad media para el resto del año (de Abril a Septiembre), y con ello se tengan distancias de la Tierra al sol más cortas,

llamada distancia perihélica (correspondientes al 1^{ero} de Enero) y distancias más lejanas, llamada distancia afélica (presentada el 1^{ero} de Julio). Cabe mencionar, que al suceder estas diferencias de distancias entre la Tierra y el sol, se traen consigo la variación la intensidad de la radiación solar extraterrestre, registrándose valores para el día 1^{ero} de Enero 1427 W/m^2 y para el 1^{ero} de Julio 1355 W/m^2 (Leyva, 1986).

La Tierra presenta dos movimientos principales, el de rotación y traslación; el movimiento de rotación que es el tiempo requerido para que el planeta complete una revolución sobre su mismo eje, cuyo tiempo requerido es un día sideral de 24 horas. Y el movimiento de traslación, que es con que la Tierra gira alrededor del sol, el cual es realizado en un tiempo de un año solar, con una duración de aproximadamente 365 días.

2.7.2 Declinación

Durante el recorrido o el desplazamiento de la Tierra a través de su órbita, también presenta declinaciones (δ) positivas o negativas, las cuales están en relación con el ángulo formado entre la el plano de la órbita elíptica y el ecuador terrestre. Como se puede observar en la Figura 2.1, un valor máximo positivo de declinación se da en el hemisferio norte entre el rayo del sol incidente y el ecuador a un ángulo de $+23.45^\circ$. Periodo correspondiente al 21 de Junio y comúnmente conocido como solsticio de verano, donde la latitud geográfica característica para este periodo es el Trópico de Cáncer. Mientras que para una declinación máxima negativa, se da en el hemisferio sur donde el ángulo entre el rayo solar y el ecuador es de -23.45° , tiempo comprendido al 21 de Diciembre y conocido como solsticio de invierno, en el que la latitud para esta fecha es el Trópico de Capricornio. Cabe mencionar para el solsticio de verano, los rayos del sol inciden en la mayor parte del hemisferio norte quedando en oscuridad en el hemisferio sur; situación contraria sucede en el solsticio de invierno.

Sin embargo, existen declinaciones donde el ángulo formado entre la el plano de la órbita elíptica y el ecuador terrestre es igual a 0° , es decir, existen días en que los rayos del sol inciden perpendicularmente al ecuador terrestre. Uno de ellos es el 21 de Marzo y es conocido como equinoccio de primavera; y el siguiente se presenta el 23 de Septiembre, conocido como equinoccio de otoño. Durante estos equinoccios, tanto el hemisferio norte y el sur son equidistantes del sol y el tiempo del día es igual al de la noche.

Cabe mencionar que todas estas fechas son próximas, pues existen variaciones de pocos días con respecto de un año a otro.

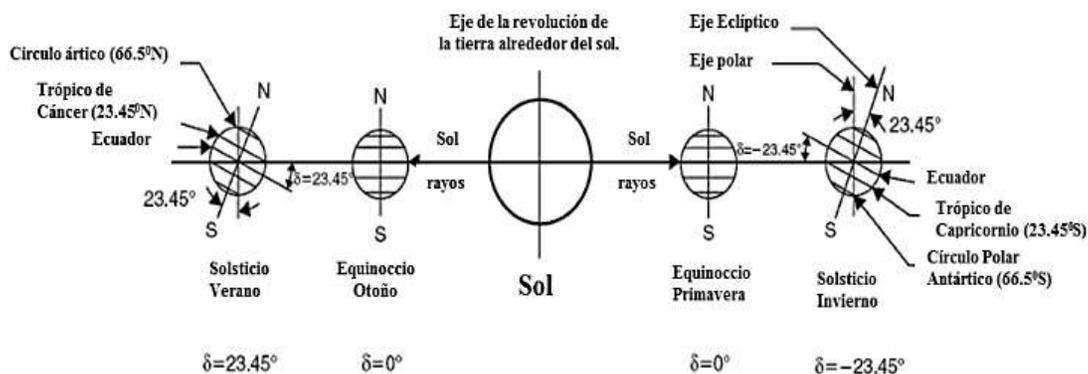


Figura 2.1. Solsticios y equinoccios debido a la declinación de la Tierra.

2.7.3 Bóveda celeste

Un observador situado en el horizonte sobre una superficie plana, podría percibir el recorrido llevado a cabo por el sol durante un año, el cual describiría orbitas circulares paralelas en una esfera transparente denominada bóveda celeste, tal como se muestra en la Figura 2.2. Este recorrido se llama movimiento aparente del sol, donde el cenit corresponde a la posición vertical más alta al observador, y el punto opuesto a éste se le llama nadir. Para describir la posición del sol durante su movimiento aparente en la bóveda celeste, se requieren coordenadas celestes llamadas altura y acimut. La altura (α) es el ángulo formado por la incidencia del rayo del sol hacia el centro de la bóveda y el plano horizontal, los ángulos son medidos desde el horizonte hacia el cenit o al nadir que van desde 0 a 90° (positivos hacia el cenit y negativos hacia el nadir). Y con respecto al acimut (z), éste es el ángulo formado entre el meridiano local (ya sea el sur para el hemisferio norte o el norte para el hemisferio sur) y la proyección de la línea observada por el sol sobre la horizontal, que va desde 0 a 180°. Los ángulos se miden en el sentido del recorrido de las manecillas del reloj para ambos hemisferios. Otro ángulo que se emplea con frecuencia es el cenital (ϕ), el cual está formado por el arco del círculo vertical entre el cenit y la posición del sol.

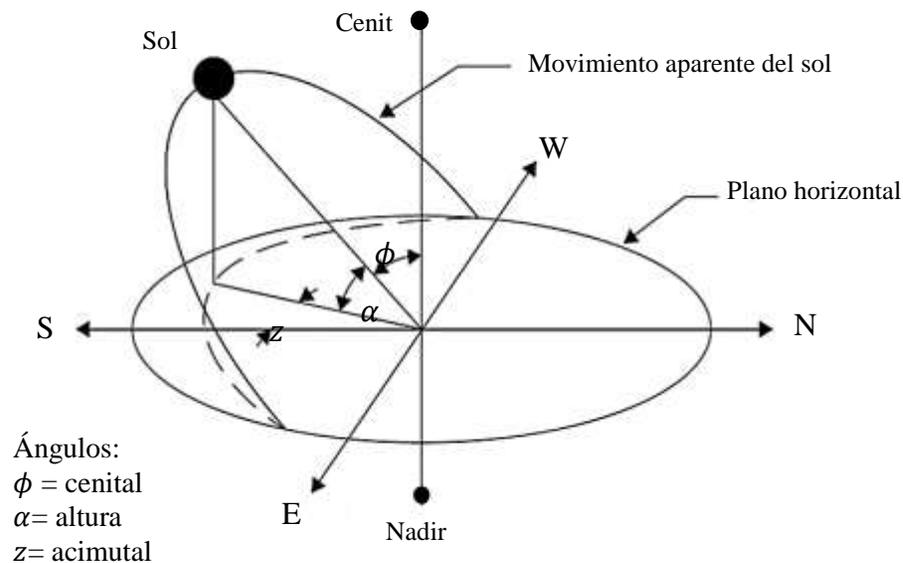


Figura 2.2. Ángulo cenital, azimutal y altura solar.

Cualquier punto sobre la superficie de la Tierra puede ser localizado mediante coordenadas geográficas llamadas latitud y longitud. La latitud corresponde al ángulo formado entre cualquier paralelo y el plano ecuatorial. El ángulo comprendido del ecuador al hemisferio va desde 0 a 90°. Valores al norte del ecuador son positivos y hacia el sur son negativos. Y en cuanto a la longitud, es el ángulo comprendido entre el meridiano de Greenwich (meridiano de referencia) y el meridiano que pasa por el sitio de interés, el valor del ángulo va desde 0 hasta 180° y de este a oeste según sea el caso. Valores positivos son hacia el este y negativos para el oeste.

2.8 Confort

El confort se centra en un estado cognitivo el cual está en relación al estado de salud³ de un individuo;

³ De acuerdo a la Organización Mundial de Salud, define a la salud como el estado de bienestar físico, psicológico y social de un individuo en relación al medio en que se encuentra.

sin embargo, existen muchos otros factores que influyen en el confort, entre ellos se encuentran los factores intrínsecos y extrínsecos.

Los factores intrínsecos están relacionados con el organismo de cada persona, tales como: el tipo de raza, sexo, edad, características físicas y biológicas, salud física o mental, estado de ánimo, el grado de actividad metabólica, y así como también el grado de vestimenta.

Mientras que en los factores extrínsecos están relacionados con el ambiente en que está en contacto o rodeado el individuo, entre estos se encuentra: la temperatura ambiente, la humedad relativa del aire, la radiación solar, la velocidad del viento, los niveles lumínicos y acústicos, la calidad del aire, olores, entre otros.

De modo que en relación a todos los factores mencionados anteriormente, el confort se puede clasificar de acuerdo a la percepción sensorial del individuo que demande. Estos son: confort térmico, lumínico, acústico, olfativo y psicológico.

Dada la orientación del trabajo de investigación, se mencionará el concepto de confort térmico y lumínico que están más relacionados a este tema de estudio.

2.8.1 Confort térmico

Sin duda existen muchos factores relacionados con el concepto de confort térmico, entre ellos y a grandes rasgos, se puede mencionar el ambiente y medio ambiente así como el propio estado de salud de un organismo (físico, psicológico y ente otros), las costumbres y demás, que permiten describir el concepto. Sin embargo, sociedades certificadas han realizado estudios y obtenido resultados de fenómenos relacionados con el confort térmico y la calidad de vida, en los que se han considerado rangos de referencia u optado como estándares después de muchos años de investigación. En este sentido, la ASHRAE (por sus siglas en inglés *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), permite definir el concepto de confort térmico como “la condición de la mente con la que se expresa satisfacción con el ambiente en el que se encuentra” (ASHRAE, 2004).

En 1962, Macpherson durante estudios relacionados al confort térmico, definió seis variables con los que están en función este concepto, las cuales son:

- 1- Temperatura ambiente.
- 2- Velocidad del aire.
- 3- La humedad relativa del aire.
- 4- La temperatura radiante media.
- 5- Niveles de vestimenta.
- 6- La razón metabolismo en el organismo humano.

Si bien, como se puede observar, las primeras cuatro variables están en relación con las condiciones del ambiente y dos están relacionadas con la particularidad de cada individuo; por lo que enseguida se mencionara la relación que se tienen en cada estas variables y su efecto en el medio desde el punto de vista del confort térmico, asimismo presentando valores estándares por normas internacionales según sea el caso.

2.8.1.1 Temperatura ambiente

Es la temperatura en que un individuo se siente cómodamente o satisfecho en el medio en que se encuentra, la cual permite que disipe adecuadamente el calor de los procesos metabólicos y por lo tanto suceda el equilibrio térmico en relación a la temperatura del cuerpo. La temperatura óptima a ello es comúnmente llamada temperatura neutra. En la Tabla 2.1 se muestran rangos de temperatura de confort térmico para algunas ciudades principales de la República Mexicana obtenidos a través de trabajos realizados por Steve Szokolay (Szokolay, 1984).

Tabla 2.1. Intervalos de temperatura para el confort térmico de ciudades de la República Mexicana.

Ciudad	Rango de temperatura (°C)		
	Mínima	Neutra	Máxima
Toluca, México	18.9	21.4	23.9
Ciudad de México (Tacubaya).	19.8	22.3	24.8
Puebla, Puebla.	20.2	22.7	25.2
Guadalajara, Jalisco.	21.0	23.5	26.0
Cuernavaca, Morelos.	21.6	24.1	26.6
Mexicali, Baja California.	21.9	24.4	26.9
Monterrey, Nuevo León.	21.9	24.4	26.9
Hermosillo, Sonora.	22.6	25.1	27.6
Veracruz, Veracruz.	22.9	25.4	27.9
Villahermosa, Tabasco.	23.6	26.1	28.6

Fuente: Szokolay, 1984.

Estas temperaturas neutras fueron determinadas mediante el método adaptativo (Szokolay, 1984), las cuales fueron expresadas como:

$$T_n = 0.31 (TMA) + 17.6 \quad (2.21)$$

siendo:

T_n la temperatura neutra (°C)

TMA la temperatura media anual (°C).

Permitiendo por lo tanto determinar la temperatura de zona de confort (Z_c) como:

$$Z_c = T_n \pm 2.5^\circ C \quad (2.22)$$

2.8.1.2 Humedad relativa del aire

La humedad relativa es la razón de la cantidad de vapor de agua en el aire y la máxima cantidad de vapor de agua, que una masa de aire puede contener a presión y temperatura específica.

La presencia de humedad en el ambiente o en un espacio, trae como efecto la activación de los mecanismos de intercambio térmico del cuerpo, tales como la transpiración, la cual “es el sistema de refrigeración natural del organismo”, pues es el mecanismo efectivo para perder calor basado en la sudoración de la piel; así como otros mecanismos donde sucede el intercambio de calor como la inhalación y exhalación

2.8.1.3 Movimiento del aire

Los efectos del movimiento de los flujos de aire también influyen sobre el confort térmico del sitio donde se encuentra un individuo. El movimiento de aire permite acelerar las pérdidas de calor por convección

entre la superficie más externa de la piel. Sin embargo, ya sean altas o bajas puede ser molestas e inconvenientes; en cuanto a esto, Steve Szokolay realizó un estudio en relación al movimiento del aire a diferentes velocidades y su efecto sobre las sensaciones causadas en el hombre, esto con el objetivo de obtener el valor óptimo para el confort térmico, los resultados del estudio se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Sensaciones caudadas en un individuo en relación a velocidades de aire.

Intervalos de velocidad (m/s)	Sensación
< 0.25	Imperceptible
de 0.25 a 0.50	Agradable
de 0.50 a 1.0	Perceptible
de 1.0 a 1.5	Desagradable
> 1.50	Muy molesto

Fuente: Szokolay, 1984.

2.8.1.4 Temperatura radiante media

La temperatura radiante media, se considera como la temperatura uniforme de un cuerpo negro con la que un individuo intercambia la misma cantidad de calor que con su entorno actual. La temperatura radiante media está relacionada a la cantidad de calor transferida a la superficie, la cual depende a la vez de la capacidad de absorber o emitir calor, asimismo de su factor de vista por el objeto.

2.8.1.5 Grado de vestimenta

En relación a la cantidad de ropa requerida para cubrir el cuerpo, un individuo podrá disipar mayor o menor cantidad de calor a su entorno o de sufrir sobrecalentamientos respecto a un valor de sensación de confort térmico. En la siguiente Tabla 2.3 se presentan algunos factores de vestimenta para distintas ocasiones proporcionados por la norma ISO 7730.

Tabla 2.3. Factor de vestimenta de acuerdo tipo de prenda puesta en un individuo.

Conjunto de ropa	Factor de vestimenta (clo*)
Desnudo	0
Shorts	0.1
Ropa ligera de verano (pantalones largos ligeros, camisa de cuello abierto de manga corta)	0.5
Conjunto de trabajo ligero (Pantalones deportivos, calcetines de lana, camisa de trabajo de algodón, pantalones de trabajo)	0.6
Traje de negocios típico	1.0
Traje de negocios típico + abrigo de algodón	1.5
Ropa deportiva ligera al aire libre (Camisa de algodón, pantalones, camiseta, pantalones cortos, calcetines, zapatos)	0.9
Traje de negocios europeo pesado tradicional	1.5

*Clo: resistencia térmica del vestido. 1 clo= 0.155 m²K/W

Fuente: ISO 7730, 2005.

2.8.1.6 Nivel de actividad metabólica

Por naturaleza, los seres humanos poseemos muchas diferencias unos con respecto de otros, tales como la altura, masa, tipo de raza, de piel, así como las diferentes actividades o costumbres que le hemos impuesto a nuestro cuerpo, que hacen que demanden de energía para llevar a cabo las funciones biológicas que necesitamos. Esta energía, es obtenida por oxidación a partir de los carbohidratos contenido en los alimentos; dicha oxidación es llevada a nivel celular, donde ocurren procesos exotérmicos. Así mismo, el tejido muscular requiere de energía para llevar a cabo sus funciones. De modo que, la temperatura emitida por estos procesos metabólicos se pueden diferenciar entre calor emitido por funciones involuntarias o sistema vegetativo (que comprende el sistema digestivo, circulatorio entre otras) y aquellas que son producidas por trabajos voluntarios a través de los músculos, de ahí que, el calor emitido por un cuerpo depende del grado de actividad a realizar. Por lo tanto, un concepto que permite definir al nivel o razón metabólica es a partir de la norma ASHRAE 55-2010, la cual la define como “el nivel de transformación de la energía química en calor y trabajo mecánico por actividades metabólicas dentro de un organismo” (normalmente expresado en relación a la superficie del cuerpo).

La razón metabólica (M) es expresada en met, que es la energía producida por unidad de superficie (de un individuo) y su equivalencia es: $1 \text{ met} = 52.8 \text{ W/m}^2$, siendo el área superficial de una persona media de 1.8 m^2 (ISO 7730, 2005). En la Tabla 2.4 se muestran algunos valores comunes en relación al nivel de actividad de acuerdo a la norma ISO 7730.

Tabla 2.4. Razón metabólicas en relación a estado o actividad realizado por un individuo.

Grado de actividad	Razón metabólica (met)*
Sentado, relajado	1.0
Sentado, trabajo ligero (Oficina, hogar, escuela, laboratorio)	1.2
De pie, trabajo ligero (Compras, laboratorio, trabajo en fábrica ligera)	1.6
De pie, trabajo moderado (Actividad de venta, trabajo de casa, operación de una máquina)	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

* M expresado en met. $1 \text{ met} = 52.8 \text{ W/m}^2$.

Fuente: ISO 7730, 2005.

2.9 Desarrollo de métodos para confort térmico

Para el estudio de un fenómeno se requiere de sustentar las bases teórica o hipótesis para su investigación, y de esa manera aseverar los hechos que suceden en la interacción de las consideraciones con las que se han planteado. En la actualidad, existen dos teorías que se enfocan en lograr y conseguir un ambiente térmico agradable orientado a la comodidad de los ocupantes con su entorno. Una de ellas es conocida como “La teoría del balance térmico” demostrada por Fanger, en la que se desarrolló un modelo empírico que involucraba las seis variables de Macpherson y una cámara térmica; en esta última, sometía a un grupo de personas para evaluar la satisfacción o la comodidad térmica. Y en cuanto a la otra teoría, esta es conocida como “la teoría adaptativa”, en la que se enfoca en estudios de campo con el objetivo principal de analizar la experiencia real del ambiente térmico junto con las personas que están interactuando y desde luego, la consideración de sus expectativas. Sin embargo, estas teorías tienen el objetivo de permitir la evaluación de ambientes térmicos confortables o para evaluar ambientes térmicos ya existentes.

2.9.1 Teoría del balance térmico e índices PMV/PPD

El modelo térmico PMV-PPD o de Fanger o también llamado estático, fue desarrollado por Polv Ole Fanger (1934-2006), en el que realizó estudios empíricos e implementó modelos en cuanto a la sensación del confort térmico en el cuerpo humano al someterlo a variables climatológicas en una cámara térmica. Por lo que, Fanger logró relacionar las ecuaciones de confort con el índice de Voto Promedio Previsto o PMV (por sus siglas en inglés *Predicted Mean Vote*), la cual refleja el valor medio de los votos emitidos por un grupo de personas (1296) con respecto a una escala psicofísica de siete niveles (de acuerdo a ASHRAE) al ser sometidos a los diferentes ambientes térmicos en un estado estable. En la encuesta, para determinar el confort térmico estándar, preguntó a los sujetos acerca de su sensación térmica en una escala de siete puntos: de frío (-3) a caliente (+3), siendo cero (PMV=0) el valor ideal; es decir, donde se tiene un temperatura operativa óptima correspondiente a la sensación térmica neutra (considerando para el espacio dado, con una actividad física y tipo de vestimenta determinada).

En la Figura 2.3 se muestran los votos medios previstos y el porcentaje previsto de personas insatisfechas a través del estudio llevado por Fanger en cámaras climáticas.

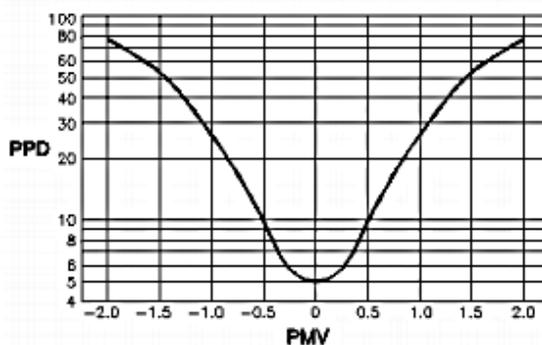


Figura 2.3. Gráfica del PMV-PPD de Fanger.

Como se puede observar, los valores de índice de PMV en el eje de las abscisas pueden cambiar de frío a caliente (izquierda a derecha) mientras que para el PPD en el eje de las ordenadas, los valores se incrementan. Por lo tanto, el índice es obtenido a partir del balance térmico y los datos estadísticos de las pruebas experimentales.

Durante mucho tiempo de investigación llevado a cabo por Fanger sobre los procesos fisiológicos del cuerpo humano para alcanzar la sensación térmica neutra; concluyó que, tanto la traspiración del sudor como la temperatura media superficial de la piel, ambos intervienen en los procesos para alcanzar la temperatura neutra en un individuo mediante la siguiente expresión (Lin, 2008):

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.028]L = \alpha L \quad (2.23)$$

Siendo L la carga térmica en el cuerpo, el cual consiste en una diferencia entre la producción interna de calor en una persona y la pérdida de calor en el ambiente, suponiendo los valores de confort de la temperatura en la dermis (T_{sk}) y las pérdidas de calor por evaporación debido a la regulación del sudor (E_{rsw}) bajo un nivel de actividad y coeficiente de sensibilidad (α).

La ecuación (2.23), se permitió expresar de una forma en que ciertos parámetros fueran fácilmente

muestreados en el ambiente; esto a través de una investigación sobre el confort térmico realizado por El Instituto de Investigaciones Ambientales de la Universidad Estatal de Kansas bajo el contrato de ASHRAE, por lo que la expresión quedó definida como:

$$PMV = aT + bP_v - c \quad (2.24)$$

siendo:

T la temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$).

P_v la presión de vapor de agua en el ambiente (kPa).

a , b y c los valores de los coeficientes correspondientes en la Tabla 2.5 según sea el caso.

Tabla 2.5. Valores de los coeficientes a , b y c en función del tiempo para cada sexo del individuo.

Tiempo	Sexo*	a	b	c
1h	Hombre	0.220	0.233	6.673
	Mujer	0.272	0.248	7.245
	Ambos	0.245	0.245	6.475
2h	Hombre	0.221	0.270	6.024
	Mujer	0.283	0.210	7.694
	Ambos	0.252	0.240	6.859
3h	Hombre	0.212	0.293	5.949
	Mujer	0.275	0.255	8.620
	Ambos	0.243	0.278	8.802

*Para una actividad metabólica sedentaria, con 0.6 clo. (Orosa, 2009).

Posteriormente al PMV se incorporó al porcentaje predicho de insatisfechos o PPD (por sus siglas en inglés *Predicted Percentage of Dissatisfied*), la cual predice el porcentaje de las personas que se sentían más que ligeramente “tibias” o un poco “frías” (Fanger, 1972). Por lo que, el PPD es determinado como:

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)] \quad (2.25)$$

El modelo de PMV-PPD de Fanger sobre confort térmico ha sido una contribución a la teoría del confort térmico, en el que su aportación ha llegado hacer utilizada hasta entonces por normas internacionales tal como la UNE- EN ISO 7730, y donde su aplicación es más apropiada para estimar la sensación térmica en edificios acondicionados mecánicamente.

2.9.2 Modelo adaptativo

El enfoque adaptativo del confort térmico, se basa en la recopilación de información a través de encuestas sobre las sensaciones cómodas en el ambiente realizadas en campo. Para poder capturar la información, los investigadores recurren a la fuente de información (individuos) en las diferentes condiciones ambientales. El objetivo de esos trabajos, consisten en desarrollar un “índice” de confort térmico (de acuerdo a la escala ASHRAE) en el que se expresa el estado de sensación cómoda en las personas en sus vidas cotidianas, considerando las variables climáticas, así como la actividad física y el nivel de vestimenta.

En comparación con el método estático, este modelo adaptativo permite a las personas crear sus propias referencias térmicas mediante la manipulación de objetos inanimados como: cerrar o abrir ventanas, correr o bajar cortinas o persianas, el control total sobre el encendido y regulación de ventiladores así como la capacidad de quitarse o ponerse vestimenta.

Hasta hoy en día, muchos estudios han revelado que los modelos de confort térmico basados en el enfoque adaptativo en las edificaciones con ventilación natural, no se definen zonas de confort estáticas, tal como lo hace la norma UNE- EN ISO 7730; pues en dichas zonas térmicas están estrechamente relacionadas con la temperatura media exterior. En este sentido, algunos modelos dinámicos tales como la ASHRAE Standart 55-2013 y la UNE-EN 15251:2008 consideran la temperatura media exterior como variable para la definición de los límites de temperatura de la zona de confort en el interior de un espacio (Sánchez, 2015).

Por otro lado, de acuerdo estudios realizados por Nicol y Humphreys, las encuestas realizadas en campo mediante estado estacionarios (PMV), no predicen con precisión los votos reales emitidos de acuerdo a la escala ASHRAE, por lo que se sobreestima el molestar por un margen inaceptable.

Un estudio realizado en campo por Nicol y Humphreys, de mostraron que los cambios de los votos de confort medios, fueron mucho menores con la temperatura al interior de un clima con respecto a otro clima (Nicol y Humphreys, 2002). Por los que Humphreys, decidió realizar más estudios para aseverar el cambio sobre los votos de confort medio considerando más climas. Lo que lo llevó a concluir, que los votos de confort con la temperatura son más bajos para cualquier encuesta en particular. Por lo tanto, se tiene como resultado que, la temperatura de confort en las encuestas de campo está estrechamente ligada de acuerdo a la medición de la temperatura media del exterior.

Es así pues que a través de entre estos y otros resultados de estudios de campo relacionados con la adaptabilidad de un individuo ante el media ambiente, se encontró que la temperatura de confort óptima en edificios ventilados de forma natural está en función con la temperatura exterior; esta temperatura de confort puede predecirse mediante ecuaciones lineales. Por los que, los trabajos realizados por Humphreys en 1978, Humphreys y Nicol en el 2000 y Nicol en el 2002, han propuesto una expresión para determinar la temperatura neutra en edificios con ventilación natural (Nicol y Humphreys, 2002):

$$T_{com} = 11.9 + 0.534 * T_{a,out} \quad (2.26)$$

siendo:

T_{com} la temperatura de confort (°C).

$T_{a,out}$ la temperatura ambiente exterior (°C).

Basándose en estos resultados, se ha integrado un nuevo confort térmico adaptativo para edificios ventilados de forma natural en ASHRAE – 55.

Si bien, la determinación del confort térmico al interior a través de una medición de temperatura promedia, ya sea mensual o anua; se fija la atención también sobre las demás variables que repercuten sobre el criterio del confort establecido, tal es el caso como la cantidad de aislamiento en una persona y su actividad metabólica, así mismo la humedad, la velocidad del viento, las cuales no se deben de ignorar pues ya que están en relación con el temperatura neutra. Sin embargo, es precisamente, la retroalimentación entre el clima y las acciones adaptativas lo que se supone que sólo la temperatura exterior debe ser considerada en situaciones reales en edificaciones. La relación es hasta cierto punto una "caja negra" empírica porque las interrelaciones no están totalmente definidas.

2.10 Confort lumínico

El concepto de confort lumínico está referido a la percepción a través del sentido de la vista. Se debe de

tener en cuenta que el confort lumínico difiere del confort visual. El confort lumínico está en relación a aspectos físicos, fisiológicos y psicológicos relacionados con la parte de la fracción electromagnética visible para el hombre. Y en cambio, el confort visual está relacionado a aspectos psicológicos relacionados con la percepción espacial y de objetos que rodean a un individuo.

El ojo humano al estar expuesto a la luz visible, presenta una sensibilidad máxima cercana a los 555 nm (correspondiente al color verde-amarillo) (Ramírez, 2013). En cuanto a la luz visible del sol, la longitud de onda máxima de emisión está cerca de los 500 nm (correspondiente al color azul). Por lo tanto, al considerar tanto la máxima sensibilidad del ojo humano y la emisión máxima por el sol, ambas se encuentran muy cercanas. De donde se infiere que, el ojo humano está diseñado para percibir de manera más sensible la luz emitida por el sol; pues ya que en relación a la luz visible emitida por una fuente artificial está muy alejada a la eficiencia visual del ojo, tal es el caso de una luminaria de tipo incandescente donde su máxima emisión en su longitud de onda alcanza los 966 nm (que comprende a la parte infrarroja del espectro electromagnético), de ahí que se hace “sentir la emisión de calor” en vez de centrarse la mayor parte en iluminar una superficie.

Por lo tanto, de acuerdo a la curva de sensibilidad espectral relativa o $V(\lambda)$ definida por la o CIE (por sus siglas en francés *Commission Internationale de l'éclairage*), como se muestra en la Figura 2.4 el ojo humano responde a dos respuestas espectrales diferentes en función a la cantidad de luz que percibe (Gómez, 2009):

- La respuesta en condiciones de luz fotópicas (cuando el ojo se tiene que adaptar a la luz) en la que la intensidad de la luz es mayor 0.1 lux. En estas condiciones se presenta la sensibilidad máxima (de 555 nm) en la parte verde-amarillo del espectro visible, con una normalización igual a 1 para aquella longitud de onda, y para los casos de la luz ultravioleta e infrarroja es igual a cero.
- Y por otro lado, la respuesta en condiciones de luz escotópicas (cuando el ojo se tiene que adaptar a la oscuridad), aquí la intensidad de luz está comprendida en el rango de 0.0001 y 0.01 lux, y donde el ojo presenta una sensibilidad máxima de 505-510 nm.

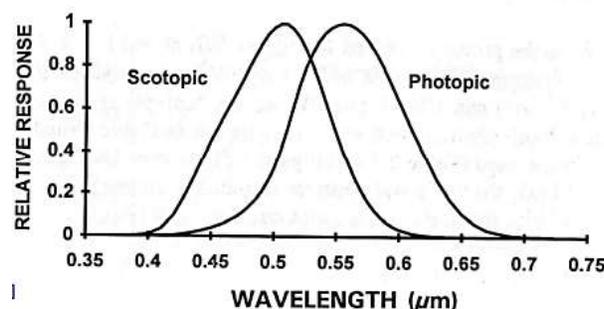


Figura 2.4. Curva de eficiencia luminosa de acuerdo a la cantidad de luz captada por el ojo humano.

Para la iluminación de una superficie ya sea externa o interna, es necesario conocer las dimensiones del lugar, ya que en ello está estrechamente relacionado, tanto la implementación de la luminaria, su potencia, y la cantidad de esta en el sistema de iluminación; por otro lado, es importante fijar las áreas de trabajo ya que para cada una de ellas existen diferentes niveles de iluminación, así como los niveles del plano de trabajo, es decir, a que altura a partir del piso en que se realizaran las actividades. Con

respecto a esto, a continuación se describirán algunos conceptos relacionados al sistema de iluminación que serán requeridos por el siguiente capítulo 4 que permitirá orientar al lector sobre este tema de estudio.

2.10.1 Niveles de iluminación en interiores y exteriores en edificaciones

Es muy importante al momento de considerar o planificar la instalación de un sistema de alumbrado al interior o exterior de una vivienda o una edificación, ya que el nivel de iluminación demasiado alta o demasiado baja puede traer consecuencias sobre la salud y sus efectos sobre la operatividad, seguridad e incluso llegar hasta problemas psicológicos en un individuo. Sin embargo, existen normas que permiten definir los niveles de iluminación para cada espacio en relación a la superficie, así como el uso al que se le dará a dicho espacio, lo que permite tener una relación iluminada individuo-espacio de una manera cómoda, sana y segura. En este sentido en la Tabla 2.6 se presenta los niveles de iluminación para diferentes áreas de trabajo de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008.

Tabla 2.6. Niveles de iluminación para diferentes espacios de acuerdo a la NOM-025-STPS-2008.

Tarea visual del puesto de trabajo	Área de trabajo	Niveles mínimos de iluminación (Lux)
En exteriores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimiento de vehículos.	Áreas generales exteriores: patios y estacionamientos.	20
En interiores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimiento de vehículos.	Interiores generales: almacenes de poco movimiento, pasillos, escaleras, estacionamientos cubiertos, iluminación de emergencia.	50
En interiores	Áreas de circulación y pasillos; salas de espera, de descanso; cuartos de almacén.	100
Requerimiento visual simple: inspección visual, recuento de piezas, trabajo en banco y máquina.	Áreas de servicios al personal: almacenaje rudo, recepción y despacho, casetas de vigilancia.	200
Distinción moderada de detalles: ensamble simple, trabajo medio en banco y máquina, inspección simple, empaque y trabajos de oficina.	Talleres: áreas de empaque y ensamble, aulas y oficinas.	300
Distinción clara de detalles: maquinado y acabados	Talleres de precisión: salas de cómputo, áreas de dibujo, laboratorios.	500
Distinción fina de detalles: maquinado de precisión, ensamble e inspección de trabajos delicados, manejo de instrumentos y equipo de precisión, manejo de piezas pequeñas.	Talleres de alta precisión: de pintura y acabado de superficies, y laboratorios de control de calidad.	750
Alta exactitud en la distinción de detalles: ensamble, proceso e inspección de piezas pequeñas y complejas y acabado con pulidos finos.	Áreas de proceso: ensamble e inspección de piezas complejas y acabados con pulido fino.	1000
Alto grado de especialización en la distinción de detalles.	Áreas de proceso de gran exactitud.	2000

2.10.2 Fuentes de iluminación artificial

La importancia del funcionamiento de las diferentes tecnologías en iluminación artificial, permite identificar los pro y contra a la hora de seleccionar una para las diferentes aplicaciones, en interiores o exteriores de una vivienda, así mismo se tienen que considerar otros aspectos como: el tiempo de vida, la eficiencia, así como la emisión de calor y el costo, en relación a esto, a continuación se mencionan algunas características principales y de funcionamiento de las luminarias más comunes hasta el momento.

En el caso de las lámparas incandescentes, en la envoltura de vidrio contiene un gas inerte o noble (generalmente kriptón) que evita la combustión del filamento de tungsteno que se encuentra en el interior, al cual, al hacerle conducir flujo de corriente, el filamento es calentado a altas temperaturas (cerca de los 2800 K) hasta resplandecer; el proceso de transformación de la energía eléctrica a luz visible sólo es del 15 a 20%, lo cual significa que el resto es emitido en forma de calor, y por ende este tipo de iluminarias se han empezado a desplazar del mercado, considerandos además, que su tiempo de vida útil es menor (1 000 horas). En cuanto a las lámparas de halógeno, estas son similares a las incandescentes, pues sólo difieren que en el interior de la bombilla encierran pequeñas cantidades de material halógeno como bromo o yodo contenido en un equilibrio químico, por lo que se tiene un tiempo mayor de vida útil y una mayor eficiencia en comparación con las anteriores. En el caso de las lámparas compactas fluorescentes o FLC (por sus siglas en inglés *Compact Fluorescent Lamp*), para lograr la conductividad y luminiscencia en el interior de la estructura de la lámpara, requieren pequeñas cantidades de mercurio para su funcionamiento. Esta luminarias desplazaron a las incandescentes, debido a su bajo consumo energético (20 a 50%) y mayor durabilidad (hasta 10 a 12 mil horas aproximadamente). Y con respecto a las luminarias LED, la luz generada es debido a semiconductores (diodos) con los que están construidas, que al pasar una corriente eléctrica a través de ellos, el material en respuesta emite el haz de luz, generándose de esta manera la mayor parte en luz visible y con muy pocas emisiones de calor. En cuanto a la eficiencia, es muy superior comparada con la incandescente, obteniéndose ahorro por consumo de energía eléctrica hasta del 80%, así mismo, respecto a la potencia es mucho menor para emitir la misma intensidad de luz que una incandescente (14W contra 100W) y así como también, el tiempo de vida es mucho mayor (de 50 a 100 mil horas). En cuestiones de costos, es superior comparada con las anteriores; sin embargo, es compensado debido al tiempo de vida útil y el ahorro de energía eléctrica anual (Philips, 2015).

Otro punto muy importantes a considerar, son algunos parámetros relacionados con la apariencia de la luz emitida, que son uno de los factores que influyen a la hora de determinar el confort visual en una superficie a iluminar, los cuales son la temperatura de color, el tono de luz, el índice de rendimiento cromático.

2.10.3 Eficiencia lumínica

La eficiencia de cualquier luminaria, permite cuantificar que parte de la potencia total consumida es convertida en luz, la eficiencia esta expresada como la cantidad del flujo luminoso (en lúmenes) y la potencia total consumida (en W). En la Tabla 2.7 se muestra el rendimiento luminoso de principales lámparas de acuerdo a la potencia o consumo de energía.

Tabla 2.7. Eficiencia energética en la principales luminarias (lum/W).

Luminaria	Consumo (W)	Eficiencia (lum/W)
Incandescente	100	15.2
Halógeno	70	90
Fluorescente compacta	23	62
LED	13	76.9

Fuente: PL, 2017.

2.10.4 Color y temperatura de color

El flujo luminoso emitido por una luminaria, a la vez proporciona un color de luz o apariencia de color, que al incidir sobre los objetos es definido según sea su color. Éste color de luz es definida por la temperatura de calor; para las aplicaciones generales de iluminación interior y de acuerdo a la normativa DIN 5035, la apariencia de color es clasificada en tres tipos (TPL, 2014):

Tabla 2.8. Temperatura de acuerdo al color de la luz emitida por una luminaria.

Apariencia de color	Temperatura de color (TC) (K)
Blanco cálido	TC<3300
Blanco neutro	3300<TC<5000
Luz fría	TC>5000

Fuente: PL, 2017.

2.10.5 Índice de Reproducción Cromática

Otro de los parámetros considerados en un sistema de iluminación, es la capacidad que tiene una fuente luminosa para definir la mayoría de los colores en el espectro emitido, el cual es denominado como Índice de Reproducción Cromática (ICR o RA). Para una luminaria con un Ra de 100 significa que todos los colores son emitidos; mientras que si son menores a 100, la dispersión de colores es proporcional a la diferencia menor de éste número. En la Tabla 2.9 se muestran los Índices de Reproducción Cromática en relación y la calidad de colores en que son emitidos por una luminaria de acuerdo con la Norma Europea (UNE EN 12464, 2012).

Tabla 2.9. Índice de reproducción de cromática para los diferentes colores emitidos por una fuente luminosa.

Índice de Reproducción Cromática	Calidad de colores
Ra<60	Pobre
60<Ra<80	Buena
80<Ra<90	Muy buena
90<Ra<100	Excelente

Fuente: UNE EN 12464, 2012.

La energía radiada por una fuente de energía lumínica es denominada como flujo radiante (Φ_{rad}) y representa la cantidad de energía por unidad de tiempo (W); una magnitud fotométrica derivada, en la que una intensidad de luz es responsable de la sensaciones visuales, es conocida como flujo luminoso o potencia luminosa (Φ) medida en lúmenes (lum). El flujo luminoso es expresado como la cantidad de energía radiante por unidad de tiempo por la máxima sensibilidad para el ojo humano integrada en el rango de la luz visible del espectro electromagnético, cuyo modelo corresponde (Gómez, 2009):

$$\Phi_{lum} = k_o \int_{380}^{760} V_{\lambda} \Phi_{rad} d\lambda \quad (2.27)$$

siendo:

Φ_{lum} el flujo luminoso de la fuente (lum).

k_o el coeficiente de eficiencia luminosa, donde en la curva fotópica corresponde a la fracción de la máxima sensibilidad para el ojo humano ($\lambda=555$ nm) del espectro visible correspondiente a 683 lm/W.

$V_{\lambda} \Phi_{rad} d\lambda$ el flujo de energía radiante en una determinada longitud de onda dentro del rango de la luz visible (W).

Las propiedades de las fuentes emisoras de luz y sus efectos sobre los objetos que inciden, son descritas mediante las siguientes magnitudes fotométricas.

2.10.6 Flujo luminoso (lx)

Es la cantidad de luz emitida por una fuente luminosa que se distribuye en todas direcciones en lumen (lx). Un lumen es equivalente a 1/680 W de luz verde-amarilla de 555 nm de longitud de onda.

2.10.7 Intensidad luminosa (cd)

La intensidad luminosa en una dirección dada de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hertz y cuya intensidad energética en esa dirección es 1/683 W/sr (equivalentes a 555 nm= pico máximo de la sensibilidad visual, donde $V(\lambda) = 1$ y cuya unidad de medida es la candela (cd).

Por lo que se infiere que, la eficacia espectral luminosa, k_o , de una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz es exactamente a 683 lm/W.

2.10.8 Iluminancia (lx)

Luminosidad o iluminancia en un punto de una superficie, se define como el flujo luminoso que incide sobre un elemento de la superficie dividido por el área de ese elemento, su unidad de medida es en lux (lx).

Un lux, se define como el nivel de iluminación de una superficie de un m^2 cuando es incidida sobre ella y de manera uniforme ($lx = lm/m^2$). Cuando se mide la iluminancia sobre el plano de trabajo, el valor correspondiente a este plano de trabajo por convención es de 0.85 m, correspondientes desde el piso hasta esta superficie.

2.10.9 Luminancia (cd/m^2)

Se define como la intensidad luminosa emitida por una fuente o superficie, en la dirección de un observador, dividida por el área de la fuente o la superficie del observador. La unidad de medida es candela por metro cuadrado (cd/m^2).

Capítulo 3

Simulación numérica con TRNSYS

En este capítulo se menciona una breve descripción y de manera general, sobre las herramientas computacionales para simular sistemas energéticos en edificaciones, y la evaluación y optimización de los mismos al analizar el comportamiento tanto térmico y energético debido a los materiales con que está integrada la envolvente. En este sentido, también se describe el software con que se llevará a cabo este trabajo de investigación, la importancia de la implementación del mismo, así como su estructura modular, en la que se permite llevar a cabo el modelado del caso de estudio. Dicho lo anterior, se describen los *Types* o componentes implementados para llevar a cabo la solución del problema, donde también se detalla su funcionalidad, y por otro lado, la descripción de expresiones matemáticas que permiten representar el estado físico del estudio, y considerar esa expresión en una representación que tiene que ver con todos los fenómenos de transferencia de calor y balance térmico en el interior de la vivienda para su análisis térmico- energético. Por último, el software para su confiabilidad de resultados, es sometido a un test comparativo mediante BESTEST donde también se muestran los resultados del test, los cuales se encuentra dentro de los intervalos de referencia.

3 Simulación numérica con TRNSYS

Una de las maneras para determinar y analizar un sistema energético relacionado a edificaciones, es mediante simulaciones a través de plataformas computacionales. Estas simulaciones proporcionan el medio para optimizar el diseño al implementar las diferentes estrategias de ahorro y eficiencia energética; lo que permite una mejor manera de aprovechar y/o aplicar los materiales de construcción con la correcta orientación y así como el estudio de otros parámetros relacionados con la edificación.

Los programas de simulación pueden ser clasificados en dos categorías: simples y detallados. En los programas de simulación simples; estos se utilizan en las primeras etapas de diseño, ya que requieren menos datos para llevar a cabo las simulaciones; siendo por lo tanto menos precisos. En cuanto a los programas de simulación detallados, en estos se emplean métodos complejos, tal como el método de Función de Transferencia para determinar la transferencia de calor por difusión a través de superficies opacas compuestas por multicapas integradas a modelos de edificaciones con multi-zonas que pueden contener multi-nodos de aire, lo cual, hace que se obtengan resultados más precisos; permitiendo de esta manera, la predicción del comportamiento térmico lo más cercano a la realidad (Hong, 2000).

Para el estudio de este trabajo de investigación, se consideró el uso de uno de los programas de simulación detallado para determinar el desempeño térmico-energético en edificaciones llamado TRNSYS. La selección de este paquete comercial, es debido a que éste ofrece una gran confiabilidad entre los programas de Simulación de Eficiencia en Edificaciones o BPS (por sus siglas en Inglés *Building Performance Simulation*), así como la evaluación de sistemas energéticos en estado transitorio (Charrón et al., 2005).

Además, desde el punto de vista de validación de software, TRNSYS es uno de los programas de simulación considerados en el Directorio de Herramientas de Software de Energía en Edificaciones por el Departamento de Energía de EE. UU. (DOE2) y la Agencia Internacional de Energía (IEA) (Neymark J. y Judkoff R., 2004).

En cuanto al uso de este software por parte de la línea de investigación relacionada con los estudios térmicos de edificaciones y sistemas solares relacionados correspondiente al Departamento de Ingeniería Mecánica, del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), se ha tenido una gran experiencia en el uso y manejo de la herramienta computacional, con el que se han obtenido resultados satisfactorios en cuanto a proyectos de investigación relacionados con dicha línea de investigación.

3.1 Descripción general del programa de simulación TRNSYS

TRNSYS, es un programa de simulación de sistemas transitorios que ha estado disponible comercialmente desde 1975. El programa fue desarrollado por el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de Wisconsin, Madison en conjunto con la Universidad de Colorado, Boulder en el que se construyó un edificio solar pasivo en Boulder y se simuló en Madison (Bradley y Kummert, 2005). A pesar de más de 40 años de existencia y para lograr su continuidad en el mercado, en los últimos años, sigue desarrollándose gracias a la colaboración internacional de los Estados Unidos (Especialistas en Sistemas de Energía Térmica y el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de Wisconsin), Francia (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) y Alemania (TRANSSOLAR Energietechnik) (Duffy et al., 2009).

3.2 Descripción del programa de simulación TRNSYS

TRNSYS es un programa de simulación transitoria modular y secuencial con código fuente en FORTRAN, de manera que en su ambiente, el usuario puede crear componentes o “*Types*” personalizados para sus necesidades de simulación dinámica; así mismo, en la biblioteca estándar de TRNSYS se pueden encontrar componentes con los que el usuario puede construir los proyectos según sea el caso, los cuales se utilizan para estudios y análisis de simulación tanto solar (térmicos y fotovoltaicos) como no solar (HVAC, sistemas de hidrógeno entre otros), así como para estudios de diseño y análisis de comportamiento térmico-energético en edificaciones, que es el caso de estudio de este tema de investigación.

Por lo tanto, TRNSYS sigue siendo un software de simulación flexible al facilitar la incorporación de componentes disponibles; asimismo, permite interactuar con otros programas (tales como Microsoft Excel, Fluent entre otros) al hacer llamados desde la simulación que son requeridos para pre o post-procesamiento.

El paquete comercial se compone de varios programas: el TRNSYS *Simulation Studio*, el motor de simulación (TRNDll.dll) y su ejecutable (TRNExe.exe), la interfaz visual de entrada de datos para el modelo de edificación multi-zona (TRNBuild.exe), y el editor utilizado para crear programas redistribuibles independientes conocidos como aplicaciones TRNSED (TRNEdit.exe) (Klein et al., 2016).

3.2.1 Ambiente *Simulation Studio* de TRNSYS

A través del archivo *DLL* del ambiente *Simulation Studio* se lleva a cabo la información requerida para la simulación. Así mismo, es el sitio donde se crean los modelos de proyectos mediante el desarrollo y la vinculación de los componentes del sistema. Los componentes o *Types*, describen el rendimiento del componente con ecuaciones algebraicas y/o diferenciales. La información que pueden relacionarse a cada componente es de tres tipos:

- Parámetro
- Entrada
- Salida

Los parámetros son la información proporcionada a los componentes que no cambia con el paso del tiempo de la simulación; en cuanto a las entradas requeridas por un componente, estas cambian durante el tiempo, tales como la temperatura, radiación, HR, flujos máscicos, entre otros.

Los componentes usados para una simulación, se desarrollan en forma de subrutinas en FORTRAN donde usan los parámetros y las entradas de datos para calcular las salidas como funciones del tiempo. Los componentes se conectan entre sí para formar un diagrama de flujo de información para el sistema al vincular las salidas de un componente a las entradas de otro.

El diagrama de flujo con información de un sistema puede exhibir un flujo de información reciclado en el cual las salidas de un componente proporcionan información para alimentar a otros componentes del sistema. En este caso, se necesita una técnica interactiva para resolver el conjunto resultante de ecuaciones. Cuando existe flujo de información reciclado, TRNSYS utiliza un esquema de iteración de sustitución sucesiva hasta que todas las variables de entrada en el ciclo reciclado convergen a una

tolerancia especificada por el usuario. Las ecuaciones diferenciales pueden resolverse analíticamente mediante la conversión en una forma algebraica o utilizando numéricamente el integrador comprendido en TRNSYS. Las ecuaciones diferenciales a menudo requieren una solución simultánea con las ecuaciones algebraicas. El software proporciona varios algoritmos de integración. El esquema original es un método de corrección de predictores de primer orden en el que el método de Euler se usa para la predicción y la regla trapezoidal se usa para el paso de corrección. La ventaja de un algoritmo de integración predictor-corrector para resolver ecuaciones diferenciales y algebraicas simultáneas es que los cálculos iterativos necesarios para resolver las ecuaciones diferenciales se producen a un valor de tiempo fijo. Como resultado, las soluciones a las ecuaciones algebraicas pueden converger por sustitución sucesiva a medida que progresa la iteración requerida para resolver las ecuaciones diferenciales. Una parte importante del esquema de solución en TRNSYS es que sólo aquellos componentes cuyas entradas (que son salidas de otros componentes) o ecuaciones diferenciales no han convergido dentro de las tolerancias especificadas se llaman durante los cálculos iterativos. De esta manera, se minimiza el esfuerzo computacional necesario para resolver las ecuaciones algebraicas y diferenciales durante cada paso de tiempo (Fiksel et al., 1995).

3.2.2 Interfaz del programa TRNBuild

Debido a la complejidad de la integración estructural de una edificación multi-zona, los parámetros del *Type 56* no se definen directamente en el archivo de entrada TRNSYS. En su lugar, se asigna un archivo llamado archivo de construcción (*.BUI) que contiene la información requerida del modelo.

A través de esta interfaz visual se permite proporcionar la información detallada del modelo de la edificación o vivienda. Aquí se consideran y define todos los parámetros de construcción, tanto de los muros, pisos, techos y superficies vidriadas, tomando en cuenta las propiedades térmicas y características físicas de los materiales de construcción. Asimismo, se consideran todos los factores que interaccionan y a la vez aquellos que puedan modificar el comportamiento térmico-energético del diseño del modelo de la edificación, tal es el caso de las infiltraciones, ganancias internas (por personas, aparatos eléctricos y/o por sistema de iluminación) o por algún sistema de HVAC.

De igual manera, en la interfaz antes de comenzar con la descripción del modelo y su orientación, se define el hemisferio (norte o sur) de acuerdo a la ubicación del caso de estudio, esto con la finalidad de calcular los ángulos acimutales correctos para las orientaciones de las superficies, ya que por cada superficie con una orientación específica se requiere una entrada de radiación incidente al *Type 56* (proporcionado por el procesador de radiación *Type 16*). Dicho lo anterior, en el *Type 56* se especifican las entradas y salidas en función de la descripción del edificio y los requerimientos que serán utilizados para el análisis.

La información considerada en el *Type 56*, se guarda en el archivo *.BUI el cual se utiliza para generar a la vez tres nuevos archivos de manera automática: un archivo *.BLD, que contiene toda la información sobre la edificación o vivienda, un archivo *.TRN que contiene los coeficientes de función de transferencia para las paredes, muros, techos y superficies vidriadas; y un archivo *.INF que contiene información sobre el archivo *.BUI procesado seguido por los valores de los coeficientes de función de transferencia y el coeficiente de transferencia de calor global ($v-U$).

3.3 Metodología de solución para el caso de estudio

En el ambiente *Simulation Studio*, se definen los componentes necesarios para llevar a cabo la simulación y se realiza la conexión entre aquellos que comparten información ya sea como entrada o como salida. Un componente está conectado a uno o varios componentes a través de "enlaces" (con la misma magnitud de la variable) permitiendo de esta manera el intercambio de información.

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo, en el que se puede observar los componentes requeridos para llevar a cabo la metodología de solución del trabajo de investigación, describiendo de manera general más adelante, la función de cada uno de ellos; permitiendo de esta manera determinar el comportamiento térmico al interior de la vivienda así como para la estimación de cargas térmicas.

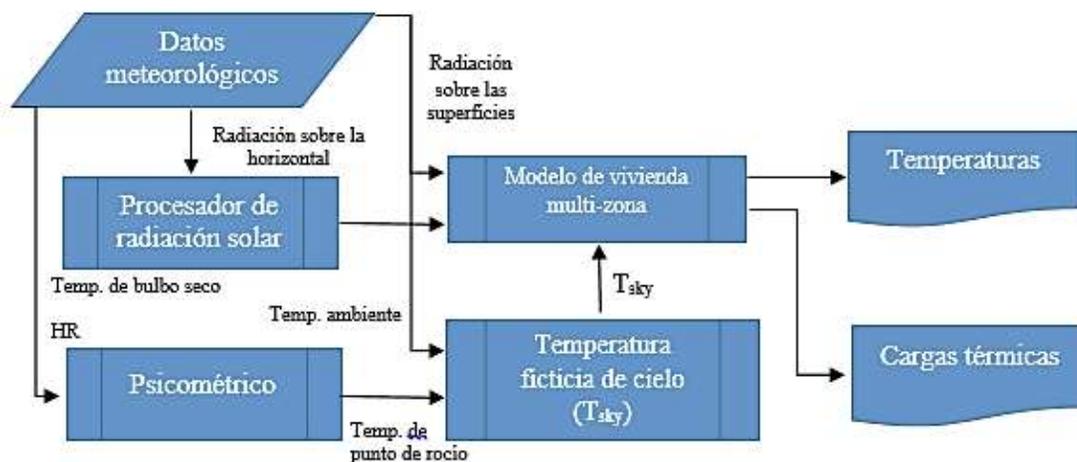


Figura 3.1. Diagrama de flujo para la metodología de solución.

3.3.1 Type 9 (lector de datos meteorológicos)

El componente lector de datos meteorológicos permite leer las variables ambientales requeridas para el estudio a intervalos de tiempo regulables desde un archivo de datos de tipo ACSII.dat, el cual dispone la información a otros componentes que la requieran en el ambiente *Simulation Studio*. El Type 9 permite leer cualquier tipo de variable meteorológica, sin embargo, es importante mencionar, que el contenido en el archivo esté en intervalos de tiempo constantes; ya que la información proporcionada para el programa es requerida en series de tiempo constantes.

Los datos meteorológicos requeridos para el caso de estudio fueron ordenados y guardados en columnas para poder ser leídos por el Type 9; estas variables consisten en velocidad del viento (m/s), temperatura ambiente (°C), humedad relativa HR (%) y radiación solar (W/m²), donde cada columna contiene 8760 datos correspondientes al número total de horas correspondientes para el año de simulación. En este componente es necesario hacer ajustes de parámetros según los datos a requerir.

3.3.2 Type 16 (procesador de radiación solar)

Este componente lee la información de la radiación solar proporcionada por el Type 9, asimismo interpola los datos (ya que en la mayoría de las simulaciones se requieren estimaciones de la radiación a intervalos

de tiempo distintos de una hora) y calcula varias cantidades relacionadas con la posición del sol y por otro lado, estima la insolación en varias superficies según sea la orientación fija (N, S, E u O) para cada superficie definida en la interfaz de *TRNBuil*.

El procesador de radiación solar, toma valores integrados por hora de la radiación solar horizontal total y calcula la fracción difusa utilizando un algoritmo (Pérez, que es el más preciso). En este componente es necesario hacer ajustes de parámetros, tal es el caso del inicio de la simulación, la latitud del sitio y el tiempo solar, por mencionar algunos.

3.3.3 *Type 69 (temperatura ficticia de cielo)*

Este componente determina una temperatura ficticia de cielo, que se usa para calcular el intercambio de radiación de onda larga entre una superficie externa arbitraria y la atmósfera. Por otra parte, este componente calcula la nubosidad del cielo en función de la temperatura de bulbo seco (proporcionado por el *Type 9*) y las temperaturas del punto de rocío (proporcionados por el *Type 33*). La temperatura ficticia de cielo determinada por este componente, es vinculada al *Type 56* requerida para el análisis en el modelo multi-zona.

3.3.4 *Type 33 (psicometría)*

Este componente toma como entrada la temperatura del bulbo seco y la humedad relativa del aire húmedo (proporcionados por el *Type 9*) y llama la rutina psicrométrica de TRNSYS, obteniéndose como salidas las propiedades correspondientes de la humedad del aire: temperatura del bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, temperatura del punto de rocío, densidad del aire seco, relación de humedad absoluta, humedad relativa, humedad absoluta y humedad específica.

3.3.5 *Type 56 (edificación)*

Este componente permite modelar el comportamiento térmico-energético de un edificio o vivienda que puede tener múltiples zonas térmicas, y que a la vez éstas puedan incorporar múltiples nodos de aire. El componente emplea la interfaz visual, que como se ha dicho anteriormente, es requerida para definir los parámetros y consideraciones del modelo de la vivienda u otra edificación, así como la definir la integración de estructuras externas en la fachada de la edificación, tal como elementos de sombreados, los cuales son caso de estudio para este tema de tesis.

3.3.6 *Type 34 (voladizos/muro vertical)*

Este componente calcula la radiación solar que incide en una pared vertical sombreada por un voladizo y/o parte-sol (muro vertical pequeño adyacente a la pared vertical). El *Type 34* realiza su propio cálculo de radiación solar difusa incidente asumiendo un modelo de cielo isótropo para cada superficie opaca o translúcida. Por lo que el componente permite caracterizar los elementos de sombreado integrados a la arquitectura de la vivienda, permitiendo cuantificar sus efectos en términos de temperatura así como de las cargas térmicas.

En este componente es necesario hacer ajustes de parámetros según las características de las dimensiones de voladizos y/o parte-soles a considerar, así como la orientación tanto azimutal como cenital.

3.3.7 Impresión de resultados, Type 28 (impresora/integrador combinado) y Type 65 (impresión en pantalla)

La información de salida que puede proporcionar el *Type 56* es muy numerosa y los cuales están en disposición de acuerdo a la información requerida para el estudio.

A través del *Type 28* se permite imprimir dos archivos de resultados requeridos para el análisis, uno de ellos proporciona información sobre los resultados integrados de acuerdo el periodo de análisis del caso de estudio (1 año), y en cuanto al otro archivo, imprime resultados integrados de manera mensual.

Para el caso en cuestión, la información requerida e impresa por este componente es:

T_{air} temperatura por cada nodo de aire en cada zonas térmica.

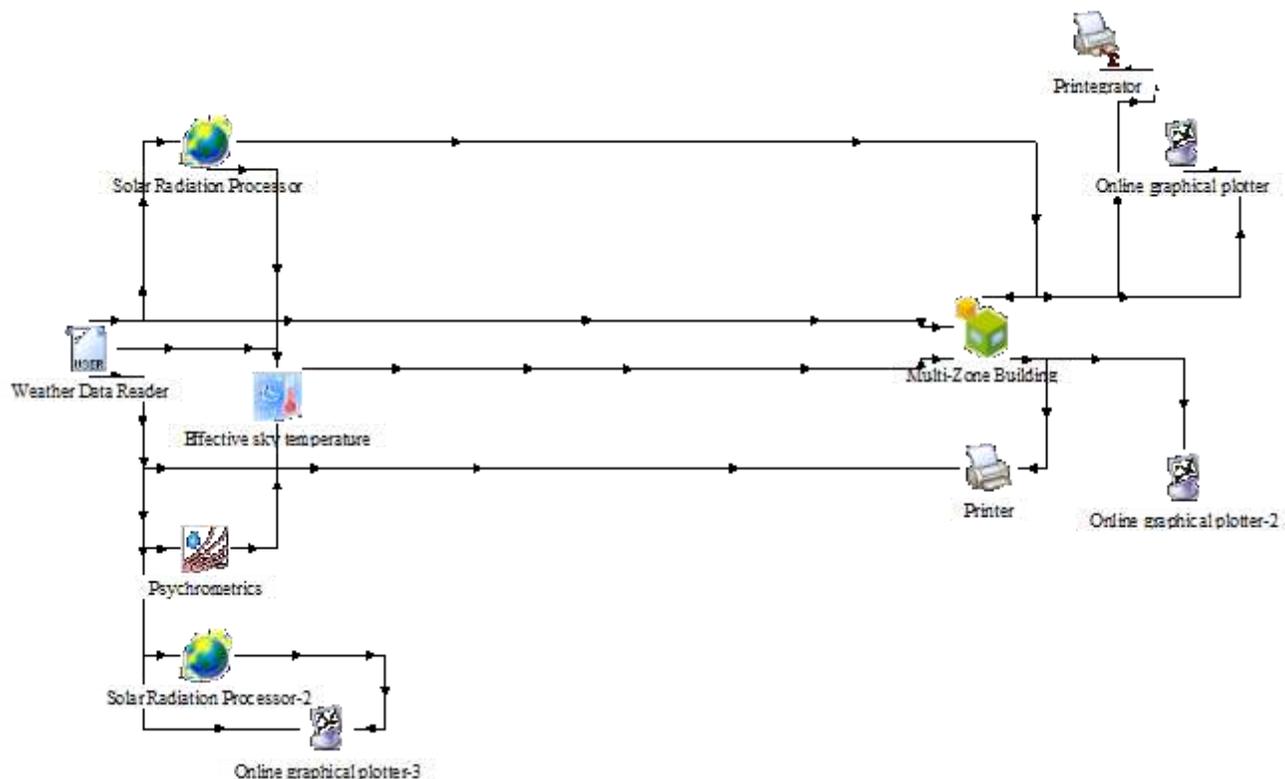
Q_{cool} Cargas por enfriamiento para cada zona térmica.

Q_{heat} Cargas por calentamiento para cada zona térmica.

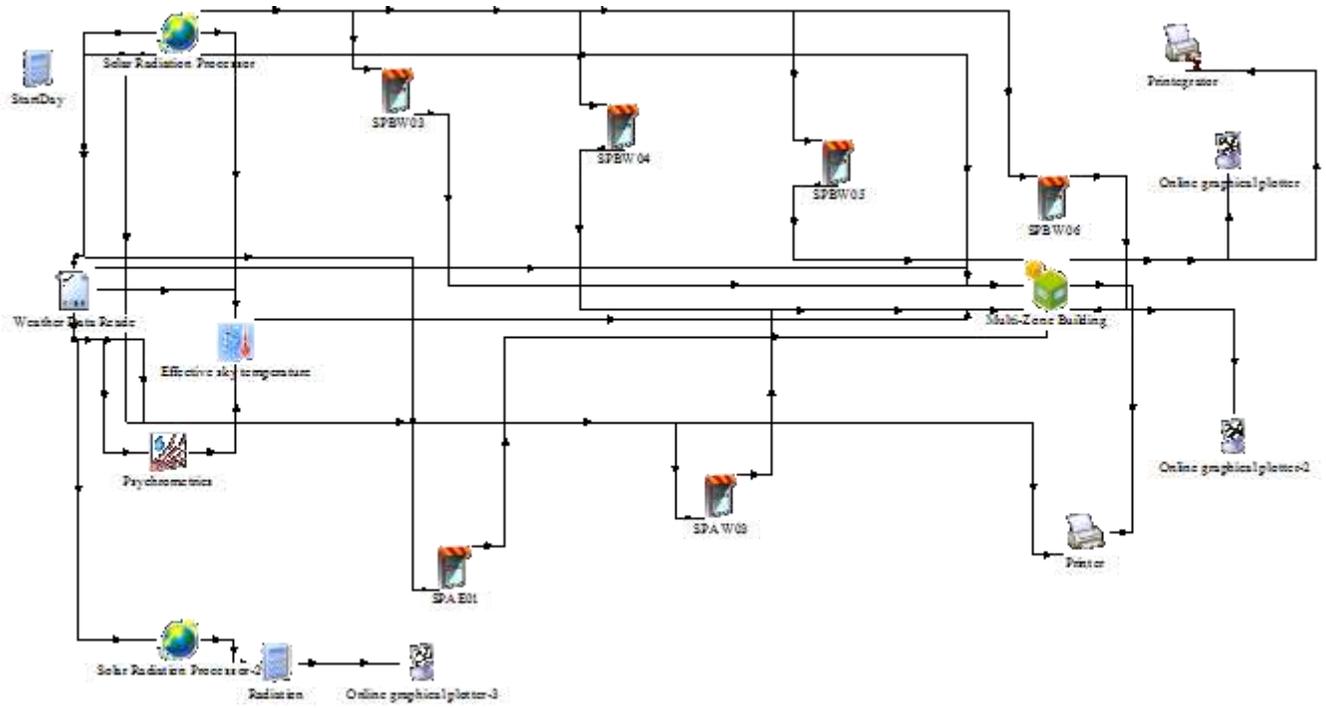
Q_{sen} Cargas térmicas sensibles para cada zona térmica.

Los resultados también pueden ser vistos en pantalla mediante la impresión por el *Type 65*, en el que permite imprimir salidas en periodos de tiempo en minutos, hora, días, semanas o de manera anual.

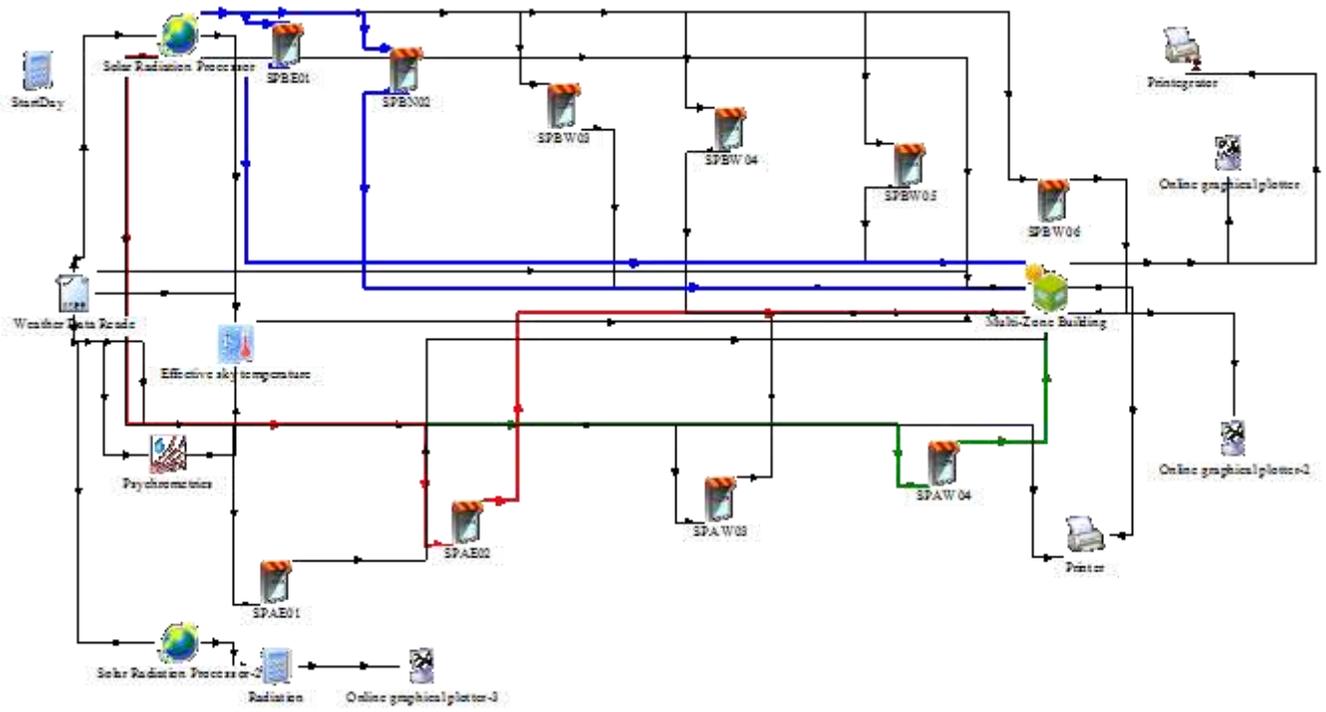
En la Figura 3.2 se muestra la implementación de los componentes para el caso de estudio en el ambiente *Simulation Studio* de TRNSYS, donde en a), se observa el modelo de la vivienda sin la consideración de los efectos de sombreado; así mismo en el ambiente b) se observa la consideración de los efectos de sombreado causado por el diseño de la vivienda, y en c) la integración de los sistemas pasivos de sombreado (en línea azul, rojo y verde) en la fachada (mismos que serán descritos en el Capítulo 4).



a)



b)



c)

Figura 3.2. Modelado de la vivienda en ambiente *Simulation Studio*. a) sin la consideración de efectos de sombreado. b) con la consideración de efectos de sombreado por mismo diseño en la vivienda y c) al integrar los sistemas pasivos de sombreado.

3.4 Descripción matemática

Al interior de la vivienda suceden diferentes efectos como pérdidas o ganancias de energía (calor), a causa de la envolvente expuesta a diferentes condiciones ambientales durante el día. A continuación se describen las expresiones matemáticas que permiten representar el estado físico del estudio, y considerar esa expresión en una representación que tiene que ver con el balance térmico en el interior de la vivienda al suponer un nodo de aire por cada recinto o espacio de estudio; dado que en la envolvente interactúan temperaturas en sus superficies (internas y externas) y coeficientes de transferencia calor, por lo que los flujos de calor dependientes de estos factores se determinan mediante funciones de transferencia, que permiten precisamente determinar el comportamiento dinámico en muros, techos o pisos con una masa térmica; cuyas expresiones están regidas con base en leyes fundamentales (ley de Fourier, conservación de la energía) para llevar a cabo los mecanismos de transferencia de calor y balances de energía; todo esto determinado por el *Type 56* durante la simulación.

3.4.1 Zona térmica/nodo de aire

Este modelo de componente realiza un balance térmico mediante un nodo de aire por cada espacio a considerar al interior de cada zona térmica. Este nodo de aire representa la capacidad térmica del volumen del aire de un espacio, el cual, está estrechamente relacionado con otras capacidades térmicas de otros nodos de aire adyacentes. La capacidad térmica del nodo es una propiedad extensiva, la cual es definida en la interfaz visual de *TRNBuild*. En la Figura 3.3, se muestra el nodo de aire al interior de un espacio en el que está influenciado bajo diferentes flujos de energía.

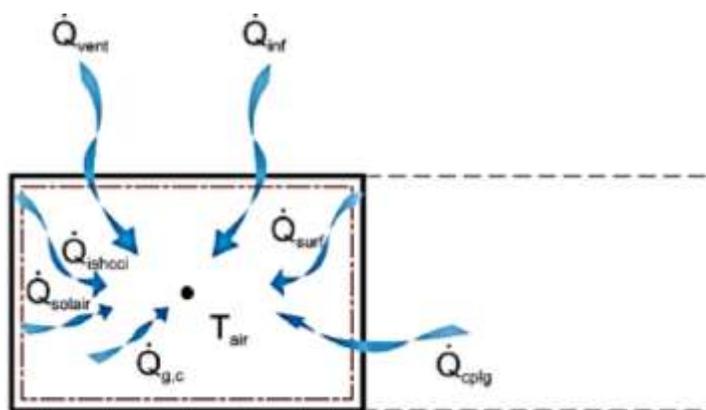


Figura 3.3. Balance de energía térmica en un nodo de aire de un espacio.

3.4.2 Flujo de calor convectivo al nodo de aire

Por lo tanto, el flujo de calor convectivo en el nodo de aire de acuerdo a la Figura 3.3, es igual a la suma de las ganancias convectivas al interior, las cuales pueden ser cuantificadas mediante la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{conv,i} = \dot{Q}_{surf,i} + \dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{vent,i} + \dot{Q}_{cplg,i} + \dot{Q}_{g,c,i} + Q_{solar,i} + Q_{ISHCCI,i} \quad (3.1)$$

siendo:

$\dot{Q}_{conv,i}$ el flujo de calor convectivo al interior del espacio (W).

$\dot{Q}_{surf,i}$ la ganancia convectiva por las superficies (W).

$\dot{Q}_{inf,i}$ la ganancia por infiltración (sólo por flujos de aire del exterior) (W), siendo:

$$\dot{Q}_{inf,i} = V\rho C_p(T_{outside} - T_{air}) \quad (3.2)$$

$\dot{Q}_{vent,i}$ la ganancia por ventilación (debido a un sistema mecánico) (W), siendo:

$$\dot{Q}_{vent,i} = V\rho C_p(T_{vent,i} - T_{air}) \quad (3.3)$$

$\dot{Q}_{cplg,i}$ la ganancia debido al flujo de aire (convectivo) del nodo de aire i o condición de frontera (W), siendo:

$$\dot{Q}_{cplg,i} = V\rho C_p(T_{zone,i} - T_{air}) \quad (3.4)$$

$\dot{Q}_{g,c,i}$ las ganancias convectivas internas (por iluminación artificial, personas y/o aparatos eléctricos) (W).

$Q_{solar,i}$ la fracción de radiación solar que ingresa a un nodo de aire a través de ventanas externas que se transfiere inmediatamente como una ganancia convectiva al aire interno.

$Q_{ISHCCI,i}$ la radiación solar absorbida por todos los dispositivos de sombreado internos de la zona y transferida directamente como una ganancia convectiva al nodo de aire.

3.4.3 Flujos de calor radiativos en pared y ventanas

Los flujos de calor radiativos en una pared o ventana, se determinan de manera análoga; es decir, se considera un nodo de temperatura en la superficie opaca y traslúcida. Como se muestra en la Figura 3.4, los flujos de calor radiativos que inciden sobre una de estas superficies, se calculan mediante un nodo en su superficie.

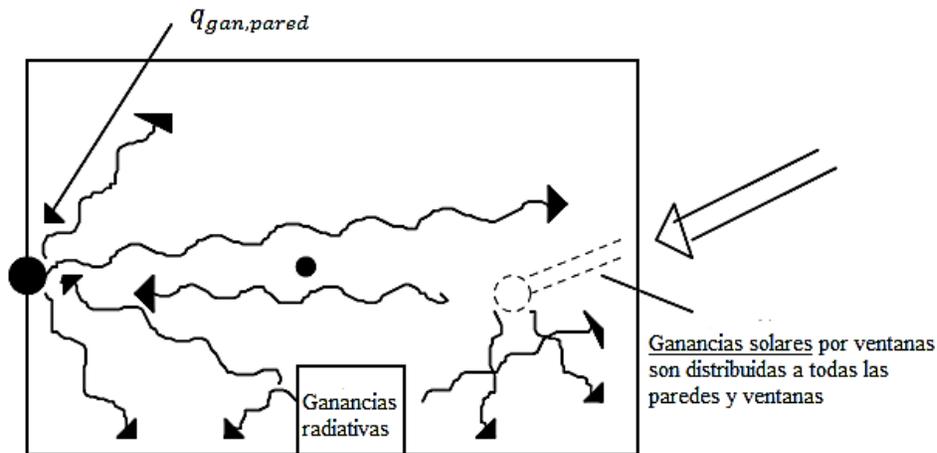


Figura 3.4. Flujo de energía radiativo sobre una pared en un nodo de temperatura superficial.

Los flujos de energía radiativos determinados por el nodo de temperatura, son calculados mediante la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{r,w_i} = \dot{Q}_{g,r,i,w_i} + \dot{Q}_{sol,w_i} + \dot{Q}_{long,w_i} + \dot{Q}_{wall-gain} \quad (3.5)$$

siendo:

\dot{Q}_{r,w_i} las ganancias radiativas por el nodo de temperatura en la superficie de la pared (W).

\dot{Q}_{g,r,i,w_i} las ganancias radiativas internas recibidas por la pared del espacio (W).

\dot{Q}_{sol,w_i} las ganancias solar a través de las ventanas de la zona (W).

\dot{Q}_{long,w_i} el intercambio radiativo de onda larga entre esta pared y todas las demás paredes y ventanas ($\epsilon_i = 1$) (W).

$\dot{Q}_{wall-gain}$ el flujo de calor definido por el usuario en la superficie de paredes o ventanas (W).

3.4.4 Comportamiento térmico en muros o ventanas

Las diferentes temperaturas y flujos de calor que interactúan en la superficie de una pared o ventana se muestran en la Figura 3.5, éstos permiten predecir el comportamiento térmico-energético en el interior de una zona térmica.

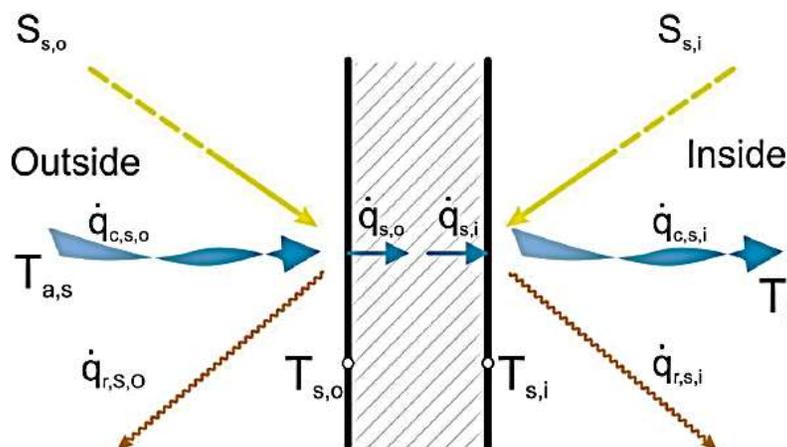


Figura 3.5. Interacción de temperaturas y flujos de calor en una superficie.

siendo:

$S_{s,i}$ el flujo de calor por radiación absorbido en la superficie interior (ganancia solar y radiativas).

$S_{s,o}$ el flujo de calor por radiación absorbido en la superficie exterior (ganancia solar).

$\dot{q}_{r,s,i}$ la transferencia de calor radiativa total (de todas las superficies interiores) de una zona.

$\dot{q}_{r,s,o}$ la transferencia de calor radiativa total en todas las superficies exteriores.

$\dot{q}_{w,g,i}$ el flujo de calor definido por el usuario en una superficie (pared o ventana).

$\dot{q}_{s,i}$ el flujo de calor por conducción desde la superficie exterior al interior.

$\dot{q}_{s,o}$ el flujo de calor por conducción desde la superficie interior al exterior.

$\dot{q}_{c,s,i}$ el flujo de calor por convección desde la superficie interior al medio exterior.

$\dot{q}_{c,s,o}$ el flujo de calor por convección de la superficie exterior hasta la condición de frontera/el medio ambiente.

$T_{s,i}$ la temperatura de la superficie interior.

$T_{s,o}$ la temperatura de la superficie exterior.

Para determinar los flujos de calor en superficies con masa térmica, TRNSYS implementa el método de Función de Transferencia. La Función de Transferencia permite determinar la conducción de calor en estado transitorio basado en el método introducido por Stephenson y Mitalas (Stephenson y Mitalas, 1971). Este método consiste en determinar las Funciones de Transferencia mediante la transferencia de calor por conducción en 1D a través de una superficie, de modo que la ecuación de conducción es resuelta con la teoría de Laplace y la transformada-z. Por lo tanto, las Funciones de Transferencia son series en el tiempo, en las que se permite calcular la cantidad de flujos de calor tanto internos o externos de una pared de un espacio (q_{si} y q_{so}) a partir de valores actuales y anteriores tanto de temperaturas de superficie (T_{si} y T_{so}) y de estos flujos de calor.

Por lo que, la conducción de calor para superficies opacas, el flujo de calor en una pared interna se expresa como:

$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_b} b^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_c} c^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_d} d^k \dot{q}_{s,i}^k \quad (3.6)$$

y para el flujo de calor en una pared externa:

$$\dot{q}_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_a} a^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_b} b^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_d} d^k \dot{q}_{s,o}^k \quad (3.7)$$

siendo

k el término de la serie temporal, donde $k = 0$ es el tiempo actual y $k = 1$ el tiempo anterior.

a , b , c y d los coeficientes de las ecuaciones de la serie de tiempo (determinados por *TRNBuil* mediante las rutinas de referencia para la función de transferencia-z (Mitalas y Arseneault, 1972).

3.4.5 Radiación de onda larga

El intercambio de radiación de onda larga entre las superficies dentro de la zona y el flujo de calor convectivo desde las superficies interiores al aire de la zona está restringido bajo una red de estrella dada por Seem (Seem, 1987), tal como se muestra en la Figura 3.6.

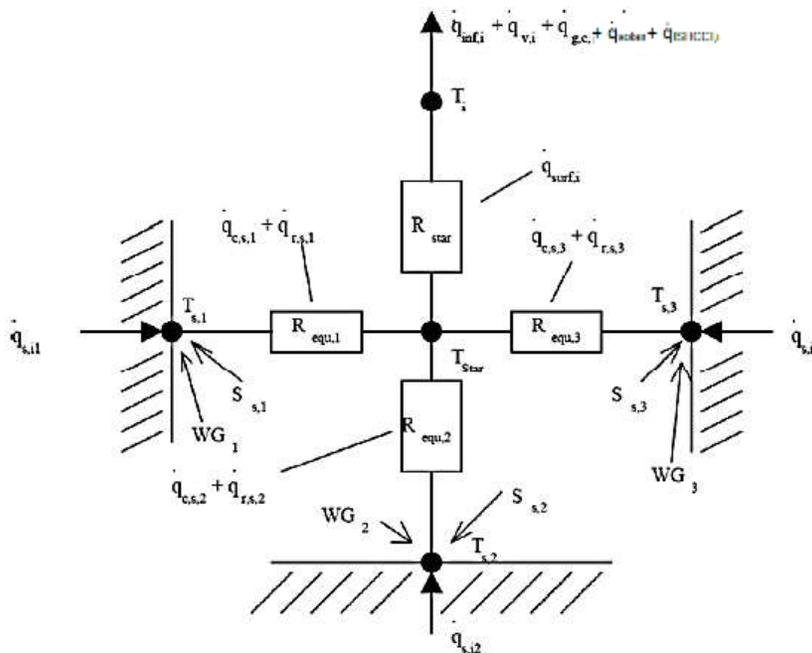


Figura 3.6. Red en estrella para un espacio.

Este método utiliza un nodo de temperatura (T_{star}) para considerar flujos de calor paralelos desde una superficie de la pared al nodo de aire por convección, y por radiación a otros elementos de pared y ventana.

$$R_{STAR,i} = f(\alpha_i, A_{surf,i}) = \frac{1}{Q_{surf,i}} (T_{star} - T_i) \quad (3.8)$$

donde las resistencias $R_{equiv,i}$ y $R_{STAR,i}$ se puede encontrar en la referencia (Seem, 1987). Las relaciones de área se usan en estos cálculos para encontrar los factores de absorción entre todas las superficies. La temperatura en el nodo de estrella se puede usar para calcular un flujo de calor total tanto radiativo y convectivo de la superficie de la pared interior:

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \dot{q}_{c,s,i} + \dot{q}_{r,s,i} \quad (3.9)$$

Por lo tanto:

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \frac{1}{R_{equiv,i} A_{s,i}} (T_{s,i} - T_{star}) \quad (3.10)$$

siendo $\dot{q}_{comb,s,i}$ el flujo de calor convectivo y radiativo combinado, y $A_{s,i}$ el área de superficie interior. Para superficies externas, el intercambio de radiación de onda larga se considera explícitamente utilizando una temperatura ficticia de cielo (T_{sky}), la cual es un dato requerido por el *Type 56*, así como el factor de vista de cielo ($f_{s,sky}$), la temperatura ficticia de suelo (T_{sgrd}) y el factor de vista ($1-f_{s,sky}$) para cada superficie externa. La transferencia de calor total se da como la suma de la transferencia de calor convectiva y radiativa:

$$\dot{q}_{comb,s,o} = \dot{q}_{c,s,o} + \dot{q}_{r,s,o} \quad (3.11)$$

Con

$$\dot{q}_{comb,s,o} = h_{conv,s,o} (T_{a,s} - T_{s,o}) \quad (3.12)$$

$$\dot{q}_{r,s,o} = \sigma \varepsilon_{s,o} (T_{s,o}^4 - T_{fsky}^4) \quad (3.13)$$

$$T_{sky} = (1 - f_{s,sky}) T_{sgrd} + f_{s,sky} T_{sky} \quad (3.14)$$

siendo

$\dot{q}_{comb,s,o}$ los flujos combinados de calor convectivos y radiativos por la superficie.

$\dot{q}_{c,s,o}$ el flujo de calor convectivo a la superficie.

$\dot{q}_{r,s,o}$ el flujo de calor radiativo a la superficie.

$h_{conv,s,o}$ el coeficiente de transferencia de calor convectivo en la superficie exterior.

f_{sky} la fracción de cielo vista por la superficie externa⁴.

T_{sky} la temperatura ficticia de cielo usada para el intercambio radiativo de onda larga.

T_{sgrd} la temperatura ficticia del suelo usado para el intercambio radiativo de onda larga.

$\varepsilon_{s,o}$ la emisividad de onda larga de la superficie exterior ($\varepsilon = 0.9$ para muros, valor leído en la ventana de la biblioteca para las ventanas).

σ la constante de Stephan Boltzmann.

Donde los balances de flujos de energía en las superficies están dadas como:

$$\dot{q}_{s,i} = \dot{q}_{comb,s,i} + S_{s,i} + Wallgain \quad (3.15)$$

$$\dot{q}_{s,o} = \dot{q}_{comb,s,o} + S_{s,o} \quad (3.16)$$

Para superficies internas $S_{s,i}$ puede incluir tanto radiación solar como radiación de onda larga generada a partir de objetos internos, como personas o muebles.

Wallgain es definido por el usuario, que permite considerar una ganancia de calor por una pared interna o por una ventana. Para superficies externas $S_{s,o}$ consiste únicamente en radiación solar.

⁴ Para una pared vertical sin obstrucciones, un valor razonable para fsky es 0.5. Si hay objetos en frente de la pared que obstruyen la vista del cielo, el valor de fsky sería inferior a 0.5. Para un techo horizontal, fsky sería 1.0.

3.5 Verificación y validación del software TRNSYS (caso 630)

Para asegurar la confiabilidad de los resultados del proceso de simulación dinámica, se realizó una validación de tipo test comparativo, el cual consiste en comparar las salidas obtenidas de la simulación con las referencias proporcionadas por desarrolladores y evaluadores de software en relación a eficiencia energética en edificaciones, tal como es el caso de BESTEST. El BESTEST (por sus siglas en inglés *Building Energy Simulation Test*) es un protocolo desarrollado por la IEA para validar las salidas de las simulaciones de los diferentes paquetes de software comerciales que se enfocan en el diseño y desempeño térmico-energético de edificaciones.

3.6 Configuración del caso 630 (protección solar en ventanas con orientación Este y Oeste)

Par verificar y validar TRNSYS, se seleccionó el caso 630 propuesto por BESTEST por tener relación con el trabajo de investigación. El caso 630 presenta dimensiones y características geométricas tal como se muestra en la Figura 3.7; el test para el caso consiste en el análisis de cargas térmicas atribuidas al efecto de elementos de sombreado integrados a superficies vidriadas.

El caso 630 presenta una sola zona térmica que alberga un volumen de 129.6 m^3 , donde los materiales de construcción integrados en la envolvente consisten en muros ligeros (ver Tabla 3.1), muros que en su orientación Este y Oeste contienen superficies vidriadas (de 6 m^2), mismas en las que se encuentran integrados elementos de sombreado así como muros verticales o parte-soles (como protectores de la incidencia de la rayos del sol), los cuales presentan características y dimensiones tal como se muestran en la figura del mismo isométrico.

En la zona se consideran ganancias internas sensibles de 200 W (60% potencia radiativa y 40% convectiva), así como una infiltración de 0.5 cambios de aire por hora. Por otro lado, también se consideran ganancias por la incidencia de la radiación solar directa que ingresa a través de las ventanas, y estas a la vez, que inciden y se distribuyen sobre las superficies internas de las paredes.

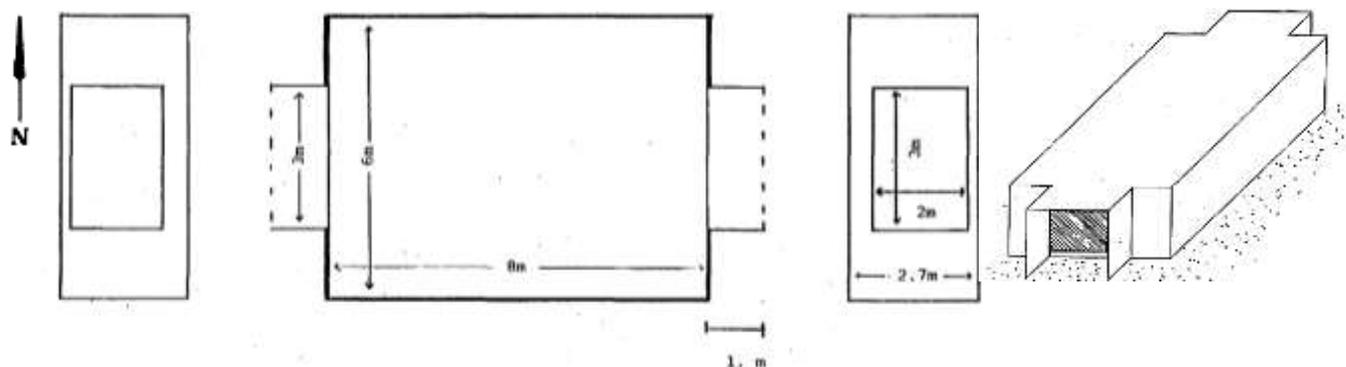


Figura 3.7. Isométrico del caso 630 (protección solar en ventanas con orientación Este y Oeste).

3.7 Características físicas y propiedades térmicas de los materiales de construcción

En la Tabla 3.1 se muestran las propiedades térmicas y características físicas de los materiales con que está integrada la envolvente de la zona, los cuales se consideraron para la simulación en TRNSYS.

Tabla 3.1. Propiedades termofísicas de los muros, piso y techo para la zona del caso 630.

Configuración de superficies opacas del caso 630							
Muro	Composición	Conductividad térmica (λ) (W/mK)	Calor específico (Cp) (kJ/kgK)	Densidad (ρ) (kg/m ³)	Espesor (m)	v-U del muro (W/m ² K)	R del muro (m ² K/W)
h _i sup. int.*						8.290	0.121
MURO_L	Plasterboard	0.160	0.840	950	0.012	29.300	0.034
	Fibreglas quilt	0.040	0.840	12	0.606		
	Wood Siding	0.140	0.900	530	0.009		
h _o sup. ext.*							
Piso	Composición	Conductividad térmica (λ) (W/mK)	Calor específico (Cp) (kJ/kgK)	Densidad (ρ) (kg/m ³)	Espesor (m)	v-U del piso (W/m ² K)	R del muro (m ² K/W)
h _i sup. int.*						8.290	0.121
PISO_L	Timber flooring	0.140	1.20	650	0.025	0.040	25.075
	Insulation	0.040	-	-	1.003		
h _o sup. ext.*							
Techo	Composición	Conductividad térmica (λ) (W/mK)	Calor específico (Cp) (kJ/kgK)	Densidad (ρ) (kg/m ³)	Espesor (m)	v-U del techo (W/m ² K)	R del muro (m ² K/W)
h _i sup. int.*						8.290	0.121
TECHO_L	Plasterboard	0.160	0.840	950	0.010	29.300	0.034
	Fibreglas quilt	0.040	0.840	12	0.1118		
	Roofdeck	0.140	0.900	530	0.019		
h _o sup. ext.*							

*coeficientes de transferencia de calor combinados para las superficies internas o externas.

Fuente: BESTEST, 1995.

En cuanto a las superficies vidriadas, se consideraron las características físicas y propiedades térmicas más cercanas a las propuestas por BESTEST, ya que TRNSYS no permite la configuración de ventanas al nivel de detalle requerido para el caso 630; de manera que, no se tomaron en cuenta todas las características planteadas por BESTEST. En la Tabla 3.2 se muestran las propiedades termofísicas del vidriado consideradas para la simulación.

Tabla 3.2. Propiedades termofísicas en el vidriado de la zona.

	No. de vidrios	Espesor de vidrios (mm)	Espesor de capa de aire (mm)	Conductividad térmica (W/m ² K)	v-U del vidriado (W/m ² K)	R del muro (m ² K/W)
h _i sup. int.*					8.290	0.121
TRNSYS	2	4	16	0.8207		
h _o sup. ext.*					21.00	0.048

*coeficientes de transferencia de calor combinados para la superficie interna o externa.

3.8 Resultados del test comparativo

Para verificar y validar los resultados obtenidos de la simulación, éstos se compararon con las referencias proporcionadas por BESTEST correspondientes a las cargas térmicas anuales (en MWh), así como para los días específicamente señalados en el caso 630 (en kW). Los resultados de la simulación y la comparación con las referencias se muestran en las Tablas 3.3 y 3.4.

Tabla 3.3. Comparación de resultados del test correspondientes a las cargas térmicas de enfriamiento.

	Cargas de enfriamiento (Q_{cool})	
	Anuales (MWh)	Horas pico (kW) (26/Julio/17:00 h)
BESTEST	2.416	3.608
Presente estudio	2.302	3.439
Diferencia	0.114	0.169
Dif. en %	4.7	4.7

Tabla 3.4. Comparación de resultados del test correspondientes a las cargas térmicas de calentamiento.

	Cargas de calentamiento (Q_{heat})	
	Anuales (MWh)	Horas pico (kW) (04/Enero/06:00 h)
BESTEST	5.624	3.922
Presente estudio	5.793	4.039
Diferencia	0.169	0.109
Dif. en %	2.9	2.7

Como se puede observar en la Tabla 3.3, las salidas de la simulación en comparación con las referencias, presentaron una diferencia más marcada con respecto a los resultados de la Tabla 3.4. Sin embargo, el resultado promedio al considerar las cargas térmicas anuales (tanto de enfriamiento como de calentamiento), así como para las horas pico (de igual manera, tanto de enfriamiento como de calentamiento), tuvieron un 2.5 y 3.7% de diferencia respectivamente, porcentaje que no aparenta tener mucha desviación de acuerdo a las referencias por BESTEST.

La configuración de todas las superficies opacas así como las consideraciones para el caso 630 a través de TRNSYS, se pudieron ingresar de manera tal cual son establecidas por BESTEST. No obstante, en cuanto al tipo de vidriado, BESTEST considera un tipo con características ópticas y físicas específicas, que como ya se mencionó, en cuanto a TRNSYS no se pudieron definir completamente (tal como la densidad, calor específico, coeficiente de transferencia de calor en el espacio de aire, por mencionar algunos), por lo que se configuró un tipo de vidriado con las características más cercanas y de acuerdo a la biblioteca proporcionada por el mismo software; de donde se infiere, que esta fue una de las principales razones por las que se debieron estas diferencias entre las cargas térmicas. De manera general, en la Tabla 3.5 se muestra la comparación de ambos tipos de vidriado.

Tabla 3.5. Comparación de superficies vidriadas en el test.

Tipo	No. de vidrios	Espesor del vidrio (mm)	Espesor de capa de aire (mm)	Conductividad térmica del vidrio (W/m^2K)	v-U (W/m^2K)
BESTEST	2	3.175	13	1.06	3.0
TRNSYS	2	4	16	0.82	2.83

Capítulo 4

Caso de estudio

En este capítulo se describe el caso de estudio donde se presenta la ubicación y geografía, así como las variables ambientales del sitio donde se encuentra la vivienda. De igual forma, se detallan las características de construcción (tanto físicas como térmicas) y orientación de la vivienda, así como los sistemas pasivos de sombreado integrados en la fachada. Posteriormente se definen las zonas térmicas a estudiar al interior de la vivienda para determinar el comportamiento térmico energético de la misma, al considerar una banda o zona de confort (la cual también se describe). Y por último se mencionan las consideraciones para el caso de estudio de acuerdo a lo anteriormente puntualizado.

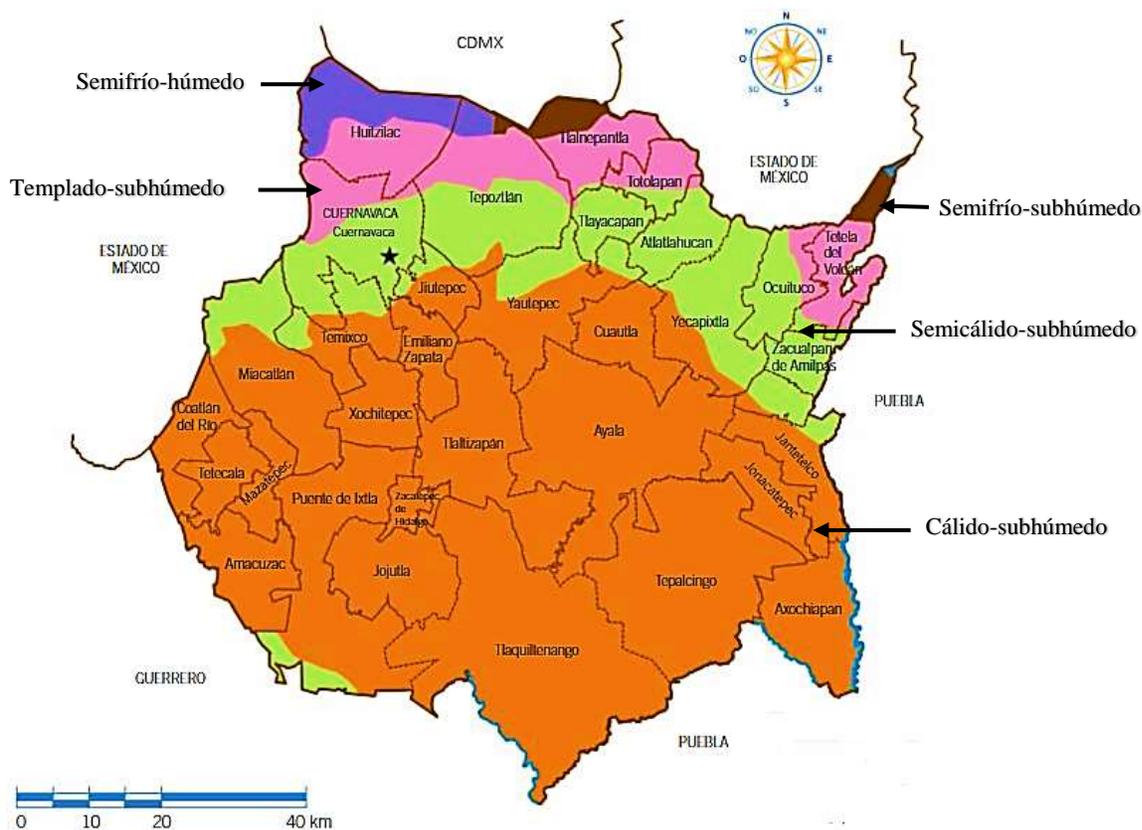
4 Caso de estudio

4.1 Ubicación y geografía del caso de estudio

La vivienda se encuentra ubicada en la localidad de Temixco, en el estado de Morelos, México, con coordenadas geográficas de 18°50'42.984" latitud Norte y 99°13'26.975" longitud Oeste, y una altitud de 1 238 (msnm).

El Estado de Morelos se encuentra localizado en la región centro del país, representando el 0.2% de la superficie del territorio de México; las colindancias que existen en la periferia de esta entidad son: al Norte con Edo. de México y la CDMX, al Este con el Edo. de México y Puebla, al Sur con Puebla y Guerrero y, al Oeste con Guerrero y el Edo. de México (INEGI, 2015).

De acuerdo a información proporcionada por el INEGI mostrada en la Figura 4.1 en relación al clima del Estado de Morelos; se tienen cinco microclimas diferentes: el cálido subhúmedo, presente en la mayor parte del Centro y Sur de la extensión territorial del estado con el 68.17% y temperaturas promedio que van desde 22 a 32°C; el clima semicálido subhúmedo presente en un 18.85% del territorio y con temperaturas que oscilan entre los 18 y 22°C; el templado subhúmedo que caracteriza al 9.7% de la superficie localizada en la franja Norte del estado, en donde se registran temperaturas entre los 12 y 18°C; el semifrío húmedo localizada en el Noreste que comprenden el 2.25%, donde se registran temperaturas entre 8 y 12°C; y por último el clima semifrío subhúmedo localizado en el Norte que comprenden el 1.03% donde se registran temperaturas entre los 5 y 12°C. En la mayor parte del estado se presentan lluvias en verano (INEGI, 2016).



Fuente: INEGI, 2016.

Figura 4.1. Climas predominantes en el estado de Morelos.

Considerando los diferentes microclimas presentes en el Estado de Morelos, la temperatura promedio anual es de 21.5°C, así como una temperatura promedio mínima anual de 10°C y una temperatura promedio máxima anual de 32°C (INEGI, 2016).

Como se puede observar en la misma figura, la localidad de Temixco presenta dos de estos microclimas, el cálido subhúmedo y el semicálido subhúmedo, donde se registra una temperatura media anual de 23.1°C. Así mismo para esta localidad, Febrero es el mes más seco, Mayo el más cálido (temperatura promedio de 25.9°C), y Diciembre el más frío (con temperatura promedio de 20.5°C) (Climate-data, 2017).

4.2 Condiciones ambientales del sitio

El estudio del comportamiento térmico-energético de la vivienda, se encuentra estrechamente relacionada con la masa térmica integrada en su envolvente. La respuesta de esta masa térmica, depende de las propiedades tanto físicas como térmicas de los mismos materiales; pero por otro lado, también depende de las condiciones ambientales con que interacciona.

Como el estudio de este tema de tesis corresponde un año de modelación para predecir el comportamiento térmico y energético de la vivienda; de manera que se requiere de variables de mayor relevancia tales como: temperatura ambiente (°C), velocidad de aire (m/s), humedad relativa (%) y radiación solar (W/m^2). En la Tabla 4.1 se muestran las variables ambientales (promedio mensual y anual) del sitio correspondiente al año 2016 proporcionadas por el Sistema Meteorológico Nacional (SMN). Estas variables fueron recopiladas y monitoreadas a partir de mediciones mediante intervalos de tiempo correspondientes a cada 10 minutos (valores promedios a partir de registros de datos de cada 10 segundos) de manera horaria, diaria y a la vez anual, realizado por la IMTA, Estación Meteorológica Automática (EMA) administrada por el SMN.

La EMA se encuentra ubicada en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), a 5.6 km de distancia del sitio de estudio; que de acuerdo a lo establecido por la Norma Mexicana PROYE-MNX-AA-116/2-SCFI-2015, y en relación a las especificaciones técnicas que deben cumplir los instrumentos de medición en las estaciones meteorológicas; las estaciones tienen un rango de cobertura de 5 km de radio, teniendo como máximos hasta 10 km, esto dependiendo de las condiciones del sitio o zona donde estén instaladas las EMAS, es decir, se consideran las diferentes estructuras naturales de gran altura o diferencias de alturas (en relación al sitio de estudio) que puedan interferir con el registro de las variables meteorológicas; por lo que la diferencia que existe entre el sitio donde se encuentra la EMA y el sitio de estudio, no existen zonas montañosas de gran altura o grandes diferencias de alturas significativas que puedan interferir con las mediciones meteorológicas.

Con las variables ambientales proporcionados por el SMN, se generó una base de datos correspondientes a promedios horarios (de acuerdo a la base de datos requerido por el motor de simulación TRNDll.dll), los cuales se definen como datos de entrada por los componentes (*types*) y, éstos a la vez permiten generar información para alimentar a otros componentes (que conforman el diseño del modelo de la vivienda) para llevar a cabo la simulación.

Tabla 4.1. Variables ambientales del sitio de estudio.

Mes del año	Vel. viento (m/s)	T. ambiente (°C)	HR (%)	Rad.solar (W/m ²)
Enero	2.0	18.5	50	186.5
Febrero	2.0	20.7	38	240.5
Marzo	2.1	21.9	46	243.8
Abril	2.2	25.2	35	284.4
Mayo	1.8	25.7	48	269.6
Junio	1.7	22.1	74	268.5
Julio	1.8	22.0	74	287.5
Agosto	1.7	21.8	80	268.0
Septiembre	1.5	21.3	85	239.0
Octubre	1.7	21.4	73	247.5
Noviembre	1.8	19.9	69	214.7
Diciembre	2.0	20.7	55	217.1
Prom. anual	1.9	21.8	61	247.2

En la Figura 4.2 se muestran las variables ambientales de manera gráfica, donde se puede observar los meses representativos para cada una de estas variables.

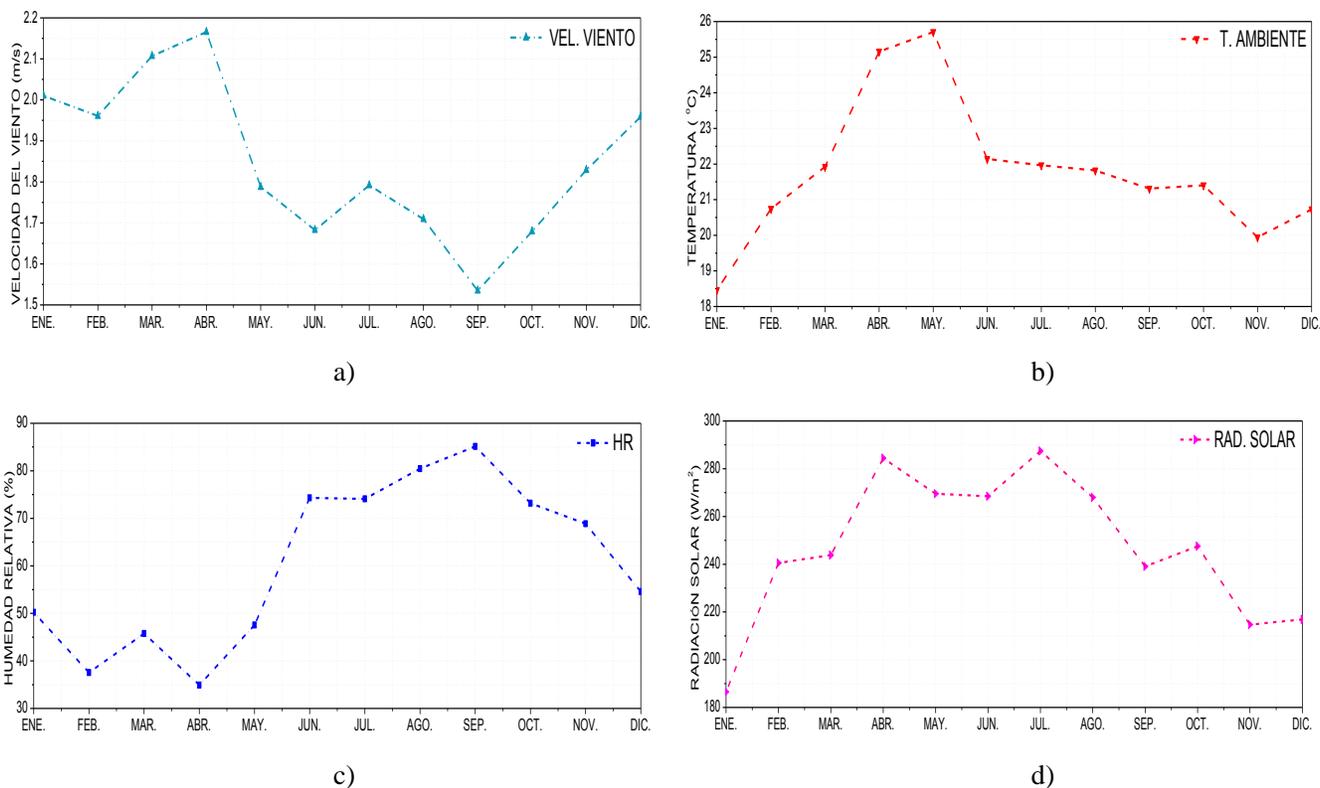


Figura 4.2. Variables ambientales promedio mensuales del sitio de estudio. a) velocidad del viento (m/s), b) temperatura ambiente (°C), c) HR (%), d) radiación solar (W/m²).

4.3 Variables ambientales máximas y mínimas promedias

En la Tabla 4.2 se muestran las variables ambientales correspondientes a valores máximos y mínimos promedios mensuales, así como de manera anual.

Con los valores medios máximos y mínimos de cada una de estas variables, se permite conocer la variación de las condiciones climáticas en todo el año (relacionado en la mayoría de ellos, con el ciclo solar anual) del sitio y por consiguiente, sus efectos sobre la masa térmica en la vivienda; por otro lado, estos a la vez permite definir las condiciones de confort térmico en el sitio considerando la oscilación de la temperatura en cada estación del año.

Tabla 4.2. Variables ambientales máximas y mínimas promedio del sitio de estudio.

Concepto	Vel. Viento (m/s)		Temp. Ambiente (°C)		Humedad relativa (%)		Rad. Solar (W/m ²)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Mes del año								
Enero	1.4	2.5	14.9	22.7	37	67	18.9	543
Febrero	1.4	2.5	16.4	25.2	28	49	25.3	651
Marzo	1.4	2.7	17.8	26.5	32	68	23.4	652
Abril	1.5	2.7	20.9	29.7	24	54	26.4	715
Mayo	1.1	2.4	21.8	29.3	35	67	29.4	714
Junio	1.0	2.4	18.8	25.6	54	96	32.6	683
Julio	1.1	2.4	18.8	25.2	56	95	31.0	717
Agosto	1.0	2.3	19.0	24.7	61	97	30.3	669
Septiembre	0.8	2.2	18.8	24.1	66	98	27.5	637
Octubre	1.1	2.2	18.4	24.5	55	94	22.6	642
Noviembre	1.2	2.3	16.5	23.7	52	89	16.4	583
Diciembre	1.4	2.4	16.8	24.8	42	70	14.9	583
Prom. anual	1.2	2.4	18.2	25.5	45.2	78.6	24.9	649.1

4.4 Descripción de la vivienda

De acuerdo al Código de Edificación de Vivienda por la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) en México, la vivienda de estudio corresponde a una de tipo residencial-plus, caracterizada por poseer más de 300 m² de terreno, así como una superficie construida de más de 225 m², y además superando el número mínimo de espacios por esta vivienda (por mencionar algunas características que definen a este tipo de vivienda) (CONAVI, 2010).

La vivienda tiene una orientación Este-Oeste, con acceso principal hacia el Oeste (debido a las condiciones del terreno). Esta está construida en dos plantas, la planta alta (PA) y planta baja (PB). La PB tiene una superficie construida de 185 m², mientras que en la PA se tienen 211 m². En la Figura 4.3 se muestra el isométrico del plano correspondiente a la PB con las dimensiones; asimismo, se muestran los 11 espacios que conforman dicha planta.

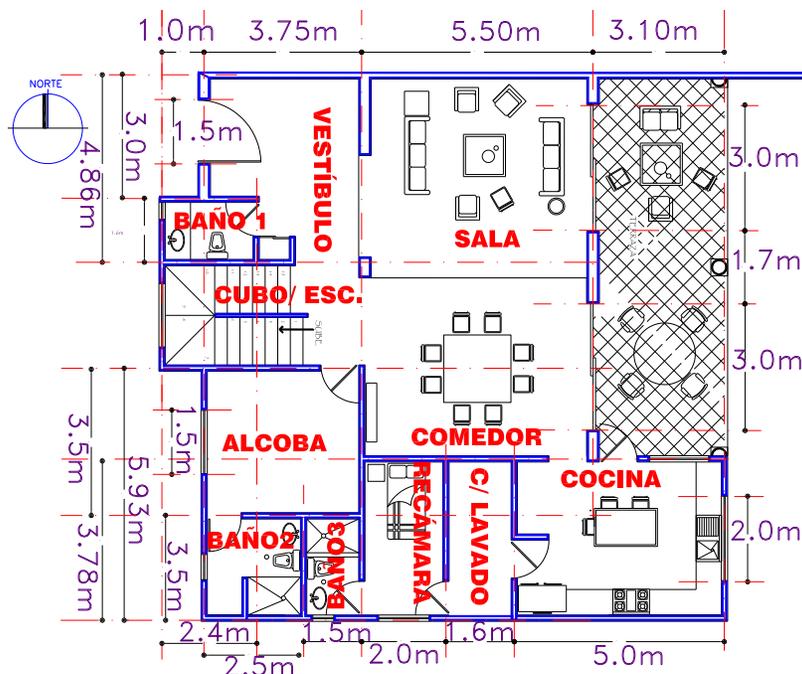


Figura 4.3. Dimensiones y espacios característicos de la PB.

En cuanto a la PA, en la Figura 4.4 se muestra de igual forma el isométrico con las dimensiones características, así como los 9 espacios que integran la planta. Como se puede observar, algunos de los espacios presentan muros en común (en ambas plantas), así como el piso de la PA, siendo éste a la vez el techo para la PB.

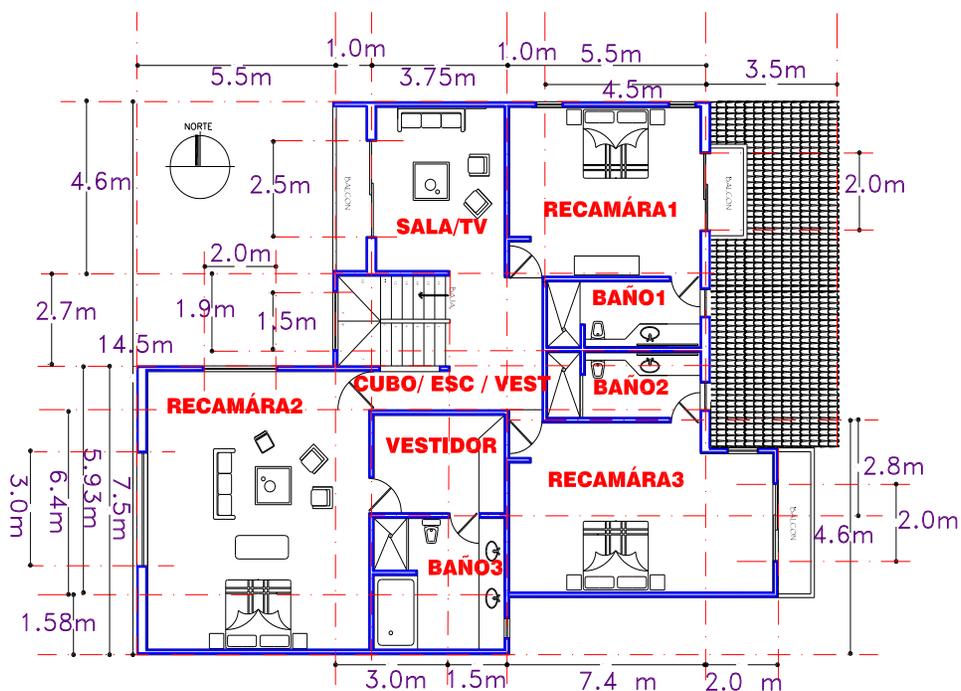


Figura 4.4. Dimensiones y espacios característicos de la PA.

Por otro lado, la relación pared-vidriado en cada una de las orientaciones (considerando las dos plantas) es de 4.66% hacia el Norte, 2.20% hacia el Sur, 39.40% hacia el Este y un 25.32% hacia el Oeste.

Para una mejor visualización, en la Figura 4.5 se muestra un modelo de la vivienda en 3D, donde se definen las divisiones para cada espacio de cada planta, así como las ventanas, puertas internas y externas.

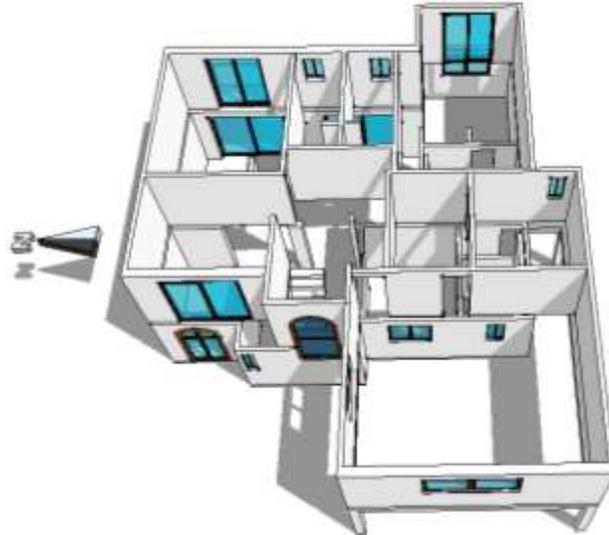


Figura 4.5. Modelo de la vivienda en 3D.

De igual manera, en la Figura 4.6 se muestran los espacios interiores de la vivienda, así como las vistas de las fachadas en relación a las cuatro orientaciones.

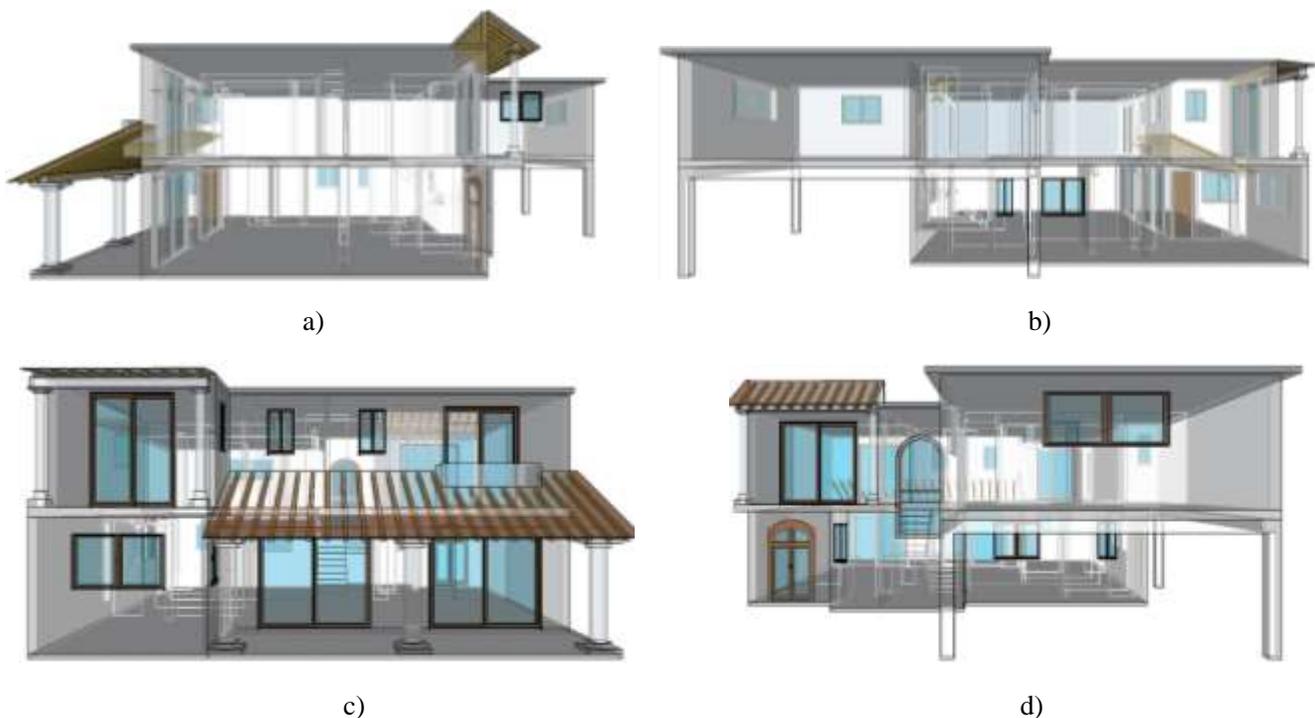


Figura 4.6. Vistas de las fachadas de la vivienda. a) orientación Norte, b) orientación Sur, c) orientación Este y d) orientación Oeste.

4.5 Dimensión y orientación de los sistemas pasivos de sombreado

En la Figura 4.7 se presentan los sistemas pasivos de sombreado integrados en la fachada de la arquitectura de la vivienda. Estos elementos de sombreado tienen la función de bloquear la radiación solar que pueda atravesar las superficies translucidas, y además permiten conseguir la suficiente luz diurna sin que se propicie el calentamiento al interior de la vivienda; obteniéndose como beneficio no sólo en mantener el confort térmico, sino también en minimizar el consumo de energía eléctrica por cargas térmicas (de enfriamiento) en los días de verano.

Las características como dimensiones, inclinaciones y orientaciones de los elementos de sombreado se mencionan enseguida, así como los espacios en que están integrados. El elemento de sombreado de la PB (SPBE01) presenta un ángulo cenital de 45° y un ángulo azimutal de 270° , con una proyección de 3.50 m con respecto a la altura máxima del receptor (superficie vidriada), éste está integrado a uno de los espacios con mayor área superficial de vidriado correspondiente a la Sala-Comedor. El primer elemento de sombreado de la PA (SPAE02), cuenta con un ángulo cenital de 7° y un ángulo azimutal de 270° con una proyección de 1.40 m, éste se encuentra fijo en una recamara; y el segundo elemento de sombreado de la PA (SPA03), presenta un ángulo cenital de 35° y un ángulo azimutal de 90° con una proyección de 1.23 m integrado al espacio de la Sala de la misma planta.



Figura 4.7. Sistemas pasivos de sombreado integrados en la fachada de la vivienda. a) Fachada principal orientada al Oeste, b) Fachada posterior orientada al Este.

4.6 Materiales integrados en la envolvente de la vivienda

4.6.1 Configuración del vidriado

Con respecto a las superficies translucidas implementadas en la vivienda; las ventanas contienen un solo tipo de vidriado, las cuales están conformadas por una hoja de vidriado simple de 4 mm de espesor y con marco de aluminio (conformando el 11% de la superficie del vidriado), presentando dimensiones característica para cada espacio según sea el caso y, con altura para todas ellas de 1.20 m (excepto para el cubo de escaleras el cual tiene un ventanal de 1.50 m de ancho por 3.10 m de alto). En la Tabla 4.3 se muestran las propiedades termofísicas del vidriado.

Tabla 4.3. Propiedades termofísicas del tipo de vidriado integrado en la vivienda.

Tipo de vidriado	Conductividad térmica (W/mK)	Calor específico (Cp) (kJ/kgK)	Densidad (ρ) (kg/m ³)	U-v (W/m ² K)	g-v (W/m ² K)	Espesor (mm)	Marco (%)
Simple	0.81	0.833	2700	5.8	0.855	4	11

Fuente: ASHRAE Handbook, librería de TRNSYS.

4.6.2 Configuración del piso PB y PA

La configuración de los materiales opacos referidos al piso de la PB, está integrada normalmente como se construyen en la mayoría de este tipo de viviendas en el país. Las capas de materiales que conforman el piso, consideradas desde el interior al exterior son: el mármol con un espesor de 1 cm, un entortado de cemento de 3 cm y por último el firme de 10 cm. En relación al piso de la PA, éste está conformado por duelas de madera de 2 cm, la loza monolítica (concreto armado) de 10 cm, seguido de un aplanado de mortero de 1 cm y, por último un aplanado de yeso de 1 cm.

4.6.3 Configuración de muros

Para el caso de los muros, la vivienda cuenta con dos tipos de muros, uno interior y otro exterior. El muro interior está conformado por el siguiente orden de capas de materiales: un aplanado de yeso de 1 cm, seguido de un aplanado de mortero de 1 cm, el tabicón el cual está colocado sobre el canto con un espesor de 11.5 cm, nuevamente un aplanado de mortero de 1 cm y un aplanado de yeso de 1 cm. En cuanto al muro exterior, éste está definido (desde el interior al exterior) de la siguiente manera: un aplanado de yeso de 1 cm, un aplanado de mortero de 1 cm, el tabicón colocado sobre el canto con un espesor de 11.5 cm y por último una capa de mortero más espesa (de 2 cm). Teniendo una altura de 3 m en todos los muros.

4.6.4 Configuración del techo

En relación con la composición de la estructura del techo, éste está integrado con materiales típicos de construcción en el país, es decir, de loza monolítica (concreto armado). Definidos desde el interior hasta el exterior, el techo está conformado por una capa de aplanado de yeso de 1 cm, un aplanado de mortero de 1 cm, la loza monolítica con espesor de 10 cm y por último una capa de impermeabilizante de 1 cm.

En la Tabla 4.4 se muestran las características termofísicas de los materiales con los que está construida la envolvente de la vivienda, cuyas características están en apego a la norma ASHRAE, así mismo, se muestran las configuraciones tanto para los muros, pisos y techo.

Tabla 4.4. Configuración de muros y sus propiedades termofísicas.

Muro										
Etiqueta	Composición	Conductividad térmica (λ) (W/mK)	Calor especifico (Cp) (kJ/kgK)	Densidad (ρ) (kg/m ³)	Em.	Abs.	Reflec.	Espesor por material (m)	Espesor total (m)	v-U del muro (W/m ² K)
MEXTINT	Yeso	0.35	0.837	1200	0.90	0.1	0.9	0.01		
	Mortero	1.4	1	2000	-	-	-	0.01		
	Tabicón	0.431	1	900	-	-	-	0.115		
	Mortero	1.4	1	2000	0.87	0.75	0.25	0.02	0.155	2.053
MINTINT	Yeso	0.35	0.837	1200	0.90	0.1	0.9	0.01		
	Mortero	1.4	1	2000	-	-	-	0.01		
	Tabicón	0.431	1	900	-	-	-	0.115		
	Mortero	1.4	1	2000	-	-	-	0.01		
	Yeso	0.35	0.837	1200	0.90	0.1	0.9	0.01	0.155	1.966
Piso										
Etiqueta	Composición	Conductividad térmica (λ) (W/mK)	Calor especifico (Cp) (kJ/kgK)	Densidad (ρ) (kg/m ³)	Em.	Abs.	Reflec.	Espesor por material (m)	Espesor total (m)	v-U del muro (W/m ² K)
PISOPB	Mármol	3.5	0.879	2800	0.95	0.44	0.56	0.01		
	Entortado	1.4	1	2000	-	-	-	0.03		
	Firme	0.47	0.83	1400	-	-	-	0.10	0.14	2.455
PISOPA	Yeso	0.35	0.837	1200	0.90	0.1	0.9	0.01	0.14	2.460
	Mortero	1.4	1	2000	-	-	-	0.01		
	Loza monolítica	2.1	1.004	2400	-	-	-	0.10		
	Madera	0.131	2.386	600	0.95	0.7	0.3	0.02		
Techo										
Etiqueta	Composición	Conductividad térmica (λ) (W/mK)	Calor especifico (Cp) (kJ/kgK)	Densidad (ρ) (kg/m ³)	Em.	Abs.	Reflec.	Espesor por material (m)	Espesor total (m)	v-U del muro (W/m ² K)
TECHOLOZAMONO	Yeso	0.35	0.837	1200	0.90	0.1	0.9	0.01		
	Mortero	1.4	1	2000	-	-	-	0.01		
	Loza monolítica	2.1	1.004	2400	-	-	-	0.10		
	Impermeabilizante	0.169	1.7	1200	0.82	0.75	0.25	0.01	0.14	3.202

Fuente: ASHRAE Handbook, librería de TRNSYS.

4.7 Zonas térmicas

Para el caso de estudio, y con la finalidad de identificar y diferenciar el comportamiento de las temperaturas en cada espacio (definido por un nodo de aire), así como para analizar los efectos de los elementos de sombreado sobre las cargas térmicas; la vivienda se distribuyó en cuatro zonas térmicas tal como se muestra en la Figura 4.8.

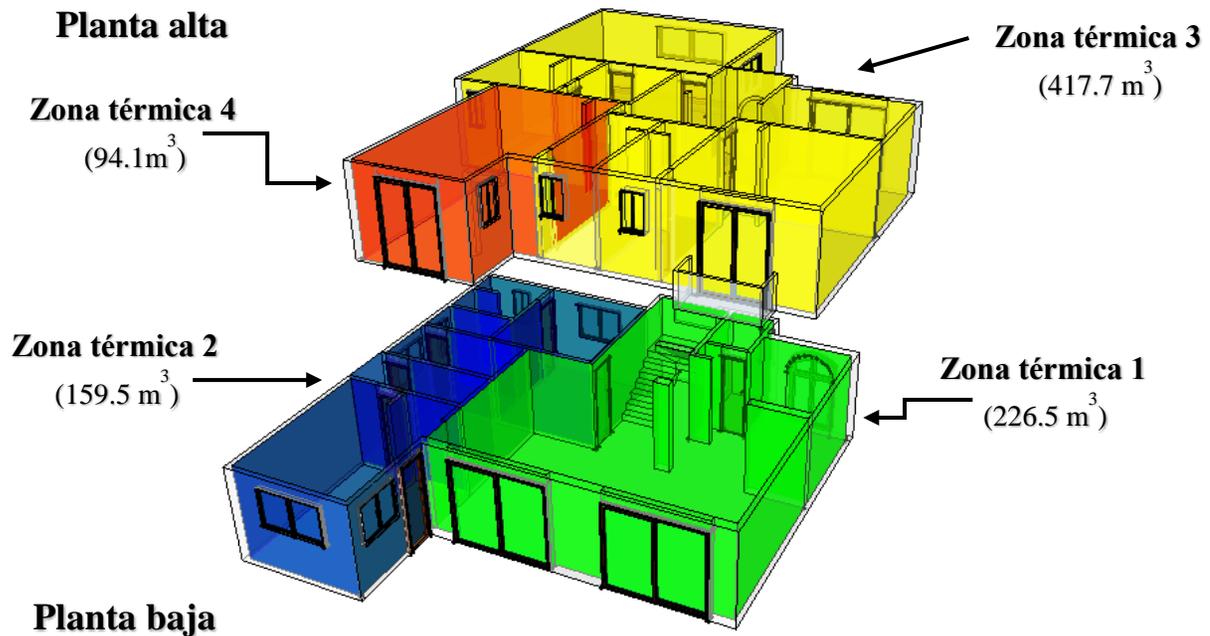


Figura 4.8. Zonas térmicas.

4.8 Temperatura de zona de confort

La definición de la temperatura de confort es un aspecto importante y a la vez una parte esencial en el diseño de una edificación, ya que con ella las personas pueden realizar sus actividades cotidianas de manera cómoda, eficiente sin presentar molestias térmicas en su entorno y de esta manera permitir mejorar su calidad de vida.

Una de la manera en que el individuo exprese satisfacción con las características ambientales en un lugar o sitio en específico, es considerar precisamente las variables que están involucradas en el ambiente que lo rodea. En este sentido, uno de los métodos para determinar la zona de confort es mediante el modelo adaptativo. Este modelo adaptativo encuentra su fundamento en tres aspectos interrelacionados: el fisiológico (a climatización, ropa, ingesta de alimentos), de comportamiento (manipulación de objetos inanimados, tales como el abrir una ventana, uso de parasoles, ventiladores, puertas) y psicológico (expectativa y habituación de confort en relación al clima interior y exterior) (Arballo et al, 2016), permitiendo de esta manera, la adaptabilidad del individuo en un sitio o zona en específico. En cuanto a este último aspecto, el modelo adaptativo se basa en resultados de estudios de confort térmico realizados en campo en edificios con ventilación natural, los cuales interactúan con una amplia gama de condiciones climáticas. Por lo tanto, la temperatura óptima o de neutralidad (asumida generalmente como temperatura de confort) se obtiene a través de un análisis de regresión lineal que correlaciona la temperatura exterior

del sitio y de las respuestas de encuestas de personas que “optan como intervalos de temperatura óptima” y de esta manera se determina la temperatura de confort (Humphreys, 1978).

Hasta el momento algunas normas han empleado este modelo para el diseño de confort térmico, tal como la ASHRAE Standart 55-2013 y la UNE-EN 15251:2008, las cuales consideran la temperatura media exterior como variable para la definición de los límites de temperatura de la zona de confort en el interior de un edificio (Sánchez, 2015).

Por lo tanto, para la determinación de la zona de confort en este caso de estudio, se definió mediante este enfoque adaptativo, el cual, de acuerdo al modelo de Humphreys y Nicol en el 2000 y Nicol en el 2002 (a través de estudios de campo), la expresión que permite definir la temperatura óptima o neutra en edificios con ventilación natural se expresa como (Nicol y Humphreys, 2002):

$$T_{com} = 11.9 + 0.534 * T_{a,out} \tag{4.1}$$

De esta manera, se determinó la temperatura de confort (T_{com}) en relación a la temperatura ambiente media ($T_{a,out}$) en el sitio de estudio. Donde esta $T_{a,out}$ (promedio mensual) fue obtenida a partir de la base de datos registrada por la EMA a lo largo de todo el año. Así mismo, en el método adaptativo se permite determinar los valores límites de temperatura de confort al considerar el porcentaje medio de insatisfechos (10%); porcentaje que corresponde a personas que podrían estar insatisfechas al interactuar con la temperatura óptima de acuerdo al criterio de confort basado en el índice PMV-PPD (Fanger, 1970).

En la Tabla 4.5 se presenta la zona de confort térmico, donde son obtenidas las temperaturas óptimas promedias mensuales así como los límites de estas mismas de manera mensual y anual.

Tabla 4.5. Temperaturas óptimas y valores límites para la zona de confort en el sitio de estudio.

Mes del año	Temp. mínima	Temp. Óptima	Temp. máxima
Enero	19.6	21.8	23.9
Febrero	20.7	23.0	25.3
Marzo	21.2	23.6	26.0
Abril	22.8	25.3	27.9
Mayo	23.1	25.6	28.2
Junio	21.4	23.7	26.1
Julio	21.3	23.6	26.0
Agosto	21.2	23.6	25.9
Septiembre	21.0	23.3	25.6
Octubre	21.0	23.3	25.7
Noviembre	20.3	22.5	24.8
Diciembre	20.7	23.0	25.3
Prom. anual	21.2	23.5	25.9

De manera que, los límites de temperatura de confort determinados (de 21 a 26°C promedios anuales) fueron considerados como datos para establecer los intervalos en el *setpoint* (como mínimo y máximo); ya que estos intervalos de temperatura se mantienen a lo largo del tiempo de análisis, y en consecuencia el control de energía requerida para mantener la temperatura correspondiente a la zona confort; obteniéndose por lo tanto, una estimación de las cargas térmicas tanto por enfriamiento y calentamiento de manera mensual y anual.

4.9 Consideraciones

A continuación se mencionan las consideraciones para el caso de estudio con base en lo descrito anteriormente.

- Definiciones de muros sin despreciar la masa térmica.
- 4 zonas térmicas para determinar el comportamiento térmico-energético en la vivienda.
- División de muros interiores en cada espacio según sea la zona térmica correspondiente.
- Coeficiente de transferencia de calor convectivo: al interior de $3.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ y al exterior de $8.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ (considerando la velocidad media del aire de 1.9 m/s de acuerdo al sitio de estudio).
- Estudio de un año de modelación para la predicción del comportamiento térmico-energético de la vivienda.
- Definición de la zona de temperatura de confort mediante el modelo adaptativo.
- Ganancias internas por iluminación artificial (por dos tipos: incandescente y LED), y
- Sin infiltraciones ni ocupantes.

En cuanto a estos dos últimos puntos; se consideran sólo las ganancias internas por iluminación, por una parte, debido a que es también uno de los aspectos importantes en el diseño de cualquier espacio de un edificio o vivienda, pues éste permite comprender mejor el entorno, y por lo tanto un individuo puede sentirse más seguro para realizar sus actividades cotidianas, ya que la mayor información que percibimos es a través de la vista. Por otro lado, concientizar mediante este tema de investigación, en la sustitución de las lámparas incandescentes por lámparas de tipo LED en edificaciones o viviendas, pues al realizar dicha sustitución, no sólo se tiene beneficios reflejados en los costos de facturación por consumo de energía eléctrica, sino también, en la disminución de emisiones de CO_2 al ambiente por el bajo consumo energético de estas lámparas.

Con respecto a las infiltraciones, no son consideradas, pues éstas se verían reflejadas en un aumento de temperatura al interior de la vivienda principalmente en verano, así como pérdidas de calor en invierno los cuales pueden interferir en la cuantificación de la temperatura relacionada a los sistemas pasivos de sombreado; es decir, no permitiría determinar cuál sería la efectividad de los elementos de sombreado para cuantificar la disminución o el aumento de la temperatura al interior de la vivienda al considerarlos o no en los modelos de la vivienda a estudiar; así como también, pudiera interferir en la cuantificación del aumento o disminución de la temperatura al considerar las ganancias internas en los modelos. Por otro lado, la presencia de personas al interior podría interferir también (por actividad metabólica o física) con dichas mediciones.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se reportan los resultados del trabajo realizado. Presentando por una parte, la estimación del número de fuentes de iluminación (tanto incandescentes como de bajo consumo) a través del diseño de iluminación para interiores (método de iluminancia) en cada espacio de la vivienda, y con su validación bajo dos normas mexicas. Así como la cantidad de calor emitido por cada tipo de fuente; cuyos datos fueron requeridos para alimentar la interfaz de *TRNBuil*. Esto y en conjunto con las consideraciones del Capítulo 4; se llevaron a cabo las simulaciones para cuantificar la demanda energética y por ende el ahorro económico en la vivienda al aplicar las estrategias de ahorro y eficiencia energética en edificaciones (sistemas pasivos de sombreado y fuentes de iluminación de alto rendimiento lumínico y bajo consumo energético).

Los resultados se obtuvieron a partir de evaluaciones y análisis de diferentes configuraciones de la vivienda; las cuales consistieron desde una configuración base hasta la consideración de dichas estrategias. Permitiendo de esta manera que se diferenciara los fenómenos por la actividad de la masa térmica de la envolvente a través del año de modelación del sitio de estudio, los efectos de los sistemas pasivos de sombreado así como por las fuentes de iluminación, para predecir de esta manera el comportamiento térmico-energético de cada configuración. Presentándose por lo tanto, en cada configuración una estimación de cargas térmicas tanto por enfriamiento como por calentamiento de manera anual así como una estimación de las emisiones de $tCO_2/año$ que se dejarían de emitir al ambiente. Finalmente, las estimación de las cargas térmicas fueron sometidas bajo técnicas de evaluación económica, donde se analizaron las ventajas (beneficios) y desventajas (costos) atribuidas a las estrategias de ahorro y eficiencia energética en términos monetarios. Técnicas económicas, con las que se permitió comparar cada configuración de manera homogénea y obtener criterios más objetivos sobre los beneficios (ahorros) para cada configuración.

5 Resultados

A continuación, se presentan los resultados del estudio del comportamiento térmico al interior de la vivienda con respecto a cada espacio así como para cada zona térmica definida, demostrando para estas últimas una estimación de cargas térmicas de manera anual.

Los resultados del comportamiento térmico-energético, se basan, además de la masa térmica integrada en la envolvente, en la consideración de los efectos de sombra provocados por el mismo diseño de la vivienda (voladizos y parte soles o llamados comúnmente como muros verticales), así como por los mismos sistemas pasivos de sombreado. Asimismo, otro factor que influye en la variación de la temperatura al interior, es a la ganancia de calor sensible al interior de la vivienda debido a la iluminación por dos tipos de fuentes de iluminación artificial: lámparas incandescentes y de tipo LED.

Por lo que, al ir desarrollando e implementando las estrategias de ahorro y eficiencia energética (consideración de los sistemas pasivos de sombreado y sustitución de fuentes de iluminación) definidos mediante configuraciones de la vivienda bajo una temperatura de confort, se permite determinar la demanda energética anual por cargas térmicas y por otro lado, la demanda de energía eléctrica por las iluminación.

Finalmente, las cargas térmicas y la demanda de energía eléctrica por iluminación, son sometidas a un análisis costo beneficio (ACB), en el que se permite cuantificar la demanda energética pero en términos monetarios. El ACB se basa en identificar y valorar monetariamente las contribuciones positivas (beneficios) y negativas (costos) atribuidas a la implementación de las estrategias de ahorro y eficiencia energética en la vivienda; permitiendo de esta manera comparar los costos anuales por la demanda energética en cada configuración de la vivienda, y también de esta manera, permitir determinar el tiempo de retorno de inversión tanto de los sistemas pasivos de sombreado así como de las fuentes de iluminación más eficientes (LED) en las configuraciones correspondientes.

5.1 Definición de ganancias internas por fuentes de iluminación artificial

La consideración de ganancias internas por calor sensible debido a los dos tipos de fuente de iluminación artificial, fueron definidas a través de la interfaz de *TRNBuil*. En la interfaz, se presentan ganancias internas predefinidas; sin embargo, la información puede ser también definida como dato; el cual, para este trabajo de investigación se consideró de ésta manera. Los datos requeridos (por *TRNBuil*) fueron obtenidos como resultado de un análisis minucioso y de manera externa a TRNSYS, y consistieron en la determinación del número de dispositivos de iluminación (tanto incandescentes como de tipo LED) demandados para cada espacio de la vivienda (medidos en lm/m^2), los cuales fueron determinados mediante un método de iluminancia. Por otro lado, también se requirió definir la cantidad de flujo de calor (convectiva y radiativa en kJ/h) emitido por cada fuente de iluminación. A continuación se detalla cada uno de ellos.

5.1.1 Definición del número de fuentes de iluminación artificial

De manera general, existen dos métodos para determinar el diseño de iluminación en interiores, que a través de ello se permita estimar el número de fuentes de iluminación o lámparas para cada espacio de la vivienda. El primero es conocido como método del punto por punto, el cual permite conocer los valores de iluminancia (flujo luminoso sobre una superficie (lm/m^2)) para una superficie en específico; es decir, sólo se limita a concentrar los niveles de iluminancia en un punto en concreto, de aquí el nombre del

método. El segundo, es el método de lúmenes o iluminancia, el cual se emplea para determinar una iluminación general y de manera uniforme para un determinado espacio. Una variante de este método es el método de cavidad zonal, en que considera zonas o relaciones de cavidad de piso (altura desde el piso a plano de trabajo), cavidad del cuarto (altura del plano de trabajo a la altura de la suspensión de la luminaria) y cavidad de techo (altura de la suspensión de la luminaria y el techo); en ambos métodos se sigue el mismo procedimiento para llevar a cabo el diseño de iluminación, a excepción de este último que se hace una corrección del coeficiente de utilización (C_u) (relación entre el flujo luminoso que llega al plano de trabajo y el flujo total que emite la lámpara instalada), debido a que en algunos casos, se tiene un coeficiente de reflexión en la cavidad del piso diferente del 20%.

Para definir el diseño de un sistema de iluminación y con ello el número de fuentes de iluminación en cada espacio para este caso de estudio, se utilizó el método de lúmenes, ya que permite calcular el nivel medio de iluminancia con un error del $\pm 5\%$ (Jiménez y Aguilar, 1995), acercándose de esta manera lo más próximo a un sistema de iluminación real requerida para llevar a cabo las actividades de acuerdo a cada área o espacio de la vivienda.

Como ejemplo del diseño de un sistema de iluminación interior, en el Anexo A se desarrolla el método de iluminancia, en el que es llevada a cabo en apego a la norma mexicana requerida para establecer los niveles de iluminación en espacios, así como la densidad de potencia eléctrica (DPEA) máxima (definida para cada espacio) expresada en W/m^2 .

De esta manera se estimó el número de lámparas (tanto de tipo incandescente como de tipo LED) requeridos en cada espacio y por ende el número total en la vivienda. La Tabla 5.1 se muestra el resultado de dicha estimación aplicando el método de iluminancia.

Tabla 5.1. Número de lámparas requeridas en la vivienda.

Zona	Tipo de lámpara	
	Incandescente	LED
PB	38.1	33.9
PA	52.9	46.0
Total	91.0	79.9

De lo anterior, y con el perfil de uso de iluminación para cada espacio mostrada en la Tabla 5.2, también se estimó el consumo de energía eléctrica de manera anual tal como se muestra en las Tabla 5.3.

Tabla 5.2. Perfil de uso en el sistema de iluminación.

Espacios de la vivienda	Horario	Estado
Recámaras	00:00 a.m.-05:00 a.m.	Off
	05:00 a.m.-08:00 a.m.	On
	08:00 a.m.-06:00 p.m.	Off
	06:00 p.m.-10:00 p.m.	On
	10:00 p.m.-00:00 a.m.	Off
Baños	00:00 a.m.-05:00 a.m.	Off
	05:00 a.m.-06:00 a.m.	On
	06:00 a.m.-06:00 p.m.	Off
	06:00 a.m.-07:00 p.m.	On
	07:00 p.m.-00:00 a.m.	Off
Cubo de escalera	00:00 a.m.-05:00 a.m.	Off
	05:00 a.m.-10:00 a.m.	On
	10:00 a.m.-04:00 p.m.	Off
	04:00 p.m.-10:00 p.m.	On
	10:00 p.m.-00:00 a.m.	Off
Pasillos	00:00 a.m.-05:00 a.m.	Off
	05:00 a.m.-10:00 a.m.	On
	10:00 a.m.-04:00 p.m.	Off
	04:00 p.m.-10:00 p.m.	On
	10:00 p.m.-00:00 a.m.	Off

Tabla 5.3. Consumo de energía eléctrica por iluminación.

Zona	Consumo de energía eléctrica (kWh/año)	
	Incandescente	LED
PB	8, 675.39	776.16
PA	11, 172.90	894.43
Total	19, 848.29	1, 670.59

5.1.2 Ganancias internas por tipo de fuente de iluminación artificial

Para determinar los efectos de las ganancias internas por cada tipo de fuente iluminación artificial de acuerdo a la configuración correspondiente; en TRNSYS se requiere como dato de entrada la cantidad de energía tanto radiativa como convectiva emitida por cada tipo de fuente.

Para el caso de una lámpara incandescente, al ser encendida, el flujo de electrones que pasa por el filamento, provoca el aumento de la temperatura (por efecto Joule) muy cercana a los 3000 K. A estas temperaturas los electrones que fluyen a través del filamento comienzan a emitir fotones de luz blanca visible, el cual es el fenómeno conocido como incandescencia. De donde resulta que, estas lámparas son ineficientes, ya que la mayor parte de la energía eléctrica consumida, el 85-92% es emitida en forma de calor (debido a que la mayor parte de la potencia emisiva de este tipo de lámpara se encuentra en el infrarrojo), mientras que el resto se emite de manera lumínica (resto comprendido en el intervalo de la región del visible) (Montoya et al., 2017). Del total del calor emitido, éste está conformado la mayor parte de manera radiativa con un 73%, y emitiéndose en menor cantidad (19%) por calor convectivo (Byung et al., 2014).

En cuanto a los LED, algunos de estos están diseñados para emitir luz a longitudes de onda específicos. Sin embargo, los LED diseñados para emitir luz visible se basan en el efecto fotoeléctrico; en el que a través del material semiconductor con que están contruidos, se permite obtener la energía luminosa como respuesta al aplicarles un flujo de corriente eléctrica. Del proceso en transformar el total de la energía eléctrica consumida en energía luminosa, se tiene como resultado un mejor rendimiento lumínico (15-25%); sin embargo, el 75-85% se emite en forma de calor (Byung et al., 2014).

De este calor emitido, sólo el 5% se expresa de forma radiativa, ya que la mayor parte de la luz visible emitida se concentra en un rango de longitudes de onda muy estrecha (entre 500-600 nm (Morgan et al., 2018)); por otro lado, el proceso que lleva en transformar la energía eléctrica en luz a través del semiconductor, se genera un ligero calentamiento, calor que es transferido desde el sustrato (chip) del LED al disipador de calor por conducción, y luego por convección (95%) hacia al ambiente (Byung et al., 2014).

5.1.3 Configuraciones a estudiar

Antes de presentar los resultados, a continuación se describen las configuraciones de la vivienda al implementar las estrategias de ahorro y eficiencia energética, con la finalidad de diferenciar el comportamiento de las temperaturas al interior de la vivienda; demostrando asimismo la variación de las cargas térmicas en los diferentes meses del año mediante la comparación de cada configuración (uno respecto al anterior) tal como se muestra en el siguiente listado.

- Configuración base **CB_SPS_SI**: Consiste en la configuración de la vivienda sin tomar en cuenta los sistemas pasivos de sombreado y, sin ganancia de calor sensibles (por iluminación artificial) al interior de la vivienda.
- Configuración **CSPS_ICONV**: La configuración no considera los elementos de sombreado, pero si las ganancias internas por el sistema de iluminación convencional (lámparas incandescentes).
- Configuración **CCPS_ICONV**: Esta configuración considera los elementos de sombreado así como las ganancias internas por el sistema de iluminación convencional.
- Configuración **CCPS_ILED**: La configuración toma en cuenta los sistemas pasivos de sombreado, así como las ganancias internas por el sistema de iluminación de tipo LED.

5.2 Comportamiento térmico al interior de cada zona térmica

Como resultados del trabajo realizado y correspondiente a las temperaturas al interior de la vivienda, en la Figura 5.1 se muestran de forma gráfica y general las temperaturas promedios mensual y anual de cada zona térmica con respecto a la configuración base de la vivienda (**CB_SPS_SI**).

La configuración **CB_SPS_SI**, permite describir la respuesta térmica de la envolvente debido a los materiales tanto opacos como translucidos implementados en la vivienda en el transcurso de todo el año; reiterando que en esta configuración, no se consideraron los efectos de sombreado ni ganancias de calor con la finalidad de no perturbar el comportamiento térmico al interior de la vivienda.

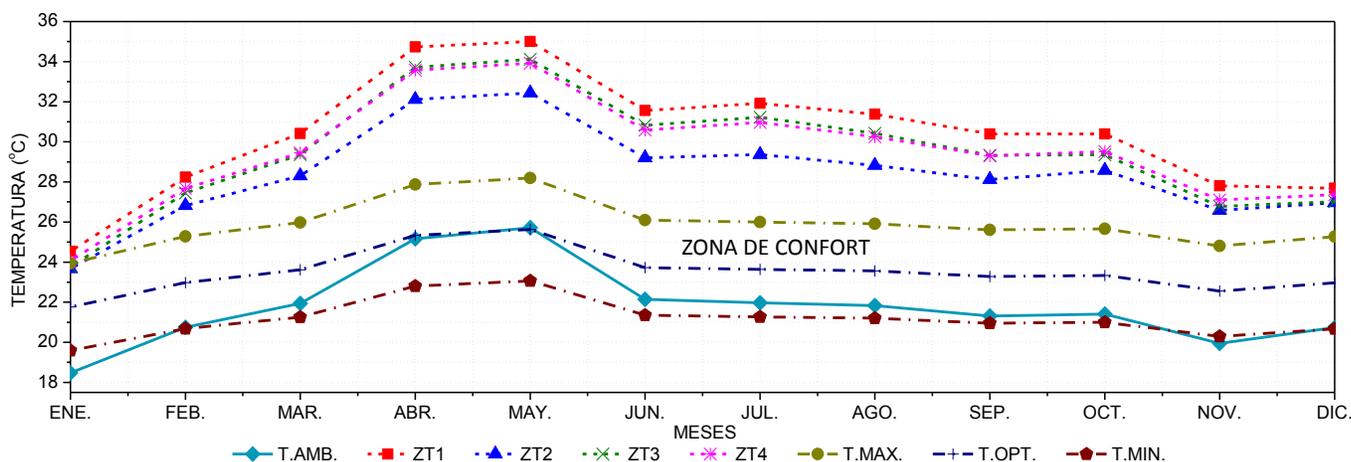


Figura 5.1. Temperaturas promedios mensuales para cada zona térmica en la configuración **CB_SPS_SI**.

Como se puede observar, los resultados demostraron que para el mes de Mayo se presentaron los días más calurosos del año, seguido del mes de Abril. También se puede observar que la zona térmica 1 (ZT1) presentó las mayores temperaturas promedio en relación a las otras zonas térmicas, esto debido a que esta zona presenta mayores superficies vidriadas (por la orientación de las fachadas de la vivienda Este-Oeste), ya que éstas están expuestas a la radiación solar desde las primeras horas del día (en la mayoría de los días del año). Además, otro factor aunado al aumento de temperatura, fue debido a las ganancias de calor atribuidas por la zona térmica 3 adyacente de la PA.

Por otro lado, se puede observar que para las zonas térmicas 2, 3 y 4 (ZT 2, 3 y 4), en los días de invierno (Enero y Diciembre) tienen un comportamiento similar, esto debido a la incidencia de los rayos del sol característicos de aquellos días (más inclinados hacia el sur por debido a la inclinación de la tierra) sobre las superficies (principalmente en muros). Siendo de manera contraria para los días de verano, ya que en

esta temporada la incidencia de los rayos del sol propicia la mayor ganancia de calor sobre los techos de las ZT3 y 4 (de la PA), ya que la posición aparente del sol para esos días se encuentra más hacia el cenit. En la Tabla 5.4 se muestran las temperaturas promedio mensuales obtenidas para cada zona térmica.

Tabla 5.4. Temperaturas promedio mensuales para cada zona térmica en la configuración **CB_SPS_SI**.

Meses	CB_SPS_SI				
	T. amb.*	ZT1*	ZT2*	ZT3*	ZT4*
Ene.	18.5	24.5	23.7	23.8	24.1
Feb.	20.8	28.2	26.8	27.4	27.7
Mar.	21.9	30.4	28.3	29.4	29.4
Abr.	25.2	34.7	32.1	33.7	33.6
May.	25.7	35.0	32.4	34.1	33.9
Jun.	22.1	31.6	29.2	30.8	30.6
Jul.	22.0	31.9	29.4	31.2	31.0
Ago.	21.8	31.4	28.8	30.4	30.3
Sep.	21.3	30.4	28.1	29.3	29.3
Oct.	21.4	30.4	28.6	29.4	29.5
Nov.	19.9	27.8	26.6	26.8	27.1
Dic.	20.7	27.7	27.0	27.0	27.4
P. anual	21.8	30.3	28.4	29.4	29.5

*Temperatura promedio en grados Celsius (°C).

Para el caso la configuración **CSPS_ICONV**, la emisión de energía radiativa y convectiva por parte de las fuentes de iluminación de tipo incandescente, la cual aunada a la respuesta de la masa térmica de la envolvente, generó un aumento de la temperatura al interior de la vivienda. Esto permitió que se tuvieran beneficios en los meses de invierno pero no para los meses de verano. Demostrando en este sentido en la Figura 5.2, la ZT1 se tuvo un impacto negativo al aumentar su temperatura promedio en 4.3% (1.6°C) en el mes de Mayo con respecto a la configuración anterior, alcanzando una temperatura promedio máxima de 36.6°C. Así mismo, se puede observar que las ZT2 y 4 presentaron un ligero aumento en la temperatura para los meses de invierno, pero un mayor incremento de temperatura en los meses de verano para la ZT4.

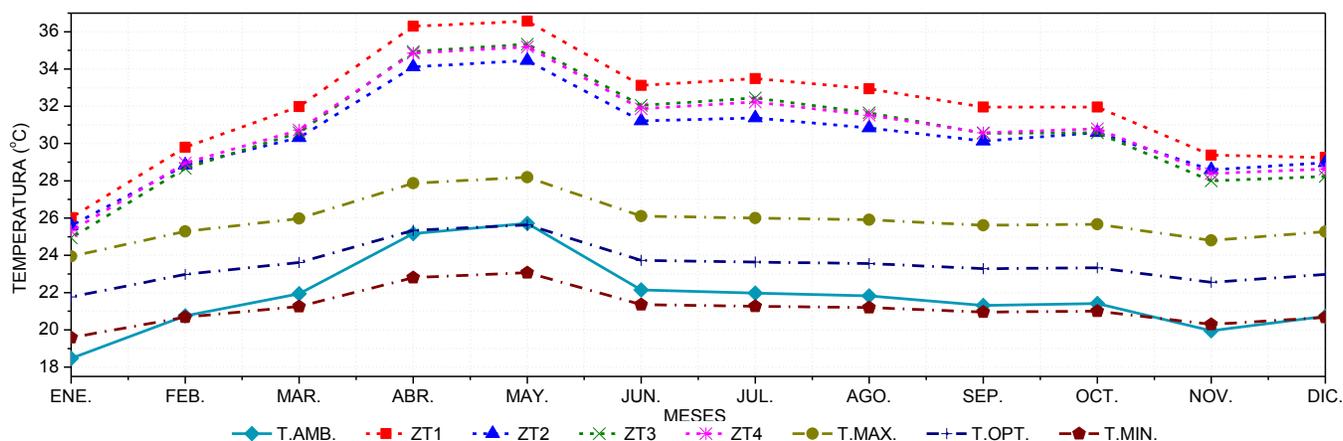


Figura 5.2. Temperaturas promedios mensuales para cada zona térmica en la configuración **CSPS_ICONV**.

En la Tabla 5.5 Se muestra la comparación de las temperaturas promedios mensuales para cada zona térmica al considerar las ganancias internas por el tipo de fuente de iluminación incandescente con respecto a la configuración **CB_SPS_SI**.

Tabla 5.5. Comparación de temperaturas para cada zona térmica al considerar las ganancias internas debidas a la iluminación de tipo incandescente.

Meses	T. amb.*	CB_SPS_SI				CSPS_ICONV				Diferencia			
		ZT1*	ZT2*	ZT3*	ZT4*	ZT1*	ZT2*	ZT3*	ZT4*	ZT1*	ZT2*	ZT3*	ZT4*
Ene.	18.5	24.5	23.7	23.8	24.1	26.0	25.6	24.9	25.3	1.5	1.9	1.2	1.2
Feb.	20.8	28.2	26.8	27.4	27.7	29.8	28.8	28.7	29.0	1.6	2.0	1.2	1.3
Mar.	21.9	30.4	28.3	29.4	29.4	32.0	30.3	30.6	30.7	1.6	2.0	1.2	1.3
Abr.	25.2	34.7	32.1	33.7	33.6	36.3	34.1	34.9	34.8	1.6	2.0	1.2	1.3
May.	25.7	35.0	32.4	34.1	33.9	36.6	34.5	35.3	35.2	1.6	2.0	1.2	1.3
Jun.	22.1	31.6	29.2	30.8	30.6	33.1	31.2	32.0	31.9	1.6	2.0	1.2	1.3
Jul.	22.0	31.9	29.4	31.2	31.0	33.5	31.4	32.4	32.2	1.6	2.0	1.2	1.3
Ago.	21.8	31.4	28.8	30.4	30.3	32.9	30.8	31.6	31.5	1.6	2.0	1.2	1.3
Sep.	21.3	30.4	28.1	29.3	29.3	32.0	30.1	30.5	30.6	1.6	2.0	1.2	1.3
Oct.	21.4	30.4	28.6	29.4	29.5	32.0	30.6	30.6	30.8	1.6	2.0	1.2	1.3
Nov.	19.9	27.8	26.6	26.8	27.1	29.4	28.6	28.0	28.4	1.6	2.0	1.2	1.3
Dic.	20.7	27.7	27.0	27.0	27.4	29.3	29.0	28.2	28.6	1.6	2.0	1.2	1.3
P. anual	21.8	30.3	28.4	29.4	29.5	31.9	30.4	30.7	30.8	1.6	2.0	1.2	1.3

*Temperatura promedio en grados Celsius (°C).

En cuanto la configuración **CCPS_ICONV**, al implementar los elementos de sombreado, estos permitieron bloquear la incidencia directa de la radiación solar en las superficies vidriadas durante ciertas horas del día para cada época del año. Por lo que se ven reflejado como beneficios al reducir las cargas térmicas de enfriamiento durante las meses de verano. Los efectos por la incorporación de los sistemas pasivos de sombreado en la fachada de la vivienda, se muestran en la Figura 5.3.

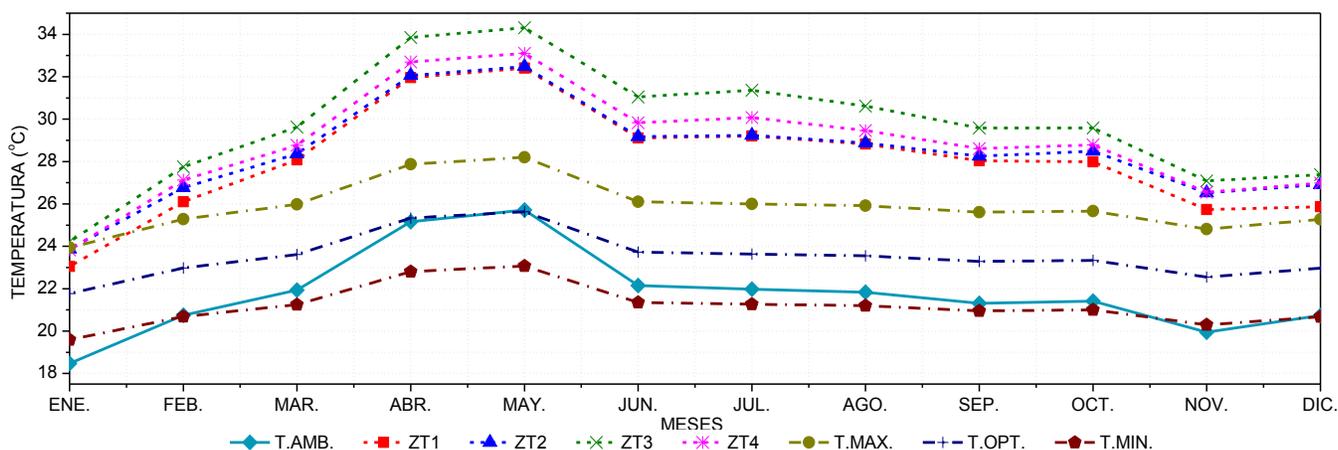


Figura 5.3. Temperaturas promedios mensuales para cada zona térmica en la configuración **CCPS_ICONV**.

Como se puede observar, la disminución de las temperaturas en el interior de la vivienda se vio reflejada principalmente en aquellas zonas térmicas donde se tienen integrados los elementos de sombreado. Para el caso de la ZT1 (zona donde se encuentra integrado el elemento de sombreado de mayor superficie (SPBE01)), permitió un descenso en la temperatura promedio del 11.4% (4.2°C), alcanzando una temperatura promedio máxima de 32.4°C en el mes de Mayo, días del mes donde es de gran importancia la protección solar (sombreado) en superficies vidriadas. Se presentó el mismo efecto y para el mismo mes, en la ZT4 (integrado por otro elemento de sombreado (SPAEO2), donde se tuvo una disminución de la temperatura del 6.0% (2.1°C), y presentándose un menor efecto para la ZT3 de 2.9% (1.0°C), ya que esta zona presenta un sistema pasivo de sombreado con menor proyección que protege al área vidriada. En cuanto a la ZT2, ésta disminuyó un 5.7% (2.0°C); esto debido a que el mismo diseño de la vivienda de la PA (ver Figura 4.5) produce un efecto de sombreado a una mayor parte de esta zona térmica. En la Tabla 5.6 se muestran la comparación de estas temperaturas promedios mensuales, así

como para cada zona térmica respecto a la configuración **CSPS_ICONV**.

Tabla 5.6. Comparación de temperaturas para cada zona térmica al considerar las ganancias internas por el tipo de fuente de iluminación de tipo incandescente y los efectos de sombreado.

Meses	T. amb.*	CSPS_ICONV				CCPS_ICONV				Diferencia			
		ZT1*	ZT2*	ZT3*	ZT4*	ZT1*	ZT2*	ZT3*	ZT4*	ZT1*	ZT2*	ZT3*	ZT4*
Ene.	18.5	26.0	25.6	24.9	25.3	23.0	23.9	24.2	23.8	3.0	1.7	0.7	1.5
Feb.	20.8	29.8	28.8	28.7	29.0	26.1	26.8	27.8	27.1	3.7	2.1	0.9	1.8
Mar.	21.9	32.0	30.3	30.6	30.7	28.1	28.4	29.6	28.8	3.9	1.9	1.0	2.0
Abr.	25.2	36.3	34.1	34.9	34.8	32.0	32.1	33.9	32.7	4.3	2.1	1.1	2.1
May.	25.7	36.6	34.5	35.3	35.2	32.4	32.5	34.3	33.1	4.2	2.0	1.0	2.1
Jun.	22.1	33.1	31.2	32.0	31.9	29.1	29.2	31.0	29.8	4.0	2.0	1.0	2.0
Jul.	22.0	33.5	31.4	32.4	32.2	29.2	29.2	31.4	30.1	4.3	2.1	1.1	2.2
Ago.	21.8	32.9	30.8	31.6	31.5	28.8	28.9	30.6	29.5	4.1	2.0	1.0	2.1
Sep.	21.3	32.0	30.1	30.5	30.6	28.0	28.3	29.6	28.6	3.9	1.9	1.0	2.0
Oct.	21.4	32.0	30.6	30.6	30.8	28.0	28.5	29.6	28.8	4.0	2.1	1.0	2.0
Nov.	19.9	29.4	28.6	28.0	28.4	25.7	26.5	27.1	26.6	3.6	2.1	0.9	1.8
Dic.	20.7	29.3	29.0	28.2	28.6	25.9	26.9	27.4	27.0	3.4	2.1	0.9	1.7
P. anual	21.8	31.9	30.4	30.7	30.8	28.0	28.4	29.7	28.8	3.9	2.0	1.0	1.9

*Temperatura promedio en grados Celsius (°C).

Finalmente, para la configuración **CCPS_ILED** donde se comparan los efectos de las ganancias internas por la sustitución del sistema de iluminación (de tipo incandescente por LED), las temperaturas para cada zona térmica disminuyeron con respecto a la configuración anterior. Como se puede observar en la Figura 5.4, en las ZT3 y 4 las temperaturas promedio registradas en la mayoría de los meses del año fueron altas, esto debido a que por una parte se pudo disminuir la temperatura al interior al implementar las estrategias de ahorro de energía; sin embargo, se presentaron altas temperaturas por el hecho de que estas zonas se encuentran ubicadas en la PA, de ahí que la mayor ganancia de calor es debido a la incidencia de los rayos del sol sobre los techos de esta zonas térmicas.

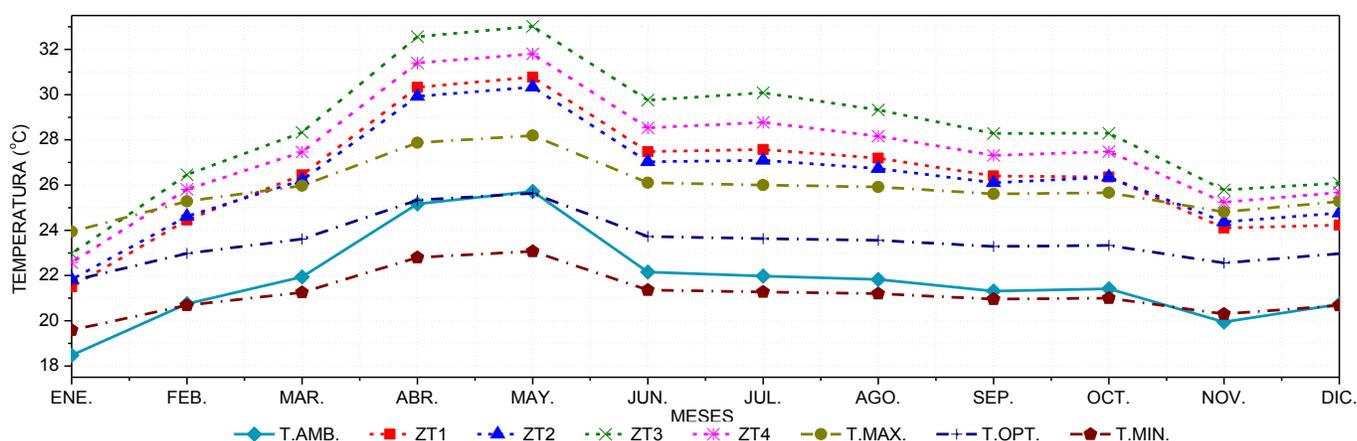


Figura 5.4. Temperaturas promedios mensuales para cada zona térmica en la configuración **CCPS_ILED**.

Como se puede observar en la Tabla 5.7, las ZT3 y 4 la temperatura promedio disminuyó un 3.8 y 3.9% respectivamente, es decir, 1.3°C menos que en la configuración anterior; y en cuanto a las zonas ZT1 y 2 disminuyeron un 5.0% (1.6°C) y 6.6% (2.1°C) respectivamente, esto de acuerdo a las temperaturas promedios correspondientes al mes de Mayo. En el caso de estas dos últimas zonas térmicas, los puntos porcentuales fueron mayores debido a que éstas se encuentran en la PB (menos cálidas). Por otro lado se puede observar en la tabla (en ambas configuraciones), que la ZT1 en los meses de invierno, se

presentaron menores temperaturas en comparación con las demás zonas térmicas, esto debido al sistema pasivo de sombreado de mayor superficie, permitió bloquear la incidencia de los rayos del sol durante los días de invierno, y por ende el descenso de la temperatura.

Tabla 5.7. Comparación de temperaturas para cada zona térmica al considerar los efectos de sombreado y la sustitución del tipo de fuente de iluminación de tipo incandescente por LED.

Meses	T. amb.*	CCPS_ICONV				CCPS_ILED				Diferencia			
		ZT1*	ZT2*	ZT3*	ZT4*	ZT1*	ZT2*	ZT3*	ZT4*	ZT1*	ZT2*	ZT3*	ZT4*
Ene.	18.5	23.0	23.9	24.2	23.8	21.5	21.8	23.0	22.6	1.6	2.0	1.2	1.3
Feb.	20.8	26.1	26.8	27.8	27.1	24.5	24.6	26.5	25.8	1.6	2.2	1.3	1.3
Mar.	21.9	28.1	28.4	29.6	28.8	26.4	26.2	28.3	27.5	1.6	2.1	1.3	1.3
Abr.	25.2	32.0	32.1	33.9	32.7	30.3	29.9	32.6	31.4	1.6	2.1	1.3	1.3
May.	25.7	32.4	32.5	34.3	33.1	30.8	30.3	33.0	31.8	1.6	2.1	1.3	1.3
Jun.	22.1	29.1	29.2	31.0	29.8	27.5	27.0	29.8	28.5	1.6	2.1	1.3	1.3
Jul.	22.0	29.2	29.2	31.4	30.1	27.6	27.1	30.1	28.8	1.6	2.1	1.3	1.3
Ago.	21.8	28.8	28.9	30.6	29.5	27.2	26.7	29.3	28.2	1.6	2.1	1.3	1.3
Sep.	21.3	28.0	28.3	29.6	28.6	26.4	26.1	28.3	27.3	1.6	2.1	1.3	1.3
Oct.	21.4	28.0	28.5	29.6	28.8	26.4	26.3	28.3	27.5	1.6	2.1	1.3	1.3
Nov.	19.9	25.7	26.5	27.1	26.6	24.1	24.4	25.8	25.2	1.6	2.1	1.3	1.3
Dic.	20.7	25.9	26.9	27.4	27.0	24.2	24.8	26.1	25.7	1.6	2.1	1.3	1.3
P. anual	21.8	28.0	28.4	29.7	28.8	26.4	26.3	28.4	27.5	1.6	2.1	1.3	1.3

*Temperatura promedio en grados Celsius (°C).

Por la tanto implementando las estrategia de ahorro y eficiencia energética desde la configuración **CSPS_ICONV** hasta esta última presentada **CCPS_ILED**, en la Tabla 5.8 se muestra la disminución de temperatura promedio mensual de cada zona térmica.

Tabla 5.8. Beneficios obtenidos al implementar las estrategias de ahorro y eficiencia energética en la vivienda.

Meses	T. amb.*	CSPS_ICONV				CCPS_ILED				Diferencia			
		ZT1*	ZT2*	ZT3*	ZT4*	ZT1*	ZT2*	ZT3*	ZT4*	ZT1*	ZT2*	ZT3*	ZT4*
Ene.	18.5	26.0	25.6	24.9	25.3	21.5	21.8	23.0	22.6	4.5	3.8	2.0	2.7
Feb.	20.8	29.8	28.8	28.7	29.0	24.5	24.6	26.5	25.8	5.3	4.2	2.2	3.1
Mar.	21.9	32.0	30.3	30.6	30.7	26.4	26.2	28.3	27.5	5.5	4.1	2.3	3.3
Abr.	25.2	36.3	34.1	34.9	34.8	30.3	29.9	32.6	31.4	6.0	4.2	2.4	3.4
May.	25.7	36.6	34.5	35.3	35.2	30.8	30.3	33.0	31.8	5.8	4.1	2.3	3.4
Jun.	22.1	33.1	31.2	32.0	31.9	27.5	27.0	29.8	28.5	5.6	4.2	2.3	3.3
Jul.	22.0	33.5	31.4	32.4	32.2	27.6	27.1	30.1	28.8	5.9	4.3	2.4	3.5
Ago.	21.8	32.9	30.8	31.6	31.5	27.2	26.7	29.3	28.2	5.8	4.1	2.3	3.4
Sep.	21.3	32.0	30.1	30.5	30.6	26.4	26.1	28.3	27.3	5.6	4.0	2.3	3.3
Oct.	21.4	32.0	30.6	30.6	30.8	26.4	26.3	28.3	27.5	5.6	4.2	2.3	3.3
Nov.	19.9	29.4	28.6	28.0	28.4	24.1	24.4	25.8	25.2	5.3	4.2	2.2	3.1
Dic.	20.7	29.3	29.0	28.2	28.6	24.2	24.8	26.1	25.7	5.0	4.2	2.2	3.0
P. anual	21.8	31.9	30.4	30.7	30.8	26.4	26.3	28.4	27.5	5.5	4.1	2.2	3.2

*Temperatura promedio en grados Celsius (°C).

5.3 Comportamiento térmico al interior de los espacios de mayor interés

Los resultados siguientes permiten observar el comportamiento de las temperaturas obtenidas por las áreas de mayor interés; es decir, espacios donde se tienen integrado los elementos de sombreado. Recordando en este sentido, que los espacios corresponden a la Sala/Comedor PB, la sala PA y a la recámara 3 PA. Los espacios fueron evaluados, de la misma manera en que se evaluaron las cuatro zonas térmicas anteriores (mediante las configuraciones **CB_SPS_SI**, **CSPS_ICONV**, **CCPS_ICONV** y **CCPS_ILED**), para de esta manera permitir comparar el comportamiento térmico al interior de cada espacio al considerar las estrategia de ahorro y eficiencia energética.

Los resultados corresponden al día más caluroso del año en el sitio de estudio, el cual es referido al día 3 del mes de Mayo.

En la Figura 5.5, se muestran las temperaturas del entorno interior del área correspondiente a la Sala/Comedor. Conforme se fueron comparando las configuraciones en este espacio, se vieron reflejados los efectos de cada uno de los elementos del análisis, es decir, por los elementos de sombreado e iluminación. Como se puede observar en la figura, para **CB_SPS_SI**, la actividad térmica al interior de este espacio empezó a las 7:00 a.m. consiguiendo un aumento ligeramente lineal y ascendente hasta las 12:00 p.m.; posteriormente, conforme pasaron las horas del día se tuvo un ligero aumento de la temperatura hasta alcanzar una máxima de 37.2°C a las 4:00 de la tarde; demostrando para las últimas horas del día un descenso de la temperatura por la puesta del sol.

Para el caso de **CSPS_ICONV** como se puede observar, presentó el mismo comportamiento térmico mencionado anteriormente; sin embargo, en éste se obtuvo un aumento de la temperatura por efecto de la emisión de calor de las fuentes de iluminación. Dicho lo anterior, para esta configuración se tuvo un aumento de la temperatura del 2.9% (1.1°C) con respecto a la temperatura máxima alcanzada (38.3°C en la hora 4:00 p.m.). Así mismo, se presentaron ligeros picos de temperatura entre las 5 y 8:00 a.m. y 6 a 10:00 p.m. por el uso de la iluminación de acuerdo al perfil de horario del mismo.

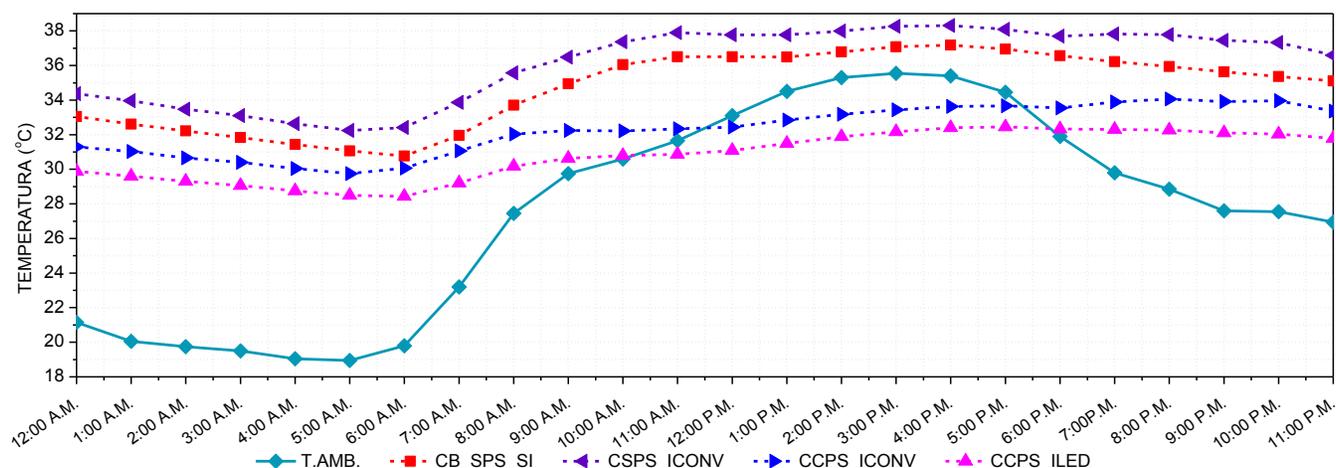


Figura 5.5. Temperaturas correspondientes al interior de la Sala/Comedor para el día más caluroso de Mayo.

En cuanto a los resultados de **CCPS_ICONV**, el sistema pasivo de sombreado (SPB01) con orientación al Este, permitió hacer su función (de 8 a 11:00 a.m.) al bloquear la incidencia de los rayos del sol, ya que estos son los momentos característicos donde los rayos del sol inciden en una superficie vertical hacia esta orientación en las primeras horas de la mañana, permitiendo por lo tanto una disminución de la temperatura del 12.3% (4.7°C) con respecto a la temperatura máxima alcanzada (33.6°C a las 4:00 p.m.). Asimismo, se puede observar que después de las doce del mediodía, se presentó un ligero aumento de la temperatura como resultado de la ganancia de calor cedida por la zona térmica (ZT3) adyacente. De igual manera, se puede observar que para las últimas horas del día, se presentó un aumento de la temperatura debido a las ganancias internas por uso de la iluminación.

En la última configuración **CCPS_ILED**, la cual integra tanto los sistemas de sombreado como las lámparas LED, se aprecia que se obtuvo el mayor beneficio al registrarse las temperaturas más bajas a lo largo de todo el día, donde la temperatura máxima alcanzada fue de 32.5°C a las 5:00 p.m. Por otro lado,

también se menciona que la temperatura al interior entre las horas 11:00 a.m. y las 7 p.m. de este espacio fue incluso menor que la temperatura ambiente.

Como resultado podemos ver que al implementar las estrategias de ahorro de energía y eficiencia energética en la vivienda, se tuvo como beneficio una disminución de la temperatura del 15.4% (5.6°C) con respecto a la configuración base de la vivienda.

En cuanto a la Recámara 3 de la PA, en la Figura 5.6 se muestran las temperaturas correspondientes a la configuración **CB_SPS_SI**. El comportamiento térmico es similar al del espacio de la Sala/Comedor, debido a que se encuentran en la misma orientación. Sin embargo, como se puede observar el aumento de la temperatura es un poco lineal hasta las 5:00 p.m., hora en que se alcanzó una temperatura máxima de 39.1°C, demostrando para las ultimas horas del día un descenso de la temperatura por la puesta del sol. El aumento de la temperatura (un poco lineal y ascendente) se debió por una parte a las ganancias de calor en la superficie vidriada (en las primeras horas de la mañana) y, por otro lado, por las ganancias en la superficie horizontal del techo, ya que éste facilita la mayor ganancia de calor en verano por la incidencia de los rayos del sol de manera vertical, ya que la posición del sol aparente se encuentra más hacia el cenit.

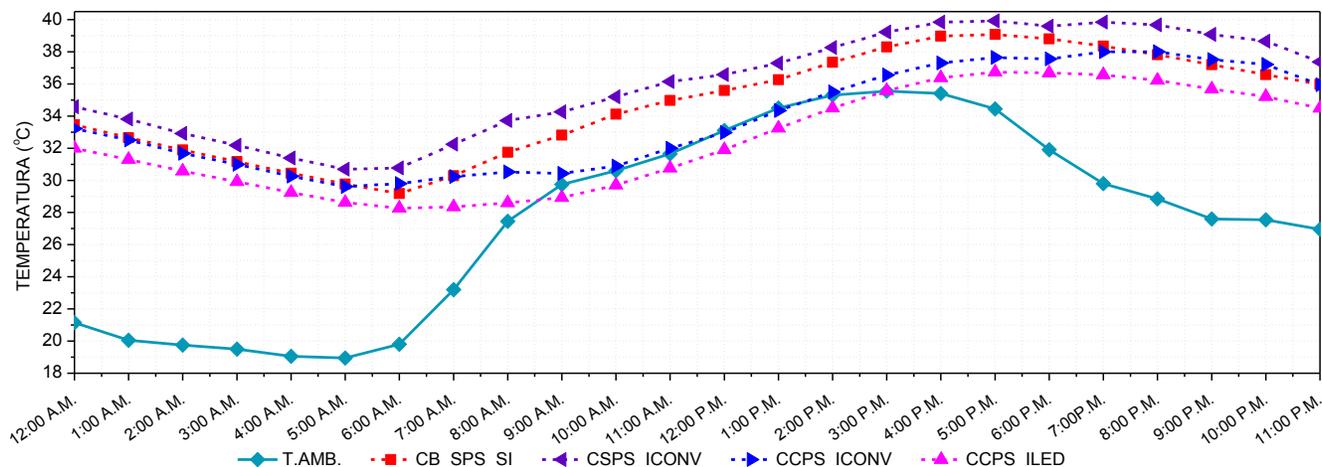


Figura 5.6. Temperaturas correspondientes al interior de la Recámara 3 PA para el día más caluroso de Mayo.

La configuración **CSPS_ICONV** como se puede observar en la misma figura, guarda una relación similar al comportamiento térmico de la configuración base. Sin embargo, debido las ganancias de calor sensible por iluminación se registró un aumento en la temperatura del 2% (0.8°C) de acuerdo a la temperatura máxima alcanzada (39.9°C) en la hora 5:00 p.m.; mostrándose asimismo los picos de temperatura por iluminación de acuerdo al perfil de uso.

En la configuración **CCPS_ICONV**, el sistema pasivo de sombreado (SPAE02) permitió bloquear la incidencia de la radiación solar al interior durante las tres primeras horas de la mañana (7 a 10:00 a.m.), lo cual se evitó que se ganara más calor en el entorno interior tal como sucedió en la configuración base. Sin embargo, después de las 10:00 a.m. y hasta a las 5:00 p.m., se puede observar que se presentó el aumento de temperatura un poco lineal debido a lo ya mencionado, horas del día donde se alcanzó temperatura máxima de 37.6°C (hasta esta última hora); permitiéndose de esta manera, que se disminuyera la temperatura a 5.8% (2.3°C) con respecto a la configuración anterior.

Para la última configuración **CCPS_ILED**, en la misma figura se puede observar que durante las

primeras horas de la mañana, las ganancias de calor por iluminación artificial (de acuerdo al perfil de uso) se permitió disminuir 1.9°C (a las 7:00 a.m.). Aunada a esta disminución, también se vio reflejado los efectos del elemento de sombreado, el cual permitió mantener una temperatura casi constante en las primeras horas de la mañana (de 7 a 10:00 a.m.), para posteriormente, y de esta manera el efecto de la actividad de la masa térmica permitiera alcanzar una temperatura inclusive inferior a la del medio exterior para las próximas seis horas del día; lapso en que se alcanzó una temperatura máxima de 35.6°C (a las 3:00 p.m.); permitiendo de esta manera disminuir más la temperatura a 2.4% (0.9°C) de acuerdo a la temperatura máxima alcanzada a las 5:00 p.m. (36.7°C).

Por lo tanto, al implementar las estrategias de ahorro de energía y eficiencia energética en la vivienda, se tuvo como beneficio una disminución de la temperatura del 12% (4.2°C) con respecto a la configuración base de la vivienda.

En cuanto al último espacio de estudio correspondiente a Sala de TV de la PA, los resultados obtenidos son poco significativos, esto debido a que el elemento de sombreado tiene una menor proyección (0.90 m) en comparación con los otros; y por otra parte, también se debió a la orientación de este espacio (al Oeste) ya que los efectos de sombreado por el sistema pasivo fue poco efectivo para las últimas horas del día.

La configuración **CB_SPS_SI**, como se puede observar en la Figura 5.7, describe la actividad de la masa térmica de la envolvente, donde el aumento de la temperatura fue aproximadamente lineal desde las 7:00 a.m. hasta las 3:00 p.m. Este incremento gradual de la temperatura se debe principalmente a la transferencia de calor que recibe el interior de la Sala PA a través del techo, el cual recibe la mayor cantidad de radiación a lo largo del día, además del calor aportado por las zonas adyacentes. De igual forma, se puede observar que después de la 3:00 p.m. la incidencia de la radiación solar tuvo actividad en las superficies vidriadas (al Oeste) de este espacio, provocando un aumento de la temperatura hasta alcanzar un valor de 38.1°C a las 5:00 p.m., para posteriormente, mostrar el ligero descenso.

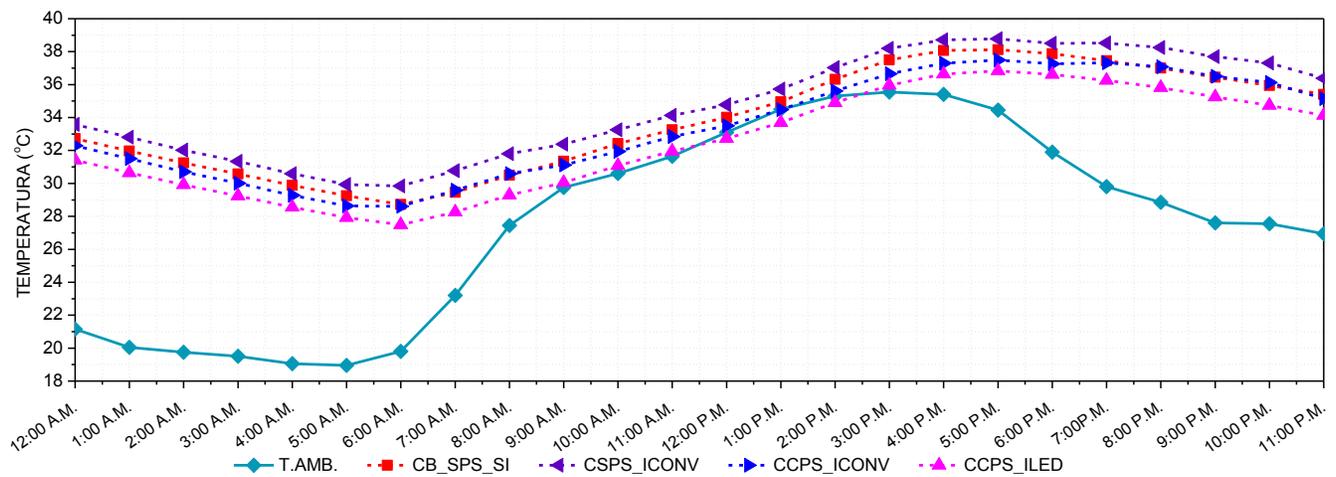


Figura 5.7. Temperaturas correspondientes al interior de la Sala PA para el día más caluroso de Mayo.

En la misma figura se observa que en la configuración **CSPS_ICONV** se alcanzó un incremento de la temperatura del 1.8% (0.7°C) con respecto a la temperatura máxima alcanzada (38.8°C a las 5:00 p.m.) y la configuración base; mostrándose también los picos de temperatura por el uso de la iluminación.

Con respecto a la configuración **CCPS_ICONV** el elemento de sombreado (SPA03) tuvo poco efecto

sobre la disminución de las temperaturas, lo cual ya se comentó anteriormente. Sin embargo, para las horas en que los rayos del sol inciden sobre las superficies vidriadas (cinco de la tarde), la temperatura disminuyó un 3.4% (1.3°C).

Y por último, en la configuración **CCPS_ILED** la poca ganancia de calor por este tipo de iluminación contribuyeron a la disminución de las temperaturas aún más. Se puede observar, y de acuerdo al perfil de uso por iluminación por la mañana (de 5 a 8:00 a.m.) se tuvo un descenso de temperatura del 5.4% (1.6°C), así como un 4.1% (1.5°C) por la noche (de 6 a 11:00 p.m.). En cuanto a los efectos del sombreado, se redujeron las temperaturas en un 1.8% (0.7°C) con respecto al modelo anterior para las horas de 3 a 5:00 p.m., horas donde los rayos del sol inciden en esta orientación. Por lo tanto para este espacio se alcanzó una temperatura máxima al interior de 36.8°C a las 5:00 p.m.

Con la implementación de las estrategias de ahorro de energía y eficiencia energética en la vivienda en este espacio, se tuvo como beneficio una disminución de la temperatura del 3.4% (1.3°C) con respecto a la configuración base de la vivienda.

5.4 Cuantificación de energía por cargas térmicas

Una carga térmica es la energía térmica que debe agregarse o sustraerse de una edificación a fin de mantener la temperatura al interior dentro de un intervalo de confort. Una edificación pierde o gana energía en función de varios parámetros como son las variables climatológicas de la zona en la que se encuentre ubicada, los materiales de construcción, la orientación y el diseño de la misma, entre otros. Adicionalmente, las ganancias de calor internas juegan un papel muy importante, dado que éstas pueden representar una contribución significativa de carga térmica, como por ejemplo un auditorio, donde cada persona al interior genera calor corporal que se traduce en calor sensible y un incremento en la temperatura al interior. De igual forma, los materiales que conforman la edificación pueden contribuir de manera importante al incremento o pérdida acelerada de la carga térmica, por lo que mantener el confort al interior de la edificación, basado en las cargas térmicas generadas por todos los factores anteriormente mencionados, requiere del uso de algún tipo de sistema de acondicionamiento de aire, ya sea para calentamiento o enfriamiento, generando por consiguiente, una demanda de energía eléctrica que pudiera ser muy elevada.

En la Figura 5.8 a) se muestran las demandas de energía por cargas térmicas de enfriamiento (CTE) de manera mensual y anual para cada zona térmica, correspondientes a la configuración **CB_SPS_SI**.

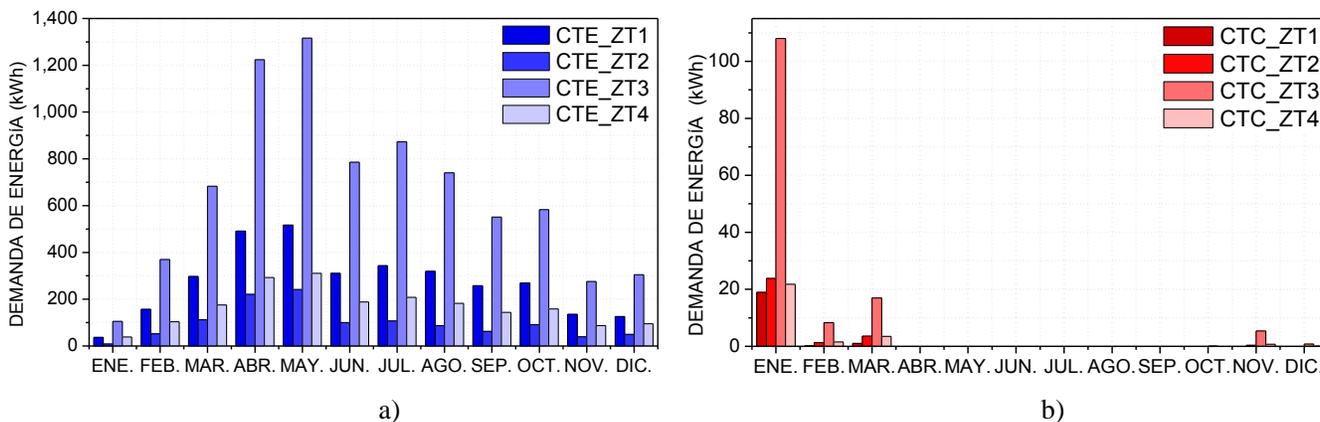


Figura 5.8. Demanda de energía por cargas térmicas para cada zona térmica correspondiente a la configuración **CB_SPS_SI**. a) cargas por enfriamiento, b) cargas por calentamiento.

Se puede observar, que la mayor demanda de energía por cargas de enfriamiento se presentaron en la ZT3 a lo largo de todos los meses del año, esto debido a que esta zona presenta una mayor superficie (170 m²) de techo expuesto a la radiación solar, así como por las superficies vidriadas en la orientación Este-Oeste. La gráfica muestra que la mayor demanda por CTE se presentó en el mes de mayo por 1316.3 kWh.

En cuanto a las cargas térmicas por calentamiento (CTC), como se muestran en la Figura 5.8 b) las cargas máximas se presentaron de igual manera para la ZT3 y principalmente en los meses de invierno. Por lo que la demanda energética máxima alcanzada fue de 108.0 kWh correspondientes al mes de Enero. Como se observa en la misma figura, para los meses de Abril hasta Octubre hay ausencia de cargas por calefacción debido a que las temperaturas presentadas en estos meses fueron superiores al límite máximo de la temperatura de confort (26°C).

De manera que esta configuración, se tuvo una demanda energética por cargas de enfriamiento de 14.21 MWh/año y 0.22 MWh/año por calentamiento; con lo cual se permitió estimar una demanda energética de manera global y anual de 14.44 MWh/año. Así mismo, considerando el factor de emisión eléctrico⁵, son emitidos al ambiente 8.38 tCO₂/año.

Continuando con el análisis de las configuraciones. En la configuración **CSPS_ICONV**, las ganancias internas por iluminación generaron un incremento en la temperatura para la ZT3 y por ende, el creciente consumo de energía por CTE en el día más cálido. En la Figura 5.9 a), se muestra la máxima demanda de energía, la cual presentó un aumento del 11.3% (168 kWh) de acuerdo al mes más cálido del año. Registrándose de esta manera una demanda de 1484.3 kWh.

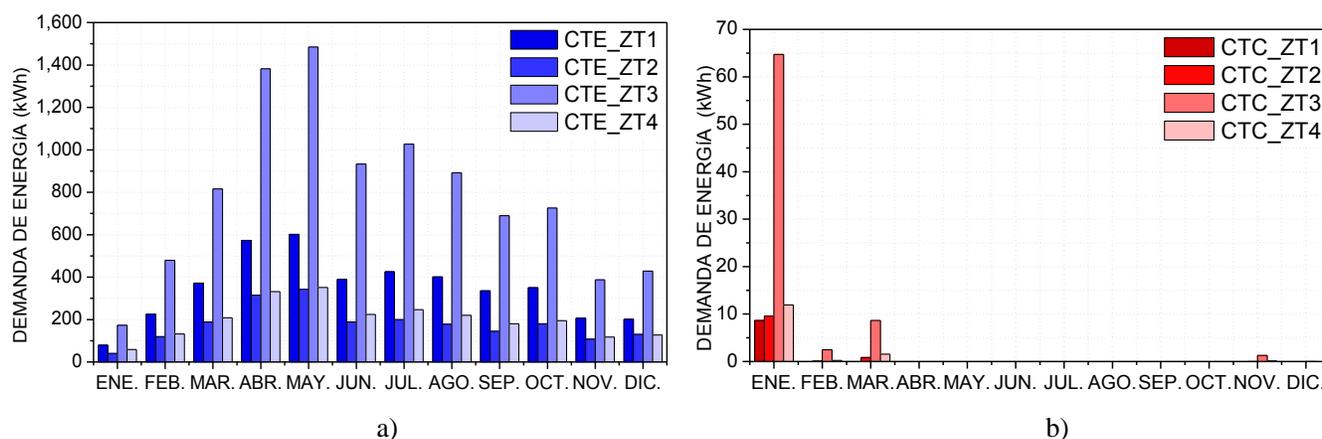


Figura 5.9. Demanda de energía por cargas térmicas para cada zona térmica correspondiente a la configuración **CSPS_ICONV**. a) cargas por enfriamiento, b) cargas por calentamiento.

Al considerar las fuentes de iluminación incandescentes en el modelo de la vivienda, las cargas de enfriamiento se incrementaron significativamente lo cual resultó contraproducente. Por otro lado, dichas ganancias internas de calor (debido a la incorporación de las luminarias), trajo como consecuencia que las cargas de calentamiento se vieran disminuidas en la zona térmica con mayor número de luminarias, principalmente en la ZT3 hasta en un 40% (43.3 kWh) en el mes de Enero, registrando una demanda máxima de 64.7 kWh para ese mes, tal como se muestra en la Figura 5.9 b).

⁵ Factor de emisión para el cálculo de emisiones indirectas por consumo de electricidad: 0.582 tCO₂/MWh (SEMARNAT, 2018).

De manera que, la demanda energética para esta configuración por cargas de enfriamiento fue de 18.10 MWh/año y 0.11 MWh/año por calentamiento; con lo cual se permitió estimar una demanda energética de manera global y anual de 18.21 MWh/año. De igual manera, considerando el factor de emisión eléctrico, son emitidos al ambiente 10.6 tCO₂/año.

La configuración **CCPS_ICONV**, la cual incorpora los dispositivos pasivos de sombreado (terrazas), mostró una disminución en las cargas térmicas de enfriamiento principalmente en los meses de verano. En la Figura 5.10 a) se puede observar que, en particular para la ZT1, con la terraza de mayor proyección, el efecto de sombreado permitió reducir la demanda energética en un 46.7% (281.1 kWh), lo cual corresponde a 320.7 kWh en el mes de Mayo.

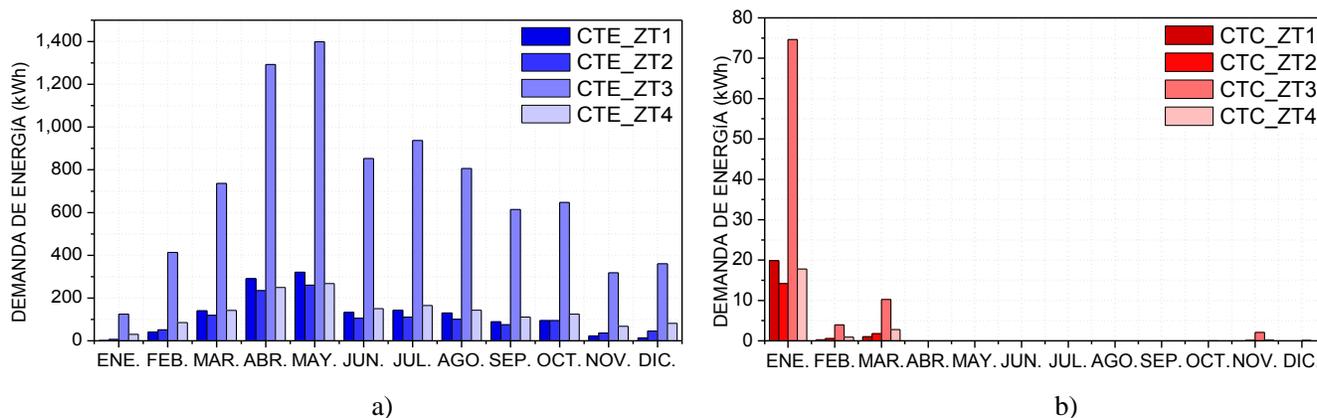


Figura 5.10. Demanda de energía por cargas térmicas para cada zona térmica correspondiente a la configuración **CCPS_ICONV**. a) cargas por enfriamiento, b) cargas por calentamiento.

Por otro lado, este mismo dispositivo de sombreado tuvo efectos negativos en la misma ZT1 para los meses de invierno, incrementando la demanda de energía eléctrica por cargas térmicas de calentamiento. En la Figura 5.10 b) para la ZT1, se muestra que la demanda por CTC tuvo un aumento del 56.6% (11.25 kWh), lo cual se requiere de una demanda de 19.8 kWh para alcanzar la temperatura de confort en esta zona térmica.

Por lo tanto, la demanda energética en esta configuración por CTE fue de 12.78 MWh/año y 0.15 MWh/año por CTC; con lo cual se permitió estimar una demanda energética de manera global y anual de 12.93 MWh/año. Al considerar el factor de emisión eléctrico, se emiten de esta manera 7.5 tCO₂/año al ambiente.

Como comentario general, no debe perderse de vista que aun cuando la implementación de los dispositivos de sombreado genera un incremento en la demanda de energía por cargas de calentamiento, el beneficio al disminuir las cargas de enfriamiento es mucho mayor; ya que la primera aumenta 11.25 kWh y la segunda disminuye 281 kWh, generando una diferencia a favor de 269.75 kWh, por lo que se considera que esta estrategia sigue siendo efectiva.

Por último, la configuración **CCPS_ILED** la cual parte del modelo anterior y sustituye la iluminación con fuentes de iluminación incandescentes por tipo LED, la ZT1 mostró una disminución del 27.3% (87.61 kWh) en las cargas térmicas de enfriamiento en el mes de Mayo tal como se observa en la Figura 5.11 a), registrando por lo tanto una demanda de 233.1 kWh para este mes.

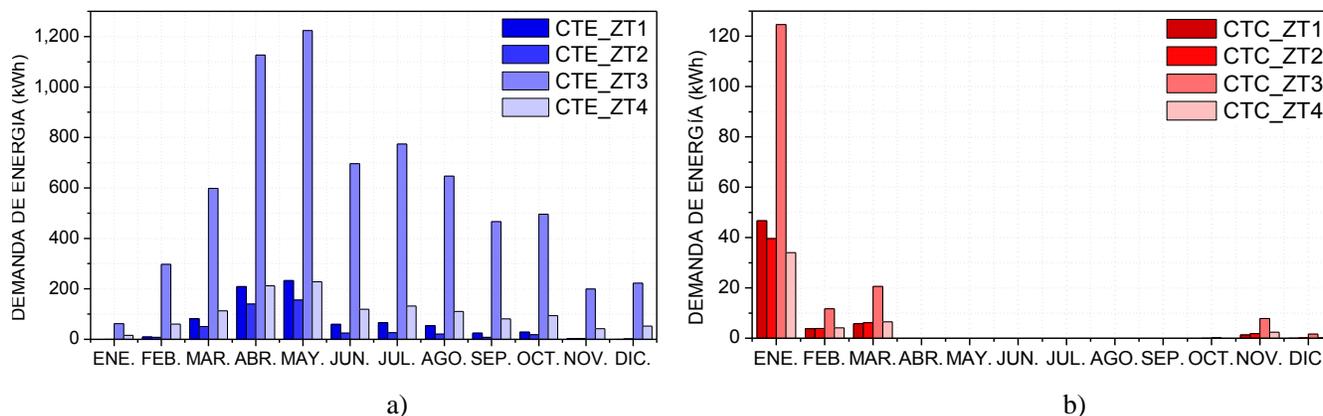


Figura 5.11. Demanda de energía por cargas térmicas para cada zona térmica correspondiente a la configuración **CCPS_ILED**. a) cargas por enfriamiento, b) cargas por calentamiento.

De igual forma que en la configuración anterior (**CCPS_ICONV**), las CTC se incrementaron de manera significativa al implementar la sustitución del tipo de fuente de iluminación. Como se observa en la Figura 5.11 b), la ZT1 tuvo un aumento del 57.4% (26.8 kWh) en el mes más frío. Por lo que se obtuvo una demanda al término de 46.7 kWh.

Por lo que la demanda energética en esta configuración por CTE fue de 9.29 MWh/año y 0.32 MWh/año por CTC; con lo cual se permitió estimar una demanda energética de manera global y anual de 9.62 MWh/año. Y en cuanto a las emisiones por consumo de energía debido a las cargas térmicas, se emiten de 5.6 tCO₂/año.

Por lo tanto, al implementar las estrategias de ahorro y eficiencia energética desde la configuración base hasta la configuración donde se consideraron los elementos de sombreado y fuentes de iluminación de bajo consumo (**CCPS_ILED**); se tuvieron beneficios al disminuir la demanda energética por CTE de manera anual a 34.57% (4.94 MWh/año); sin embargo, debido a la baja emisión de calor por las lámparas y bloqueo de los rayos del sol en invierno, las CTC se incrementaron un 31.25% (0.1 MWh/año); No obstante, se tuvo aun así beneficios al disminuir la demanda energética de manera global y anual a 33.45% (4.83 MWh/año). Disminuyéndose de igual manera en las emisiones un 33.17% (2.78 tCO₂/año).

Los valores de las cargas térmicas comentadas anteriormente, se muestran en tablas en el Anexo B para observar los efectos que se tuvieron al implementar las medidas de ahorro y eficiencia energética al comparar las configuraciones y zonas térmicas.

De forma general, en la Figura 5.12 se muestra la comparación de las configuraciones con la demanda energética por ambas cargas térmicas de manera mensual y anual.

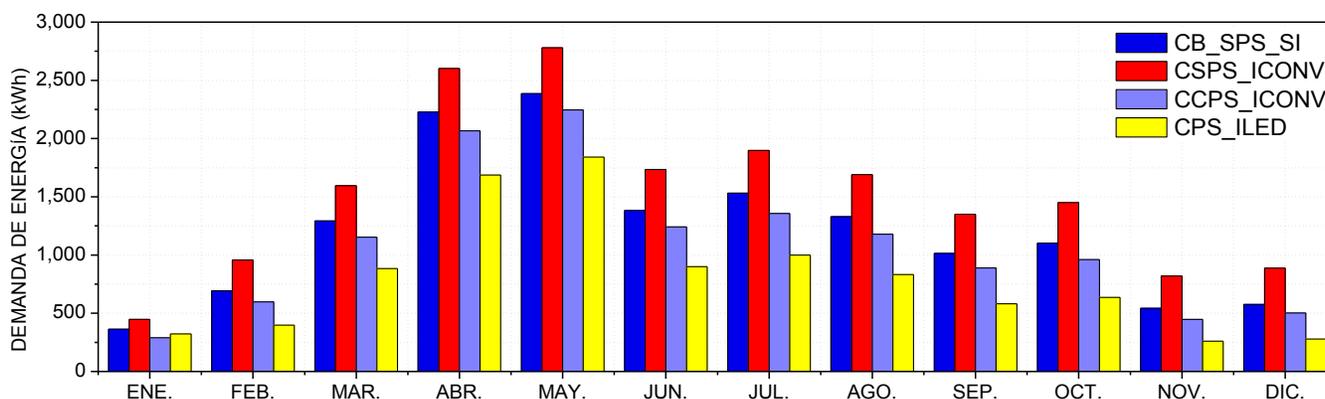


Figura 5.12. Demanda energética por cargas térmicas para cada configuración de la vivienda.

5.5 Análisis Costo Beneficio

Una forma de cuantificar el consumo energético de manera tangible es en términos monetarios. De modo que las demandas de energía por cargas térmicas debido a los efectos por la implementación de elementos de sombreado y los tipos de fuentes de iluminación, son analizadas desde el punto de vista y a partir técnicas de evaluación económicas. Una de ellas y de acuerdo al objetivo de este trabajo, es mediante el análisis costo-beneficio (ACB). El ACB se basa en identificar y valorar monetariamente las contribuciones positivas (beneficios) y negativas (costos) atribuidas a las estrategias de ahorro y eficiencia energética. Así mismo se implementan otros indicadores de evaluación financieros tales como el valor presente neto (VPN), el costo anual uniforme equivalente (CAUE), el beneficio anula uniforme equivalente (BAUE), el tiempo o periodo de retorno de inversión (TRI), así como la tasa interna de retorno (TIR), los cuales permiten comparar las contribuciones al implementar los elementos de sombreado y el sistema de iluminación de manera homogénea, y así obtener criterios sobre los beneficios económicos que son finalmente equivalentes a ahorros de energía eléctrica. Estos métodos se describen más adelante conforme se vayan demostrando los resultados.

Para llevar a cabo el análisis ACB, se requiere del conocimiento de los siguientes ítems de costos:

- Costo capital o de inversión (P).
- Cantidad considerada de manera anual por costos y/o beneficios (F).
- Costo por mantenimiento.
- Tasa mínima aceptable de rendimiento ($\text{TMAR}^6=i$).
- Horizonte de análisis ($n=20$ años).
- Precio de la energía eléctrica por kWh (\$ 1.57 MXN⁷).
- Tasa interna de retorno ($\text{TIR}=14.67\%$).

⁶ Tasa que representa una medida de rentabilidad, la mínima que se le exigirá al proyecto de tal manera que se permita cubrir la totalidad la del costo capital, así como por demanda energética por CT, costos por mantenimiento y entre otros, para de esta manera obtener ganancias de pues haber cubierta dichos cotos.

⁷ Precio establecido de acuerdo a la cuota aplicada por la CFE para los usuarios DAC (doméstico de alto consumo). Ya que como la demanda de EE (promedio anual 1203.56 kWh/mes) hace que se ubique en esta tarifa. Por otro lado, el precio fue promediado entre el consumo básico, intermedio y excedente, ya que como se puede observar en el Anexo B, se presentan variaciones en la demanda energética en el transcurso del año.

Antes de hacer el ACB, es necesario definir de manera breve los conceptos de los indicadores de evaluación a nivel económico.

Para determinar el valor de los costos y beneficios a través del horizonte de análisis, sería un error considerarlos constantes a través del tiempo, ya que el valor del dinero va perdiendo el poder adquisitivo en el tiempo; por lo tanto es necesario someterlos al método de valor presente (VP), el cual permite valorarlos a través del tiempo de acuerdo al horizonte de análisis, para de esta manera acercarse a lo más posible de lo que pueda suceder en la vida real, lo cual se permite saber “ el riesgo” de los costos o beneficios que se puedan tener en el futuro y de esta manera traerlos al valor de hoy, que de ahí el nombre de VP. Esto se lleva a cabo mediante la siguiente expresión (Baca, 2007):

$$VP = \sum_{t=1}^n \frac{F}{(1+i)^t} \quad (5.1)$$

donde las variables F y n ya fueron descritas anteriormente. Para el caso de la i , ésta tasa de descuento fue determinada mediante un análisis de sensibilidad con respecto a la TIR y el VPN; por otro lado, también se consideró de la experiencia tomada de la misma en la literatura.

Con la ecuación (5.1) se puede obtener también el flujo neto de efectivo (FNE), esto no es más que una diferencia entre una serie de beneficios y costos; este se expresa como:

$$FNE = \sum_{t=1}^n B - C \quad (5.2)$$

Un indicador de evaluación económico principal que permite comparar las diferentes configuraciones, es mediante el costo anual uniforme equivalente (CAUE), el cual permite determinar el costo que se tiene de manera anual y uniforme considerando el costo capital y/o series de costos que se tengan de acuerdo al horizonte de análisis; este se determina mediante la siguiente expresión:

$$CAUE = P \frac{i * (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (5.3)$$

En este indicador, es muy importante aclarar lo siguiente. Todos los costos son por naturaleza negativos debido a que lógicamente son “desembolsos”, pero para problemas de este tipo, se acuerda asignar el signo positivo para los costos, lo cual se hace con la finalidad de no tener un signo negativo, pues ya que representa por sí costos.

En caso que se cuenten con beneficios en el proyecto, estos pueden cuantificarse mediante el beneficio anual uniforme equivalente (BAUE); el cual, demuestra los ahorros obtenidos de manera anual de acuerdo al horizonte de análisis. Este se determina por la siguiente expresión:

$$BAUE = (-P + FNE) \frac{i * (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (5.4)$$

Esta ecuación es muy similar a la (5.3); sin embargo, se acuerda asignar el signo negativo para los costos y el signo positivo a los beneficios (ahorros) en los *FNE*.

En cuanto a la relación beneficio costo (B/C), éste es uno de los indicadores para la evaluación económica que se requiere demostrar de acuerdo el objetivo de este trabajo. La relación B/C indica simplemente los beneficios obtenidos por cada unidad monetaria invertida en el horizonte de análisis; es decir, el rendimiento unitario de la totalidad de la inversión inicial (al implementar las estrategias de ahorro y eficiencia energética) y sus beneficios obtenidos. Este se determina mediante la siguiente expresión:

$$B/C = \frac{B}{P} \quad (5.5)$$

Para el caso del valor presente neto (*VPN*), permite cuantificar las ganancias o ahorros totales en los años considerados para el análisis respecto a la tasa de descuento; es decir, la obtención de las ganancias totales después de haber cubierta la inversión y otros costos a partir del *FNE* actualizado. Éste se determina como:

$$VPN = -P + \sum_{t=1}^n \frac{FNE}{(1+i)^n} \quad (5.6)$$

Otro indicador económico requerido para determinar el tiempo en recuperar el costo de inversión (correspondiente a los elementos pasivos de sombreado y el tipo de fuente de iluminación), y de acuerdo al horizonte de análisis para este trabajo de investigación, es el TRI, el cual considera la relación entre el costo capital y los beneficios, éstos últimos considerados del *FNE* y también actualizados de acuerdo a la *TMAR*. Este índice se determina como:

$$TRI = \frac{P}{B} \quad (5.7)$$

Por último, se presenta mediante un estudio de sensibilidad uno de los índices de mayor relevancia desde el punto de vista financiero, la *TIR*. La *TIR* permite devolver al *VPN* en cero, lo cual significa que la evaluación económica no se tiene pérdidas ni ganancias (recuperación de costo capital); además, mediante esta *TIR* se permite establecer la *TMAR*, para de esta manera determinar la rentabilidad y por ende la viabilidad del proyecto. Para este caso de estudio, la *TIR* fue definida en 14.67%. En la Figura 5.13, se muestra el análisis de sensibilidad al variar la *TMAR* y el riesgo que conlleva al obtener benéficos o costos reflejados directamente sobre el *VPN*; por otro lado, también se muestra su efecto en el TRI sobre el costo capital para la configuración más viable.

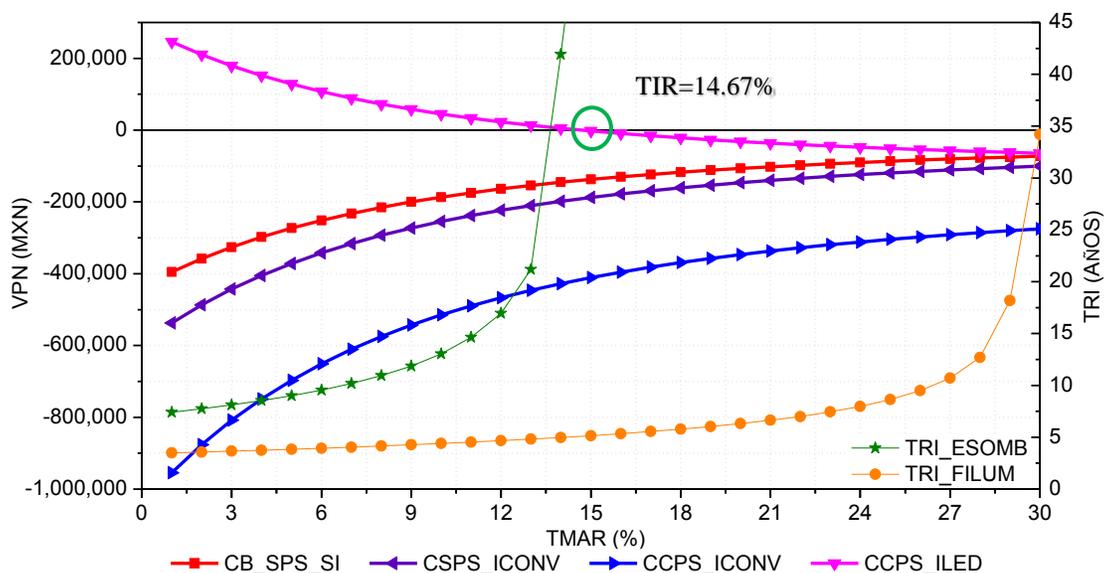


Figura 5.13. Análisis de sensibilidad al variar la TMAR y el efecto en el VPN y el TRI.

Como se puede observar, para las configuraciones **CB_SPS_SI**, **CSPS_ICONV**, **CCPS_ICONV**, se presentaron en la mayoría de ellas los costos más elevados debido a que no se consideró las estrategias de ahorro y eficiencia energética. Sin embargo, presentado se en esta última los menores costos por los beneficios obtenidos de los elementos de sombreado.

En particular, la configuración **CCPS_ILED** se presentó ganancias por la implementación de dichas estrategia; no obstante, al considerar la TMAR se puede observar que a mayor tasa se presentaron menores ganancias, inclusive pérdidas o costos después de una tasa mayor al 14.67%, valor porcentual el cual corresponde a la TIR, ya que en este punto la TIR vuelve al $VPN=0$, lo que se traduce como un equilibrio donde no se tiene ganancias ni pérdidas de capital. Dicho comportamiento, se presentó también para las demás configuraciones pero de manera inversa, ya que a mayor tasa o “riesgo del costo capital”, sólo de estaría cubriendo la serie de costos presentes en el proyecto y por lo tanto se reducirían las deudas.

Por otro lado, se puede observar para el caso de la viabilidad en la configuración **CCPS_ILED**, que a mayor TMAR, el tiempo de retorno de inversión por parte de los elementos de sombreado (**TRI_ESOMB**) se aumentó; inclusive a una mayor TIR (superior a 14.67%), el tiempo en recuperar su costo de inversión fue superior a los 100 años. Y en cuanto al tiempo en que tomaría en recuperar la inversión por parte de las fuentes de iluminación (**TRI_FILUM**), este tiempo se mantuvo constante y poco ascendente (dentro del periodo de análisis correspondiente a 20 años, lo cual es muy bueno), no siendo así para una TMAR mayor al 27%.

Por lo tanto, queda claro que para este caso de estudio se consideró una TMAR del 12%, tasa que proporcionara beneficios y con ello la viabilidad de implementar las estrategias de ahorro y eficiencia energética en la vivienda.

5.5.1 Análisis costo-beneficio

Enseguida se presentan los resultados del ACB siguiendo los indicadores descritos anteriormente para la evaluación de este estudio, asimismo aplicándolos en cada una de las configuraciones mencionadas anteriormente.

Para la configuración **CB_SPS_SI**; como se puede observar en la Tabla 5.9, en esta configuración no se tuvieron costos de inversión, por ende, ningún otro indicador relacionado a ello. Sólo existen costos por la demanda de energía eléctrica debido a las cargas térmicas; costo que se puede interpretar como “por el acondicionamiento de la vivienda”; lo cual demostró un costo total a lo largo de todo el horizonte de estudio de \$ 163,653.12 pesos de acuerdo el VPN; de esta manera, el costo de manera anual correspondió a \$ 21, 909.68 pesos de acuerdo al CAUE.

Tabla 5.9. Indicadores de evaluación financieros para la configuración **CB_SPS_SI**.

años	Costo de Inversión	Costo por demanda de energía eléctrica por cargas térmicas	Costos por mantenimiento	Beneficios (ahorros)	FNE
0	---				---
1		\$ 21, 909.68	---	---	-\$ 21, 909.68
2		\$ 21, 909.68	---	---	-\$ 21, 909.68
3		\$ 21, 909.68	---	---	-\$ 21, 909.68
---		---	---	---	---
20		\$ 21, 909.68	---	---	-\$ 21, 909.68
Total (VP)					-\$163,653.12
Índices económicos					
VPN		-\$ 163,653.12			
CAUE		\$ 21, 909.68			
BAUE		----			
B/C		----			
TRI (años)		---			

En cuanto a la configuración **CSPS_ICONV** como se muestra en la Tabla 5.10, en esta configuración se tiene en cuenta el costo de inversión correspondiente al tipo de fuente de iluminación. Éste costo de inversión se determinó a partir del número de lámparas requeridas en toda la vivienda a través del diseño de iluminación realizado en el Apéndice A, a las cuales se les aplicó el precio unitario acorde al costo en el mercado (en promedio \$ 6 .00 peso). Así mismo se muestra en la misma tabla, el costo por consumo de energía eléctrica por iluminación de manera anual, esto de acuerdo al perfil de uso para cada espacio; de lo cual, se tuvo un alto costo debido a la ineficiencia de éste tipo de lámparas. En cuanto al costo por mantenimiento, éste se refiere a las veces que se tienen que sustituir las lámparas de manera anual, ya que esta fuentes de iluminación tienen un tiempo de vida de sólo 1000 horas (en funcionamiento continuo), por lo cual, equivaldría sustituir 3.6 veces una lámpara anualmente considerando el perfil de uso de iluminación de cada espacio en la vivienda.

Por otro lado, también se muestran los costos por demanda de energía eléctrica derivada de las cargas térmicas (CT), que como se demostró anteriormente, dichas CT se aumentaron debido a la alta emisión de calor por el tipo de fuente de iluminación. Para esta configuración, no se presentan beneficios por la inversión considerada (fuentes de iluminación).

Por lo tanto, los índices económicos con base en los flujos de caja y la inversión, se tuvo tanto el VPN y el CAUE negativos, debido a que sólo existen costos.

Tabla 5.10. Indicadores de evaluación financieros para la configuración **CSPS_ICONV**.

años	Costo de Inversión	Costo por demanda de energía eléctrica por cargas térmicas	Costos por consumo de energía eléctrica (iluminación)	Costo por mantenimiento	Costos totales	Beneficios (ahorros)	FNE
0	\$ 2, 018.02						-\$ 2, 018.02
1		\$ 27, 629.38	\$ 30, 109.86	\$ 2, 018.02	\$ 29, 647.40	---	-\$ 29, 647.40
2		\$ 27, 629.38	\$ 30, 109.86	\$ 2, 018.02	\$ 29, 647.40	---	-\$ 29, 647.40
3		\$ 27, 629.38	\$ 30, 109.86	\$ 2, 018.02	\$ 29, 647.40	---	-\$ 29, 647.40
---		---	---	---	---	---	---
20		\$ 27, 629.38	\$ 30, 109.86	\$ 2, 018.02	\$ 29, 647.40	---	-\$ 29, 647.40
Total (VP)							-\$ 221, 449.58
Índices económicos							
VPN	-\$ 223, 467.60						
CAUE	\$ 29, 917.57						
BAUE	---						
B/C	---						
TRI (años)	---						

Para la configuración **CCPS_ICONV** como se puede observar en la Tabla 5.11, los costos de inversión esta vez fueron por una parte, por el tipo de fuente de iluminación, del cual se presentan los costos asociados a este sistema de iluminación ya comentados. Y por otra parte, también se muestra el costo capital correspondiente a los elementos de sombreado, así como el costo relacionado por sus efectos sobre la demanda de energía por las cargas térmicas, que como se puede observar (en comparación con la configuración anterior) se obtuvieron menores costos. De igual manera, se presenta el costo anual por su mantenimiento (2% sobre el costo de inversión). Finalmente se muestra en la tabla los beneficios o ahorros obtenidos por la implementación de dicha estrategia, los cuales a la vez fueron únicos para esta configuración e inferiores a los costos totales generados.

Tabla 5.11. Indicadores de evaluación financieros para la configuración **CCPS_ICONV**.

años	Costo de Inversión	Costo por demanda de energía eléctrica por cargas térmicas	Costos por consumo de energía eléctrica (iluminación)	Costo por mantenimiento (sist. pasivos de sombreado)	Costos por mantenimiento (iluminación)	Costos totales	Beneficios (atribuidos por los efectos de sombreado)	FNE
0	\$ 120, 000.00							-\$ 122, 018.02
	\$ 2, 018.02							
1		\$ 19, 616.13	\$ 30, 109.86	\$ 2, 400.00	\$ 2, 018.02	\$ 54, 144.00	\$ 8, 016.25	-\$ 46, 130.75
2		\$ 19, 616.13	\$ 30, 109.86	\$ 2, 400.00	\$ 2, 018.02	\$ 54, 144.00	\$ 8, 016.25	-\$ 46, 130.75
3		\$ 19, 616.13	\$ 30, 109.86	\$ 2, 400.00	\$ 2, 018.02	\$ 54, 144.00	\$ 8, 016.25	-\$ 46, 130.75
---	---	---	---	---	---	---	---	---
20		\$ 19, 616.13	\$ 30, 109.86	\$ 2, 400.00	\$ 2, 018.02	\$ 54, 144.00	\$ 8, 016.25	-\$ 46, 130.75
Total (VP)								-\$ 344, 571.05
Índices económicos								
VPN	-\$ 466, 598.06							
CAUE	---							
BAUE	-\$ 62, 466.37							
B/C	---							
TRI (años)	---							

Por lo tanto, de acuerdo a estos beneficios obtenidos y a los indicadores económicos, para el VPN se obtuvo un costo en todo el periodo de análisis de -\$ 466, 598.06 pesos; los cuales ascendieron (en comparación con la configuración anterior) debido a la inversión por los elementos de sombreado; sin

embargo, esta estrategia permitió obtener ahorros al reducir la demanda de energía eléctrica por cargas térmicas de manera anual. De modo que, los beneficios obtenidos (por la implementación de los elementos de sombreado) de manera anual y de acuerdo al BAUE fueron de -\$ 62, 466.37 pesos, los cuales son negativo, lo que se traduce como costo.

El estudio hasta estas configuraciones no se muestran resultados de los demás índices económicos, debido a que no se han tenido inversiones y sus consecuentes beneficios y si se han obtenido, estos ahorros son inferiores a los costos, de donde se infiere la ausencia por el TRI y la relación B/C.

Para la última configuración **CCPS_ILED**, en la Tabla 5.12 se muestra el costo capital correspondiente esta vez por los elementos de sombreado y otros costos asociados a estos ya comentados; sin embargo, los costos esta vez por la demanda de energía por cargas térmicas se vieron abatidos (en comparación con la configuración anterior) reflejado en los beneficios. Por otro parte, se presenta el costo de inversión por el tipo de fuente de laminación, el cual se determinó de la misma manera que el tipo incandescente. En este sentido el costo capital, en el momento cero es muy elevado en relación al del incandescente, sin embargo, debido a la alta eficiencia de estas lámparas y bajo consumo energético se tuvieron altos ahorros o beneficios. Como se puede observar en la misma tabla, no se tuvieron costos por mantenimiento de las mismas que corresponden a su sustituciones, ya que una lámpara de este tipo tiene un tiempo de vida (de acuerdo a la ficha técnica) de 50 000 h en funcionamiento continuo, por lo que en relación al perfil de uso de iluminación se estimó que aproximadamente en 21.3 años se reemplazaran las lámparas.

Por lo tanto, de acuerdo a estos beneficios y por la reducción de los costos por las cargas térmicas, se presentó un FNE positivo, los cual significa que obtuvieron ahorros. De manera que, los indicadores económicos demostraron resultados aceptables desde el punto de vista financiero. Tal es el caso del VPN el cual se definió con un valor mayor a cero, lo que se traduce como beneficios o ahorros (después de haber recuperada la inversión) de \$ 23, 105.97 pesos en todo el horizonte de análisis. Por lo que, al determinar los ahorros de manera anual de acuerdo al BAUE, esto fueron de \$ 3, 093.40 pesos.

Cabe mencionar y muy importante que, estos ahorros fueron definidos a partir del análisis de evaluación económica con una tasa mínima del 12% (tal como se demostró al inicio de esta sección para demostrar la viabilidad), de manera que se pueden obtener mayores ahorros al considerar una menor tasa de descuento; sin embargo, esta no puede ser menor al 6.04%, ya que la tasa de descuento está compuesta a la vez por una prima de riesgo más la parte del aumento sostenido de los precios en los productos comerciales, este último correspondiente a estos 6.04 puntos porcentuales promedio anual de acuerdo al INPC (Índice Nacional de Precios del Consumidor) reportados por el Banco de México en el 2017⁸.

Prosiguiendo con la demostración de los índices económicos financieros, en cuanto a la relación B/C esta se tuvo un valor de 1.17, lo cual significa que aparte de recuperar el costo capital total (por el valor de 1), se obtiene adicionales 0.17 pesos por cada peso invertido. Y por último, el tiempo en que tomará en recuperar las inversiones, en el caso de los elementos de sombreado demorará un tiempo de 16 años con 10 meses; y en cuanto a las fuentes de iluminación, el costo de recuperación llevara un tiempo de 4 años con 8 meses, los cuales y de acuerdo a criterios a nivel económicos estos TRI están comprendidos dentro del horizonte de análisis de acuerdo al tema de estudio, de donde resulta que por otro lado, las ganancias serán a largo plazo en ambos casos, ya que los tiempo de vida son de 80 y 21 años en promedio respectivamente.

⁸ <https://es.inflation.eu/tasas-de-inflacion/mexico/inflacion-historica/ipc-inflacion-mexico-2017.aspx>

Tabla 5.12. Indicadores de evaluación financieros para la configuración CCPS_ILED.

años	Costo de Inversión	Costo por demanda de energía eléctrica por cargas térmicas	Costos por consumo de energía eléctrica (iluminación)	Costo por mantenimiento (sist. pasivos de sombreado)	Costos totales	Beneficios (atribuidos a los efectos de sombreado e iluminación)	Beneficios (atribuidos por sust. iluminación)	Beneficio (ahorros) totales	FNE
0	\$ 120, 000.00 \$ 14, 400.00								-\$ 134, 400.00
1		\$ 14, 591.98	\$ 2, 534.29	\$ 2, 400.00	\$ 19, 526.26	\$ 13, 037.40	\$ 27, 557.57	\$ 40, 612.97	\$ 21, 086.71
2		\$ 14, 591.98	\$ 2, 534.29	\$ 2, 400.00	\$ 19, 526.26	\$ 13, 037.40	\$ 27, 557.57	\$ 40, 612.97	\$ 21, 086.71
3		\$ 14, 591.98	\$ 2, 534.29	\$ 2, 400.00	\$ 19, 526.26	\$ 13, 037.40	\$ 27, 557.57	\$ 40, 612.97	\$ 21, 086.71
---		---	---	---	---	---	---	---	---
20		\$ 14, 591.98	\$ 2, 534.29	\$ 2, 400.00	\$ 19, 526.26	\$ 13, 037.40	\$ 27, 557.57	\$ 40, 612.97	\$ 21, 086.71
Total (VP)									\$ 157, 505.97
Índices económicos									
VPN	\$ 23, 105.97								
CAUE	---								
BAUE	\$ 3, 093.40								
B/C	1.17								
TRI_Elementos_sombreado (años)			16.86						
TRI_Fuentes_iluminación (años)			4.66						

Como resumen, en la siguiente Figura 5.14, se muestran la comparación de la demanda energética por CT vs el costo por el consumo de energía por dichas cargas para las configuraciones evaluadas; demostrando de esta manera la configuración de mínimo costo anual en al que se tuvo mayores ahorros económicos.

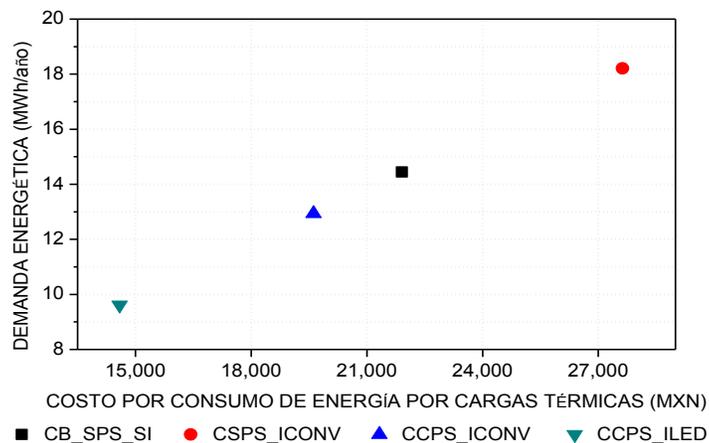


Figura 5.14. Comparación de las configuraciones de mínimo costo anual en relación a la demanda energética por cargas térmicas.

De igual manera, en la Figura 5.15 se muestran la comparación del costo por inversión vs el costo por el consumo de energía eléctrica de acuerdo al tipo de fuente de iluminación; demostrando de esta manera la configuración en la que se obtuvo el mínimo costo y por ende los mayores ahorros económicos.

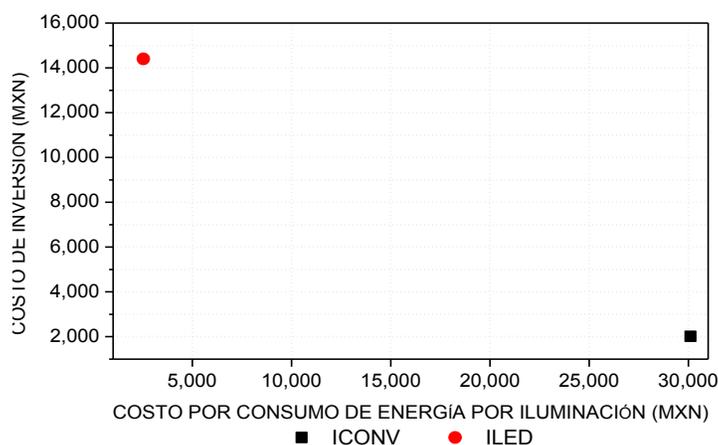


Figura 5.15. Comparación del tipo de fuente de iluminación con el mínimo costo anual por consumo de energía eléctrica en relación al costo de inversión.

Como dato adicional, al considerar la cantidad de emisión de contaminantes al medio ambiente por consumo de energía eléctrica debido a este tipo de fuente de iluminación de tipo incandescente, este se estima que se pueden emitir 11.6 tCO₂/año comparados con los 0.97 tCO₂/año que se puedan emitir por las fuentes de iluminación de tipo LED.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo, se presentan las conclusiones de acuerdo a los resultados obtenidos de las configuraciones evaluadas y analizadas al implementar las estrategias de ahorro y eficiencia energética en la vivienda. Estrategias que consisten en la consideración de sistemas pasivos de sombreado incorporados en las fachadas de la vivienda y, por otro lado, la sustitución del diseño de iluminación interior de tipo incandescente por uno de alto rendimiento lumínico y bajo consumo energético (LED); esto con la finalidad de abatir las ganancias de calor al interior de cada zona térmica, así como la de cada espacio de mayor interés (donde se encuentran incorporados los sistemas pasivos de sombreado). Así mismo, se presenta una estimación de la demanda energética por cargas térmicas al considerar un *setpoint* o temperatura de zona de confort. Cargas térmicas donde también se valoran los efectos atribuidos por dichas estrategias, las cuales al someterlas a técnicas de evaluación económica mediante los indicadores económicos más importantes desde el punto de vista financiero, se permite comparar y determinar la configuración en términos monetarios, para así determinar la configuración viable que permita el menor consumo energético y por ende ahorro económico, y por otro lado, que permita recuperar la inversión en el menor tiempo dentro del plazo u horizonte de análisis.

6 Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

En este trabajo de investigación, se realizó una evaluación y análisis del comportamiento térmico-energético de una vivienda residencial-plus, donde se implementaron estrategias de ahorro y eficiencia energética en edificaciones (mediante sistemas pasivos de sombreados incorporados en las fachadas, y la aplicación de fuentes de iluminación de alto rendimiento lumínico y bajo consumo energético). La vivienda está construida en dos plantas, con una orientación Este-Oeste, donde la relación pared-vidriado se encuentran en mayor porcentaje (39.40 y 25.32% respectivamente); asimismo, la envolvente presenta materiales de construcción con una alta masa térmica. Aunado a lo anterior, la condición climática (cálido-subhúmedo) en el sitio de estudio, desfavorecen el estado de la temperatura de confort al interior de la vivienda. Este proyecto de investigación se llevó a cabo con la finalidad de abatir las temperaturas al interior, y por ende, la demanda energética por cargas térmicas de enfriamiento necesarias para mantener una temperatura de confort; que al someter la estimación de cargas térmicas bajo técnicas de evaluación económica, por una parte, se obtuvieron ahorros desde el punto de vista monetarios atribuidos a la implementación de dichas estrategia, así como el rendimiento por cada peso invertido (B/C); y por otra parte, se obtuvo el tiempo de retorno de las inversiones tanto de los sistemas pasivos de sombreado como de las fuentes de iluminación.

Para el estudio, se hizo el uso del programa de simulación TRNSYS®. Herramienta computacional que permite simular sistemas energéticos (en edificaciones para el caso de estudio) en estado transitorio. Para de esta manera predecir la actividad térmica al interior de la vivienda, así como la estimación de la demanda energética por cargas térmicas, ésta bajo un intervalo de temperatura de confort (21-26°C) en función a la temperatura del medio exterior en el sitio de estudio.

Con el objetivo de estudiar los efectos atribuidos a la implementación de las estrategias de ahorro y eficiencia energética sobre el comportamiento térmico-energético; se evaluaron cuatro configuraciones de la vivienda, en las que se consideraron las ganancias internas por iluminación artificial, así como por los efectos de sombreado. Esto con la finalidad de poder diferenciar y cuantificar las ventajas y/o desventajas (sobre la disminución de temperatura y demanda energética) al ir comparando cada configuración, una respecto a la anterior; dicho esto, a continuación se mencionan las conclusiones:

6.1.1 Comportamiento térmico al interior de cada zona térmica

Al implementar las estrategias de ahorro y eficiencia energética mediante la configuración **CCPS_ILED**, y al comparar los resultados (respecto al mes de Mayo) con los de la configuración **CSPS_ICONV**, se obtuvo que:

- En el caso de la ZT1, se permite abatir la temperatura promedio hasta un 15.8% (5.8°C) debido a que en esta zona térmica se encuentra el elemento de sombreado de mayor extensión; de modo que la máxima temperatura promedio alcanzada en esta zona térmica es de 30.8°C.
- Para la ZT2, los efectos de sombreado causados por el mismo diseño de la vivienda de la PA, permite disminuir la temperatura en un 11.2% (4.1°C), por lo que temperatura promedio máxima registrada es de 30.3°C respecto a este mes.

En cuanto a las ZT3 y 4, siendo las zonas que presentan los techos expuestos a la radiación solar durante todos los días del año; aun así se disminuyó las temperaturas y se concluye que:

- Para la ZT3, la disminución de la temperatura es debido principalmente por el tipo de fuentes de iluminación. En el caso de los efectos de sombreado, éstos repercuten de una menor manera; por lo que debido a ello se permite abatir la temperatura a 6.5% (2.3°C), de donde resulta que la mayor temperatura máxima promedio alcanzada es de 33.0°C.
- Y en cuanto a la última ZT4, se permite disminuir la temperatura a 9.6% (3.4°C) debido principalmente por la función del sistema pasivo de sombreado integrado en esta zona con orientación al Este; de manera que la temperatura promedio máxima alcanzada para esta zona es de 31.8°C.

Cabe mencionar, que otro factor que influyó también con mayor impacto tanto en el aumento de las temperaturas y cargas térmicas para estas dos zonas térmicas, fue debido al coeficiente de absorbanza del material de la última capa externa del techo (impermeabilizante, rojo-terracota), ya que su aplicación de este tipo de material sería más viable para climas fríos que para climas cálidos; concluyendo de esta manera que para éste último, su aplicación sería más conveniente un color claro.

6.1.2 *Comportamiento térmico al interior de los espacios de mayor interés*

En esta sección, se presentan las conclusiones de los resultados para aquellos espacios de la vivienda donde se encuentran incorporados los sistemas pasivos de sombreado. Asimismo, éstos corresponden al día más caluroso del año, el cual fue el 3 del mes de Mayo. De acuerdo a los resultados de la misma comparación de configuraciones, se concluye que:

- Para el espacio correspondiente a la Sala/Comedor, se permite la temperatura en el entorno interior a 14.7% (5.6°C), de modo que en este espacio se alcanza una temperatura máxima de 32.5°C (para las 5:00 p.m.).
- En cuanto al espacio de la Recámara 3 de la PA, al implementar las estrategias, se reduce la temperatura al interior a 7.9% (3.2°C), lo cual corresponde a la temperatura máxima alcanzada de 36.7°C a las 5:00 p.m.
- Y para el último espacio correspondiente a la Sala de TV de la PA, permite abatir la temperatura en el espacio interior a 5.0% (1.9°C), de modo que temperatura máxima alcanzada es de 36.8°C.

6.1.3 *Cuantificación de energía por cargas térmicas e iluminación*

Es indiscutible que de la implementación de las medidas de ahorro energético en la vivienda se obtuvieron beneficios substanciales. Las cargas térmicas de enfriamiento se redujeron significativamente; sin embargo, cabe mencionar que las cargas térmicas de calentamiento se vieron incrementadas (en invierno), pero dicho incremento no tuvo mayor impacto dado que en términos de demanda global anual por cargas térmicas, la reducción de la demanda fue significativa, y se concluye que:

- Al implementar las medidas de ahorro correspondientes a los sistemas pasivos de sombreado, estos permiten abatir la demanda energética de manera anual por cargas térmicas de enfriamiento a 29.4% (5.32 MWh/año).
- Y al sustituir las fuentes de iluminación, estos permiten abatir la demanda energética de manera anual por cargas térmicas de enfriamiento a 27.2% (3.48 MWh/año).
- Por lo que al implementar ambas medidas, se permite reducir la demanda energética de manera global y anual a 47.2% (8.59 MWh/año), con lo cual se estima una demanda de 9.6 MWh/año.
- Por otro lado, el ahorro por consumo de energía eléctrica anual debido a la sustitución del tipo de fuente de iluminación, se reduce a 91.6% (18.18 MWh/año), de manera que el consumo de energía eléctrica por iluminación es de 1.67 MWh/año.

De esta manera queda claro que el impacto de la estimación energética por la reducción de las CTE es mucho mayor que las generadas por el incremento de las CTC, de tal manera que, la estimación de la demanda energética de forma global y anual requerida para mantener el acondicionamiento en la vivienda, se reduce de 18.21 a 9.61 MWh/año. Por otro parte, la emisión de contaminantes al ambiente también se ven reducidas de 10.6 a 5.6 tCO₂/año; y debido a la iluminación, estas se disminuyen de 11.6 a 0.97 tCO₂/año.

6.1.4 *Análisis económico*

Mediante técnicas de evaluación económica que implica a la vez los índices económicos más importantes a nivel financiero, se valoró las contribuciones atribuidas a las estrategias de ahorro y eficiencia energética en términos monetarios, y con ello llevar el riesgo que conlleva al evaluarlos a través del tiempo al considerar una tasa de descuento, para de esta manera acercarse a lo más posible que pueda suceder en la vida real al considerar un periodo de análisis, y por lo tanto permitir determinar la rentabilidad y por ende la viabilidad al considerar las estrategias. Dicho lo anterior, se concluye que:

- Al considerar la implementación de los elementos de sombreado, se reducen los costos de manera anual derivados por demanda energética a 29.0%, de modo que los beneficios obtenidos son de \$ 8, 013.25 pesos por año.
- En cuanto a la sustitución de las fuentes de iluminación y su efecto en los costos por cargas térmicas, estas permiten reducir a 25.6%, por lo tanto los beneficios obtenidos son de \$ 5, 024.15 peso anuales.
- Por otro lado, derivado de la sustitución de este sistema de iluminación, por consumo eléctrico se tienen grandes ahorros de \$ 27, 5757.57 pesos anuales, esto debido a su alto rendimiento lumínico y bajo consumo energético que tienen esta lámparas.

De acuerdo a éstos beneficios y los índices económicos se concluye que:

- De acuerdo al VPN, después de a ver cubierto la inversión y demás costos (éstos en su forma anual) se tiene ganancias al final del horizonte de análisis de \$ 23, 105.97 pesos, por lo que
- Los beneficios anual de acuerdo al BAUE, se obtienen \$ 3, 093.40 pesos.
- En cuanto a la relación B/C este es de 1.17, el cual indica que de acuerdo a los beneficios, se recupera la inversión y como adicional se tienen ganancias de \$ 0.17 pesos por cada peso invertido, lo cual permite obtener las ganancias al final del periodo de análisis.

Por último se tiene el tiempo en que llevara en recuperar las inversiones tomando en cuenta la tasa de descuento, para de esta manera considerar la pérdida que pueda sufrir el poder adquisitivo de los beneficios en el tiempo; de acuerdo al TRI se concluye que:

- Para el caso de los elementos de sombreado, estos se recuperarán en un plazo de 16 años con 10 meses.
- Y en cuanto al tiempo que tomará para recuperar el costo capital por las fuentes de iluminación, este llevará un lapso de 4 años 8 meses.

Se tiene que tomar en cuenta que todos estos índices económico mencionados anteriormente, están considerados bajo una tasa mínima de rendimiento exigido en el horizonte de análisis, por lo cual al reducir la tasa hasta un 8 o 7.5% se pueden obtener beneficios anuales de más de \$ 10, 000.00 pesos de acuerdo al BUAE, y alcanzar inclusive menor tiempo en el retorno en las inversiones.

6.2 Recomendaciones para trabajos futuros

Enseguida se enlistan las recomendaciones que se pudieran considerar en el análisis de comportamiento térmico-energético de la vivienda para de alguna u otra manera se pudieran ver los pros y contras sobre las demandas energética y con ello permitir aplicar criterios más objetivos mediante la evaluación económica.

- Para el techo, considerar algún impermeabilizante claro (o con menor absorbancia) para reducir las ganancias de calor.
- O en su caso, sustituir el impermeabilizante por un recubrimiento reflectivo para reducir las cargas térmicas en las zonas térmicas de la planta alta, lo cual se verá reflejado en un ahorro económico al reducir las cargas térmicas.
- Implementar más elementos de sombreado como protección de superficies vidriadas de ventanas y puertas; para que de esta manera se disminuyan las ganancias internas de calor por la incidencia de los rayos de sol a través de estas superficies.
- Considerar las infiltraciones, ya que estas tendrán un efecto sobre la temperatura al interior, tanto en los meses de invierno, como para los meses de verano.
- Considerar las ganancias internas por la presencia y actividad de personas, ya que en función al número y tipo de actividad, repercutirán sobre el aumento de la temperatura al interior y por ende la demanda energética por cargas térmica.
- De igual manera, considerar si es el caso en que se tuvieran otras ganancias internas por aparatos eléctricos al interior de la vivienda.
- Considerar el vidriado de doble panel en las ventanas para reducir las cargas térmicas.
- Reducir la tasa de descuento (>6.04%) para determinar las ganancias en todo el periodo de análisis y de manera anual.

Referencias

- Akash S., Saibal S., Jhumoor B., Arindam D., “*Evaluation of Impact of Shading Devices on Energy Consumption of Buildings in Tropical Regions*”. Journal of Energy Resources Technology, Vol. 136, 2014.
- Arballo B., Kuchen E., Alamino N. Y., Alonso F. A., “*Energy Efficiency and Comfort in Public Buildings by Multiobjective Optimization*”, Conference VII CRETA- Congreso de Tecnología de la Arquitectura, At: San Juan, Argentina. 2016.
- ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004, Thermal Environment Conditions for Human Occupancy, 2004.
- ASHRAE. ASHRAE handbook of fundamentals. 2001.
- Aston T. S, The Industrial Revolution, Oxford University Press, Lourdes, 1946.
- Baca U. G., Fundamentos de INGENIERÍA ECONÓMICA. MAGRAW-HILL/INTERAMERICANA, 2007.
- Beltrán de Q., M., El Sol en la Mano, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, 1937.
- Bodart M., De Herde A., “*Global energy savings in offices buildings the use of daylighting*”. Energy and buildings, Vol. 34, págs. 421-429, 2002.
- Bowen A.,” *Passive and Low Energy Ecotechniques*”, Proceeding of the Third International PLEA Conference, Mexico City, 1984.
- Bradley D., Kummert M.,” *NEW EVOLUTIONS IN TRNSYS – A SELECTION OF VERSION 16 FEATURES*”, Building simulation 2005, Ninth International IBPSA Conference Montréal, Canada 2005.
- Byung L. A., Cheol Y J., Seung B. L., Seunghwan Y., Hakgeun J., “*Effect of LED lighting on the cooling and heating loads in office buildings*”. Applied Energy, Vol. 113, págs. 1484-1489, 2014.
- Camarano S., Pellegrino A., Lo Verso V., Aghemo C. “*Daylighting design for energy saving in a building global energy simulation context*”. Procedia Energy, Vol. 78, págs. 364-369. 2015.
- Candanedo L., Feldheim V., Dumont E., Pierret S., Deramaix D. “*Building energy and light simulation for the design of pasive-apartment buildings in Belgium*”. In "BSO14 Building Simulation and Optimization Conference", London, England, 2014.
- Centro de Estudios de Finezas Públicas, El Sector Eléctrico en México 1980-2006, Palacio de San Lázaro, México, 2006.
- Centro de Estudios de Finezas Públicas, El Sector Eléctrico en México 1980-2006, Palacio de San Lázaro, México, 2006.
- Centro de Investigación Económica, El petróleo en México: Actualidad y futuros desafíos, México, 2013.

- Chapa Carreón J, Manual de instalaciones de alumbrado y fotometría, LIMUSA NORIEGA EDITORES, 2004. SMII, Sociedad Mexicana de Ingenieros en Iluminación, NIVELES MEDIOS DE ILUMINACIÓN AL PLANO DE TRABAJO RECOMENDADOS PARA LA REPÚBLICA MEXICANA, 2015.
- Charrón, R., Athienitis, A. y Beausoleil-Morrison, “*Tools for the Design of Zero Energy Solar Homes*”, 30th Annual Conference of the Solar Energy Society of Canada, Vancouver, Canada, 2005.
- Código de Edificación de Vivienda, Comisión Nacional de Vivienda CONAVI, segunda edición, CDMX, 2010.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía, Análisis de la evolución del consumo eléctrico del sector residencial entre 1982 y 2014 e impactos de ahorro de energía por políticas públicas, Cuadernos de la Conuee No.1, México, 2016.
- Duffy M. J., Hiller M., Bradley D., E., Keilholz W., Thornton J. W., TRNSYS – FEATURES AND FUNCTIONALITY FOR BUILDING SIMULATION 2009 CONFERENCE, Building simulation 2009, Eleventh International IBPSA Conference Glasgow, Scotland, 2009.
- Fanger P. O., “*Assessment of man’s thermal comfort in practice*”, British Journal of Industrial Medicine, Vol., 30(4), págs. 313-24, 1973.
- Fanger P.O., “*Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*”, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.
- Fiksel A., Thornton J. W., Klein S. A., Beckman W. A., “*Developments to the TRNSYS Simulation Program*”, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 117, Pág. 123-127, 1995.
- Franzetti C., Fraisse G., Achard G. “*Influence of the coupling between daylight and artificial light on the thermal loads in office buildings*”. Energy and Buildings, Vol. 36, págs. 117-126, 2004.
- García J.R., Diseño Bioclimático, Universidad Autónoma Metropolitana, México, 1996.
- Gómez G. E., Fundamentos de Óptica: Radiometría y Fotometría, Universidad de Sevilla 2006-2009.
- Gómez G. E., Fundamentos de Óptica: Radiometría y Fotometría, Universidad de Sevilla 2006-2009
- Hashemi A., Kathami K., “*Effects of solar shading on thermal comfort in low-income tropical housing*”. Energy Procedia, Vol. 111, págs. 235-244, 2017.
- Hong, T., Chou S. K., Bong T. Y., “*Building Simulation an overview of developments and information sources*”, Building and Environment, Vol. 35, págs. 347-361, 2000.
- Humphreys M. “*Outdoor Temperatures and Comfort Indoors*”, Building Research and practice, Vol. 6.
- Incropera F., Dewitt D., Fundamentos de Transferencia de Calor, Prentice, Edición Hall. México, 2005.
- Instituto de Astronomía, Astronomía de Altas Energías, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2016.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Censo de Población y Vivienda 2015, México, 2016.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Panorama Sociodemográfico de México, Encuesta intercensal 2015. México 2015.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Situación Geográfica de México, México, 2017.
- International Energy Agency, “*Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a Clean Energy System*”, Executive Summary, International Energy Agency, OECD/AIE, 2012.
- International Energy Agency, World Energy Balance, edición 2014.
- International Energy Agency, World Energy Balance, edición 2017.
- ISO/FDIS 7730, International Standard, Ergonomics of the thermal environment Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005.
- Jiménez J. V., Aguilar R. M., Iluminación y Color, Ed. UPV, Valencia, España, 1995.
- Judkoff R., Neymark J., “*International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method*”, National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401 United States. 1995.
- Khin A., Salleh E., Haw C., Yusof M., “*Potential of shading devices and glazing configurations on cooling energy saving for high-rise office buildings in hot-humid climates: The case of Malaysia*”. International Journal of Sustainable Built Environment, Vol. 5, págs. 387-399, 2016.
- Kim G., Lim H. S., Lim T. S., Schaefer L., Kim J. T., “*Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings*”. Energy and Buildings, Vol. 46, págs. 105-111, 2012.
- Klein S.A. et al., “*TRNSYS 16: A Transient System Simulation Program*”, Laboratorio de Energía Solar, Universidad de Wisconsin, Madison, EE.UU., 2016.
- Lai K., Wang W. y Giles H. “*Performance analysis of an energy efficient building prototype by using TRNSYS*”. 22nd International Compressor Engineering Conference at Purdue, Indiana, EE. UU, 2014.
- Lee J., Alshayeb M., Chang D. “*A Study of Shading Device Configuration on the Natural Ventilation Efficiency and Energy Performance of a Double Skin Façade*”. Procedia Engineering, Vol. 118, págs. 310-315. 2015.
- Leyva C., A., “Principios Físicos de la Radiación Solar”. Memorias del curso de actualización de energía solar 1986. Laboratorio de Energía Solar I.I.M de la UNAM Temixco, Molerlos, México, 1986.
- Li D. H.W., Lam J. C., “*Evaluation of light performance in office buildings with daylighting controls*”. Energy and Buildings, Vol. 33, pág. 733-803, 2001.
- Lin Z, Deng S.”*A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—developing*

- a thermal comfort model for sleeping environments*". Building and Environment 2008; 43:70–80.
- Mitalas, G. P. and Arseneault, J.G., "*FORTRAN IV Program to Calculate z-Transfer Functions for the Calculation of Transient Heat Transfer Through Walls and Roofs*", Division of National Research Council of Canada, Ottawa, 1972.
- Montoya G. F., Peña G. A., Juaidi A., Manzano A. F., "*Indoor Lighting Techniques: an overview of evolution and new trends for energy saving*". Energy & Buildings, Vol. 140, págs. 50-60, 2017.
- Morgan P. P., Hansen M., Tsao J. Y., "*LED lighting efficacy: Status and directions*". Comptes Rendus Physique, Vol. 19, págs.134-135, 2018.
- Neymark, J., Judkoff, R. Building Energy Simulation Test y el método de diagnóstico para calefacción, ventilación, equipos de aire acondicionado Modelos; Laboratorio Nacional de Energías Renovables: Golden, CO, EE. UU., 2004.
- Nicol J. F., Humphreys M. A., "*Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings*", Energy and Buildings, Vol. 34, págs. 563-572, 2002.
- Nikolaou T., Stavrakakis G., Skias I., Kolokotsa D. "*Contribution of shading in improving the energy performance of buildings*". 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, Crete island, Greece, 2007.
- NORMA MEXICANA, NMX-AA-164-SCFI-2013, EDIFICACIÓN SUSTENTABLE - CRITERIOS Y REQUERIMIENTOS AMBIENTALES MÍNIMOS
- Olano C., Herrera S., Historia del petróleo, Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, 2015. International Energy Agency, World Energy Outlook, edición 2014.
- Olgay V., Design With Climate, Princeton University Press, Princeton, USA, 1963.
- Orosa J. A., "*Research on general thermal comfort models*", European Journal of Scientific Research, Vol., 27, págs. 217–227, 2009.
- Ozisik M., N., Heat Transfer, Edición. McGraw-Hill, 1985.
- Philips Lighting, Tarifa Alumbrado, España, 2017.
- Philips, Tarifa Alumbrado Profesional, 2014, España.
- Philips Lighting, LuxSpace empotrable, modelo DN570B LED12S/830 PSE-E C WH,
- Ramírez A., El Paradigma de la Medición de la Luz (primera parte), 2013.
- RETILAP, Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público, Bogotá D.C, 2010.
- Roisin B., Bodart M., Deyener A., D' Herdt P. "*Lighting energy savings in office using different control system and their real consumption*". Energy and Buildings, Vol. 40, págs. 514-523, 2008.
- Sánchez D., Sánchez G. C., Rubio C., "*The adaptive approach to thermal comfort in Seville*", ANALES de Edificación, Vol. 2, págs. 38-48, 2016.

- Sears F., Semansky M., Young H., Freedman R., University Physics with Modern Physics, San Francisco: EE.UU, Edición Pearson, 2008.
- Secretaría de Energía, Balance Nacional de Energía 2015, México, 2016.
- Secretaría de Energía, Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2016-2030 PROSEDEN, México, 2017.
- Secretaría de Energía, Prospectiva del Sector Eléctrico 2012-2026, México, 2012.
- Seem, J. E., "*Modeling of Heat in Buildings*," Ph. D. thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin Madison (1987).
- SEMARNAT, Reporte de Registro Nacional de Emisiones. Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental Dirección General de Políticas para el Cambio Climático. CDMX, 2018.
- Shan R. "*Optimization for heating, cooling and lighting load in building façade design*". Procedia Energy, Vol. 57, págs. 1716-1725, 2014.
- Stephenson, D. G. y Mitalas, G. P., "*Calculation of Heat Conduction Transfer Functions for Multi-Layer Slabs*", ASHRAE Annual Meeting, Washington, D.C., August 22-25, 1971.
- Szokolay S., "*Passive and low energy design for thermal and visual comfort*". Passive and Low Energy Ecotechniques Applied to Housing (PLEA '84) Pergamon Press, New York, US, 1984.
- Szokolay, S., Environmental Science Handbook, The Construction Press, Lancaster, England, 1981.
- Torres A. C., Serrano A. J., Macías M. E., Trejo T. B., "*Simulación energética de prototipo de vivienda de interés social para evaluar el confort térmico*". Revista de Aplicaciones de la Ingeniería, Vol. 3, págs. 83-89, 2016.
- Torres S., Evans J. M. "*Diseño arquitectónico y consumo de energía estudios paramétricos con Energy-10*". AVERMA. Vol. 3. Recuperado de <http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/1999/1999-t008-a041.pdf>
- Tzempelikos A., Athienitis A., "*The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand*". Solar Energy, Vol. 81, págs. 369-382, 2007.
- UNE, EN 12464, Light and lighting. Lighting of work place Part 1: Indoor work place, 2012.
- United Nations Environment Programme, Climate change, 2016.
- VIKON, Manual del electricista, VIACON conductores Monterrey, México, 2013.
- Yunus C., Transferencia de calor y masa. Edición Mcgraw-Hill, 2011.

Anexos

Anexo A: Diseño de iluminación en interior mediante el método de lumen.

Como ejemplo del diseño de un sistema de iluminación interior, a continuación se describe el método de iluminancia en apego a la norma oficial mexicana, que fue requerida para establecer los niveles de iluminación en espacios; así como la implementación de otra norma mexicana que permite valorar la cantidad de potencia instalada por iluminación en relación a la superficie. Con las cuales, se determinó el número de lámparas (por los dos tipos de fuente) requeridas por el *Type 56*.

El método de iluminancia consiste en llevar a cabo los siguientes pasos para el diseño de iluminación:

- **Definir características del local o recinto;** se refiere a que tipo de espacio o recinto, así como la actividad que se va a realizar allí, ya que depende de esto se establecen los niveles de iluminación. Para el ejemplo a diseñar corresponde a la sala de la PB.
- **Parámetros del local;** aquí se requieren datos relacionados con las dimensiones, la forma, colores, característica de la superficie del espacio, así como la reflectividad y la altura del plano de trabajo.

Para el ejemplo, la forma es rectangular con dimensiones: largo $l=5.10$, ancho $a=4.5$ y una altura de $H=3$ m, las superficies son lisas, claras, que en el caso del piso es color gris; por lo que los coeficientes de reflexión son 70, 50 y 20% para el techo, pared y piso respectivamente. En cuanto el plano de trabajo se tiene una altura de $h'=0.85$ m.

- **Niveles de iluminancia (E_m);** se definen la cantidad de flujo luminoso por unidad de superficie (en lux), estos son establecidos por alguna norma. En la Tabla AA-5.1, se definen los niveles de iluminancia por la NOM 025 –STPS-2008, la cual, presenta valores de referencias que fueron requeridos para llevar a cabo los diseños de iluminación para cada espacio.

Tabla AA-5. 1. Niveles de iluminancia para vivienda.

Tipo de local y actividad	Iluminancia media (lux)		
	Mínimo	Recomendado	Óptimo
Residencial, vivienda			
Cocinas	200	300	500
Salas de estar, comedor	100	200	300
Baños	100	150	200
Recamaras	100	200	300
Vestíbulo	100	200	300
C. lavado	200	300	500
Escaleras, pasillos	60	100	200

Fuente: SMII, 2007.

- **Tipo de lámpara y luminaria:** para el ejemplo, se emplea una fuente luminosa de tipo LED, con un flujo luminoso de $\Phi_L=1350$ lm, una potencia de $P=11$ W, una rendimiento lumínico de $\eta=123$ lm/W y un IRC >80 . En cuanto a la luminaria de acuerdo al fabricante es de tipo empotrable al techo de alto brillo (Philips, 2017).

- **Determinación del índice local (k);** describe el tamaño del espacio en relación a las dimensiones del mismo en términos de índices (del 1 al 10). El *k* también guarda relación con la distancia que existe entre el plano de trabajo y el plano de la luminaria.

Para determinar el *k* en el ejemplo, conviene expresarlo para un sistema de iluminación directo, pues de acuerdo al diseño de luminarias el flujo luminoso estará dirigido entre el 60 y 90% hacia el plano de trabajo y, el resto en la parte superior (Chapa, 2004); por lo tanto, la expresión del *k* se determina como:

$$k = \frac{l * a}{h'(l + a)} \tag{AA 5.1}$$

donde las variables *l*, *a* y *h'* ya fueron descritas anteriormente; teniéndose como resultado para el ejemplo un *k* =0.96.

- **Coefficiente o factor de utilización (Cu);** es un factor que refleja el hecho de que no todos los lúmenes producidos por una luminaria alcanzan la superficie del plano de trabajo. El *Cu* depende de la lámpara y la altura de la luminaria en el plano de trabajo, así como de las dimensiones del recinto o espacio, las superficies y reflectancias de las mismas. El *Cu* es determinado a partir de información fotométrica presentada en tablas proporcionadas por los fabricantes; en las cuales también es requerido el valor del *k* determinado anteriormente.

Muchas de las veces se tienen valores de *k* entre dos valores encontrados en las tablas, por lo que se tiene que interpolar. Siguiendo con el ejemplo, en la Figura AA-5.1, se muestra las características fotométricas de la luminaria proporcionadas por el fabricante; en la misma figura, se muestra la determina del *Cu*; donde el coeficiente de utilización después de interpolarlo, se tiene un valor de 0.80. Este valor significa que el 80% de la potencia luminosa es aprovechada mientras que el 20% es absorbido por las paredes, techo y por la suciedad que pueda ser acumulada en la lámpara.

Utilisation factor table

Room Index k	Reflectances for ceiling, walls and working plane (CIE)										
	0.80	0.80	0.70	0.70	0.70	0.70	0.50	0.50	0.30	0.30	0.00
	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.30	0.30	0.10	0.30	0.10	0.00
	0.30	0.10	0.30	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00
0.60	0.67	0.64	0.66	0.65	0.63	0.58	0.58	0.54	0.57	0.54	0.53
0.80	0.77	0.72	0.76	0.74	0.72	0.66	0.66	0.62	0.65	0.62	0.61
1.00	0.85	0.79	0.84	0.81	0.78	0.73	0.73	0.69	0.72	0.69	0.67
1.25	0.92	0.85	0.91	0.87	0.84	0.79	0.79	0.76	0.78	0.75	0.73
1.50	0.98	0.89	0.96	0.92	0.88	0.84	0.83	0.80	0.82	0.79	0.78
2.00	1.06	0.94	1.03	0.98	0.93	0.90	0.89	0.87	0.88	0.86	0.84
2.50	1.11	0.98	1.08	1.02	0.97	0.94	0.93	0.91	0.92	0.90	0.88
3.00	1.14	1.00	1.11	1.05	0.99	0.97	0.96	0.94	0.94	0.93	0.91
4.00	1.18	1.02	1.15	1.08	1.01	1.00	0.98	0.97	0.97	0.96	0.93
5.00	1.21	1.04	1.17	1.09	1.03	1.01	1.00	0.99	0.98	0.97	0.95

Ceiling mounted

Figura AA-5. 1. Determinación del coeficiente de utilización (Cu).

Fuente: Philips, 2017.

- **Factor de mantenimiento (FM);** Es la relación de la iluminancia promedio en el plano de trabajo después de un periodo determinado de uso de una instalación, y la iluminancia promedio obtenida al empezar a funcionar la misma como nueva (RETILAP, 2010). En la Tabla AA-5.2 se muestran los valores de referencia en porcentaje del estado de limpieza. Por consiguiente, el valor de FM para el ejemplo se considera un 0.8.

Tabla AA-5. 2. Factor de mantenimiento en relación al grado de limpieza y tipo de iluminación.

Tipo de iluminación	Estado de limpieza (%)*		
	Limpio	Medio	Sucio
Directa	75-80	70-75	60-65
Semidirecta	80	70	60
Indirecta	75	65	...
Semiindirecta	70	60	...

*Limpieza periódica anual.

Fuente: Viakon, 2013.

- **Determinación del flujo luminoso total requerido (Φ_T);** valor del flujo luminoso total que se necesita para producir el nivel de iluminancia o iluminación media (E_m) para el espacio o área de estudio. Este Φ_T es expresado como:

$$\Phi_T = \frac{E_m * l * a}{C_u * FM} \quad (\text{AA 5.2})$$

donde las variables E_m, l, a, C_u y FM ya fueron descritas anteriormente, que para el ejemplo se tiene un $\Phi_T = 3783.1$ lúmenes.

- **Número de luminarias (N_L);** se determina el número de luminarias en el área de estudio. El N_L se obtiene a partir de:

$$N_L = \frac{\Phi_T}{\Phi_L} \quad (\text{AA 5.3})$$

donde la variable Φ_L corresponde al flujo luminoso emitido por cada lámpara; para el ejemplo se tiene un $N_L = 2.8$ luminarias.

Como cada luminaria (de acuerdo el fabricante) considera una lámpara; por consiguiente se tiene el mismo número de lámparas; dicho lo anterior, la siguiente expresión permite estimar el número de lámparas para el espacio de estudio:

$$n = \frac{E_m * l * a}{\Phi_L * C_u * FM} \quad (\text{AA 5.4})$$

donde la variable n es el número lámparas en el área de estudio, que para el ejemplo corresponden a $n = 2.8$ lámparas.

- **Validación de resultados**

Para validar los resultados del N_L o n en el diseño de la iluminación para cumplir con los niveles de iluminancia (E_m) de acuerdo a la norma, el diseño de iluminación es comprobado por la siguiente expresión:

$$E_m = \frac{N_L * n * \Phi_L * C_u * FM}{l * a} \geq \text{nivles medios de iluminación establecidos por norma} \quad (\text{AA 5.5})$$

donde para el ejemplo, se tuvo un nivel de iluminancia $E_m = 100$ lux, de acuerdo a establecido por la norma.

Por otro lado, para determinar la carga conectada por iluminación en el diseño, se comprueba con forme a la norma NMX-AA-164-SCFI-2013, la cual define la Densidad de Potencia Eléctrica para Alumbrado (DPEA). Este indica la carga conectada para alumbrado por zona o superficie de construcción expresado en W/m^2 , tal como se muestra en la Tabla AA-5.3.

Tabla AA-5. 3. Densidad máxima de potencia de iluminación para vivienda.

Espacio de la vivienda	DPEA (W/m^2)
Sala	14
Comedor	14
Cocina	14
Recámara	13
Estudio	16
Pasillos	10
Escaleras	12
Patio interior	6
Alacena	12
Closet	12
Estacionamientos cerrados	3
Áreas exteriores	1.8

Fuente: Edificación Sustentable, 2013.

Para una DPEA, se determina como:

$$DPEA = \frac{P * N_L}{l * a} \quad (\text{AA 5.6})$$

El índice de carga conectada por iluminación en el diseño del ejemplo se tuvo una DPEA= 1.3 W/m^2 , por lo que se cumple con la norma mexicana.

Anexo B: Cuantificación de energía por cargas térmicas en las configuraciones

Tabla AB-5. 1. Cargas térmicas en la configuración **CB_SPS_SI**.

Meses	Cargas térmicas por enfriamiento (Q_{Cool}) (kWh)				Cargas térmicas por calentamiento (Q_{Heat}) (kWh)			
	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4
Ene.	37.22	8.46	105.64	38.85	18.95	23.83	108.02	21.78
Feb.	156.88	52.50	369.37	103.65	0.15	1.33	8.34	1.51
Mar.	297.04	112.17	682.84	175.06	1.00	3.56	16.95	3.50
Abr.	490.98	220.56	1223.48	292.91	0.00	0.00	0.00	0.00
May.	516.70	241.43	1316.28	310.94	0.00	0.00	0.00	0.00
Jun.	310.42	99.79	785.21	187.92	0.00	0.00	0.00	0.00
Jul.	343.45	107.16	873.17	208.13	0.00	0.00	0.00	0.00
Ago.	319.23	87.49	740.56	182.41	0.00	0.00	0.00	0.00
Sep.	257.40	62.52	550.95	144.10	0.00	0.00	0.00	0.00
Oct.	269.28	91.41	583.19	158.17	0.00	0.00	0.06	0.00
Nov.	134.83	39.54	275.37	86.91	0.00	0.38	5.35	0.70
Dic.	126.17	49.26	304.28	95.28	0.00	0.00	0.79	0.04
Total (MWh/año):	14.226				0.216			

Tabla AB-5. 2. Cargas térmicas en la configuración **CSPS_ICONV**.

Meses	Cargas térmicas por enfriamiento (Q_{Cool}) (kWh)				Cargas térmicas por calentamiento (Q_{Heat}) (kWh)			
	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4
Ene.	79.64	40.37	173.57	58.74	8.63	9.58	64.74	11.92
Feb.	224.71	118.88	479.25	132.29	0.00	0.08	2.49	0.22
Mar.	372.08	188.82	815.35	208.64	0.00	0.86	8.63	1.57
Abr.	572.81	315.20	1382.23	331.80	0.00	0.00	0.00	0.00
May.	601.82	342.09	1484.29	351.58	0.00	0.00	0.00	0.00
Jun.	389.33	188.77	932.74	224.35	0.00	0.00	0.00	0.00
Jul.	425.44	199.47	1027.27	246.24	0.00	0.00	0.00	0.00
Ago.	401.22	177.56	891.54	220.43	0.00	0.00	0.00	0.00
Sep.	335.64	145.09	689.69	180.09	0.00	0.00	0.00	0.00
Oct.	350.19	179.97	725.48	195.10	0.00	0.00	0.00	0.00
Nov.	206.16	107.30	386.87	117.00	0.00	0.01	1.31	0.12
Dic.	201.27	129.65	428.38	127.46	0.00	0.00	0.01	0.00
Total (MWh/año):	18.103				0.109			

Tabla AB-5. 3. Cargas térmicas en la configuración **CCPS_ICONV**.

Meses	Cargas térmicas por enfriamiento (Q_{Cool}) (kWh)				Cargas térmicas por calentamiento (Q_{Heat}) (kWh)			
	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4
Ene.	1.35	6.60	124.83	30.57	19.88	14.20	74.60	17.80
Feb.	41.37	51.45	413.47	85.12	0.24	0.54	3.95	0.93
Mar.	140.51	119.24	736.70	141.76	1.01	1.76	10.25	2.78
Abr.	290.37	234.85	1292.36	249.14	0.00	0.00	0.00	0.00
May.	320.71	259.97	1398.77	267.59	0.00	0.00	0.00	0.00
Jun.	133.11	104.99	852.43	150.13	0.00	0.00	0.00	0.00
Jul.	143.35	110.97	937.43	164.62	0.00	0.00	0.00	0.00
Ago.	130.20	100.66	806.37	142.65	0.00	0.00	0.00	0.00
Sep.	88.91	75.04	614.76	110.80	0.00	0.00	0.00	0.00
Oct.	93.98	94.75	647.11	124.29	0.00	0.00	0.01	0.00
Nov.	22.87	36.71	318.06	67.95	0.00	0.08	2.10	0.21
Dic.	13.68	45.64	360.53	81.69	0.00	0.00	0.12	0.00
Total (MWh/año):	12.780				0.150			

Tabla AB-5. 4. Cargas térmicas en la configuración **CCPS_ILED**.

Meses	Cargas térmicas por enfriamiento (Q_{Cool}) (kWh)				Cargas térmicas por calentamiento (Q_{Heat}) (kWh)			
	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4
Ene.	0.00	0.19	61.90	15.61	46.71	39.58	124.61	34.00
Feb.	9.17	8.18	297.04	60.52	3.78	3.88	11.65	4.14
Mar.	81.61	51.17	598.43	113.06	5.78	6.14	20.60	6.47
Abr.	208.97	139.86	1126.43	211.97	0.00	0.00	0.00	0.00
May.	233.10	155.80	1223.79	227.90	0.00	0.00	0.00	0.00
Jun.	59.96	24.42	696.43	119.09	0.00	0.00	0.00	0.00
Jul.	66.30	26.17	774.33	131.78	0.00	0.00	0.00	0.00
Ago.	54.27	20.73	646.58	110.35	0.00	0.00	0.00	0.00
Sep.	25.00	8.25	466.78	81.43	0.00	0.00	0.00	0.00
Oct.	28.63	18.39	495.57	93.73	0.00	0.01	0.17	0.00
Nov.	2.46	3.12	199.33	42.42	1.29	1.80	7.82	2.40
Dic.	0.01	1.20	222.75	52.05	0.01	0.12	1.61	0.17
Total (MWh/año):	9.296				0.322			

