

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Mecánica

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Análisis Térmico del Efecto de la Razón de Aspecto Área Vidriada-Pared
(RAVP) en el Consumo Energético de Edificaciones No Residenciales**

presentada por
Ing. Polar Hernández Castillo

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

Directora de tesis
Dra. Gabriela del Socorro Álvarez García

Codirector de tesis
Dr. Efraín Simá Moo

Cuernavaca, Morelos, México. Junio de 2016.



Cuernavaca, mor., 25/abril/2016

OFICIO No. DIM/088/2016

Asunto: Aceptación de documento de tesis

C. DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la C. Ing. Polar Hernández Castillo, con número de control M13CE048, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional "Análisis térmico del efecto de la razón de aspecto área vidriada-pared (RAVP) en el consumo energético de edificaciones no residenciales". 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

DRA. GABRIELA DEL SOCORRO ÁLVAREZ G.
Doctora en Ingeniería
2105850

REVISOR 1

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

REVISOR 2

DR. JESÚS ARCE LANDA
Doctor en Ingeniería
6170951

REVISOR 3

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

C.p. (Lic. Guadalupe Garrido Rivera).- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Estudiante
Expediente

Iniciales AAP/mrsr



Cuernavaca, Mor., 4 de mayo de 2016
OFICIO No. SAC/158/2016

Asunto: Autorización de impresión de tesis

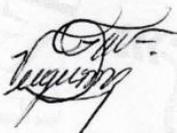
**ING. POLAR HERNÁNDEZ CASTILLO
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTE**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Análisis Térmico del Efecto de la Razón de Aspecto Área Vidriada-pared (RAVP) en el Consumo Energético de Edificaciones no Residenciales"**, 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

"CONOCIMIENTO Y TECNOLOGIA AL SERVICIO DE MEXICO"



**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



SEP TecNM
CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA

C.p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

GVGR/mcr



Dedicatorias

Este trabajo está dedicado a mi familia que son un ejemplo de honradez y superación, a mis padres: Micaela y Adrian, hermanos: Billie Jean, Adriana, Karina y Adrian, a mis sobrinos: Harumy, Fernando, Alexander, Danna y Arturo y a mi cuñado Arturo; su apoyo y confianza me impulsan para seguir superándome y alcanzar mis sueños. Sin duda alguna, son la mejor familia que Dios pudo darme.

Por supuesto, a Ramiro, por ser una luz en mi camino, por ser mi complemento y mi compañero de vida, por estar en las buenas y en las malas a mi lado y sobre todo, por tu paciencia infinita en esta etapa de mi vida, eres un orgullo para mí.

A mi nueva familia, De Aquino García, que sin conocerme, me han brindado su amor y cariño.

A la señora Teresa Olivares Galindo, por ser mi segunda madre, por apoyarme en cada decisión y en cada momento, sé que nuestro cariño perdurará siempre.

A mis grandes amigos de toda la vida, Paty, Citlalli y Beto, por sus consejos y su cariño, han sido un regalo de la vida, siempre los llevaré en mi corazón.

"Quizás no he sembrado un árbol, pero he sembrado muchas semillas y han florecido!, también me ha faltado escribir un libro y me falta mucho para ello y, espero que esta tesis sea solo el principio de las páginas que están por venir y tampoco he tenido un hijo, pero mis sobrinos son angelitos que llenan de felicidad mi vida y los he amado con cada parte de mi ser... hay cosas de la vida difícil de comprender, pero sé que cada situación y cada persona llegan a nuestra vida por alguna razón, en el momento indicado; pero sin dudarlo, sé que es hermosa y dar lo mejor de uno sin dañar a nadie es la mayor satisfacción "

Arturito:

Este trabajo es especialmente por ti, ¡jalá Dios nos preste vida para verte crecer, tu fortaleza, tu esfuerzo y tu hermosa sonrisa me motivaron para terminar mi trabajo, siendo tan pequeño me das cada día lecciones de vida, para recuperarme, para no perder la fe y para ser valiente! Eres una bendición y agradecemos tu presencia en nuestras vidas..

Agradecimientos

A Dios a la Vida y al Universe...gracias gracias gracias!!!

A la Dra. Gabriela Álvarez García y al Dr. Espain Simá Mee, por ser mis revisores en este trabajo de investigación, por los conocimientos y por el apoyo que me brindaron académica y personalmente.

A mis revisores la Dra. Yvonne Chávez Chena, Dr. Jesús Arce Landu y Dr. Jesús Ramón Villaseñor, por sus sugerencias y valiosas aportaciones durante el desarrollo de la tesis y sobre todo por los apreciables consejos que me brindaron.

A la Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros por tomarse el tiempo de revisar la tesis y las sugerencias brindadas.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENTDET) por el crecimiento académico y profesional durante la maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme los apoyos económicos para desarrollar el presente trabajo de investigación.

A la Dra. Gabriela Álvarez García, Dr. Espain Simá Mee y al Dr. Arturo Abundez Piñe por brindarme el apoyo económico para la presentación del artículo, "Análisis térmico de la RAVP en edificaciones no residenciales: simulación en Energy Plus" en el XIII Congreso Internacional Anual de la S.C.M.M. en la ciudad de Coahuacalcos Veracruz.

Al Mtro. Miguel Ángel Chagolla Aranda, por los conocimientos y consejos brindados durante el desarrollo de la tesis.

A la Dra. Gaby, Dra. Sara y Dra. Yvonne por su apoyo, consejos y palabras de aliento en todo momento.

A mis compañeros y amigos de la maestría, Diana, Citlaly, Lupita, Lulú, Paco, Daniel, Albert, Roger, Miguel Chagolla, Lino, Yair, Benjamín, Enrique, Ángel Aranda, por apoyarme en todo lo que pudieron, por su cariño y amistad sincera.

Y por supuesto a la señora Lorena, que siempre me mostró una amistad sincera, un apoyo incondicional, grandes consejos y el mejor arroz.

Y a todas las personas que conocí durante la maestría y que siempre tuvieron un gesto de amabilidad y cariño.

A todos y cada uno de ustedes de corazón, muchas gracias!!!

Índice

	Páginas
Lista de figuras	V
Lista de tablas	V
Nomenclatura	IX
Resumen	XIV
Abstract	XVI
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Revisión bibliográfica	6
1.2.1 Metodologías para la evaluación del consumo energético, sistemas HVAC, confort térmico y programas de simulación en edificaciones	6
1.2.2 Evaluación del consumo energético y el efecto de la razón de aspecto área vidriada-pared (RAVP) en edificaciones	8
1.2.3 Evaluación del consumo energético y el efecto de la razón de aspecto área vidriada-pared (RAVP) en edificaciones, orientados al confort térmico y visual	13
1.2.4 Conclusiones de la revisión bibliográfica	16
1.3 Objetivo general	17
1.4 Alcances	17
1.5 Justificación	18
1.6 Descripción general de los capítulos	18
Capítulo 2. Marco teórico	20
2.1 Envoltente de una edificación	21
2.1.1 Techos	21
2.1.2 Muros	21
2.1.3 Ventanas	21
2.1.4 Pisos	22
2.2 Transferencia de calor en envolventes	22
2.2.1 Conducción	22

2.2.2 Convección	24
2.2.3 Radiación	29
2.2.4 Valor-U	32
2.3 Propiedades y tipos de acristalamientos	34
2.3.1 Propiedades ópticas	34
2.3.2 Propiedades térmicas	35
2.3.3 Tipos de acristalamientos	35
2.4 Parámetros de eficiencia térmica en vidriados de ventanas	36
2.4.1 Coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC)	36
2.4.2 Coeficiente de sombreado (SC)	37
2.4.3 Transmitancia visible (VT)	37
2.5 Balance térmico en edificaciones	37
2.5.1 Ganancias y/o pérdidas térmicas	37
2.6 Confort térmico	41
2.6.1 Modelo de confort térmico adaptable	42
Capítulo 3. Caso de estudio y descripción de las simulaciones	44
3.1 Caso de estudio: edificación base para la elaboración de indicadores de la NOM-008-ENER-2001	45
3.2 Descripción de las simulaciones	50
3.2.1 Características climáticas	50
3.2.2 Descripción del estudio paramétrico	57
3.2.3 Metodología utilizada	58
Capítulo 4. Programas de simulación y calibración	62
4.1 Programas de simulación	63
4.1.1 EnergyPlus	63
4.1.2 Proceso de simulación en EnergyPlus	73
4.2 Calibración de DesignBuilder y EnergyPlus	76
Capítulo 5. Análisis de resultados	81
5.1 Datos climatológicos mensuales: irradiación global, temperatura y humedad relativa	82
5.1.1 Villahermosa	82

5.1.2 Mérida	85
5.1.3 Monterrey	87
5.1.4 Hermosillo	90
5.1.5 México D. F.	92
5.1.6 Xalapa	95
5.2 Ganancias y pérdidas de calor de la edificación base no residencial por efecto del vidriado	97
5.2.1 Villahermosa	98
5.2.2 Mérida	99
5.2.3 Monterrey	99
5.2.4 Hermosillo	100
5.2.5 México	101
5.2.6 Xalapa	102
5.2 Consumo energético anual para la edificación base no residencial con reflectancia de 0.25	103
5.2.1 Villahermosa	104
5.2.2 Mérida	104
5.2.3 Monterrey	105
5.2.4 Hermosillo	107
5.2.5 México D. F.	108
5.2.6 Xalapa	109
5.3 Consumo energético anual para la edificación base no residencial con reflectancia de 0.80	110
5.3.1 Villahermosa	111
5.3.2 Mérida	112
5.3.3 Monterrey	114
5.3.4 Hermosillo	115
5.3.5 México D. F.	116
5.3.6 Xalapa	118
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones	121
6.1 Conclusiones	122
6.2 Recomendaciones	125
Referencias	126

Anexo A. Ganancias y pérdidas de calor por efecto del vidriado	130
Anexo B. Análisis térmico de la RAVP en edificaciones no residenciales: simulación en energyplus	138

Lista de figuras

	Páginas	
Figura 1. 1	Uno de los primeros rascacielos en emplear muro-cortina (Iturriaga, 2008).	2
Figura 1. 2	Consumo final total de energía 2014 (Secretaría de Energía, 2015).	4
Figura 1. 4	Elementos que más energía consumen en edificaciones.	4
Figura 2. 1	Conducción de calor en un elemento vertical.	23
Figura 2. 2	Transferencia de calor por convección.	25
Figura 2. 3	Radiación entre dos superficies.	31
Figura 2. 4	Transferencia de calor en cuerpos opacos y transparentes.	32
Figura 2. 5	Balance térmico en una edificación.	38
Figura 3. 1	Ubicación de los materiales de construcción.	46
Figura 3. 2	Ubicación de la película de control solar, a) climas cálidos, b) clima frío.	48
Figura 3. 3	División climática de la República Mexicana.	52
Figura 3. 4	Porcentaje de tipo de clima en territorio nacional.	54
Figura 3. 5	Estudio paramétrico para la ciudad de Villahermosa.	60
Figura 3. 6	a) Edificio no residencial de 5 pisos para la ciudad de México D. F., b) edificio no residencial de 3 pisos para otras ciudades.	61
Figura 4. 1	Esquema del programa EnergyPlus.	64
Figura 4. 2	Diagrama del volumen de control del balance de calor exterior.	70
Figura 4. 3	Sistema vidriado con dos capas de vidrio que muestra las variables usadas en las ecuaciones de balance de calor.	72
Figura 4. 4	Proceso de simulación de <i>EnergyPlus</i> con interfaz <i>DesignBuilder</i> .	74
Figura 4. 5	Modelo geométrico en <i>DesignBuilder</i> .	75
Figura 4. 6	Carga de enfriamiento para diferentes edificaciones, con RAVP del 20%.	77
Figura 4. 7	Carga de enfriamiento para diferentes edificaciones, con RAVP del 40%.	79
Figura 4. 8	Carga de calentamiento para diferentes edificaciones, con RAVP del 40%.	79
Figura 5. 1	Radiación solar promedio acumulado diario para la ciudad de Villahermosa	84
Figura 5. 2	Temperatura ambiente y humedad relativa para Villahermosa.	84
Figura 5. 3	Radiación solar promedio acumulado diario para la ciudad de Mérida.	86
Figura 5. 4	Temperatura ambiente y humedad relativa para Mérida.	87
Figura 5. 5	Radiación solar promedio acumulado diario para la ciudad de Monterrey.	89

Figura 5. 6	Temperatura ambiente y humedad relativa para Monterrey.	89
Figura 5. 7	Radiación solar promedio acumulado diario para la ciudad de Hermosillo.	91
Figura 5. 8	Temperatura ambiente y humedad relativa para Hermosillo.	92
Figura 5. 9	Radiación solar promedio acumulado diario para la ciudad de México D. F.	94
Figura 5. 10	Temperatura ambiente y humedad relativa para México D. F.	94
Figura 5. 11	Radiación solar promedio acumulado diario para la ciudad de Xalapa.	96
Figura 5. 12	Temperatura ambiente y humedad relativa para Xalapa.	97
Figura 5. 13	Ganancias y pérdidas de calor para la ciudad de Villahermosa.	98
Figura 5. 14	Ganancias y pérdidas de calor para la ciudad de Mérida.	99
Figura 5. 15	Ganancias y pérdidas de calor para la ciudad de Monterrey.	100
Figura 5. 16	Ganancias y pérdidas de calor para la ciudad de Hermosillo.	101
Figura 5. 17	Ganancias y pérdidas de calor para la ciudad de México D. F.	102
Figura 5. 18	Ganancias y pérdidas de calor para la ciudad de Xalapa.	102
Figura 5. 19	Consumo energético total para la ciudad de Villahermosa.	104
Figura 5. 20	Consumo energético total para la ciudad de Mérida.	105
Figura 5. 21	Consumo energético total para la ciudad de Monterrey.	106
Figura 5. 22	Consumo energético total para la ciudad de Hermosillo.	107
Figura 5. 23	Consumo energético total para la ciudad de México D. F.	108
Figura 5. 24	Consumo de energía total para la ciudad de Xalapa.	109
Figura 5. 25	Ahorro anual de energía para la ciudad de Villahermosa.	112
Figura 5. 26	Ahorro anual de energía para la ciudad de Mérida.	113
Figura 5. 27	Ahorro anual de energía para la ciudad de Monterrey.	115
Figura 5. 28	Ahorro anual de energía para la ciudad de Hermosillo.	116
Figura 5. 29	Ahorro anual de energía para la ciudad de México D. F.	118
Figura 5. 30	Ahorro anual de energía para la ciudad de Xalapa.	120
Figura A. 1	Ganancias de calor para la ciudad de Villahermosa.	132
Figura A. 2	Pérdidas de calor para la ciudad de Villahermosa.	132
Figura A. 3	Ganancias de calor para la ciudad de Mérida.	133
Figura A. 4	Pérdidas de calor para la ciudad de Mérida.	133
Figura A. 5	Ganancias de calor para la ciudad de Monterrey.	134
Figura A. 6	Pérdidas de calor para la ciudad de Monterrey.	134
Figura A. 7	Ganancias de calor para la ciudad de Hermosillo.	135
Figura A. 8	Pérdidas de calor para la ciudad de Hermosillo.	135

Figura A. 9	Ganancias de calor para la ciudad de México D. F.	136
Figura A. 10	Pérdidas de calor para la ciudad de México D. F.	136
Figura A. 11	Ganancias de calor para la ciudad de Xalapa.	137
Figura A. 12	Pérdidas de calor para la ciudad de Xalapa.	137

Lista de tablas

	Páginas	
Tabla 2. 1	Conductividad térmica para materiales de construcción.	24
Tabla 2. 2	Valores del coeficiente de transferencia de calor por convección.	26
Tabla 2. 3	Valores del coeficiente radiativo.	31
Tabla 2. 4	Temperaturas de confort para las ciudades.	43
Tabla 3. 1	Materiales de construcción, dimensiones y propiedades termofísicas de la edificación base.	45
Tabla 3. 2	Ficha técnica de los vidriados seleccionados.	47
Tabla 3. 3	Propiedades ópticas y térmicas de los vidriados seleccionados.	49
Tabla 3. 4	Parámetros de operación para la edificación base.	49
Tabla 3. 5	Principales tipos de clima para cada entidad federativa.	53
Tabla 3. 6	Regiones climáticas y ciudades representativas.	55
Tabla 4. 1	Resumen de la diferencia entre cargas de enfriamiento, simuladas y reportadas.	77
Tabla 4. 2	Resumen de la diferencia entre cargas de enfriamiento, simuladas y reportadas.	78
Tabla 4. 3	Resumen de la diferencia entre cargas de enfriamiento, simuladas y reportadas.	78
Tabla 4. 4	Resumen de las cargas térmicas simuladas y reportadas.	80
Tabla 5. 1	Clima para la ciudad de Villahermosa (promedios mensuales).	83
Tabla 5. 2	Clima para la ciudad de Mérida (promedios mensuales).	85
Tabla 5. 3	Clima para la ciudad de Monterrey (promedios mensuales).	88
Tabla 5. 4	Clima para la ciudad de Hermosillo (promedios mensuales).	90
Tabla 5. 5	Clima para la ciudad de México D. F. (promedios mensuales).	93
Tabla 5. 6	Clima para la ciudad de Xalapa (promedios mensuales).	95
Tabla 5. 7	Consumo y ahorro energético anual por vidriados en la ciudad de Villahermosa.	111
Tabla 5. 8	Consumo y ahorro energético anual por vidriados en la ciudad de Mérida.	113
Tabla 5. 9	Consumo y ahorro energético anual por vidriados en la ciudad de Monterrey.	114
Tabla 5. 10	Consumo y ahorro energético anual por vidriados en la ciudad de Hermosillo.	115
Tabla 5. 11	Consumo y ahorro energético anual por vidriados en la ciudad de México D.F.	117
Tabla 5. 12	Consumo y ahorro energético anual por vidriados en la ciudad de Xalapa.	119

Nomenclatura

Simbología	Descripción	Unidad
LATINA		
A, A_s	Área expuesta al flujo de calor	m^2
CO_2	Bióxido de carbono	
C_p	Calor específico	$kJ/kg \cdot K$
dT/dx	Variación de la temperatura con respecto al espesor	$^{\circ}C/m$
E	Radiación	W/m^2
FF	Velocidad del viento	m/s
$F_{i,j}$	Factor de vista	
g	Gravedad	m/s^2
G_h	Irradiación global	kWh/m^2
h	Coefficiente de transferencia de calor por convección y radiación	$W/m^2 \cdot K$
H	Altura	m
h_c, h_{cv}	Coefficiente de transferencia de calor convectivo	$W/m^2 \cdot K$
h_r	Coefficiente de transferencia de calor por radiación	$W/m^2 \cdot K$
HR	Humedad relativa	
k	Conductividad térmica	$W/m \cdot K$
l	Espesor del vidrio	m
L	Número de capas vidriadas	
$Low-e$	Vidriado bajo emisor	
N	Fracción de la radiación absorbida	
n	Número de vidrios	

N_b	Índice de nubosidad	
N_u	Numero de Nusselt	
q''	Flux de calor	W/m^2
q''_{conv}	Flux convectivo	W/m^2
q''_k	Flux de calor por conducción	W/m^2
q''_{LWR}	Flux neto de radiación de onda larga exterior	W/m^2
q''_{LWS}	Flux de radiación de onda larga interior de equipos	W/m^2
q''_{LWX}	Flux neto de radiación de onda larga interior entre superficies	W/m^2
q''_{sw}	Flux neto de radiación de onda corta interior	W/m^2
q''_{asol}	Flux radiativo solar absorbido exterior	W/m^2
Q_c	Ganancias/pérdidas de calor por conducción	W
q_{cv}	Flujo de calor convectivo de la ventana	W/m^2
Q_e	Pérdidas evaporativas	W
$Q_{emitida,max}$	Radiación emitida por un cuerpo ideal	W
Q_i	Ganancias de calor internas	W
$q_{i,j}$	Intercambio radiativo de onda larga entre las superficies interiores i y j	W/m^2
Q_m	Ganancias/pérdidas mecánicas	W
Q_{rad}, Q_r	Flujo de calor por radiación	W
Q_s	Ganancias solares	W
q_{sol}	Flux radiativo solar transmitido	W/m^2
Q_v	Ganancias/pérdidas por ventilación/convección	W
R_a	Número de Rayleigh	
R_{sol}	Reflectancia solar	
R_{vis}	Reflectancia visible	

S	Radiación absorbida	
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
T_{∞}	Temperatura del fluido	$^{\circ}\text{C}$
T_{alred}	Temperatura de los alrededores	$^{\circ}\text{C}$
T_{amb}	Temperatura ambiente	$^{\circ}\text{C}$
$T_{b,n}$	Temperatura de la superficie interior del vidriado	$^{\circ}\text{C}$
T_c	Temperatura de confort	$^{\circ}\text{C}$
T_m, T_{prom}	Temperatura promedio	$^{\circ}\text{C}$
T_s	Temperatura de la superficie de la ventana	$^{\circ}\text{C}$
T_{sol}	Transmitancia solar	
T_{vis}	Transmitancia visible	
v	Velocidad del viento	m/s
V	Velocidad del viento medido a 10 m sobre el nivel del suelo	m/s
<i>Valor-R</i>	Resistencia térmica	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$
<i>Valor-U</i>	Coefficiente global de transferencia de calor	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
V_s	Velocidad del aire cerca de la superficie de la ventana	m/s
VT	Transmitancia visible (<i>Visible Transmittance</i>)	
x	Espesor	m

GRIEGA

α	Absortividad	$0 \leq \alpha \leq 1$
A	Absortancia	
αG	Radiación absorbida	
γ	Ángulo de inclinación de la ventana	$^{\circ}$
ε	Emisividad	$0 \leq \varepsilon \leq 1$
θ	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$

μ	Viscosidad dinámica	$kg/m \cdot s$
ρ	Densidad	kg/m^3
ρG	Radiación reflejada	
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$
T	Transmitancia	
τG	Radiación transmitida	

SUBÍNDICES

$1, in, i$	Lado interior
$2, ex, o$	Lado exterior
cg	Centro del vidrio
eg	Borde del vidrio
f	Marco de la ventana
k	Capa del vidrio
sol	Solar
vis	Visible
i, j	Superficies

SIGLAS

<i>ACH</i>	Cambio de aire por hora (<i>Air Change per Hour</i>)
<i>BB-25</i>	Edificación base con reflectancia de 0.25
<i>BB-80</i>	Edificación con reflectancia de 0.80
<i>DCLCL</i>	Vidriado doble claro+claro
<i>DCLLE</i>	Vidriado doble claro+low-e
<i>DCLRE</i>	Vidriado doble claro+reflectivo
<i>DDV</i>	Dispositivos de Doble Vidriado
<i>CFD</i>	Dinámica de fluidos computacional (<i>Computational fluid</i>)

dynamics)

<i>HVAC</i>	Sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (<i>Heating, Ventilating and Air Conditioning</i>)
<i>NFRC</i>	Consejo nacional de evaluación de sistemas de fenestración (<i>National Fenestration Rating Council</i>)
<i>RAVP</i>	Razón de aspecto Área Vidriada-Pared
<i>SC</i>	Coefficiente de sombreado (<i>Shading Coefficient</i>)
<i>SCL</i>	Vidriado Sencillo Claro
<i>SHGC</i>	Coefficiente de ganancia de calor solar (<i>Solar Heat Gain Coefficient</i>)
<i>SLE</i>	Vidriado sencillo low-e
<i>SR</i>	Vidriado sencillo reflectivo
<i>STI</i>	Vidriado sencillo tintado
<i>VT</i>	Transmitancia visible (Visible transmittance)
<i>WFR</i>	Razón/relación ventana-piso (<i>Window Floor Ratio</i>)
<i>WWR</i>	Razón/relación ventana-pared (<i>Window Wall Ratio</i>)

Resumen

En este trabajo se realiza un estudio paramétrico del consumo de energía de edificaciones no residenciales, donde las principales variables son el tipo y tamaño de vidriado. Cabe mencionar que la distribución del vidriado es homogénea para cada muro de la edificación, por ello, no se consideró el efecto de la orientación en el consumo energético. Para este estudio, se analizaron cuatro tipos de vidriados sencillos y tres dispositivos de doble vidriado (DDV), los cuales fueron: vidriado claro, vidriado reflectivo, vidriado bajo emisor (low-e), vidriado tintado, DDV claro+claro, DDV claro+reflectivo y DDV claro+low-e. Así mismo, se analizaron cuatro valores de Razón de aspecto Área Vidriada-Pared (RAVP), las cuales fueron de 20%, 40%, 70% y 90%.

El análisis del comportamiento térmico de la edificación base no residencial se llevó a cabo para las seis regiones climáticas de la República Mexicana y se seleccionaron las ciudades de Villahermosa y Mérida que representan el clima cálido, Monterrey y Hermosillo, el clima seco y para el clima templado se seleccionó la ciudad de México y Xalapa. La edificación base empleada en este trabajo de investigación fue la utilizada para la realización de indicadores de la NOM-008-ENER-2001, la cual, fue considerada para la ciudad de México de cinco pisos y para las otras ciudades se consideraron edificaciones de tres pisos. Se utilizó como programa de simulación el *EnergyPlus* con interfaz *DesignBuilder*, el cual, permitió calcular las ganancias y pérdidas de calor y las cargas térmicas de refrigeración y calefacción de forma anual.

Los resultados muestran que las ganancias de calor fueron incrementando con el aumento en el valor del *SHGC*. Por ejemplo, para las edificaciones ubicadas en climas cálidos y secos y únicamente por efecto del vidriado las gráficas tuvieron un comportamiento uniforme y semejante, esto para cada RAVP. El vidriado DCLRE (Doble Claro Reflectivo) fue el que menos ganancias de calor obtuvo para cada ciudad analizada y el vidriado SCL (Sencillo Claro) fue el que obtuvo mayores ganancias.

Por otra parte, con respecto a las pérdidas de calor, los resultados mostraron que cuando el *valor-U* del vidriado aumenta las pérdidas de calor se incrementan, esto para vidriado sencillo como doble. Para climas templados los resultados muestran que a pesar de que el vidriado DCLRE fue el que menores ganancias de calor obtuvo al igual que los climas cálidos y secos, igualó prácticamente las ganancias de calor que un vidriado SR (Sencillo Reflectivo). El vidriado DCLLE (Doble Claro Low-e) incrementó de tal forma las ganancias de calor en clima templado que en este ocupa el segundo lugar con mayores

ganancias de calor, superando al vidriado DCLCL (Doble Claro Claro), siendo para este clima, el vidriado SCL el menos eficiente.

Abstract

This paper presents a parametric study of the energy consumption of non-residential buildings, where the main variables are the type and size of glazing. It is noteworthy that the distribution of the glazing is homogeneous for each wall of the building. Therefore, the effect of orientation in the energy consumption was not considered. For this study four types of simple glazing and three devices double glazing (DDV) were analyzed, which were: clear glazing, reflective glazing, low emissivity (low-e) glazing, tinted glazing, clear + clear DDV, clear + reflective DDV and clear + low-e DDV. Also, four values of area glazing-wall ratio (RAVP) were analyzed, which were 20%, 40%, 70% and 90%. The analysis of the thermal behavior of the base non-residential building was carried out for six climatic regions of Mexico. The cities of Villahermosa and Merida representing the warm weather, Monterrey and Hermosillo cities the dry weather and Mexico City and Xalapa were selected for the temperate weather.

The base building used in this research was used to obtain indicators in the NOM-008-ENER-2001, which was considered for Mexico City five floors and other cities three floors were considered. The simulation program *EnergyPlus* was used with *DesignBuilder* as interface, which allowed calculating the heat gains and heat losses and heating and cooling thermal loads annually.

The results show that heat gains were increasing with the increase in the value of SHGC. For example, for buildings located in hot and dry climates and only the effect of the glazing, graphics had a uniform behavior and such, this for each RAVP, being the DCLRE glazing (Double Clear Reflective) the least heat gains obtained for each analyzed city and the SCL glaze (Single Clear) was the one who obtained higher heat gains. Furthermore, regarding heat losses, the results show that when the value-U increases, the heat losses increase, this simple as to double glazing.

For temperate climates, the results show that although the DCLRE glazing was minor heat gains obtained, as hot and dry climates, virtually equaled heat gains a SR glazing (Simple Reflective). The DCLLE glazing (Clear Double Low-E) increased so heat gains in temperate climate, which now ranks second with higher heat gains, outperforming the DCLCL glazing (Double Clear Clear), being this climate the SCL glazing less efficient.

CAPÍTULO **1**

Introducción

El consumo de energía a nivel global ha ido incrementando principalmente en el sector industrial, de transporte y el residencial. Dentro de pocos años, el sector residencial será el principal consumidor de energía debido al aumento en la construcción de edificaciones y a los altos requerimientos de confort térmico y visual de los residentes. Diversas investigaciones están encaminadas al estudio de los diferentes elementos de la envolvente y su relación con el consumo energético. En este capítulo, se presenta una recopilación de investigaciones que están enfocadas en el efecto que tiene el tipo y tamaño del vidriado en el consumo de energía en edificaciones.

1.1 Antecedentes

Después de la revolución industrial y con la crisis energética surgida a principios de los 70's, se hizo posible practicar aberturas mayores en las envolventes de los edificios con la ayuda del hierro y del vidrio y hubo cambios estructurales en los patrones de consumo de energía de países desarrollados. El desarrollo del muro-cortina (Fig. 1) hizo posible una fachada de vidrio y acero cada vez mayor, de aquí la invención del aire acondicionado que pudo compensar el sobrecalentamiento del edificio, derivado del empleo de los grandes elementos vidriados (Iturriaga, 2008).

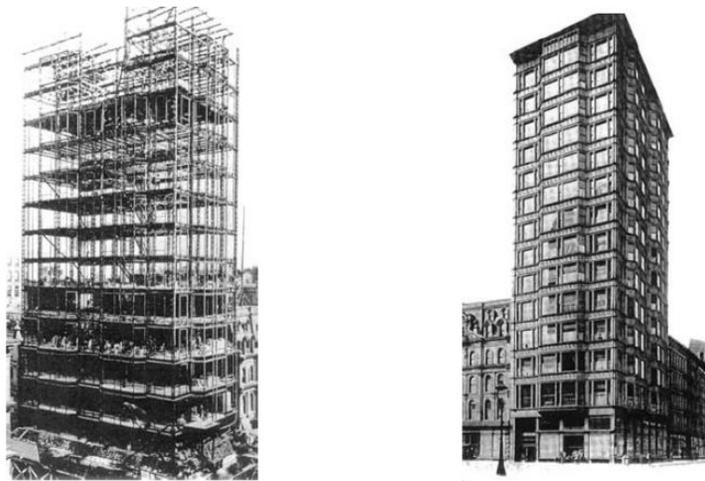


Figura 1. 1 Uno de los primeros rascacielos en emplear muro-cortina (Iturriaga, 2008).

El rápido crecimiento del uso de energía a nivel mundial y el agotamiento de los recursos energéticos traen consigo grandes impactos en el medio ambiente como, calentamiento global, cambios climáticos, deterioro de la capa de ozono, entre otros. El consumo final de la energía se muestra usualmente en tres sectores separados, industrial, de transporte y residencial.

A nivel global, los edificios residenciales y comerciales tienen una contribución entre el 20% y el 40% del consumo de energía y 30% de emisiones de CO_2 (Tian *et al.* 2010). El sector residencial se divide en viviendas y en el sector servicios (edificios públicos y comerciales). Aunado al crecimiento de la

población, la mejora en los servicios de edificios, principalmente el incremento en los niveles de confort y el aumento en el tiempo de permanencia en el interior de los edificios, se predice que para el 2025 los edificios serán los principales consumidores de energía a nivel mundial.(Chagolla,2013).

Con el crecimiento económico y poblacional, incrementa la demanda y el sector de servicios y a su vez, el consumo de energía (causado por sistemas HVAC, agua caliente doméstica, iluminación, refrigeración, preparación de comida, etc.). Con el consumo elevado de energía y las emisiones de CO_2 se han creado estrategias para el ahorro y la eficiencia energética, esto ha sido un objetivo prioritario para las políticas energéticas de varios países. Así mismo, se ha intensificado la demanda del consumo de energía por sistemas HVAC, en paralelo con la demanda del confort térmico, considerado no hace mucho como un lujo. El confort térmico es el uso más grande de energía tanto en sector residencial como no residencial, que comprende calentamiento, ventilación y aire acondicionado. En países desarrollados, el uso de energía por sistemas HVAC en edificios es del 50% y un 20% de la energía total nacional. En Europa, el consumo de energía en el sector comercial crece a tasas muy altas más que otros sectores debido a la expansión de sistemas HVAC en nuevos edificios. De acuerdo al uso, el consumo de energía en oficinas por sistemas HVAC es del 50% y le sigue el uso de la iluminación con un 15% (Pérez-Lombard *et al.*, 2008).

A nivel nacional, en el año 2014 el sector con mayor consumo de energía fue el del transporte con un 44%, le sigue el industrial con el 31% y el tercer lugar lo ocupó el residencial (edificios para uso habitacional y no residenciales) con un 18% (Secretaría de Energía, 2015), Fig. 1.2.

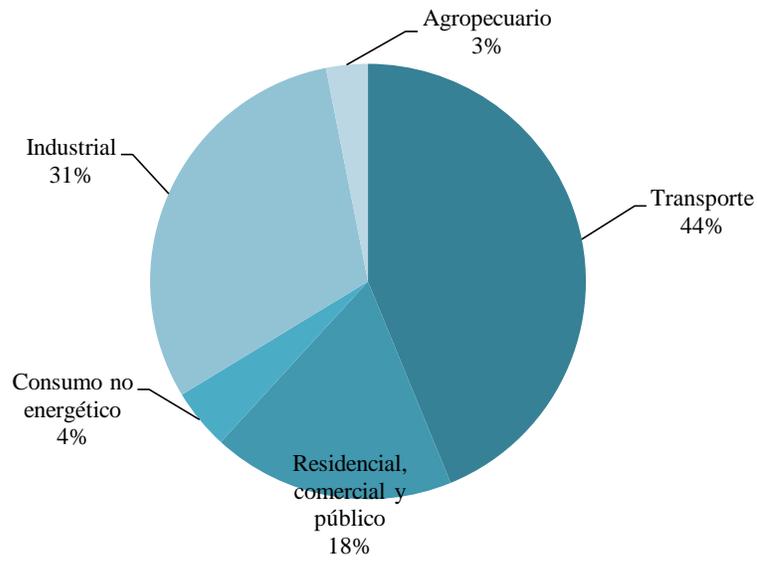


Figura 1. 2 Consumo final total de energía 2014 (Secretaría de Energía, 2015).

En la Fig. 1.3, se muestra el consumo total de energía de una edificación y la forma en que es consumida. Se aprecia que los sistemas de calefacción y aire acondicionado consumen la mayor cantidad de la energía total.

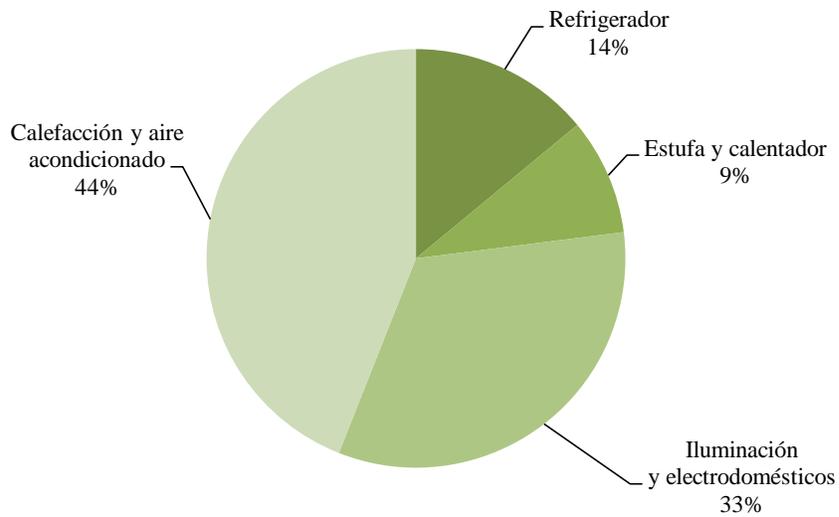


Figura 1. 3 Elementos que más energía consumen en edificaciones.

Como se mencionó, el sector residencial es un gran consumidor de energía. Una fuente importante de ganancias de calor solar son los vidriados de la edificación, estos juegan un rol muy importante ya que proporcionan vista e iluminación natural, sin embargo, pueden incrementar considerablemente el consumo de energía debido a su bajo valor de aislamiento térmico. El consumo total anual de energía en edificios de oficinas alcanza su valor más alto con acristalamientos claros, debido al incremento de las ganancias solares y al enfriamiento de la edificación (Stegou-Sagia *et al.*, 2007).

La elección de áreas y proporciones de las ventanas es parte fundamental y principal en la etapa de diseño del edificio (Ochoa *et al.*, 2012). Las ventanas que son óptimas exclusivamente para confort visual, producen un gran consumo de energía y las ventanas que producen un bajo consumo energético sacrifican el aspecto visual. Por lo tanto, una ventana óptima es aquella que debe cumplir no solo con estándares de confort térmico (tipo, tamaño y orientación de la ventana) si no también cumplir con el confort visual (tamaño y tipo de ventana). Las mejoras en eficiencia energética, particularmente en el uso de iluminación, calefacción y aire acondicionado en el sector residencial, así como las propias del sector industrial, son factores que se espera continúen de forma constante en mediano y largo plazo.

En México existen normativas que permiten regular el consumo energético de edificaciones, tanto residenciales como no residenciales, estas normas son la NOM-020-ENER-2011 y NOM-008-ENER-2001, respectivamente. Ambas normas están relacionadas con el diseño térmico de edificios y tienen como objetivo controlar las ganancias de calor a través de toda su envolvente.

El diseño de edificios sustentables y energéticamente eficientes radica en crear su propia energía por medio de energías renovables, así como el análisis térmico de cada elemento de su envolvente para reducir el consumo energético debido a ganancias o pérdidas de calor dentro del mismo. La NOM-008-ENER-2001 limita la ganancia de calor de las edificaciones no residenciales a través de su envolvente, con objeto de racionalizar el uso de la energía en los sistemas de enfriamiento.

Una forma de reducir las ganancias de calor en el interior de la edificación es modificar los materiales de construcción de su envolvente y siendo las ventanas uno de los principales elementos que mayor ganancia de calor aporta; el uso de diferentes vidriados alternos al convencional, pueden reducir significativamente el consumo energético total.

1.2 Revisión bibliográfica

Con el impacto que tiene el sector de la construcción, tanto residencial como no residencial, diversas investigaciones se han enfocado en el análisis de los elementos de la envolvente de dichas edificaciones y su impacto en el consumo energético. Diferentes parámetros como el tipo y porcentaje de área vidriada y el impacto en el consumo energético y confort fueron examinados en las siguientes investigaciones.

1.2.1 Metodologías para la evaluación del consumo energético, sistemas HVAC, confort térmico y programas de simulación en edificaciones

En este apartado se muestran algunas investigaciones que muestran la importancia del análisis térmico de edificaciones y su relación con el confort térmico, así como las ventajas que tienen los paquetes comerciales para calcular el consumo energético de edificios.

Crawley et al. (2001) realizaron una investigación sobre el software *EnergyPlus*. Los autores describen a *EnergyPlus* como un programa de nueva generación de simulación energética de edificios. Los autores describieron sus orígenes, componentes, estructura, métodos de cálculo, entre otros. *EnergyPlus* se basa en la experiencia de *BLAST* y *DOE-2*, la diferencia entre estos dos programas es el método de cálculo de cargas, *DOE-2* usa un enfoque de factor de ponderación de la habitación mientras que *BLAST* usa un enfoque de balance de calor. Ambos programas simulan el flujo de energía de masa y calor a lo largo de todo el edificio. *EnergyPlus* es un programa nuevo basado en las características y capacidades más populares de *BLAST* y *DOE-2*, está estructurado en un código escrito en Fortran 90 y es principalmente un motor de simulación, no tiene una interface amigable. *EnergyPlus* tiene tres componentes básicos, un administrador de simulación, un módulo de simulación de balance de masa y calor y un módulo de simulación de sistemas de edificios. Los cálculos de balance de calor se basan en *IBLAST* (una versión de *BLAST* con sistemas HVAC integrados). El método de cálculo para la zona térmica del edificio es el modelo de balance de calor y se asume en este método, que el aire en cada zona térmica puede ser modelado a lo largo de una temperatura uniforme (aunque no refleja la realidad, una alternativa es la dinámica de fluidos computacional *CFD*, pero es una simulación muy compleja del fluido).

Con respecto a la evaluación del confort térmico, **Nicol y Humphreys (2002)** realizaron un estudio sobre el confort térmico adaptable (este modelo plantea, en primera instancia, que las exigencias de confort no son las mismas para personas acostumbradas a edificios climatizados artificialmente y para aquellas que habitan regularmente edificios que funcionan en modo pasivo) y estándares térmicos de edificaciones. Los autores describen que el modelo de confort adaptable permite a los diseñadores de edificaciones estimar la temperatura de entrada, con la cual, los ocupantes se encontrarán más confortables principalmente en edificios pasivos. Las personas tienen una tendencia natural a adaptarse a los cambios de su medio ambiente, esta tendencia natural se expresa en un enfoque adaptable para confort térmico. El objetivo de este enfoque fue encontrar la temperatura o la combinación de variables térmicas (temperatura, humedad y velocidad del aire) considerada “neutral” o “confortable”.

Por otra parte, **Pérez-Lombard et al. (2008)** presentaron una revisión sobre la información del consumo de energía de edificios a nivel mundial y encontraron que los edificios, tanto residencial y comercial, tienen una contribución global entre el 20% y el 40% del consumo de energía, superando a grandes sectores como el industrial y de transporte, así mismo, los autores indican que el uso de energía en el ambiente de la construcción crecerá un 34% en los próximos 20 años. En edificios no domésticos, las oficinas consumen más del 50% de la energía total. En el sector comercial, las oficinas son aquellas que tienen un gran consumo de energía y emisiones de CO_2 . De acuerdo al uso, el consumo de energía en oficinas por sistemas *HVAC* es del 50% y le sigue la iluminación con un 15%. Los autores concluyen que se deben tomar estrategias de eficiencia energética y que deben tomarse como prioridad para el desarrollo de políticas energéticas para la regulación y certificación de nuevos edificios y crear un futuro energético sustentable.

Orosa y Oliveira (2011) realizaron una investigación sobre los software existentes para reducir el consumo energético o mejorar las condiciones térmicas en el interior de edificios. Los autores describen que los programas de simulación pueden predecir resultados como las cargas de calefacción y enfriamiento de un edificio, así como, el ambiente térmico de un espacio. Antes de que los paquetes comerciales puedan simular adecuadamente un edificio, existen parámetros clave que necesitan introducirse de acuerdo al programa; como por ejemplo, la geometría del edificio, el número de zonas que conforman el edificio, así como sus cargas internas. Los autores mencionan que algunos programas pueden calcular las cargas máximas de enfriamiento y calentamiento, el consumo total de energía, el rendimiento y costo del sistema. Algunos de los software que analizaron Orosa y Oliveira fueron:

BLAST, *BSim*, *CHVAC*, *DOE-2*, *EnergyPlus*, *HAP*, *TRNSYS*, *UMIDUS* y *HAM-tools*. Finalmente, los autores seleccionaron la herramienta *HAM* para simular el ambiente interior en edificios escolares.

1.2.2 Evaluación del consumo energético y el efecto de la razón de aspecto área vidriada-pared (RAVP) en edificaciones

Debido a la importancia que tienen los vidriados en el aumento de las ganancias solares, algunos investigadores enfocaron sus estudios en evaluar solamente las cargas térmicas, el consumo energético y el efecto debido al tipo de vidrio y a la Razón de aspecto Área Vidriada-Pared (RAVP), manejada por algunos autores como relación ventana-pared (*WWR*).

Omar y Al-Ragom (2002) presentaron una metodología para la selección de áreas vidriadas, mientras se mantiene la demanda de carga máxima establecida, $70W/m^2$. Los autores tuvieron como objetivo principal, analizar el efecto del tipo y área del vidriado en las cargas de enfriamiento de edificios para oficinas. Durante el desarrollo, Omar y Al-Ragom consideraron 2 orientaciones diferentes, una cara al norte-sur, y la otra al este-oeste. Para cada orientación y para cada tipo de vidrio (7 tipos) se consideraron 5 diferentes casos de área vidriada. La metodología se aplicó a un edificio de gobierno típico en Kuwait usando el programa de simulación energética *EPS-r* y el software *WINDOW*.

El edificio base fue de 4 pisos de forma rectangular con un área total $1074m^2$ y el ambiente interior fue controlado por un sistema de enfriamiento de aire. Las RAVP fueron de 0%, 37%, 47%, 61% y 100%. No se consideraron dispositivos de sombreado ni marcos. Los parámetros de entrada que se consideraron para el análisis incluye el tipo de clima, cargas internas, temperaturas interiores y las propiedades térmicas y ópticas de los acristalamientos. Se utilizaron diferentes ángulos de incidencia ($0^\circ, 40^\circ, 55^\circ, 70^\circ$ y 80°), asegurando la precisión del calor transferido a través del vidriado. De forma general, los autores concluyeron que la orientación norte-sur permite tener relaciones de área vidriada mayores que las orientaciones este-oeste. Para un vidrio claro la RAVP permitida es del 28%, vidrio reflectivo 35%, doble vidrio claro 38% y para los otros tres tipos de vidrio que cuentan con película tipo espejo la RAVP es de 60%, 70% y 100%. A sí mismo, se pueden emplear grandes áreas vidriadas hasta del 100% siempre y cuando el acristalamiento cuente con un alto desempeño térmico, como por ejemplo, empleando vidrios con películas tipo espejo con un *SHGC* menor a 0.15, y un coeficiente de transferencia de calor total por debajo de $1.6W/m^2 \cdot ^\circ C$.

Por otra parte, **Su y Zhang (2010)** estudiaron el impacto ambiental de un edificio no residencial sobre todo su ciclo de vida en Shanghai China y buscaron el valor límite adecuado para la RAVP con diferentes orientaciones y materiales de ventanas. Su objetivo fue, cuantificar la diferencia entre el desempeño ambiental del ciclo de vida para diferentes valores de RAVP (variando desde un 10% hasta un 70%) con diferentes orientaciones de la ventana y tipo de material para ventanas y de esta forma, averiguar un valor límite adecuado para la relación ventana-pared con diferentes materiales para ventanas de un edificio típico de oficina.

Para su estudio Su y Zhang emplearon el método BIN (usado para calcular el consumo de energía del edificio), también usaron ventanas con vidrio simple, ventanas huecas y ventanas huecas con vidrio de baja emisividad. Este estudio demostró el impacto ambiental (mayor o menor consumo de energía) del ciclo de vida de los edificios con diferentes tipos de ventanas y diferentes RAVP mediante el software BESLICI. Los autores concluyeron que mientras la RAVP vaya incrementando, el impacto ambiental tiende a disminuir significativamente, así mismo, se nota que la orientación que disminuye el impacto ambiental debido al uso de calefacción es el lado sur y el lado este; en cuanto al tipo del vidrio, la mejor opción resulta ser el bajo emisivo y si se combina con la orientación sur, el impacto ambiental aun seguirá disminuyendo conforme la RAVP incrementa.

Gasparella et al. (2011) evaluaron el impacto de diferentes tipos de sistemas vidriados (dobles y triples), tamaño de la ventana (desde un 16% hasta un 41% de área de ventana con respecto al piso), orientación de las fachadas principales y las ganancias internas en invierno y en verano, así como también, las cargas pico de un edificio residencial bien aislado en cuatro ciudades de Europa.

Los autores mencionan que la transmitancia solar, el tamaño de la ventana así como su orientación pueden tener grandes efectos en el uso de energía de los edificios. Para el desarrollo del proyecto utilizaron principalmente el software *TRNSYS*. Ellos concluyeron que el uso de grandes cristales mejora el rendimiento en invierno, pero empeora ligeramente el pico de cargas en verano, así mismo, en invierno el uso de ventanas con baja transmitancia térmica es de utilidad si se acompaña de una transmitancia solar alta y finalmente, los autores recomiendan el uso sistemas de sombreado ya que podrían mejorar el rendimiento en verano sin afectar el rendimiento en invierno.

Özkan y Onan (2011) examinaron los espesores de aislamiento óptimos en paredes externas de edificios en diferentes ciudades de Turquía, utilizando el método P_1 - P_2 , que particularmente se usa para el cálculo del ahorro ciclo de vida, así como para optimizar el tamaño del aislamiento de las paredes externas. Los autores estudiaron también el efecto de la alteración del acristalamiento

(variación del 10% al 50% de área vidriada) y áreas de la pared exterior, en el requerimiento de la energía de calefacción de edificios. Examinaron 4 regiones de Turquía y emplearon como materiales aislantes el XPS (*Extruded Polystyrene Foam*) y lana mineral.

Los autores obtuvieron como resultado que al utilizar un aislamiento con 20 cm de espesor en las paredes exteriores, la demanda energética disminuye hasta un 53.4% con respecto a un espesor de 2 cm. Referente al área vidriada, la demanda energética anual de calefacción KWh/m^2 , disminuye 40.29% para un área vidriada del 10% con respecto a un área vidriada del 50%, mientras que el ahorro de energía $\$/m^2$ es del 33% considerando las mismas áreas vidriadas. Por otro lado, las emisiones de CO_2 se redujeron, para áreas vidriadas del 10% y 50%, un 61.47% y 44%, respectivamente, empleando aislamiento. Özkan y Onan concluyeron que el porcentaje de área vidriada, el tipo y el espesor del aislante juegan un rol muy importante en el calentamiento y enfriamiento de edificios en términos de consumo de energía. Se aprecia que el aislamiento es más efectivo, el ahorro de energía es más grande y el periodo de recuperación es más corto en edificios con un área de ventana más pequeña que edificios con un área de ventana más grande.

Tahmasebi et al. (2011) evaluaron el impacto de las ventanas en la eficiencia energética de un edificio y la generación de bióxido de carbono, analizando la alteración del tamaño de ventanas, considerando una *WFR* (relación ventana-piso) del 16% al 41%, tipo de vidrio (dos acristalamientos dobles y dos triples), orientación de la *WFR* y tipo de gas (argón y aire) de una habitación aislada diseñada en clima tropical de Malasia. La simulación se llevó a cabo usando el software *Graphisoft EcoDesigner*. Una vez conocidos los componentes que son usados en el cálculo del consumo energético de un edificio (factores climáticos, ganancias internas de calor, sistemas de enfriamiento, bombas de calor, etc.) el programa calcula el balance energético del edificio mediante la comparación de la energía emitida con la energía suministrada. Los autores obtuvieron como resultado, que un incremento del 9% en el área de la ventana con doble vidrio en el lado este, incrementa el consumo de energía un 7.5. Las proporciones del consumo energético (KWh) son de 8.2% para la *WFR*=16% al 25%, 7.5% para la *WFR*=25% al 34% y finalmente, 5.5% para la *WFR*=34% al 41%; los porcentajes en el consumo energético no difieren mucho de los porcentajes de generación de bióxido de carbono ($(kg \cdot CO_2)/año$). Los resultados de las simulaciones muestran también que la orientación norte para cada *WFR* es la más efectiva.

Los autores concluyeron que una ventana bien diseñada contribuye a la sustentabilidad y a los edificios verdes mediante la disminución de emisiones de carbono y el uso de energía. De acuerdo a

los resultados de la simulación, el incremento del tamaño de la ventana del 41% no difiere significativamente de la del 34% de acuerdo al consumo energético en áreas tropicales y sugieren que en los casos donde se requiera mayor iluminación natural, usar ventanas con tamaños de área superiores al 34% con respecto al piso no agrava el consumo de energía.

Quienes también analizaron el consumo energético fueron, **Leskovar y Premrov (2012)** que tuvieron por objetivo, investigar una alternativa de solución en el comportamiento de la demanda energética anual para calefacción y enfriamiento de una vivienda con un modelo numérico. El caso de estudio fue una casa con un sistema de estructura de madera y se analizó el impacto del incremento de la proporción de las superficies vidriadas, tomando en consideración datos del clima de Ljubljana, capital de Eslovenia. En este estudio trataron un sistema de elementos de pared macro-panel, TF₁ a TF₃ en estructuras de madera, así mismo, se analizaron tres elementos de pared prefabricados de un solo panel, TFcl₄-TFcl₆.

Los autores obtuvieron como resultado que la demanda energética por calefacción disminuye casi linealmente con el crecimiento de RAVP, esto para el lado sur; mientras que para el lado norte, la demanda energética aumenta con el crecimiento de RAVP. El ahorro de energía causado por un incremento en el área total de acristalamiento para el elemento TFcl₄ es del 33% considerando una RAVP=0% a RAVP=79%, y solo el 27% para el elemento TFcl₆. Finalmente, se demostró que la proporción óptima de la superficie vidriada de la pared exterior orientada al sur, depende de la transmitancia térmica de la pared exterior. Leskovar y Premrov, concluyeron que es importante la renovación de viviendas existentes con estructuras de madera ya que el uso de grandes áreas vidriadas en paredes externas orientadas al sur, mejoran la eficiencia energética del edificio.

Lee et al. (2012) estudiaron el consumo de energía en edificios de oficinas y la variación del diseño de la fenestración. Utilizaron *COMFEN* para evaluar el consumo de energía. Este estudio busca identificar las características del consumo energético de edificios para cuatro orientaciones (N, S, E y O) con ventanas diseñadas de diferente manera, considerando el tipo de acristalamiento y cambiando la RAVP. El estudio se realizó en Seoul, Korea. En este estudio, el consumo de energía que se usó para la simulación se estimó por la variación en el diseño de fenestración (varias combinaciones del *valor-U* (W/m^2K) y *SHGC*) y diferentes condiciones (orientación y RAVP) por medio de una herramienta de simulación dinámica, con respecto a una habitación de referencia.

Los autores emplearon acristalamiento de doble panel sin dispositivos de sombreado, emplearon RAVP de un 10% a un 90%, así mismo emplearon *valor-U* de 1.4 a 2.4 ($W/m^2 \cdot K$) y *SHGC* de 0.3 a 0.7. Los resultados mostraron que la cantidad del consumo de energía del edificio frente a las cuatro orientaciones es afectado por las características del vidriado y la RAVP. La orientación este y oeste tienen mayor insolación que el lado sur y norte. En particular, cuando el *SHGC* es más grande que el *valor-U* ($W/m^2 \cdot K$), el consumo total de energía tiende a ser más grande debido al incremento en las cargas de enfriamiento. Cuando el *valor-U* ($W/m^2 \cdot K$) decrementa, independientemente del tamaño del vidrio, el consumo energético decrementa. El consumo de energía disminuye cuando el valor de *SHGC* es bajo, esto para cuando RAVP es igual o mayor al 30% (este) y cuando la RAVP es igual o mayor a 40% (oeste). Cuando el *SHGC* incrementa, las cargas por enfriamiento también aumentan, en contraste, cuando el *SHGC* decrementa, la insolación también decrementa, causando menor energía consumida.

Un año más tarde, **Yu et al. (2013)** estudiaron la influencia de dos factores para ahorrar la energía en edificios para oficinas; diferentes orientaciones del edificio y la variación de RAVP. Se empleó el software *ECOTEC* para la simulación energética. El edificio tiene una estructura tipo muro-cortina en la pared exterior (muro acristalado), orientado 41° al sur-este y tiene un total de 24 pisos. Esta investigación estudió sistemas *HVAC*. Los autores obtuvieron como resultado que cuando el muro cortina tiene una RAVP=100% la mejor orientación del edificio es 3° al suroeste, comparado con una orientación de 41° al sureste. Cuando la RAVP=24%, 30% y 37%, la mejor orientación del edificio es 12° al sur este. Si RAVP es igual a 25%, 29% y 33%, la mejor orientación del edificio es 3° al noreste. Yu et al., concluyeron que con el incremento de la RAVP, el consumo de energía por calefacción, aire acondicionado y consumo total de energía, aumentan gradualmente con una orientación de 41° al sureste.

Kim et al. (2014) realizaron un estudio para proponer un indicador de análisis energético de los elementos de las ventanas de edificios de oficinas en Korea, con la finalidad de controlar la variación del consumo de energía de la edificación a través de la variación de los elementos de la ventana. Los autores utilizaron *COMFEN v4* como herramienta de simulación. No consideraron el desempeño óptico y la orientación. Los autores mencionan que la RAVP está incrementando porque el método de muro-cortina está de moda por razones de estética. Muchos estudios han confirmado los efectos del consumo de energía de edificios mediante la variación de ventanas. Los resultados muestran que

generalmente, el consumo de energía incrementa con el aumento de la RAVP, pero para esta investigación, el consumo disminuyó 2.8% con $valor-U=1 \text{ (W/m}^2 \cdot K)$ y $SHGC=0.2$, cuando RAVP aumentó de 20% a 80%. Esto confirmó que aunque RAVP incrementara y existiera un bajo $valor-U \text{ (W/m}^2 \cdot K)$ y de $SHGC$, el consumo de energía disminuirá. Los autores recomiendan considerar elementos complejos de ventanas como orientación, RAVP, $SHGC$ y $valor-U$. Este estudio confirmó que el consumo energético aumenta con el incremento del $valor-U$ y del $SHGC$ de la ventana.

1.2.3 Evaluación del consumo energético y el efecto de la razón de aspecto área vidriada-pared (RAVP) en edificaciones, orientados al confort térmico y visual

Conociendo la importancia que tiene el análisis térmico en los elementos de la envolvente de edificaciones, principalmente en muros vidriados, algunas investigaciones no solo se han enfocado en analizar el consumo energético por efecto del vidriado, sino también, han analizado la importancia y la relación que tiene el tipo, tamaño y orientación del acristalamiento con el confort térmico y visual.

Stegou-Sagia et al. (2007) simularon un edificio residencial y un edificio de oficinas con *Ener-Win*. Los datos básicos de entrada para la simulación térmica son: temperatura del ambiente local, orientación y geometría del edificio, propiedades de los materiales de los muros, pisos y techos, sin sombreado externo, propiedades de ventanas, sistemas de calentamiento, sistemas de aire acondicionado, número máximo de personas, así como su ocupación, tipo de lámparas, abertura de ventanas, agua caliente usada y temperatura del espacio. El edificio de oficina cuenta originalmente con ventanas tintadas grises de doble vidrio las cuales representan el 20% del área total de la pared; posteriormente, el edificio fue simulado usando vidrio claro de doble acristalamiento y eventualmente se simuló un área de ventana con una RAVP del 10%.

Los autores indicaron que el consumo total anual de energía en edificios de oficinas alcanza su valor más alto con acristalamientos claros, debido al incremento de las ganancias solares y al enfriamiento, mientras que la menor área vidriada reduce el consumo de energía, pero tiene un impacto negativo por el uso de la iluminación artificial, así que los vidrios tintados grises ofrecen una solución balanceada. Así mismo, los autores resaltan que el principal uso en los edificios de oficinas es la iluminación y que el clima (2 ciudades de Grecia) no tiene un efecto considerable. Stegou-Sagia et al. concluyeron que el uso de la luz natural puede traer grandes ventajas en ahorro de costos, así mismo, hay una reducción de las pérdidas térmicas usando ventanas dobles en lugar de ventanas sencillas. La elección del vidriado

es un factor importante en edificios residenciales y de oficina, porque esto afecta directamente el consumo de energía. Los cambios en el tipo y porcentaje de vidriado no tienen un efecto importante en el confort térmico, sin embargo, en edificios de oficinas si hay un efecto de las ventanas, principalmente en el confort visual. Pocas ventanas reducen el uso de energía de los edificios, pero la reducción del área vidriada puede tener un impacto negativo en los usuarios debido a la desconexión con el ambiente natural, falta de vista, iluminación natural, etc.

Más tarde, **Al-tamimi et al. (2009)** utilizaron un método experimental y monitorearon la temperatura interior mediante un registrador de datos *BABUC/M*, éste método evalúa el confort térmico bajo diferentes condiciones, ayudando a hacer una rápida y simple evaluación del comportamiento térmico del edificio; con el objetivo de investigar el efecto de la orientación y el área vidriada de la envolvente de un edificio. Para el caso de estudio se empleó una *WFR* (relación ventana-piso) de 49%, 29% y 80%; el vidrio fue de tipo claro de 6 mm de espesor y se aplicó a edificios residenciales localizados en Malaca, Malasia.

Los resultados indicaron que la temperatura de entrada en una habitación con orientación suroeste con *WFR*=29% (R_1) es inferior que una habitación con *WFR*=49% (R_2) en la misma orientación durante el día. Posteriormente los resultados mostraron que una habitación con una *WFR*=80% (R_3) recibe mayor radiación que R_2 , no solo por el área vidriada sino también por la orientación. Los resultados también indican que R_3 siempre es más caliente que R_2 durante las horas diurnas, con una diferencia máxima de 6.7%. Por otro lado, R_3 es más fría que R_2 durante la noche, al igual que R_2 es más fría que R_1 , debido a que el vidrio permite que el calor escape fácilmente durante la noche. Los autores concluyeron que en climas tropicales, los edificios se sobrecalientan durante las horas diurnas a través de la envolvente del edificio y de la transmisión solar a través de las ventanas. Así mismo, durante la noche, las grandes áreas vidriadas permiten que el calor acumulado durante el día escape fácilmente a las temperaturas frescas del exterior, por su alto valor global de transferencia térmica. Por otra parte, el tamaño, la ubicación y la orientación de áreas vidriadas en un edificio tendrán un efecto crítico en las ganancias de calor porque las áreas vidriadas tienen la mayor ganancia de calor por unidad de área.

Por otro lado, **Tian et al. (2010)** desarrollaron un *WERS* (Sistema de Evaluación Energética en Ventanas), que proporciona una herramienta simple y efectiva para la evaluación eficiente del desempeño energético promedio de ventanas, combinando, conducción de calor, infiltración y ganancias de calor solar. Dicho *WERS*, muestra las cargas de calefacción y enfriamiento que son causadas por las ventanas en edificios pequeños o viviendas, así mismo, realizaron una evaluación

energética en ventanas para edificios de oficina en Hong Kong. Los autores consideraron dos estrategias de control de iluminación, encendido/apagado (on/off) sencillo y control de atenuación continua. Tian *et al.* realizaron simulaciones de iluminación y enfriamiento tomando las ventajas de los programas de simulación *DOE-2* y *ADELIN*E. Utilizaron una variación de RAVP de un 10% hasta un 100%. Se utilizaron 13 tipos de ventanas y sus parámetros fueron tomados del programa *WINDOW*.

Los autores obtuvieron como resultado que para el lado norte, la ventana *RLV* (reflectivo y low-e) puede tener un ahorro máximo de energía con una RAVP del 20% cuando se adopta el control de atenuación continua. Para el lado oeste, la ventana *clear8* usa la energía más alta con una RAVP de 100% cuando se adopta la estrategia on/off.

Tian *et al.* concluyeron que la orientación de la ventana impacta significativamente en el desempeño energético. Una ventana orientada al norte ahorra hasta cinco veces más energía que una ventana orientada al oeste. Muchos factores como la orientación, el tipo de vidrio y la RAVP, tienen un impacto en el desempeño energético de la ventana, aunado a esto, puede ahorrarse una gran cantidad de energía por iluminación. A sí mismo, concluyeron que una ventana bien diseñada podría ser un elemento ahorrador de energía en lugar de consumidor. Los resultados de la simulación mostraron también que hay una necesidad para la mejora de sistemas de ventanas y que se puede optimizar el ahorro de energía significativamente, mediante la utilización de la luz del día a través de una ventana.

Ochoa *et al.* (2012) consideraron variaciones discretas de tamaño de área con una RAVP de 0% hasta 100%. El desempeño visual y los criterios de confort se dividieron en criterios basados en iluminación y en deslumbramiento. Las áreas óptimas de ventanas fueron las de la región crítica, que es el límite cuando el incremento del tamaño de la ventana no contribuye más a la disponibilidad de luz natural. Los autores utilizaron *EnergyPlus* como programa de simulación. Se modeló una habitación para oficina con dimensiones 3.5x5.3x2.7 m con una pared externa sencilla. Una de las paredes externas aloja solo una ventana colocada en el centro a fin de proporcionar una vista exterior todo el tiempo. La RAVP de la abertura varía de un 10% hasta un 100% en incrementos discretos del 10%. El tipo de acristalamiento para todos los tamaños de ventana fue claro de doble panel. La iluminación fue medida en dos puntos de control, los cuales corresponden al centro de cada zona de iluminación. Los autores notaron una demanda más grande por refrigeración debido a grandes tamaños de ventanas, esto para la orientación sur, mientras que para la orientación norte, el aumento en tamaños de ventanas resulta en una gran demanda de calefacción. El consumo de energía global más alto se observó en la orientación este y oeste. El menor uso de energía se observó con una RAVP de 30% para la orientación norte, mientras que para el sur, este y oeste una RAVP del 20%. El uso de grandes ventanas es

contraproducente debido a que estas proporcionan transferencia de calor tanto en verano como en invierno. Ochoa *et al.* concluyeron que las ventanas óptimas exclusivamente para un confort visual, producen un gran consumo de energía y las ventanas que producen un bajo consumo energético sacrifican el aspecto visual. Por lo tanto, una ventana óptima es aquella que debe cumplir no solo con estándares de confort térmico (tipo, tamaño y orientación de ventana) sino también cumplir con el confort visual (tamaño y tipo de ventana).

Por otra parte, Lee *et al.* (2013) realizaron un estudio para encontrar el sistema de ventana óptimo para reducir las cargas energéticas de la edificación. Emplearon *COMFEN* como herramienta de simulación. *COMFEN* es una herramienta de diseño de fachadas basada en el motor de cálculo de *EnergyPlus*. Las RAVP fueron del 0%, 25%, 50%, 75% y 100%, emplearon 6 tipos de vidrios. En términos de las cargas de energía por iluminación, los autores concluyen que una pequeña RAVP las incrementa. Para cargas de enfriamiento, la reducción relativa del tamaño de la ventana definitivamente reduce el consumo de energía por enfriamiento. De forma general, el uso de ventanas amplias aumenta la variación del consumo de energía. Los cambios en el *valor-U* de 1.5 a 0.8 ($W/m^2 \cdot K$) tienen un gran efecto en la reducción de las cargas de calentamiento que en las cargas de enfriamiento. Así, para áreas frías donde las cargas de calefacción son de gran importancia, hay mayores ventajas en la adopción de ventanas con un bajo *valor-U* ($W/m^2 \cdot K$).

1.2.4 Conclusiones de la revisión bibliográfica

De la literatura revisada se encontró que los programas de simulación son una gran herramienta para el análisis térmico de edificaciones, estos programas permiten calcular no solo el consumo energético total, si no también pueden obtener datos de salida relacionados con sistemas *HVAC*, confort térmico y confort visual. Algunos autores mencionan que el comportamiento térmico de la edificación depende no solo del tipo del material de construcción de la envolvente, sino también del tamaño de los elementos y de la orientación de estos.

Una forma de reducir el consumo energético en edificaciones de acuerdo con la literatura, es analizar el comportamiento del vidriado, de acuerdo con parámetros como, la orientación, el tipo (características ópticas y térmicas) y el tamaño (RAVP), principalmente. Algunas investigaciones solamente se enfocaron en uno o dos parámetros, muy pocas analizaron de forma general los tres parámetros

principales relacionados al consumo energético debido a los vidriados. Para México, se encontró muy poca información sobre la relación RAVP-consumo energético; existe una amplia información aunada a edificaciones y comportamiento de los vidriados para diversos climas pero en general, la mayoría de las investigaciones se ha enfocado en un clima en particular, con un tamaño de vidriado o ventana o un solo tipo de vidriado.

En la presente investigación, se hace un estudio térmico sobre la relación: tipo de vidrio-RAVP-consumo energético para cada región climática de la República Mexicana, contemplando un albedo en techo y paredes de 0.25 (edificio de referencia) y de 0.80.

1.3 Objetivo general

Realizar un análisis térmico del efecto de la razón de aspecto área vidriada-pared (RAVP) en el consumo energético de edificaciones no-residenciales para las seis regiones climáticas de la República Mexicana.

1.4 Alcances

- Realizar un análisis térmico de la influencia que tiene la Razón de aspecto Área Vidriada-Pared (RAVP) en edificaciones no residenciales con albedo de 0.25, utilizando vidrios claros, reflectivos, low-e, entintados y sistemas con doble vidrio, de 6 mm de espesor.
- Emplear razones de aspecto área vidriada-pared de 20%, 40%, 70% y 90%.
- Simular las 6 regiones climáticas de la República Mexicana establecidas por el INEGI.
- Obtener las cargas térmicas de enfriamiento y calentamiento de las edificaciones no-residenciales, utilizando el programa de simulación *EnergyPlus* y la interfase *DesingBuilder*.
- Obtener las ganancias y pérdidas de calor para cada tipo de vidriado y para cada región climática.
- Determinar el vidriado óptimo de acuerdo al tipo de vidrio y a la RAVP, para cada región climática de la República Mexicana.

- Simular la edificación base con albedo de 0.80.

1.5 Justificación

Autores como *Tian et al. (2010)* y *Lee et al. (2013)* han demostrado que las edificaciones son responsables del 40% del consumo de energía total a nivel global, estas cifras son causadas principalmente por la necesidad de alcanzar altos niveles en el confort térmico en edificaciones, haciendo uso de aire acondicionado y sistemas de calentamiento.

El estudio de las ventanas tiene una gran influencia, ya que se le atribuye la mayor cantidad de pérdidas y ganancias de calor hasta un 50 % con respecto a los demás elementos de la envolvente de un edificio de acuerdo al tipo de clima. Algunas ventanas que se usan en edificios, son importadas de otros países, por lo tanto, al ser diseñadas para condiciones climáticas diferentes al país, no son óptimas para las regiones climáticas de México. Por lo anterior, en este proyecto se pretende conocer el impacto que tendrá la variación de la razón de aspecto área vidriada-pared (RAVP) y el tipo de vidriado en las seis regiones climáticas de México y de esta forma conocer el consumo energético de edificios no residenciales de acuerdo con la edificación empleada por la Norma para la elaboración de indicadores NOM-008-ENER-2001 y conocer el diseño del vidriado óptimo para cada una de las 6 regiones climáticas.

1.6 Descripción general de los capítulos

El presente trabajo de investigación está conformado por seis capítulos; en el primero se hace una reseña histórica de la relación del uso de energía y edificaciones, también se muestra el estado del arte, enfatizando en estudios relacionados al consumo energético en edificaciones y los efectos por el tipo y tamaño de acristalamiento. En el Capítulo dos, se describen de forma detallada los procesos de transferencia de calor, así como su relación con el flujo de energía en edificaciones, así mismo, también puede encontrarse en este apartado, el balance de calor en edificaciones y las diferentes formas de ganar y perder calor en la edificación. Con respecto al Capítulo tres, se describe la edificación base que se utilizó para la elaboración de indicadores de la NOM-008-ENER-2001, la cual, se utilizó como

edificación base en la presente investigación. En el Capítulo cuatro, se describen los paquetes comerciales que se utilizaron para llevar a cabo las simulaciones, *DesignBuilder* y *EnergyPlus* y se explica la calibración de los software. Para el Capítulo cinco, se presentan los resultados del consumo energético total obtenidos de las simulaciones para cada ciudad seleccionada con un albedo en las edificaciones de 0.25 y como actividades extras, se realizaron simulaciones para edificaciones con albedo de 0.80 y se calcularon las ganancias y pérdidas de calor por efecto de los vidriados y se presenta un análisis de resultados. Finalmente, en el Capítulo seis, se concluye el trabajo de investigación y se realiza una comparación entre el empleo del vidriado de referencia y los vidriados óptimos, reduciendo o conservando el mismo consumo energético pero con RAVP mayores. Por otra parte, se proponen algunas recomendaciones que permitirán continuar con el trabajo de investigación, así como posibles actividades que pueden complementar el trabajo.

CAPÍTULO 2

Marco teórico

En el comportamiento térmico de edificaciones están involucrados los tres mecanismos de transferencia de calor, conducción, convección y radiación. En el Capítulo 2 se describen a detalle los elementos principales de la envolvente de la edificación y la forma en que una edificación intercambia energía con el exterior, así mismo, se describen las características de los acristalamientos más comunes y de forma general se introduce al balance térmico en edificaciones.

2.1 Envoltente de una edificación

Un edificio puede ser de tipo residencial (casas) o no residencial (escuelas, centros comerciales, oficinas, entre otros.) y tienen en común elementos característicos que los conforman, entre los cuales están, techos, muros, ventanas y pisos; y estos elementos forman parte de la envoltente de un edificio. Existen estudios que muestran la importancia que tiene el análisis térmico en edificaciones, ya que un buen diseño en la envoltente del edificio puede traer mejoras en la salud, confort y productividad al ocupante (Al-tamimi *et al.*, 2009).

2.1.1 Techos

México recibe una irradiación solar de entre 5.66 kWh/m^2 y 6.16 kWh/m^2 al día (Tapia, 2012). El techo es uno de los elementos del edificio que mayor radiación solar recibe, tratándose de una edificación residencial y como se encuentra sobre el plano horizontal, capta la mayoría de los rayos solares. Para edificaciones no residenciales, mientras el número de pisos incrementa, la aportación de ganancias solares por el techo disminuirá.

2.1.2 Muros

Son construcciones que conforman la mayor parte de la envoltente del edificio, éstos pueden estar integrados por cerramientos como puertas y ventanas. Si bien, en edificios no residenciales la mayor parte de los muros son cubiertos por grandes áreas vidriadas, se debe considerar el uso de aislantes para la reducción de ganancias y pérdidas de calor.

2.1.3 Ventanas

Estos elementos forman parte de los muros y son responsables de aproximadamente un 50% de las ganancias solares. Las ganancias solares debido a las aberturas vidriadas de un edificio, dependiendo del clima, representan una importante fuente de calor no deseada y discomfort térmico en edificios sin ventilación (Al-tamimi *et al.*, 2009).

2.1.4 Pisos

Existen dos tipos de pisos, los pisos sobre terreno o pisos sobre nivel del suelo que son aquellos ubicados en la planta baja del edificio y los pisos superiores. Los pisos superiores forman parte del techo del nivel uno de la edificación y a su vez conforman el suelo del nivel dos. El buen diseño y selección de los materiales de construcción para estos elementos evita considerablemente pérdidas de calor en el edificio, principalmente en pisos sobre nivel del suelo.

2.2 Transferencia de calor en envolventes

Cuando existe una diferencia de temperaturas entre la edificación y el ambiente exterior, ocurre una transferencia de calor, en donde, por principios de la termodinámica, dicho calor fluirá del lado más caliente al menos caliente de la edificación. Los mecanismos por los cuales ocurre la transferencia son, conducción, convección y radiación.

2.2.1 Conducción

La conducción de calor es vista como la transferencia de energía en donde las partículas más energéticas de una sustancia ceden energía a las menos energéticas debido a la interacción entre las mismas, produciendo un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas. Los metales suelen ser los mejores conductores de calor, mientras que el aire es un mal conductor de calor. A los materiales que son malos conductores de calor se les llama aislantes.

Es posible cuantificar el proceso de transferencia de calor mediante ecuaciones que pueden ser usadas para calcular la cantidad de energía que está siendo transferida por unidad de tiempo. Para conducción de calor, en estado estacionario, la ecuación gobernante es conocida como *Ley de Fourier* y se representa como:

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

donde,

Q_c = Flujo de energía calorífica por conducción [W]

k = Conductividad térmica del material [$W/m \cdot K$]

A = Área expuesta al flujo de calor [m^2]

$\frac{dT}{dx}$ = Razón de cambio de la temperatura respecto al eje x

La constante de proporcionalidad k es una propiedad de transporte conocida como conductividad térmica y es una característica del material que representa la capacidad con la cual dicho material conduce calor. El signo menos es una consecuencia del hecho de que el calor es transferido en la dirección del decremento de temperatura (Incropera y Dewitt, 2002). En la Fig. 2.1, se muestra el esquema de la conducción de calor en un elemento vertical.

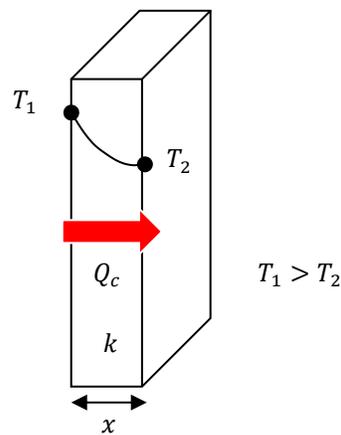


Figura 2. 1 Conducción de calor en un elemento vertical.

En una edificación, la transferencia de energía por conducción ocurre en cada elemento de la envolvente. La Tabla 2.1 muestra valores de la conductividad térmica para materiales empleados en la construcción de edificaciones.

Tabla 2. 1 Conductividad térmica para materiales de construcción.

Material de construcción	Conductividad térmica [W/m·K]
Ladrillo	0.814
Poliestireno expandido	0.0389
Yeso	0.372
Arena/mortero	0.721
Concreto	1.74
Impermeabilizante	0.17
Azulejo	1.136
Aire*	0.024

* Empleado como fluido en el interior de la edificación a 20 °C.

2.2.2 Convección

La transferencia de calor por convección (Fig. 2.2) ocurre entre un fluido en movimiento y una superficie cuando los dos están a diferentes temperaturas. Este modo de transferencia de calor comprende dos mecanismos, el primero llamado *difusión*, que corresponde a la transferencia de energía debido al movimiento molecular aleatorio y *advección*, que se refiere al transporte de energía por movimiento macroscópico o masivo del fluido (Incropera y Dewitt, 2002).

La transferencia de calor por convección puede clasificarse de acuerdo a la naturaleza del flujo. Se habla de *convección forzada* cuando el flujo es causado por medios externos, como bombas, ventiladores o viento atmosférico. Por el contrario, para la *convección libre* (natural), el movimiento del fluido se origina únicamente por fuerzas de flotación, inducidas por la diferencia de densidades del fluido, causada por variaciones en la temperatura del mismo (Santamouris y Asimakopoulos, 1996).

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa con la siguiente ecuación, representada por la *Ley de enfriamiento de Newton*:

$$Q_v = h_c A_s (T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

donde,

Q_v = Flujo de calor convectivo [W]

h_c = Coeficiente de transferencia de calor convectivo [$W/m^2 \cdot K$]

A = Área de la superficie [m]

T_s = Temperatura de la superficie [K]

T_∞ = Temperatura del fluido [K]

La constante de proporcionalidad h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección; este coeficiente depende de la geometría de la superficie, de la naturaleza del movimiento del fluido y de las propiedades termodinámicas y de transporte del fluido.

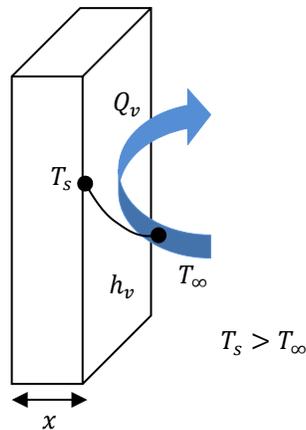


Figura 2. 2 Transferencia de calor por convección.

El valor del coeficiente de transferencia de calor por convección h_c , puede variar de acuerdo al tipo de superficie.

Tabla 2. 2 Valores del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Tipo de superficie	h_c $W/m^2 \cdot K$
Superficies interiores verticales	3
Superficies interiores horizontales	4.3
Superficies expuestas al viento	$5.8 + 4.1v$

* v = Velocidad del viento [m/s]

Así mismo, el calor se transfiere por convección natural cuando la velocidad del aire es menor a $0.3m/s$ y por el contrario, cuando es mayor a esta velocidad se considera convección forzada. La determinación exacta de la transferencia de calor por convección tanto en superficies externas como internas resulta compleja y puede ser hecha mediante medidas cuidadosas y programas de simulación. En elementos como ventanas, la transferencia de calor por convección ocurre en ambos lados de ésta, en el lado interior como exterior.

2.2.2.1 Convección en el lado interno de la ventana

La transferencia de calor por convección en el lado interno de la ventana, ocurre principalmente por convección natural y pocas veces sucede por convección forzada. El flujo de calor convectivo en el lado interno se define como (ISO 15099, 2012):

$$q_{cv,in} = h_{cv,in} (T_{s,in} - T_{in}) \quad (2.3)$$

donde, $T_{s,in}$ es la temperatura de la superficie interior de la ventana y T_{in} es la temperatura del aire interior. El coeficiente de transferencia de calor convectivo de la superficie interior $h_{cv,in}$, es determinado en términos del número de Nusselt (Nu):

$$h_{cv,int} = Nu \left(\frac{k}{H} \right) \quad (2.4)$$

donde k es la conductividad térmica del aire y el número de Nusselt se calcula como función del número de Rayleigh basado en la altura H de la ventana:

$$Ra_H = \frac{\rho^2 H^3 g C_p |T_{b,n} - T_{int}|}{T_{m,f} \mu k} \quad (2.5)$$

donde, $T_{b,n}$ es la temperatura de la superficie interior del vidriado; las diversas propiedades de los fluidos son aquellas del aire evaluado y la temperatura promedio de la película se calcula, según ISO 15099 (2012) con la siguiente ecuación:

$$T_{m,f} = T_{int} + \frac{1}{4}(T_{b,n} - T_{int}) \quad (2.6)$$

El valor de Nusselt está en función al ángulo de inclinación de la ventana γ y se basa en el hecho de que el ambiente interior es más caliente que la superficie interna del vidriado $T_{int} \geq T_{b,n}$. Es por ello que se han propuesto ecuaciones que permiten calcular el número de Nusselt de acuerdo al ángulo de inclinación de la ventana (ISO 15099, 2012).

Por otra parte, cuando el flujo de aire en el lado interno de la ventana es forzado, el coeficiente de transferencia de calor se calcula mediante la siguiente relación:

$$h_{cv,int} = 4 + 4V_s \quad (2.7)$$

donde, V_s es la velocidad de la corriente libre cerca de la superficie de la ventana en m/s .

2.2.2.2 Convección en el lado externo de la ventana

La transferencia de calor el lado externo ocurre principalmente por convección forzada. El flujo de calor convectivo en el lado externo está definido como:

$$q_{cv,ex} = h_{cv,ex} (T_{s,ex} - T_{ex}) \quad (2.8)$$

donde, $T_{s,ex}$ es la temperatura de la superficie externa del vidriado.

Debido a que las ventanas son los principales elementos de la edificación en el desempeño energético total, es necesario definir las características del vidriado como una función de las diferentes variables climáticas. Diversos factores influyen en la transferencia de calor por convección forzada del lado externo de la ventana, como por ejemplo, la diferencia de temperatura entre la superficie del vidrio y el aire, la velocidad y dirección del viento, forma y rugosidad de la superficie, entre otros. Es por ello que el coeficiente de transferencia de calor por convección forzada se calcula mediante (ISO 15099, 2012):

$$h_{cv,ex} = 4.7 + 7.6V_s \quad (2.9)$$

Si la superficie es de barlovento,

$$V_s = 0.25V ; V \geq 2 \frac{m}{s} \quad (2.10)$$

$$V_s = 0.5V ; V \leq 2 \frac{m}{s} \quad (2.11)$$

Si la superficie es de sotavento,

$$V_s = 0.3 + 0.05V \quad (2.12)$$

donde, v es la velocidad del viento medido a una altura de 10 m sobre el nivel del suelo y V_s es la velocidad de la corriente libre cerca de la superficie de la ventana. Se han establecido correlaciones para el cálculo de la dirección del viento (a favor o en contra) con relación a la superficie (ISO 15099, 2012). Para determinar el coeficiente de convección natural en el lado exterior, se sigue la misma metodología que el caso de convección natural en el lado interior.

2.2.3 Radiación

El tercer mecanismo de transferencia de calor es la radiación, en donde la energía emitida por la materia se transfiere en forma de ondas electromagnéticas (fotones) debido a los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constituyentes. A diferencia de la conducción y convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio conductor.

La radiación es la forma más rápida de transferir calor (a la velocidad de la luz) y es de esta forma en que la energía del sol llega a la Tierra. La radiación térmica es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura absoluta. Todo cuerpo a una temperatura por encima del cero absoluto emite radiación térmica (Cengel, 2007).

La razón máxima de radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura T_s se rige por ley de *Stefan-Boltzmann*:

$$Q_{emitida,máx} = \sigma A_s T_s^4 \quad (2.13)$$

donde,

$Q_{emitida,máx}$ = Radiación emitida por un cuerpo ideal [W]

σ = Constante de Stefan-Boltzmann [$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$]

A_s = Área de la superficie expuesta [m^2]

T_s = Es la temperatura absoluta de la superficie [K]

Esta radiación máxima corresponde a una superficie idealizada conocida como *cuerpo negro*, sin embargo, la radiación emitida por superficies reales es menor a la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como:

$$Q_{emitida,máx} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (2.14)$$

La *emisividad* ε es una propiedad radiativa cuyo valor se encuentra entre $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Esta propiedad proporciona una medida de que tan eficientemente una superficie emite energía con respecto a un cuerpo negro, para el cual $\varepsilon = 1$.

Otra propiedad importante relativa a la radiación de una superficie es su *absortividad* α , la cual es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por esta. Su valor está en el intervalo $0 \leq \alpha \leq 1$. Para un cuerpo negro $\alpha = 1$, ya que absorbe totalmente la radiación incidente sobre él. Por lo tanto, un cuerpo negro es considerado un absorbente perfecto y a su vez, un emisor perfecto.

Cuando la razón de absorción de la radiación es mayor que la de emisión, se dice que la superficie está ganando energía por radiación, en caso contrario, se dice que la superficie está perdiendo energía por radiación. Cuando una superficie de emisividad ε y área superficial A_s , a una temperatura T_s , está completamente encerrada por una superficie mucho más grande (o negra), a una temperatura T_{alred} y separada por un gas (como el aire) que no interfiere con la radiación, la radiación neta de transferencia de calor [W] (flujo de calor por radiación) se expresa como:

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alred}^4) \quad (2.15)$$

El flujo de calor por radiación entre dos superficies con temperaturas T_1 y T_2 , está dado por (Chagolla, 2013):

$$Q_{rad} = h_r A_s (T_1 - T_2) \tag{2.16}$$

donde, h_r es el coeficiente de transferencia de calor por radiación $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$.

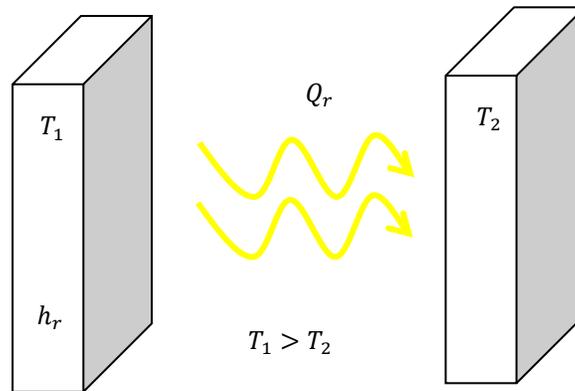


Figura 2.3 Radiación entre dos superficies.

La Tabla 2.3 muestra valores del coeficiente radiativo h_r , éste depende de la emisividad de las superficies y de la temperatura de las mismas.

Tabla 2.3 Valores del coeficiente radiativo.

Superficie	Temperatura superficial [°C]	h_r
Para superficies de construcción normales	20	5.7 ϵ
	0	4.6 ϵ

Haciendo una comparación entre cuerpos opacos, por ejemplo, muros y techos, con cuerpos transparentes, como el vidriado de una ventana, la transferencia de calor por radiación se muestra en la Fig. 2.4.

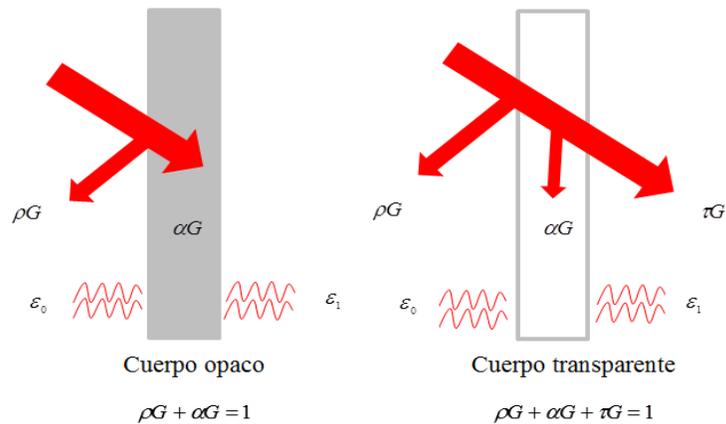


Figura 2. 4 Transferencia de calor en cuerpos opacos y transparentes.

La reflectividad ρG , transmisividad τG y la absorptividad αG , son propiedades ópticas de los acristalamientos y se explicará con mayor detalle en la sección 2.3.

2.2.4 Valor-U

El *valor-U* cuantifica el valor de aislamiento de un vidrio, esto indica la tasa de flujo de calor a través de un sistema vidriado. El *valor-U* es el coeficiente de transferencia de calor total en un sistema vidriado, cuyas unidades son $W/m^2 \cdot K$, lo cual incluye transferencia de calor por radiación, conducción y convección, para determinadas condiciones ambientales. Una medida pequeña del *valor-U* de un material indica una tasa baja de flujo de calor. El *valor-R* mide la resistencia térmica y es el recíproco del *valor-U* ($R=1/U$).

El *valor-U* depende de las propiedades térmicas de los materiales del sistema vidriado (en el caso de una ventana, se deben incluir las propiedades térmicas tanto del vidrio, marco, divisores, etc.) así como de las condiciones climáticas, diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior y la velocidad del viento. El *NFRC* (*National Fenestration Rating Council*) ha estandarizado la condiciones para calcular el *valor-U* para la evaluación de un producto, utilizando para la velocidad del viento: 5.5 m/s, temperatura interior: 21 °C y temperatura del aire exterior: -18 °C (LBNL, 2011).

La transferencia de calor en unidades vidriadas se subdivide en: el centro del vidrio (cg), borde del vidrio (eg) y contribución del marco (f); para el caso de un sistema de doble vidriado se contempla la transferencia de calor del gas. En consecuencia, la tasa de transferencia de calor a través de un sistema vidriado, puede calcularse conociendo las contribuciones por separado de estas tres partes (cuando se presenta divisores de acristalamiento, rejillas decorativas y barras de división, también afecta la transferencia de calor y su contribución también se considera).

Cuando se requiere únicamente el efecto de la transferencia de calor en la superficie vidriada (sin contemplar marcos ni divisores) se referirá a un *valor-U* del centro del vidrio. Para un vidrio sencillo, el *valor-U* depende ampliamente de los coeficientes de la superficie interna y externa del vidrio. El *valor-U* para un vidrio sencillo es (ASHRAE, 2009):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_i} + \frac{l}{k}} \quad (2.17)$$

donde, h_i y h_o son los coeficientes de transferencia de calor de la superficie interior y exterior del vidrio, respectivamente y l es el espesor del vidrio. Los coeficientes h_i y h_o se determinan por la suma del coeficiente de transferencia de calor por convección y radiación al interior y exterior de la superficie acristalada (Jiménez, 2012):

$$h = h_c + h_r \quad (2.18)$$

El flujo de calor a través de una porción central del vidrio de una unidad multividriada debe considerarse transferencia convectiva y radiativa en el espacio gaseoso y puede ser considerado unidimensional. Para mayores anchos en el espacio gaseoso no hay efectos significativos en el *valor-U*; a mayores espesores de unidades vidriadas, el *valor-U* decrementa.

2.3 Propiedades y tipos de acristalamientos

En edificios no residenciales el empleo de grandes áreas vidriadas omite el uso de marcos y acristalamientos, ya que el empleo de vidriados continuos permite a la edificación mantener un estilo único y vanguardista. Las propiedades de los acristalamientos pueden afectar de manera significativa su desempeño térmico, por lo que es necesario tomarlas en cuenta en el momento de su elección. Un vidrio cuenta con propiedades ópticas y térmicas que cuantifican en mayor o menor medida su eficiencia térmica.

2.3.1 Propiedades ópticas

Las propiedades básicas de los acristalamientos que afectan la transferencia de energía solar son: transmitancia, reflectancia y absortancia. Una propiedad óptica de los acristalamientos es la *transmitancia* y se refiere al porcentaje de radiación solar que puede atravesar una superficie vidriada (LBNL, 2011). La *reflectividad* representa la fracción de la radiación incidente que es reflejada por la superficie vidriada. La reflectividad natural del vidrio depende de la calidad de la superficie del vidrio, de la presencia de recubrimientos y del ángulo de incidencia solar y puede incrementarse aplicando varios recubrimientos metálicos sobre la superficie (LBNL, 2011).

Por otra parte, la absortividad es la propiedad del vidrio que determina la cantidad de radiación incidente que puede absorber. La *absortancia*, por otro lado, representa en sí la fracción de radiación incidente que es absorbida por el vidrio, con valores que van de 0 a 1 (aunque también pueden expresarse en términos de porcentaje, de 0% a 100%). La absortancia, en ocasiones denominada absorción superficial, depende fundamentalmente del color y el acabado de los materiales (DesignBuilder, 2011). La absortancia puede establecerse en relación con radiaciones de diferentes longitudes de onda. Debido a ello es común encontrar tres formas distintas de absortancia, solar, visible y térmica.

2.3.2 Propiedades térmicas

La *conductividad térmica* de un material se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área, por unidad de diferencia de temperatura y está dada en $W/m^{\circ} \cdot C$ (Cengel, 2007).

Cuando un vidrio absorbe calor, este es reirradiado por la superficie del vidrio. Esta habilidad del vidrio (o material) para radiar energía se llama *emisividad*. La emisividad de un material representa la proporción entre la energía radiada por dicho material y la energía que radiaría un cuerpo negro ideal. En otras palabras, se trata de una medida de la capacidad de un material para absorber y radiar energía; cualquier objeto real tiene una emisividad mayor a 0 y menor a 1.

2.3.3 Tipos de acristalamientos

El *acristalamiento claro* es el tipo más simple y no tiene recubrimiento. Proporciona la transmitancia visible más alta pero a su vez, tiene las mayores pérdidas térmicas. Por otra parte, *el acristalamiento tintado* contiene colorantes metálicos y es un elemento arquitectónico muy importante en el diseño de fachadas y también se emplea en la decoración de interiores. Los vidrios tintados tienen una baja transmitancia y una elevada absorción y son llamados vidrios absorbentes. La baja transmitancia reduce la cantidad de iluminación natural al interior. Su principal uso es el reducir el deslumbramiento y la excesiva transmisión solar.

Los recubrimientos *reflectivos* pueden ser agregados al vidrio para incrementar la reflectividad en su superficie, con el fin de lograr una considerable reducción en las ganancias solares. Un recubrimiento reflectivo consiste usualmente de capas delgadas metálicas. Los diseñadores generalmente emplean vidrios reflectivos debido a su control de deslumbramiento y a la apariencia atractiva exterior. Un acristalamiento con recubrimiento de *baja emisividad (low-e)* logra ya sea, control solar o aislamiento térmico. El desempeño de un vidrio sencillo con recubrimiento low-e dependerá de la posición del recubrimiento, interior o exterior.

2.4 Parámetros de eficiencia térmica en vidriados de ventanas

El desempeño térmico de un vidriado está principalmente influenciado por índices que relacionan la transferencia de calor, como el *valor-U* ($W/m^2 \cdot K$) y las ganancias solares como el *SHGC*. También se encuentra el coeficiente de sombreado, que está directamente relacionado con las ganancias solares.

2.4.1 Coeficiente de ganancia de calor solar (*SHGC*)

El coeficiente de ganancia de calor solar (*SHGC*) representa la ganancia de calor solar a través de un sistema vidriado con relación a la radiación solar incidente. Aunque el *SHGC* puede ser determinado para cualquier ángulo de incidencia, la referencia utilizada comúnmente es la radiación solar incidente normal. El *SHGC* se refiere al desempeño total de un sistema vidriado y es un indicador de la ganancia solar bajo un amplio rango de condiciones. El *SHGC* se expresa como un número adimensional en un intervalo de 0 a 1. Un alto valor en el *SHGC* significa una ganancia de calor elevada, mientras que un valor bajo significa una ganancia de calor baja.

El *SHGC* es la fracción de la radiación solar incidente admitida a través de una superficie vidriada, transmitida o absorbida directamente. Para determinar el *SHGC* de una superficie vidriada, *ASHRAE* presenta la siguiente ecuación:

$$SHGC = T + \sum_{k=1}^L N_k A_k \quad (2.19)$$

donde,

T = Transmitancia de la superficie vidriada

L = Número de capas vidriadas

A = Absortancia de la capa de vidrio k

N = Fracción de la radiación absorbida que fluye al interior para la capa de vidrio k

La fracción de la radiación absorbida puede calcularse utilizando la siguiente ecuación:

$$N_k = \frac{\text{valor} - U}{h_{ex,k}} \quad (2.20)$$

donde $h_{ex,k}$ es el coeficiente efectivo de transferencia de calor entre el ambiente exterior y el vidrio.

2.4.2 Coeficiente de sombreado (SC)

El coeficiente de sombreado (*SC, Shading Coefficient*) representa la razón de la ganancia de calor solar a través de un sistema vidriado con respecto a un vidrio claro de 3 mm en incidencia normal. El SC define la capacidad de control solar de un sistema vidriado, es decir, proporciona la transmitancia de energía solar a través de la ventana.

2.4.3 Transmitancia visible (VT)

La *transmitancia visible (VT, Visible Transmittance)* es la transmitancia total del vidriado a través de la porción visible del espectro solar. Aunque la *VT* puede determinarse por algún ángulo de incidencia, por defecto y la referencia más comúnmente usada es la radiación solar en incidencia normal.

2.5 Balance térmico en edificaciones

En términos generales, las condiciones térmicas de un edificio dependen de la magnitud de las pérdidas y ganancias de calor que está teniendo en un momento dado por conducción, convección y radiación. El edificio tenderá a calentarse cuando las ganancias de calor sean mayores que las pérdidas, y a enfriarse en la situación contraria. En cualquiera de los dos casos se puede llegar fácilmente a condiciones interiores de discomfort, las cuales, en situaciones extremas, exigirán sistemas de climatización artificial (refrigeración y/o calefacción) para ser contrarrestadas.

2.5.1 Ganancias y/o pérdidas térmicas

Las ganancias o pérdidas térmicas están relacionadas con la interacción edificio-ambiente, Fig. 2.5, es decir, surgen a partir de un intercambio de energía a través de los mecanismos de transferencia de

calor. Se habla de ganancia térmica cuando hay un aporte de energía en el interior del edificio y pérdida térmica cuando dicha energía se libera al medio ambiente.

De acuerdo al método de la ecuación del balance térmico, el equilibrio térmico de un edificio ocurre cuando la suma de las pérdidas y ganancias de calor es igual a cero, llegando a un punto neutral que se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Q_s + Q_i \pm Q_c \pm Q_v \pm Q_m - Q_e = 0 \quad (2.21)$$

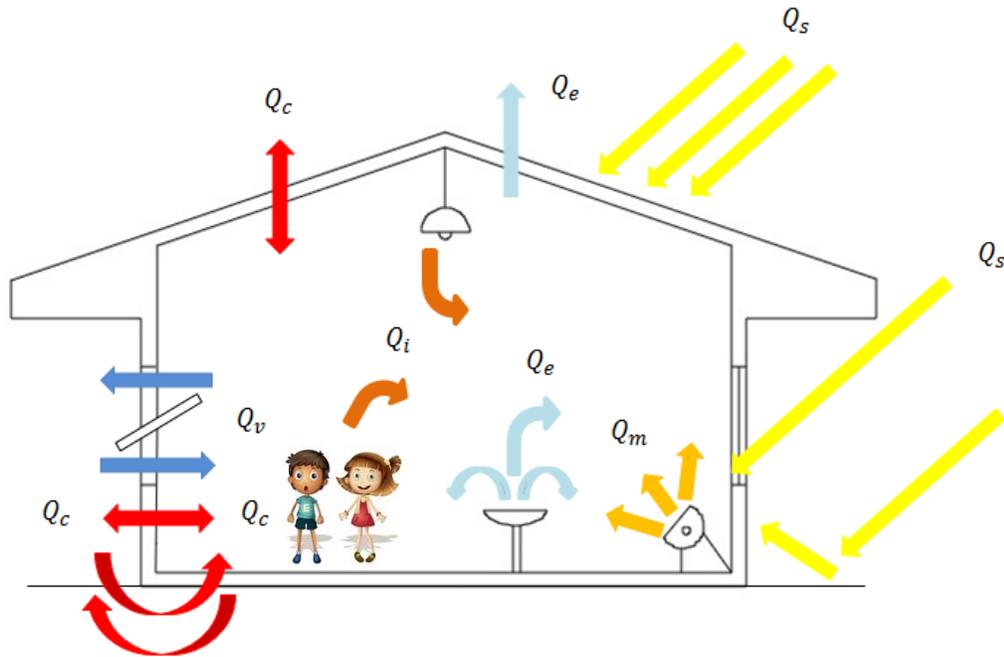


Figura 2.5 Balance térmico en una edificación.

2.5.1.1 Ganancias solares Q_s

La radiación solar que incide sobre la edificación puede generar importantes ganancias de calor. Cuando éstas se dan a través de superficies opacas (muros y cubiertas) se denominan *ganancias*

indirectas, y cuando ocurren a través de superficies transparentes, como el vidrio, se llaman *ganancias directas*. En la ecuación del balance térmico se recomienda calcular las ganancias indirectas por medio del parámetro temperatura sol-aire (ganancias por conducción). Sin embargo, en ocasiones puede resultar útil conocer las ganancias solares indirectas independientemente de la temperatura del aire exterior.

2.5.1.2 Ganancias internas Q_i

Los flujos de calor internos son aquellos que se originan exclusivamente en el interior de la edificación y las principales fuentes son:

- a) *Calor metabólico*. Es el calor producido por los ocupantes, lo cual puede ser significativo, especialmente cuando el espacio esté lleno de personas (un adulto promedio produce 110 W, lo cual puede elevarse hasta 800 W cuando están jugando basquetbol).
- b) *Iluminación artificial*. Lo cual es una fuente de calor significativa en edificios de oficinas y comerciales, mientras que su contribución para edificios residenciales es usualmente pequeña.
- c) *Dispositivos electrónicos*. Producen una cantidad suficiente de calor, especialmente en oficinas modernas. Una televisión puede añadir más de 300W, dependiendo de su tamaño.
- d) *Cocina, baño*. Los cuales agregan una entrada de calor extra en el interior del edificio.

2.5.1.3 Ganancias y pérdidas por conducción Q_c

Cuando existen flujos de calor a través de la envolvente del edificio y dependiendo del sentido de dichos flujos, se tienen, pérdidas o ganancias por conducción. Si los cerramientos tienen cámaras de aire en su interior también se dan procesos de transferencia de calor por convección, aunque estos suelen ser menos intensos. La cantidad de calor ganado o perdido dependerá de las características térmicas de los materiales empleados, de la diferencia de temperatura interior-exterior y de la superficie total expuesta.

2.5.1.4 Ganancias y pérdidas por ventilación-convección Q_v

Las pérdidas y ganancias por ventilación-convección, ocurren cuando el aire exterior ingresa y circula a través de la edificación, lo cual implica también que el aire interior sea expulsado hacia afuera. La ventilación se puede dar de manera intencional, a través de ventilas, ventanas y puertas, o bien en forma involuntaria, mediante la infiltración a través de los componentes constructivos. Cuando la temperatura del aire exterior es mayor que la del aire interior se tienen ganancias, y viceversa.

La *ventilación* en edificios ha sido una importante técnica de enfriamiento a través del mundo. Está basada en los fundamentos de transferencia de calor por convección, donde el aire que fluye junto a una superficie disipa calor, siempre que sea una temperatura inferior a la de la superficie. Cuando esto pasa sobre el cuerpo humano, incrementa la tasa de evaporación de la piel y mejora la extracción de calor. Los movimientos del aire a través de los edificios resultan de la diferencia de presiones en interiores como exteriores, lo cual puede lograrse por:

- a) *Fuerzas naturales*: Debidas a una diferencia de presiones inducidas por el viento y diferencia de presiones inducidas por gradientes de temperatura entre el interior y el exterior del edificio.
- b) *Fuerzas mecánicas*: Diferencias de presiones inducidas mecánicamente como por ejemplo un ventilador.

Por otra parte, la *infiltración* es la fuga de aire a través de grietas en la envolvente de la edificación. La infiltración permite incrementar las cargas de calentamiento o enfriamiento cuando el aire exterior ingresa a la edificación y necesita ser calentado o enfriado. En condiciones extremas, la infiltración puede ser responsable de grandes pérdidas y ganancias de calor al igual que los elementos de la envolvente. La ASHRAE describe diversos métodos para el cálculo de la infiltración en edificios residenciales y comerciales, algunas ecuaciones empíricas combinan el flujo de aire debido a la diferencia de temperatura y el efecto del viento y se utiliza para calcular las infiltraciones de aire a través de toda la envolvente. Su aplicación se basa en el conocimiento del área efectiva de fugas de aire o coeficiente de la tasa de filtrado para una diferencia de presión establecida y de los valores de una serie de constantes empíricas que se obtienen a partir de tablas. Sin embargo, debido a la diversidad y complejidad del cálculo de las infiltraciones, algunos autores (ASHRAE, 2009) encontraron que ocho

edificios de oficinas de reciente construcción, tuvieron tasas de infiltración que van del 0.1 al 0.6 ACH (cambio de aire por hora) sin entrada de aire exterior.

La infiltración en los edificios comerciales puede tener muchas consecuencias negativas, incluyendo la reducción de confort térmico, la interferencia con el funcionamiento adecuado de los sistemas de ventilación mecánica, calidad del aire interior degradada, daños por humedad de la construcción de los componentes de la envolvente del edificio y un mayor consumo de energía.

2.5.1.5 Ganancias y pérdidas mecánicas Q_m

El flujo de calor debido a los sistemas mecánicos de climatización está sujeto al diseñador y puede dimensionarse de acuerdo a las necesidades de la edificación. Debido a ello, generalmente se considera como una variable independiente, es decir, que se puede ajustar de acuerdo al balance de los demás factores.

Los sistemas mecánicos de climatización, además de ser costosos, suponen un gasto energético extra en los edificios, el cual puede llegar a alcanzar niveles excesivos. En este sentido, el diseñador siempre debería tratar de reducir los requerimientos de climatización mecánica al mínimo aplicando estrategias de diseño pasivas, empleando los materiales y sistemas constructivos más adecuados.

2.5.1.6 Pérdidas evaporativas Q_e

Las pérdidas de calor por evaporación ocurren cuando el agua se evapora y se incorpora al aire del espacio interior. La contribución de cada tipo de ganancias o pérdidas de calor dependen de la envolvente y del uso del edificio. La protección frente a los flujos de calor se pueden lograr a través de, dispositivos de sombreado, vegetación, evaporación, aislamiento térmico, colores claros y dispositivos electrónicos eficientes (Santamouris y Asimakopoulos, 1996).

2.6 Confort térmico

En la actualidad, los estándares de confort térmico permiten establecer condiciones variadas de acuerdo al tipo de edificación, ya que las exigencias de confort no son las mismas para personas acostumbradas

a edificaciones climatizadas artificialmente y para aquellas que habitan regularmente edificios que funcionan de modo pasivo.

2.6.1 Modelo de confort térmico adaptable

El objetivo principal de los modelos de confort térmico es establecer una temperatura con la cual la mayoría de las personas en un sitio determinado se sentirían razonablemente cómodas. El modelo de confort adaptable, empleado por Nicol y Humphreys (1998), considera tres tipos de edificaciones, edificios en modo pasivo, edificios en modo mecánico y edificaciones con funcionamiento desconocido o variable.

El presente trabajo, empleó la edificación base que se utilizó para la elaboración de indicadores de la NOM-008-ENER-2001. En la edificación base se emplean sistemas mecánicos para acondicionar el interior, es por ello que se utilizó del modelo de confort adaptable la edificación en modo mecánico, donde la ecuación para determinar la temperatura de confort es la siguiente:

$$T_c = 23.9 + 0.295(T_{prom} - 22) \exp\left(\left[\frac{-(T_{prom} - 22)}{33.94}\right]^2\right) \quad (2.22)$$

A partir de esta ecuación se determinaron los set points para cada zona climática. Algunos autores recomiendan establecer la zona de confort a partir de rangos de ± 2 °C, cuando se emplean temperaturas promedios anuales y ± 1.75 °C cuando se emplean promedios mensuales, esto, con respecto a la temperatura de confort calculada. En la Tabla 2.4, se muestran las temperaturas de confort calculadas de acuerdo al modelo de confort adaptable para cada ciudad seleccionada.

Tabla 2. 4 Temperaturas de confort para las ciudades seleccionadas.

Ciudad	Temperatura de confort [$^{\circ}\text{C}$]
Villahermosa	24.9
Mérida	25.0
Monterrey	24.9
Hermosillo	24.9
México D. F.	22.9
Xalapa	22.9

El conocimiento de las propiedades termofísicas de los materiales de construcción permiten una adecuada selección de dichos materiales para que el comportamiento térmico de la edificación sea lo más eficiente posible. Sin embargo, existen normativas mexicanas que siguen empleando materiales de construcción con un desempeño térmico bajo, tal es el caso de la NOM-008-ENER-2001; es por ello que este estudio, utiliza la edificación utilizada por la norma y estudia su comportamiento térmico con diferentes tipos de vidriados. A continuación se describe la edificación base y el estudio paramétrico utilizado para las modelaciones.

CAPÍTULO **3**

Caso de estudio y Descripción de las simulaciones

En el Capítulo 3, se describe la edificación no residencial que se utilizó como base para la elaboración de indicadores de la NOM-008-ENER-2001 y que fue empleada para esta investigación, llamada edificación de referencia (edificación base), así mismo, se describe de forma general las características climáticas de las ciudades seleccionadas y la metodología en que fueron llevadas a cabo las simulaciones para obtener las ganancias y pérdidas de calor, así como el consumo energético total.

3.1 Caso de estudio: edificación base para la elaboración de indicadores de la NOM-008-ENER-2001

En México el presupuesto energético de las edificaciones no residenciales nuevas o en remodelación está supervisado por la Norma NOM-008-ENER-2001. Esta Norma permite calcular las ganancias de calor del edificio base o de referencia (es el edificio en el que se basa la Norma) y las del edificio proyectado (es el edificio que se pretende construir) y compara las ganancias totales de los edificios, el de referencia y el proyectado. De esta forma se determina el cumplimiento o no de la Norma del edificio proyectado junto con la eficiencia energética del mismo. De esta manera, se optimiza el diseño desde el punto de vista del comportamiento térmico de la envolvente, obteniéndose como beneficios, entre otros, el ahorro de energía por la disminución de la capacidad de los equipos de enfriamiento y un mejor confort de los ocupantes.

La edificación base o de referencia empleada en esta investigación, fue la reportada por la Norma NOM-008-ENER-2001, así mismo, fue la misma edificación que emplearon otros autores como *Halverson et. al.* en 1994 y *Álvarez et. al.* en el 2014, para calcular las cargas térmicas de refrigeración. Los materiales de construcción de la edificación base se describen en la Tabla 3.1.

Tabla 3. 1 Materiales de construcción, dimensiones y propiedades termofísicas de la edificación base.

Elemento del edificio	Material	Espesor [mm]	Densidad [kg/m ³]	Calor específico [KJ/kg - K]	Conductividad térmica [W/m - K]
Pared	Yeso	15	800	1000	0.372
	Ladrillo	140	1600	800	0.81
	Mortero	15	1890	837	0.72
Techo	Yeso	15	800	1000	0.372
	Concreto	100	2300	840	1.740
	Impermeabilizante	20	1127	800	0.17
Piso nivel	Azulejo	10	2600	795	1.136

del suelo	Concreto	100	2300	840	1.740
	Azulejo	10	2600	795	1.136
Pisos superiores	Concreto	100	2300	840	1.740
	Yeso	15	800	1000	0.372
Ventana	Vario claro	6	-	-	-

La edificación base que se utilizó para la elaboración de indicadores de la NOM-008-ENER-2001 no cuenta con materiales aislantes en su envolvente, lo que hace que sea una edificación propensa a tener altas ganancias de calor. La Fig. 3.1, muestra la ubicación de los materiales de construcción, para diferentes elementos de la envolvente de la edificación base.

Exterior



a) Pared



b) Techo

Interior



c) Piso nivel del suelo



d) Pisos superiores

Figura 3. 1 Ubicación de los materiales de construcción.

La NOM-008-ENER-2001 empleó para su estudio una edificación con vidriado claro de 6 mm con RAVP (Razón de aspecto Área Vidriada-Pared) del 40%. Otros autores como *Omar y Al-Ragom (2002)* emplearon vidriados también con 6 mm de espesor, por lo tanto, tomando como referencia los datos anteriores, para las edificaciones no residenciales simuladas en el presente trabajo de investigación se emplearán vidriados con 6 mm de espesor.

Para la selección de los vidriados se tomó en cuenta el trabajo hecho por *Hernández (2013)*, quien utilizó para su estudio vidriado claro, reflectivo y vidriado de baja emisividad (low-e). Así mismo, para realizar un análisis más completo y comparativo, se consideró también, el vidriado tintado y sistemas de doble vidriado. En la Tabla 3.2, se muestra la ficha técnica de los vidriados seleccionados para las simulaciones, así como la configuración de los sistemas de doble vidriado. Para el cálculo de las propiedades ópticas y térmicas de los vidriados se empleó el software *WINDOW 7.3*, ya que cuenta con una amplia librería en vidriados y permite el cálculo de propiedades de sistemas vidriados múltiples.

Los vidriados seleccionados para las simulaciones son distribuidos por fabricantes con sucursales en México, para el caso de *Vitro*, se seleccionó el vidriado claro y tintado, el vidriado reflectivo es distribuido por *Saint Gobain Glass* y el vidrio bajo emisivo por la empresa *Guardian*.

Tabla 3. 2 Ficha técnica de los vidriados seleccionados.

Número	Tipo	Espesor [mm]	Coeficientes de ganancia solar			
			<i>Valor-U</i>		<i>SHGC</i>	
			Cálido	Frío	Cálido	Frío
1	Claro	6	5.801		0.82	
2	Reflectivo	6	5.706		0.498	
3	Low-e	6	3.327		0.58	
4	Tintado	6	5.801		0.611	
5	Claro+aire+claro	6,12,6	2.695		0.707	
			Cálido	Frío	Cálido	Frío
6	Claro+aire+reflectivo	6,12,6	2.675	2.67	0.424	0.457
7	Claro+aire+low-e	6,12,6	1.711	1.710	0.51	0.659

En la Tabla 3.2, se puede apreciar que para los dispositivos de doble vidriado (DDV) claro+reflectivo y claro+low-e, existen dos valores para U y para el $SHGC$, esto se debe a que la ubicación de la película de control solar, reflectiva o bajo emisiva es diferente para climas cálidos y fríos, de acuerdo con Pérez (2012). Para climas cálidos, la película de control solar se ubica en la superficie interna del vidriado exterior y para climas fríos, la película se coloca en la superficie externa del vidriado interior. La Figura 3.2, muestra la ubicación de la película de control solar, empleada por Pérez (2012).

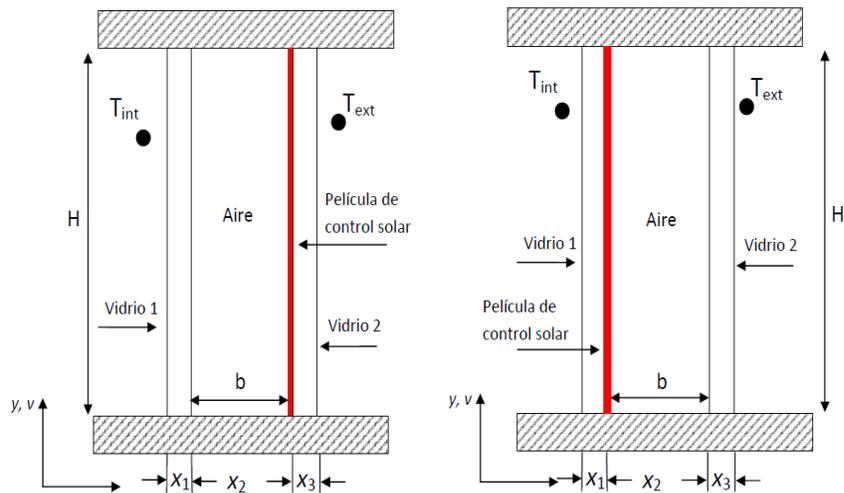


Figura 3. 2 Ubicación de la película de control solar, a) climas cálidos, b) clima frío (Pérez, 2012).

Estos cambios en la ubicación de la película de control solar para climas cálidos y fríos trajeron cambios como el incremento del $SHGC$ para climas fríos y el valor- U prácticamente permaneció constante. En la Tabla 3.3, se muestran las propiedades térmicas y ópticas de los vidrios seleccionados, donde T_{sol} representa la transmitancia solar, T_{vis} es la transmitancia visible, R_{sol} es la reflectancia solar, la reflectancia visible está representada por R_{vis} , ϵ es la emitancia y k es la conductividad térmica del vidrio. Los subíndices 1 y 2 se refieren al lado exterior e interior del vidrio, respectivamente.

Tabla 3. 3 Propiedades ópticas y térmicas de los vidriados seleccionados.

Tipo de vidrio	T_{sol}	R_{sol1}	R_{sol2}	T_{vis}	R_{vis1}	R_{vis2}	ϵ_1	ϵ_2	$k[W/m \cdot K]$
Claro	0.772	0.073	0.074	0.878	0.084	0.085	0.840	0.840	1
Reflectivo	0.479	0.373	0.295	0.316	0.535	0.453	0.837	0.837	0.703
Low-e	0.589	0.229	0.288	0.872	0.053	0.043	0.836	0.066	0.997
Tintado	0.447	0.053	0.056	0.755	0.071	0.073	0.840	0.840	1

La edificación base utilizada en el presente trabajo tomó como referencia parámetros de operación de la edificación empleada por *Halverson et. al. (1994)* mostrados en la Tabla 3.4. Éstos datos fueron conservados para la calibración del software y posteriormente algunos parámetros se modificaron para la realización del estudio paramétrico; entre los parámetros modificados están, el tipo de vidriado, la Razón de aspecto Área Vidriada-Pared (RAVP), el set point de temperatura y el albedo. *Halverson et. al. (1994)* utilizaron un set point de temperatura de 25 °C, como valor de confort para todas las ciudades que analizaron, sin embargo, en esta investigación se consideró el *modelo de confort térmico adaptable*, que permite calcular el set point de temperatura para cada región climática, cuyos valores difieren de un clima a otro; en el capítulo 2 se describieron a detalle y se muestra los set points de temperatura para climas cálidos, secos y templados.

Tabla 3. 4 Parámetros de operación para la edificación base.

Parámetro de simulación	Valor
Número de pisos	Ciudad de México-5 Otras ciudades-3
Altura de piso a piso	4m
Área por piso	669m ²
Razón de aspecto	1:1
Nivel de iluminación	16W/m ²
Equipo	8W/m ²

Densidad de ocupación	9m ² por persona
Porcentaje de ocupación	30-95%
Tasas de ventilación	0.46m ³ /min–m ²
Tasa de infiltración	1 ACH
Aislamiento de pared	Ninguno
Aislamiento de techo	Ninguno
Albedo pared/techo	0.25
Horas de ocupación y operación	8:00-22:00 (Lun—Vie)
Set point de temperatura	25
Razón de aspecto área-vidriada pared (RAVP)	40%

3.2 Descripción de las simulaciones

En el presente trabajo se calcula el consumo energético total de la edificación base de la NOM-008-ENER-2001, considerando las seis regiones climáticas de la República Mexicana propuestas por el INEGI, así mismo, analizar el efecto que causa el tipo y tamaño del vidriado.

3.2.1 Características climáticas

El clima es el estado más frecuente de la atmósfera en un lugar determinado y es la suma total de todos los fenómenos meteorológicos como la temperatura del aire, la presión atmosférica, el viento y la humedad. Estos elementos se ven afectados por condiciones astronómicas y geográficas que habitualmente influyen o modifican el clima de un lugar, como por ejemplo, la latitud, la altitud, distancia al mar y la distribución existente de tierra y agua.

La República Mexicana está situada en el continente americano en el hemisferio norte; parte de su territorio se encuentra en América del Norte y el resto en América Central. México se extiende entre los paralelos 14° 32' 27" en la desembocadura del río Suchiate y el paralelo 32° 43' 06" que pasa por la

confluencia del río Gila con el Colorado; así mismo está comprendido entre las longitudes oeste de Greenwich de 118° 22'00" y 86° 42'36" respectivamente.

En México, se ha adoptado la clasificación del famoso climatólogo alemán Köppen, cuya clasificación de climas es de las más aceptadas a nivel mundial. Inicialmente esta clasificación se basaba solo en dos elementos fundamentales, la temperatura y la humedad, posteriormente se le agregaron otros elementos como el viento y la presión, hasta llegar a la clasificación actual. La clasificación de Köppen es un tanto compleja ya que maneja una nomenclatura alfabética, por lo que el Anuario Estadístico del INEGI en el año 2000, basándose en la clasificación de Köppen muestra una estructura de la superficie continental de la República Mexicana por tipo de clima, en donde la clasificación climática se divide en 3 grupos y a su vez en 6 subgrupos.

De acuerdo a su temperatura, los climas de México se dividen en: cálido y templado y con respecto a la humedad existente en el medio, se clasifica en: húmedo, subhúmedo, seco y muy seco. La Fig. 3.3, muestra la distribución de climas de México divididos en grupos y subgrupos.

Con respecto al clima cálido, se subdivide en cálido húmedo y cálido subhúmedo. El primero de ellos ocupa el 4.7% del territorio nacional y se caracteriza por tener una temperatura media anual entre 22 °C y 26 °C y precipitaciones de 2,000 a 4,000 mm anuales. Por su parte, el clima cálido subhúmedo se encuentra en el 23% del país; en él se registran precipitaciones entre 1,000 y 2,000 mm anuales y temperaturas que oscilan de 22 °C y 26 °C, con regiones en donde superan los 26 °C.

El clima seco se encuentra en la mayor parte del centro y norte del país, región que comprende el 28.3% del territorio nacional; se caracteriza por la circulación de los vientos, lo cual provoca escasa nubosidad y precipitaciones de 300 a 600 mm anuales, con temperaturas en promedio de 22 °C a 26 °C en algunas regiones, y en otras de 18 °C a 22 °C.



Figura 3.3 División climática de la República Mexicana (Comisión Nacional del Agua, 210).

El clima muy seco registra temperaturas en promedio de 18 °C a 22 °C, con casos extremos de más de 26 °C; presentando precipitaciones anuales de 100 a 300 mm en promedio, se encuentra en el 20.8% del país.

Finalmente, el clima templado se divide en húmedo y subhúmedo; en el primero de ellos se registran temperaturas entre 18 °C y 22 °C y precipitaciones en promedio de 2,000 a 4,000 mm anuales; comprende el 2.7% del territorio nacional. Respecto al clima templado subhúmedo, se encuentra en el 20.5% del país, observa en su mayoría temperaturas entre 10 °C y 18 °C y de 18 °C a 22 °C, sin embargo en algunas regiones puede disminuir a menos de 10 °C; registra precipitaciones de 600 a 1,000 mm en promedio durante el año.

La Tabla 3.5, muestra los seis subgrupos climáticos de la República Mexicana, según la Entidad Federativa. Es notable que el clima seco predomina en México, mientras el clima más escaso es el templado húmedo.

Tabla 3. 5 Principales tipos de clima para cada entidad federativa.

Entidad	Cálido húmedo	Cálido subhúmedo	Seco	Muy seco	Templado húmedo	Templado subhúmedo
Aguascalientes			✓			
B. California			✓	✓		
B. Cal. Sur			✓	✓		
Campeche		✓				
Coahuila			✓	✓		
Colima		✓				
Chiapas	✓	✓			✓	✓
Chihuahua			✓	✓		✓
D. Federal						✓
Durango			✓			✓
Guanajuato			✓			✓
Guerrero		✓	✓			✓
Hidalgo			✓		✓	✓
Jalisco		✓	✓			✓
México		✓				✓
Michoacán		✓	✓			✓
Morelos		✓				✓
Nayarit		✓				
Nuevo León			✓			✓
Oaxaca	✓	✓	✓		✓	✓
Puebla	✓	✓	✓		✓	✓
Querétaro			✓			✓
Quintana Roo		✓				
S. L. Potosí			✓		✓	✓
Sinaloa		✓	✓	✓		
Sonora			✓	✓		

Tabasco	✓				
Tamaulipas		✓	✓		
Tlaxcala			✓		✓
Veracruz	✓	✓		✓	
Yucatán		✓			
Zacatecas			✓		✓

En la Figura 3.4, se muestra una gráfica que indica el porcentaje de territorio que ocupa cada tipo de clima a lo largo de República Mexicana.

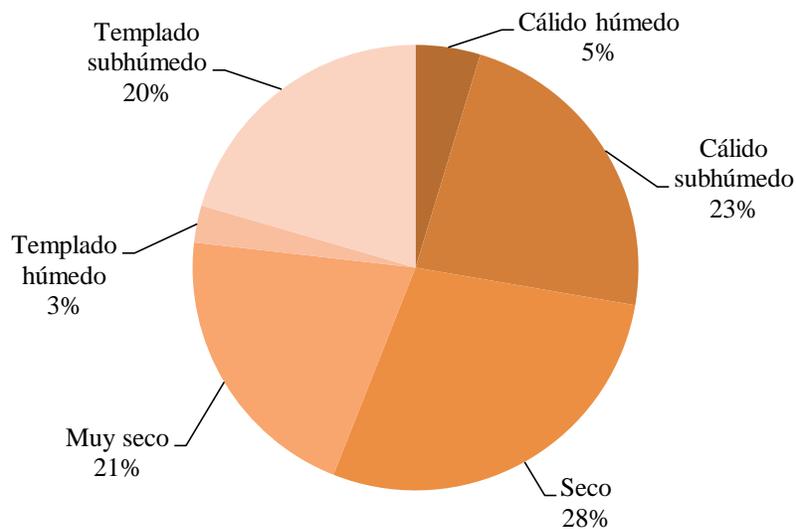


Figura 3. 4 Porcentaje de tipo de clima en territorio nacional.

Para la realización de la simulaciones, se seleccionó de cada subgrupo climático una entidad federativa, tomando en consideración el estudio que realizó *Halverson et. al. (1994)* y contemplando las ciudades más importantes y pobladas de México se seleccionó a su vez, una ciudad representativa del clima. Estas ciudades fueron la ciudad de Villahermosa, Mérida, Monterrey, Hermosillo, Xalapa y

México D. F. En la Tabla 3.6, se muestra el tipo de clima y la ciudad seleccionada para la realización de las simulaciones.

Tabla 3. 6 Regiones climáticas y ciudades representativas.

Grupos de climas	Subgrupo	Ciudad
Cálido	Cálido Húmedo	Villahermosa
	Cálido Subhúmedo	Mérida
Seco	Seco	Monterrey
	Muy seco	Hermosillo
Templado	Templado Húmedo	Xalapa
	Templado Subhúmedo	México D.F.

El Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa del 2013 del INEGI especifica la localización geográfica, condiciones climatológicas y número entre las que se encuentran las ciudades que fueron seleccionadas para la realización de las simulaciones.

3.2.1.1 Villahermosa

Tiene una Latitud Norte de 17.97°, una Longitud Oeste de 92.92° y una altitud de 10 msnm. Villahermosa es una ciudad con una gran abundancia de recursos naturales y goza de ser la conexión entre la Ciudad de México (904 km) y las más importantes ciudades del sureste como Cancún (900 km), Mérida (650 km) Campeche (390 km), Oaxaca (500 km) y Cd. del Carmen (168 km). Tiene una población de 353, 577 habitantes. Al igual que la mayor parte del estado de Tabasco, el clima en Villahermosa es cálido-húmedo. La temperatura durante la primavera puede llegar a superar los 40° C con una humedad relativa superior al 90%, durante el corto invierno el clima es mucho más seco y las temperaturas son mucho más bajas. Es un destino turístico ya que en primavera se disfruta del sol y los ríos, mientras que en el corto invierno se puede disfrutar del clima agradable, ya que en la mayor parte del año hace mucho calor.

3.2.1.2 Mérida

Tiene una Latitud Norte de 20.96°, una Longitud Oeste de 89.62° y una altitud de 10 msnm. Tiene una población de 777, 615 habitantes. Mérida se encuentra a una distancia de 1, 557 km de la Ciudad de México, 386 km de Chetumal, 650 km de Villahermosa, 325 km de Playa del Carmen, 309 km de Cancún, 173 km Campeche, entre otras. En general el clima es cálido, subhúmedo, con lluvias en verano (de junio a octubre), tiene una temperatura media mensual de 26.5 °C, una temperatura máxima media de 35-36 °C en los meses de abril a junio y la temperatura mínima media más baja es 17 °C, para los meses de diciembre a febrero.

3.2.1.3 Monterrey

Tiene una Latitud Norte de 25.78°, una Longitud Oeste de 100.12° y una altitud de 340 msnm. En 2010 agrupó un total de 1,135, 512 habitantes, siendo la novena ciudad más poblada de México, así como cabecera de la Zona Metropolitana de Monterrey, que agrupa un total de 4.15 millones de habitantes en 2010 por lo que es considerada como la tercera área metropolitana más grande del país solo después de las ciudades de México y Guadalajara, y la segunda en extensión territorial. Según la Clasificación climática de Köppen, el clima de Monterrey es semiárido cálido. La temperatura media es de 22.5 °C. Hay un importante contraste entre las estaciones: en verano los días son calurosos con noches templadas (34-22 °C), también es común que en los días calurosos, al atardecer o anochecer se produzcan fuertes tormentas eléctricas e incluso granizo. En invierno las tardes son agradables y las noches son frías (21-9 °C), también produciéndose nieblas y lloviznas. La humedad relativa promedio es de 65%.

3.2.1.4 Hermosillo

Hermosillo es la capital y mayor ciudad del estado de Sonora, localizada en su centro. Se ubica a 270 km de la frontera con Estados Unidos y a 95 km de la costa en el Golfo de California. De acuerdo con los resultados del Censo de Población y Vivienda 2010 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) tiene un población de 715, 061 habitantes. Hermosillo tiene una Latitud Norte de 29.09°, una Longitud Oeste de 110.95° y una altitud de 210 msnm. El clima de Hermosillo es desértico cálido, de acuerdo con los criterios de la clasificación climática de Köppen; tiene una

temperatura media anual de 25.2 °C. Durante casi todo el año las temperaturas son calurosas. Hay alrededor de 67.5 días de nevadas todos ellos en el mes de enero en las zonas serranas del municipio. Lluvia principalmente durante el monzón, que ocurre entre julio y septiembre, mayormente en forma de chubascos que generalmente causan actividad de tronadas. El invierno (entre diciembre y febrero) es agradable, con noches frescas y días tibios; no escarcha ni nieva. En los meses de enero y diciembre pueden presentarse algunas nieblas.

3.2.1.6 Xalapa

Xalapa-Enríquez, conocida comúnmente como Xalapa o Jalapa, es una ciudad mexicana, cabecera del municipio del mismo nombre y capital del estado de Veracruz. Cuenta con 424, 755 habitantes. Tienen una Latitud Norte de 19.52°, una longitud de 96.92° y una altitud de 1,460 msnm. El clima es húmedo y variado, teniendo una temperatura máxima de 34.3 °C y una mínima desde los 5 hasta los 10 °C por las mañanas. Tiene una temperatura media anual de 18.3 °C y un clima templado húmedo. Las nevadas en invierno son comunes en Perote, Veracruz, ubicado a 35 minutos de esta Capital.

3.2.1.5 Ciudad de México D. F.

La ciudad de México es el núcleo urbano más grande del país tiene una población de 8,851,080 habitantes y se encuentra ubicada a una Latitud de 19.42° y una Longitud de 99.13°; tiene una altitud de 2,240 msnm y tiene una superficie de 1,495 Km cuadrados. La zona urbana presenta un clima templado lluvioso, con una temperatura promedio de 16.7 °C, con temperaturas máximas superiores a 28 °C en algunos días del final de la primavera; en algunos días del invierno las temperaturas bajan a 0 °C en el centro histórico de la ciudad, a -1 °C en la UNAM y a -5 °C en zonas periféricas. La temporada húmeda en el Distrito Federal abarca de mayo a noviembre, si bien la pluviosidad es mayor entre los meses de junio y agosto. El patrón de las lluvias indica que son más abundantes mientras mayor sea la altitud de un sitio. En la mayor parte de su territorio se presenta clima Templado subhúmedo (87%) En el resto se encuentra clima seco y semi seco (7%) y Templado húmedo (6 %).

3.2.2 Descripción del estudio paramétrico

Los parámetros que se consideraron para las simulaciones fueron, el tipo de clima, tipo de vidriado y la razón de aspecto área-vidriada pared (RAVP). Fueron seleccionadas las seis ciudades de la República

Mexicana que se mencionaron en la sección anterior. Las RAVP simuladas son del 20%, 40%, 70% y 90%, cabe mencionar que la NOM-008-ENER-2001 utilizó una RAVP del 40% con vidriado claro. En esta investigación se analizaron en total siete tipos de vidriados, cuatro de tipo sencillo, vidriado claro, reflectivo, bajo emisivo (low-e) y vidriado tintado y tres dispositivos de doble vidrio, claro+claro, claro+reflectivo y claro+low-e; se incluye el vidriado claro en las simulaciones, ya que éste se tomó como referencia para el análisis de resultados y como objeto de comparación en el capítulo 5 y 6. Así mismo, para conocer el efecto que tiene el albedo en el consumo energético total, se simuló la edificación base no residencial con un albedo de 0.80 y se comparó con los resultados de la edificación base con albedo de 0.25.

De forma general, el estudio paramétrico consta de 3 variables principales:

- Ciudad
- Tipo de vidriado y
- RAVP

3.2.3 Metodología utilizada

El proceso de simulación empieza con la introducción de los seis climas en formato EPW (*Energy Plus Weather*) al software *DesignBuilder*, posteriormente se dibujó la geometría de la edificación de tres y cinco pisos y se seleccionaron los materiales de construcción. Una vez que se fijó el clima, se selecciona el tipo de vidriado deseado desde la librería de *WINDOW* y en seguida se modifica el tamaño del vidrio. Una vez que se tiene la configuración de la edificación a simular, el archivo se exporta a *EnergyPlus* y se seleccionan las variables de salida que se deseen calcular, en este caso fueron, ganancias y pérdidas de calor y la energía de enfriamiento y calentamiento.

Para la realización de las simulaciones se consideró en primera instancia fijar la ciudad y un tipo de vidriado, empezando por los vidrios sencillos y variar la RAVP, del 20% al 90%. Una vez que se simularon todas las RAVP, se cambió el tipo de vidriado hasta simular los siete vidriados seleccionados. Finalmente, se varió la ciudad, empezando por Villahermosa y terminando con la ciudad de México D. F.

La Fig. 3.5, muestra la estructura y el orden en que se llevaron a cabo las simulaciones para obtener las ganancias y pérdidas de calor en kW , así como el consumo energético total anual en MWh ; el ejemplo citado es para la ciudad de Villahermosa y esta estructura se conservó para simular las otras ciudades.

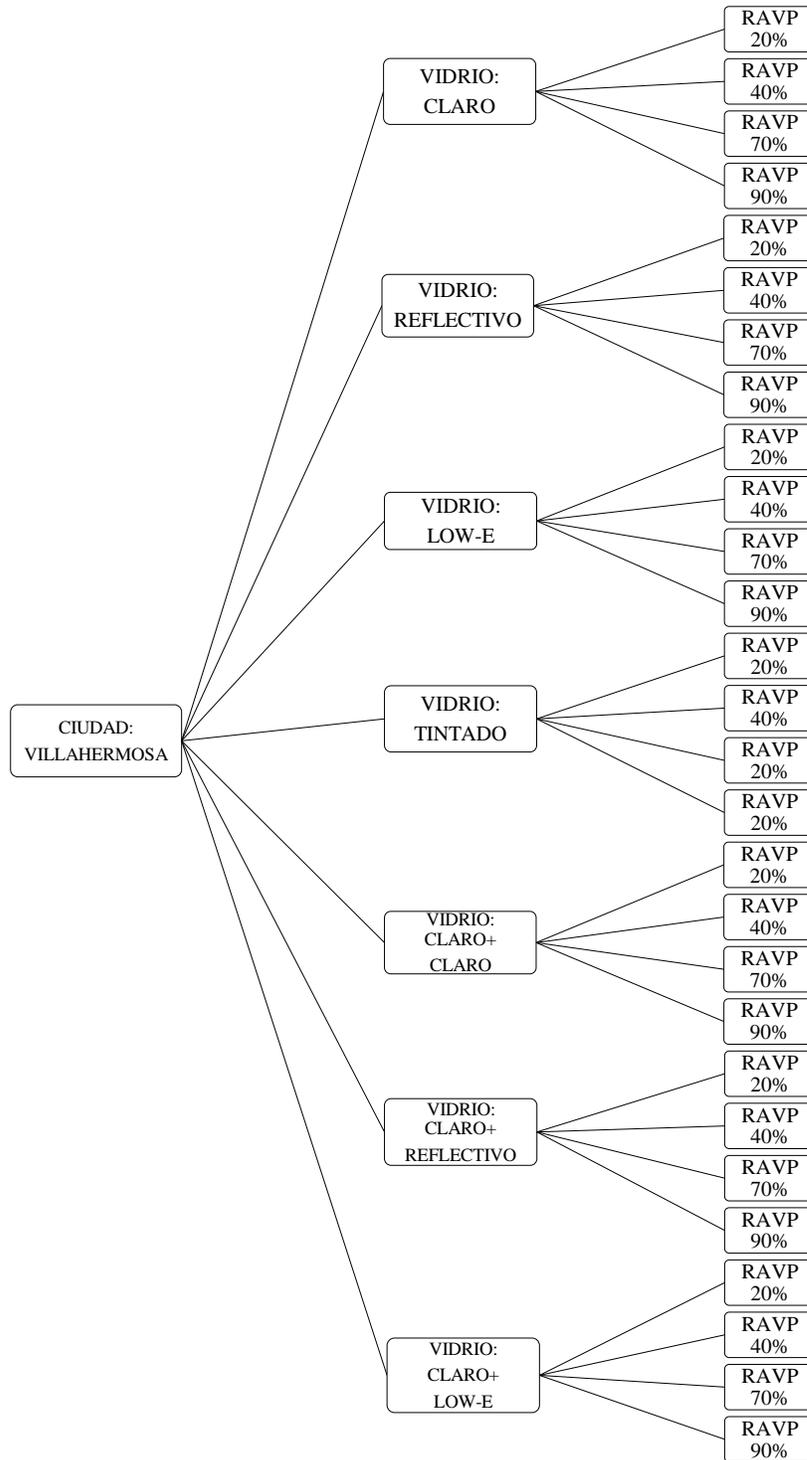


Figura 3. 5 Estudio paramétrico para la ciudad de Villahermosa.

Como se mencionó anteriormente, la edificación base no residencial utilizada en el presente trabajo, es la que se empleó para la realización de indicadores de la norma NOM-008-ENER-2001. La edificación emplea materiales de construcción convencionales como mortero, yeso, ladrillo, concreto, azulejo, vidrio claro, entre otros.

En esta investigación, al igual que *Halverson et al. (1994)*, emplearon dos modelos de edificación, para las ciudades de Villahermosa, Mérida, Monterrey, Hermosillo y Xalapa se utilizaron edificios con 3 pisos, mientras que para la ciudad de México D. F. se consideraron 5 pisos. Estos dos modelos de edificación mantienen los mismos materiales de construcción y el mismo modo de operación. La Fig. 3.6, muestra los dos modelos de edificación, de 3 y 5 pisos utilizados en las simulaciones.

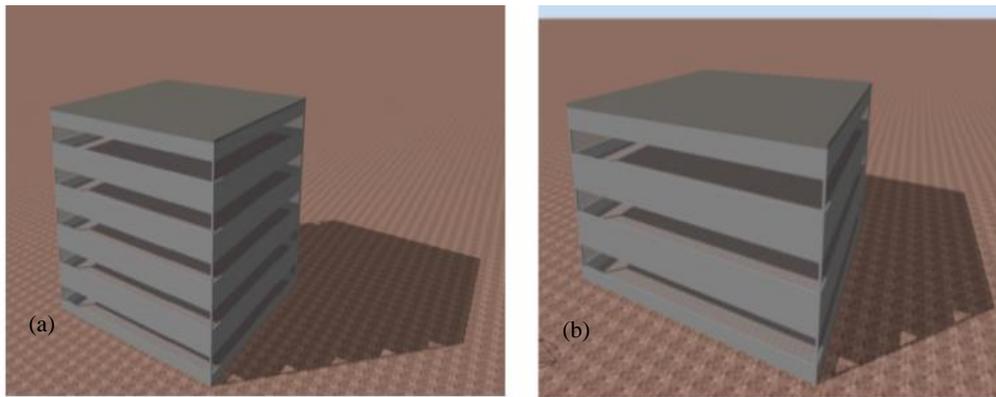


Figura 3. 6 a) Edificio no residencial de 5 pisos para la ciudad de México D. F., b) edificio no residencial de 3 pisos para otras ciudades.

Una vez establecido el estudio paramétrico del consumo energético y la geometría de la edificación base no residencial es necesario realizar una serie de pruebas con el programa de simulación, con la finalidad de obtener resultados aproximados con los de otros autores que se han reportado en la literatura, a esto se le llama verificación o en este caso, a dichas pruebas de les llama calibración.

CAPÍTULO 4

Programas de simulación y Calibración

Sin duda alguna, los programas de simulación son una buena herramienta para el análisis térmico de las edificaciones. En este capítulo, se presenta la descripción, funcionamiento y calibración de *DesignBuilder* y *EnergyPlus*, como herramientas de simulación.

4.1 Programas de simulación

Para obtener el consumo energético anual de edificaciones no residenciales, el software *EnergyPlus* v8.1 es una buena herramienta para este fin, ya que permite analizar térmicamente toda la edificación. La geometría de la edificación, tipos de materiales, parámetros de entrada, modo de operación, entre otros, fueron establecidos en la interfaz *DesignBuilder* v3.4. Esta interfaz resulta más flexible, ya que parametrizar en *EnergyPlus* resulta más complejo, ya que éste es prácticamente un motor de cálculo. A continuación se presentan las ecuaciones que *EnergyPlus* utiliza para realizar los cálculos (EnergyPlus, 2013) y la metodología que se siguió para la obtención de los resultados (Chagolla, 2013).

4.1.1 *EnergyPlus*

El programa *EnergyPlus* es una colección de muchos módulos de programas que trabajan juntos para calcular la energía necesaria para calentar y enfriar un edificio utilizando una variedad de sistemas y fuentes de energía. *EnergyPlus* toma las mejores capacidades y características de BLAST y DOE-2 y comprende completamente un código nuevo, modular y estructurado escrito en Fortran 90, es ante todo, un motor de simulación. La entrada y salida de datos son simples archivos de texto ASCII, mucho más simple que la entrada de DOE-2 y BLAST.

Muchos diseñadores necesitan herramientas que proporcionen respuestas a cuestiones muy específicas durante el diseño, por ejemplo, los diseñadores quieren herramientas que proporcionen un alto nivel de exactitud en las simulaciones. Una de las prioridades de los desarrolladores de *EnergyPlus* fue crear simulaciones integradas (cargas y sistemas simultáneos) para la predicción exacta del confort y temperatura.

EnergyPlus resuelve un gran problema que ni DOE-2 ni BLAST logran hacer; los desarrolladores lograron conseguir la predicción exacta de temperaturas espaciales, esto es crucial para la eficiencia energética de sistemas ingenieriles, como por ejemplo, tamaño del sistema, confort y la salud de los ocupantes ya que estos son dependientes de las temperaturas espaciales.

La simulación integrada también permite a los usuarios evaluar un número de procesos que ni DOE-2 ni BLAST pueden hacer, como por ejemplo, control de sistemas realistas, adsorción y desorción de

humedad en elementos del edificio, calentamiento radiante y sistemas de enfriamiento y flujo de aire en la interzona. *EnergyPlus* tiene tres componentes básicos, un administrador de simulación, un módulo de simulación de balance de calor y masa y un módulo de simulación de sistemas de edificaciones. El administrador de simulación controla todo el proceso de simulación. Los cálculos de balance de calor están basados en IBLAST (una versión reciente de BLAST con sistemas integrados de HVAC y simulación de cargas para edificios).

El método de cálculo de *EnergyPlus* es un modelo de balance de calor. La asunción fundamental de los modelos de balance de calor es que el aire en cada zona térmica puede ser modelado con temperaturas uniformes. Y aunque esto no refleje bien la realidad física, una alternativa actual es la dinámica de fluidos computacional (CFD). La estructura modular de *EnergyPlus* asume que los modelos en el balance de calor es que las superficies (paredes, ventanas, techos y pisos) tienen, temperaturas uniformes, irradiación de onda corta y larga uniforme y radiación difusa y conducción de calor en una dimensión. La Fig. 4.1, muestra en forma esquemática la estructura de *EnergyPlus*. El módulo de balance de calor en la superficie simula el balance de calor en la superficie interior y exterior, interconecta balances de calor, condiciones de frontera y efectos de conducción, convección, radiación y transferencia de masa.

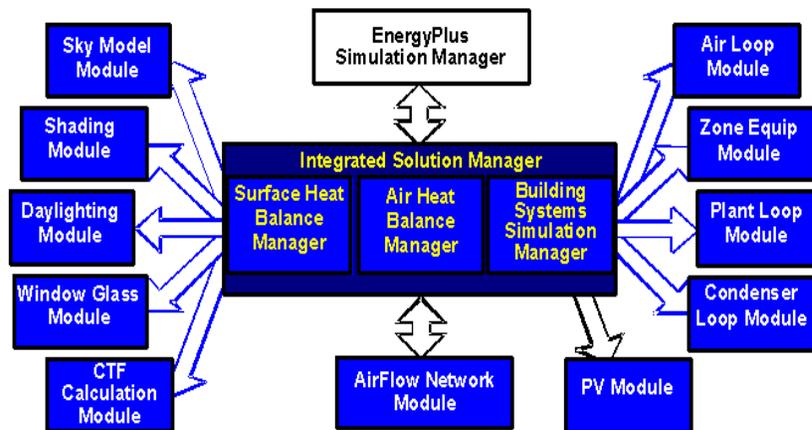


Figura 4. 1 Esquema del programa EnergyPlus.

Adicionalmente, el motor de balance de calor y masa de IBLAST tiene tres módulos basados en las capacidades de DOE-2, iluminación de luz de día, sistemas de fenestración basados en *WINDOW* y cielo anisotrópico. Después de que el administrador completa la simulación de balance de calor para un paso de tiempo, éste llama al administrador de simulación de sistemas de edificios, lo cual controla la simulación de sistemas HVAC y sistemas eléctricos, equipo y componentes y actualizaciones de condiciones de zona-aire.

De forma general, los beneficios de *EnergyPlus* incluyen una simulación integrada, balance combinado de transferencia de calor y masa, flujo de aire multizona, ciclos HVAC, links para SPARK y TRNSYS, algoritmos del kit de cargas ASHRAE y las entradas y salidas de las capacidades de simulación son mucho más flexibles, entre otros.

4.1.1.1 Ecuaciones generales que intervienen en los programas de simulación

A continuación, se describen algunas ecuaciones que *EnergyPlus* utiliza para realizar los cálculos del balance de calor en la edificación.

4.1.1.1.1 Cálculo de temperatura del aire de la zona y cálculo de las cargas térmicas

La integración de la zona y sistemas de aire es la formulación de balances de energía y humedad para el aire de la zona y *EnergyPlus* resuelve ecuaciones diferenciales ordinarias utilizando un enfoque predictor-corrector. La formulación del esquema de solución empieza con el balance de calor del aire de la zona.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_z} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{mf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sis} \quad (4.1)$$

donde, $\sum_{i=1}^{N_z} \dot{Q}_i$ es la suma de las cargas internas convectivas, $\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ es la transferencia de calor convectiva de las superficies de la zona, $\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ representa la transferencia de calor debido al

mezclado del aire en la interzona, $\dot{m}_{\text{inf}} C_p (T_{\infty} - T_z)$ es la transferencia de calor debido a la infiltración del aire exterior, \dot{Q}_{sis} es la salida del sistema de aire y $C_z \frac{dT_z}{dt}$ es la energía almacenada del aire de la zona.

Los sistemas de aire proporcionan aire frío o caliente a las zonas para cumplir con las cargas de calentamiento y enfriamiento, como se muestra en la ec. 4.2.

$$-\dot{Q}_{\text{sis}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{SI}}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{\text{superficie}}} h_i A_i (T_{\text{si}} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{\text{zonas}}} \dot{m}_i C_p (T_{\text{zi}} - T_z) + \dot{m}_{\text{inf}} C_p (T_{\infty} - T_z) \quad (4.2)$$

La energía del sistema proporcionada a la zona, \dot{Q}_{sis} , puede ser formulado a partir de la diferencia entre la entalpía del aire de suministro y la entalpía del aire que sale de la zona como se muestra en la ec. 4.3.

$$\dot{Q}_{\text{sis}} = \dot{m}_{\text{sis}} C_p (T_{\text{sup}} - T_z) \quad (4.3)$$

El resultado de sustituir la ec. 4.3, para \dot{Q}_{sis} en la ecuación de balance de calor, ec. 4.1, se muestra a continuación:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_i} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{\text{superficie}}} h_i A_i (T_{\text{si}} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{\text{zonas}}} \dot{m}_i C_p (T_{\text{zi}} - T_z) + \dot{m}_{\text{inf}} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{m}_{\text{sis}} C_p (T_{\text{sup}} - T_z) \quad (4.4)$$

La suma de las cargas de la zona y la salida del sistema de aire ahora es igual al cambio en la energía almacenada en la zona. Normalmente, la capacitancia térmica C_z , sería sólo la del el aire de la zona. Sin embargo, las masas térmicas suponen estar en equilibrio con el aire de la zona y podría ser incluido en este término. *EnergyPlus* ofrece tres diferentes algoritmos de solución para resolver las

ecuaciones de balance de energía del aire de la zona y de humedad, diferencias finitas, método de Euler y solución analítica. La ec. 4.5 (fórmula de Euler), se emplea en la ec. 4.4, para sustituir el término de la derivada.

$$\frac{dT}{dt} = (\delta t)^{-1}(T_z^t - T_z^{t-\delta}) + O(\delta t) \quad (4.5)$$

Todos los términos que contienen la temperatura media del aire de la zona se agrupan del lado izquierdo de la ecuación, mientras que los términos que no se conocen se agrupan del lado derecho. Estos cambios se aprecian en la fórmula de la temperatura media del aire:

$$C_z \frac{T_z^t - T_z^{t-\delta}}{\delta t} + T_z^t \left(\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sis} C_p \right) = \sum_{i=1}^{N_d} \dot{Q}_i + \dot{m}_{sis} C_p T_{sum}^t + \left(\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} \right)^{t-\delta} \quad (4.6)$$

La ecuación de balance de calor que incluye efectos de capacitancia térmica en la zona se obtuvo dividiendo ambos lados por T_z de la ec. 4.6.

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_d} \dot{Q}_i + \dot{m}_{sis} C_p T_{sum}^t + \left(C_z \frac{T_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} \right)^{t-\delta}}{\frac{C_z}{\delta t} + \left(\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sis} C_p \right)} \quad (4.7)$$

La ec. 4.7, puede calcular la temperatura del aire de la zona y se define como *EulerMethod*, sin embargo, esto puede limitar gravemente el tamaño del paso del tiempo bajo algunas condiciones. Para evitar errores de truncamiento y permitir pasos de tiempo más grandes, se llegó a la conclusión de que la aproximación de diferencias finitas de tercer orden obtiene mejores resultados:

$$\left. \frac{dT_z}{dt} \right|_t \approx (\delta t)^{-1} \left(\frac{11}{6} T_z^t - 3T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right) + O(\delta t^3) \quad (4.8)$$

Cuando se usa esta forma de derivar, la ec. 4.6, cambia a:

$$C_z (\delta t)^{-1} \left(\frac{11}{6} T_z^t - 3T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right) = \sum_{i=1}^{N_d} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficie}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{sumate}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{m}_{sis} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (4.9)$$

Y finalmente, la ecuación actualizada de la temperatura de la zona es la siguiente:

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_d} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficie}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{sumate}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} + \dot{m}_{sis} C_p T_{sum} - \left(\frac{C_z}{\delta t} \right) \left(-3T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right)}{\left(\frac{11}{6} \right) \frac{C_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{N_{superficie}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{sumate}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sis} C} \quad (4.10)$$

La siguiente ecuación, *EnergyPlus* la utiliza para calcular la potencia requerida de los sistemas de aire para mantener las condiciones deseadas de la temperatura del aire de la zona.

$$\dot{Q}_{carga} = \sum_{i=1}^{N_d} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficie}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{sumate}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) \quad (4.11)$$

La ec. 4.11, es la ec. 4.2, sin el término de sistema de aire \dot{Q}_{sis} . Adicionalmente, T_z es ahora la temperatura deseable de la zona. La temperatura actual de la zona fue calculada a partir de la ec. 4.10. La cantidad de calentamiento o enfriamiento proporcionado por el sistema de aire con relación a la temperatura del aire deseada de la zona está dada por:

$$\dot{Q}_{sis} = \dot{m}_{sis} C_p \eta (T_{sup} - T_{z,desabk}) \quad (4.12)$$

donde, η es la fracción entre 0 y 1 del paso del tiempo en la que el sistema de aire se enciende.

4.1.1.1.2 Conducción a través de paredes

La solución más básica de las series de tiempo es la ecuación del factor de respuesta, lo cual relaciona el flujo de calor en una superficie de un elemento para ambos lados:

$$q_{ko}''(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (4.13)$$

donde q'' es el flux de calor, T es temperatura, i, o significa el lado interior y exterior del elemento de la edificación, respectivamente, t es el paso del tiempo actual, X y Y son factores de respuesta. La forma básica de una solución de la función de transferencia de conducción, se muestra en la siguiente ecuación:

Para el flux de calor en el lado interno:

$$q_{ki}''(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \phi_j q_{ki,t-j\delta}'' \quad (4.14)$$

Para el flux de calor del lado externo:

$$q_{ko}''(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \phi_j q_{ko,t-j\delta}'' \quad (4.15)$$

donde ϕ es el coeficiente de flux CFT (funciones de transferencia de conducción). El método básico que utiliza *EnerPlus* para calcular las funciones de transferencia de conducción se conoce como método de espacio de estado y también utiliza un método antiguo, transformadas de Laplace.

4.1.1.1.3 Balance de calor en superficies exteriores

El balance de calor en la superficie exterior es:

$$\ddot{q}_{\text{sol}} + \ddot{q}_{\text{LWR}} + \ddot{q}_{\text{conv}} - \ddot{q}_{\text{ko}} = 0 \quad (4.16)$$

donde \ddot{q}_{sol} es el flux de calor absorbido de la radiación solar (longitud de onda corta) directa y difusa, \ddot{q}_{LWR} es el intercambio de flux neto de radiación de longitud de onda larga (térmica) con el aire y los alrededores, \ddot{q}_{conv} es el intercambio de flux convectivo con el aire exterior y \ddot{q}_{ko} es el flujo de calor por conducción en la pared. La Fig. 4.2, muestra el balance de calor exterior en una pared y los mecanismos que intervienen en este.

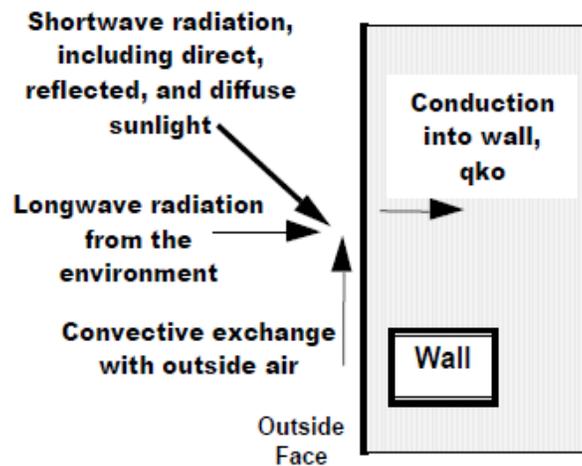


Figura 4. 2 Diagrama del volumen de control del balance de calor exterior.

4.1.1.1.4 Balance de calor en superficies interiores

El corazón del método de balance de calor es el balance de calor interno que involucra las caras interiores de las superficies de las zona. Este balance de calor generalmente es modelado por cuatro componentes de transferencia de calor, por conducción a través de los elementos del edificio, convección del aire, absorción y reflexión de radiación de onda corta e intercambio radiativo de onda larga. El balance de calor en la cara interna puede ser escrito como:

$$q_{LWX}'' + q_{SW}'' + q_{LWS}'' + q_{ki}'' + q_{sol}'' + q_{conv}'' = 0 \quad (4.17)$$

donde, q_{LWX}'' es el intercambio de flux neto radiativo de onda larga entre las superficies de las zonas, q_{SW}'' es el flux neto de radiación de onda corta de superficies de luces, q_{LWS}'' es el flux de radiación de onda larga de equipos en la zona, q_{ki}'' es el flux conducido a través de la pared, q_{sol}'' representa el flux radiativo solar transmitido y que es absorbido por la superficie y finalmente, q_{conv}'' es el flux de calor convectivo del aire de la zona.

El intercambio radiativo de onda larga en superficies interiores, *EnergyPlus* lo calcula con la siguiente ecuación:

$$q_{i,j} = A_i F_{i,j} (T_i^4 - T_j^4) \quad (4.18)$$

donde, $F_{i,j}$ es el factor de vista entre las superficies i y j .

4.1.1.1.5 Balance de calor en vidriados

Las temperaturas del vidriado de una ventana son determinadas resolviendo las ecuaciones de balance de calor en cada cara para cada paso de tiempo. Para una ventana con N número de vidrios hay $2n$ lados y además $2N$ ecuaciones que resolver. La Fig. 4.3, muestra las variables usadas para un sistema de doble vidriado ($n = 2$).

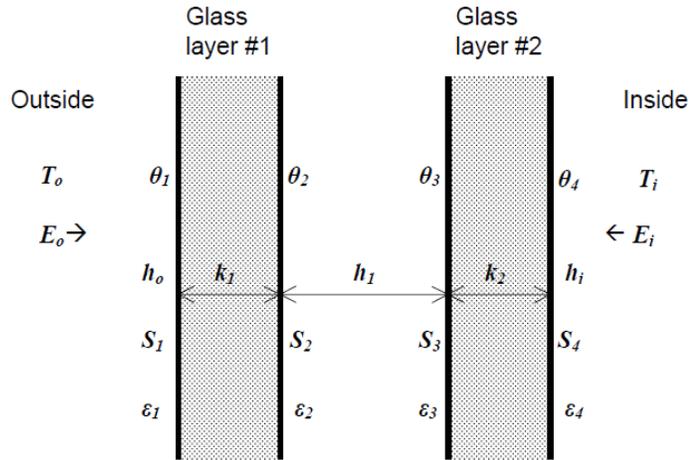


Figura 4.3 Sistema vidriado con dos capas de vidrio que muestra las variables usadas en las ecuaciones de balance de calor.

Las cuatro ecuaciones, 4.19-4.22, para doble vidriado se expresan a continuación. Las ecuaciones para vidriado sencillo ($n = 1$) y para $n = 3$ y $n = 4$ son análogas.

$$E_o \varepsilon_1 - \varepsilon_1 \sigma \theta_1^4 + k_1 (\theta_2 - \theta_1) + h_o (T_o - \theta_1) + S_1 = 0 \quad (4.19)$$

$$k_1 (\theta_1 - \theta_2) + h_1 (\theta_3 - \theta_2) + \sigma \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} (\theta_3^4 - \theta_2^4) + S_2 = 0 \quad (4.20)$$

$$h_1 (\theta_2 - \theta_3) + k_1 (\theta_4 - \theta_3) + \sigma \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} (\theta_2^4 - \theta_3^4) + S_3 = 0 \quad (4.21)$$

$$E_i \varepsilon_4 - \varepsilon_4 \sigma \theta_4^4 + k_2 (\theta_3 - \theta_4) + h_i (T_i - \theta_4) + S_4 = 0 \quad (4.22)$$

donde, h_o, h_i son los coeficientes convectivos de la película de aire exterior e interior, respectivamente, E_o, E_i es la radiación exterior e interior incidente en la ventana, θ_i es la temperatura de la cara i , S_i

representa la radiación absorbida (onda corta y onda larga de fuentes alternas) por la cara i . Los coeficientes convectivos son obtenidos de ISO 15099, (2012).

4.1.2 Proceso de simulación en *EnergyPlus*

El proceso de simulación en *EnergyPlus* empieza con la introducción de parámetros en la interfase *DesignBuilder*, como se aprecia en la Fig. 4.4. La creación de archivos meteorológicos en formato *EPW* (*EnergyPlus Weather*) es el primer paso de la simulación; estos archivos *EPW* pueden crearse en el software *METEONORM v7* ya que la creación de archivos en este software es muy sencilla, solamente se introduce el nombre de la ciudad o se colocan las coordenadas de ubicación, como latitud y longitud. y *METEONORM* puede obtener los archivos climáticos cada cierto tiempo, según lo desee el usuario, así mismo, también se puede seleccionar los años típicos de los datos climáticos. *DesignBuilder* también tiene una librería de archivos climáticos y pueden ser seleccionados desde aquí y en caso de no contar con la ciudad deseada, se deberá importar en formato *EPW* el archivo climático de la ciudad seleccionada en *METEONORM*.

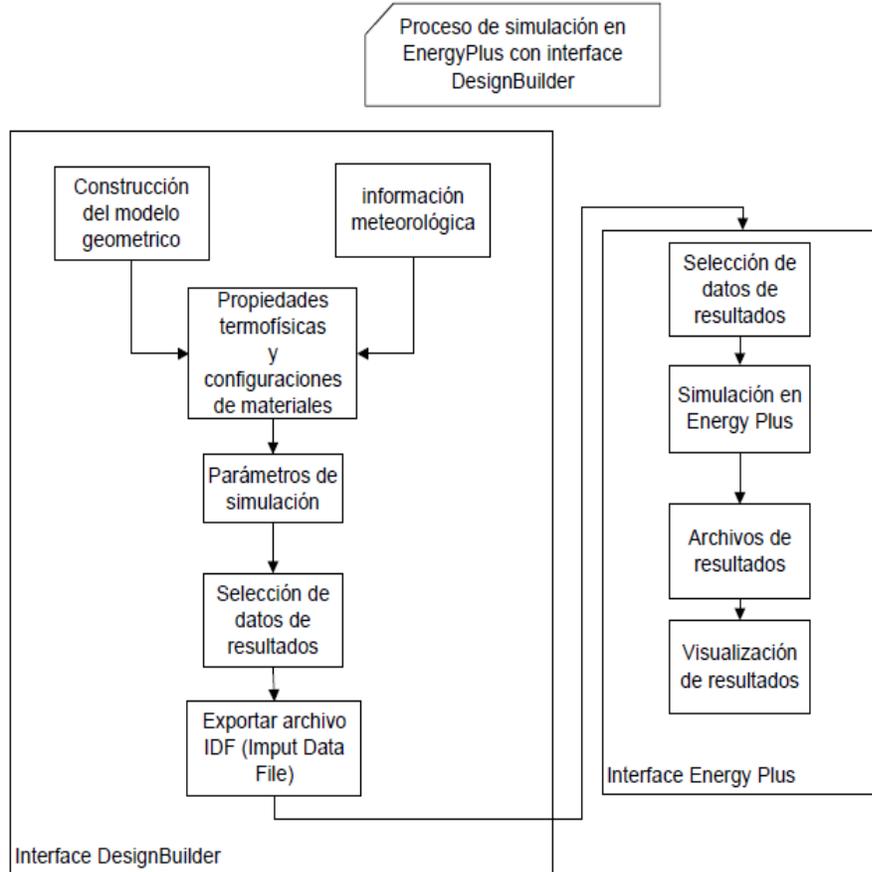


Figura 4. 4 Proceso de simulación de *EnergyPlus* con interfaz *DesignBuilder*.

Una vez que se seleccionó el archivo climático, se crea la geometría de la edificación en la opción *Modelo*, Fig. 4.5 y se lleva a cabo dibujando el perímetro de la edificación, extruyendo cada bloque hasta conseguir el número de niveles deseado. Así mismo, *DesignBuilder* también tiene la opción de importar un archivo en formato *DXF* que contiene las dimensiones del edificio, se extruye y se crea la envolvente del edificio. Una vez que se tiene la geometría de la edificación, se crean los cerramientos, como puertas y ventanas. Si la edificación cuenta con zonas interiores, éstas se dibujan y se generan particiones para dividir la edificación en zonas específicas.

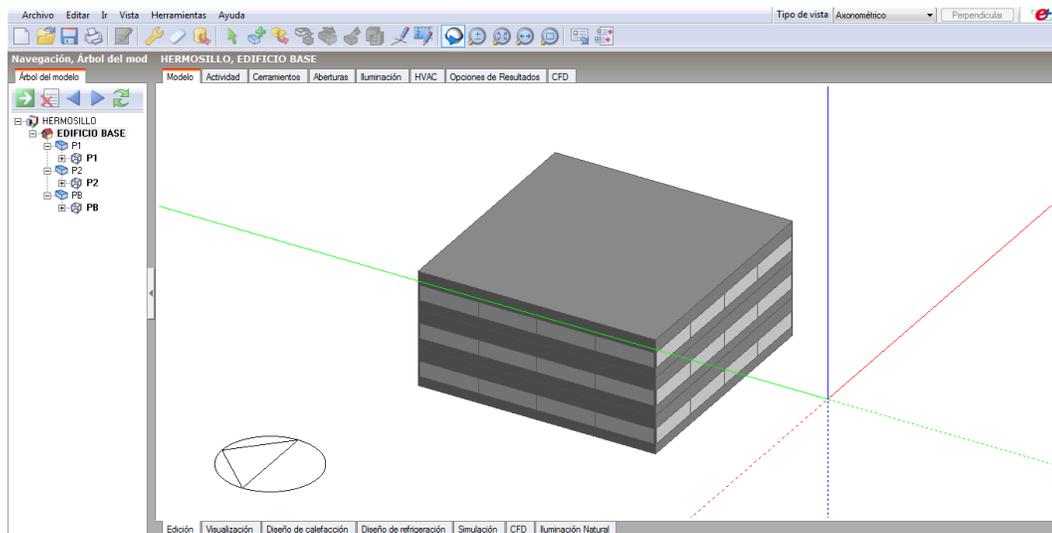


Figura 4. 5 Modelo geométrico en *DesignBuilder*.

La configuración de los materiales de construcción se lleva a cabo en la opción de *Cerramientos* y es aquí donde se modifican las propiedades termofísicas de los materiales de construcción. En la opción de *Aberturas*, se modifican las características y propiedades térmicas y ópticas de los acristalamientos, tales como, tipo y distribución del acristalamiento, espesor, conductividad térmica, transmitancia, reflectancia, emitancia, entre otras.

Los sistemas de aire acondicionado son seleccionados en la opción de *HVAC*, aquí se selecciona el equipo a utilizar, el tipo de ventilación y características de los sistemas de refrigeración y calefacción. Parámetros como actividad, ocupación, set points de temperatura y horarios son modificados en la opción de *Actividad*. La programación de los sistemas HVAV se modifican en éste mismo apartado. Finalmente, en *DesignBuilder*, para la selección de datos de salida específicos se deberá exportar con toda la información de la edificación a *EnergyPlus* en la opción archivo: *Exportar archivo de entrada EnergyPlus* en formato .IDF. Una vez que se exportó el archivo a *EnergyPlus* con toda la información de entrada, se abre un subprograma de *EnergyPlus* llamado *EP-Launch* donde se selecciona el archivo con extensión *IDF* y el archivo climático, ya sea de la librería o de los creados en *METEONORM* y se ejecuta el comando *Simulate*. Cuando el programa termina de simular la edificación se genera un archivo con extensión .DAT, donde se imprimen los resultados seleccionados.

4.2 Calibración de *DesignBuilder* y *EnergyPlus*

Hoy en día existe un sinnúmero de paquetes comerciales que permiten simular el comportamiento térmico de edificaciones, tal es el caso de *EnergyPlus*. Los programas de simulación son muy flexibles, para *EnergyPlus*, los parámetros de entrada se registran en la interfaz *DesignBuilder*, mientras que los resultados requeridos se obtienen del motor de cálculo *EnergyPlus*. Para poder analizar la edificación base junto con el estudio paramétrico fue necesario calibrar el programa para cerciorarse de que los resultados obtenidos son correctos. Se analizaron los trabajos de *Halverson et al. (1994)* y *Álvarez et al. (2014)* para calibrar el software. Las edificaciones fueron simuladas para la ciudad de Mérida, México D. F. y Monterrey y fueron las mismas edificaciones empleadas para la realización de indicadores de la NOM-008-ENER-2001. Los materiales de construcción y la operación de la edificación fueron descritos en el capítulo 3.

En primer lugar *Halverson et al. (1994)* emplearon como software de simulación *DOE-2*, utilizaron una Razón de aspecto Área Vidriada-Pared (RAVP) de 20%, 40% y 69%, todas con vidriado claro de 6 mm y emplearon datos climatológicos extraídos del Centro Nacional de Datos Climatológicos de Estados Unidos de América hace más de 20 años. En esta investigación los datos climatológicos para la calibración fueron obtenidos del software *METEONORM v7*, tomando un periodo del año 2000-2009 para temperatura y de 1986-2005 para datos de radiación. Las ciudades fueron localizadas en *METEONORM v7* por medio de coordenadas geográficas, con la finalidad de que el software adquiriera mayor número de variables climatológicas, interpolando estaciones cercanas a la ciudad requerida.

Entre los resultados reportados y simulados hubo una diferencia entre el 0.20% y el 10.85. Es importante señalar que la mayor diferencia fue para la ciudad de México, esto podría deberse al periodo en que fueron tomados los datos climatológicos y el número de estaciones climatológicas existentes.

Para una RAVP del 20% en el trabajo realizado por *Halverson et al. (1994)*, se reportaron las cargas de enfriamiento en MWh para un periodo de un año. De las tres ciudades simuladas, Monterrey presentó una menor diferencia en las cargas de enfriamiento, Fig. 4.6.

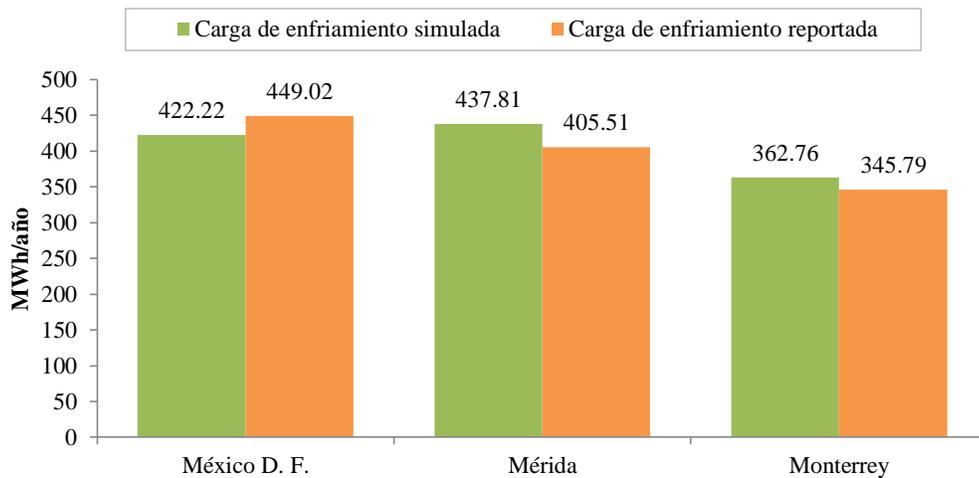


Figura 4. 6 Carga de enfriamiento para diferentes edificaciones, con RAVP del 20%.

Para edificaciones con RAVP del 20%, Monterrey fue la ciudad con menor diferencia con respecto al trabajo reportado, pero de forma general, las tres simulaciones tuvieron un porcentaje de diferencia menor al 10%. La Tabla 4.1 muestra un resumen de las cargas de enfriamiento simuladas y reportadas.

Tabla 4. 1 Resumen de la diferencia entre cargas de enfriamiento, simuladas y reportadas (Halverson et al., 1994), vidrio claro de 6 mm, con RAVP del 20%

Edificio no residencial	Carga de enfriamiento simulada [kWh]	Carga de enfriamiento reportada [kWh]	Diferencia [%]
México D. F.	422,217.04	449,018.00	5.97
Mérida	437,812.83	405,508.00	7.90
Monterrey	362,769.28	345,795.00	4.91

Para la calibración de las edificaciones con RAVP del 40% y RAVP del 69%, los resultados se muestran resumidos en las Tablas 4.2 y 4.3. Los resultados muestran que para una RAVP del 40%, Mérida y Monterrey obtuvieron una diferencia menor al 1%, mientras que la ciudad de México tuvo una diferencia superior al 10%.

Tabla 4. 2 Resumen de la diferencia entre cargas de enfriamiento, simuladas y reportadas (Halverson et al., 1994), vidriado claro de 6 mm, con RAVP del 40%.

Edificio no residencial	Carga de enfriamiento simulada [kWh]	Carga de enfriamiento reportada [kWh]	Diferencia [%]
Ciudad de México	467,428.84	524,319.00	10.85
Mérida	479,749.46	475,037.00	0.99
Monterrey	397,785.27	398,594.00	0.20

Cuando la RAVP es del 69%, Mérida y Monterrey tienen una diferencia menor al 10%, como se muestra en la Tabla 4.3 y al igual que la edificación con RAVP del 40%, México D. F. tuvo la mayor diferencia entre las cargas de refrigeración simuladas y reportadas con un 18% aproximadamente.

Tabla 4. 3 Resumen de la diferencia entre cargas de enfriamiento, simuladas y reportadas (Halverson et al., 1994), vidriado claro de 6 mm, con RAVP del 69%

Edificio no residencial	Carga de enfriamiento simulada [kWh]	Carga de enfriamiento reportada [kWh]	Diferencia [%]
Ciudad de México	519,000.48	630,062.00	17.62
Mérida	527,906.53	567,243.00	6.93
Monterrey	438,241.75	485,350.00	9.7

Por otra parte, *Álvarez et. al. (2014)* simularon también la edificación empleada por la NOM-008-ENER-2001 y los autores utilizaron para sus simulaciones el programa *EnergyPlus v6.0*. En esta investigación los autores calcularon tanto cargas de enfriamiento como de calentamiento para edificaciones con vidriado claro de 4 mm con RAVP del 40%. Los resultados mostraron que las cargas de enfriamiento simuladas tuvieron una diferencia entre el 2% y 10% con las reportadas, siendo la edificación de la ciudad de México D. F. la que tuvo la mayor diferencia; esto puede apreciarse en la Fig. 4.7.

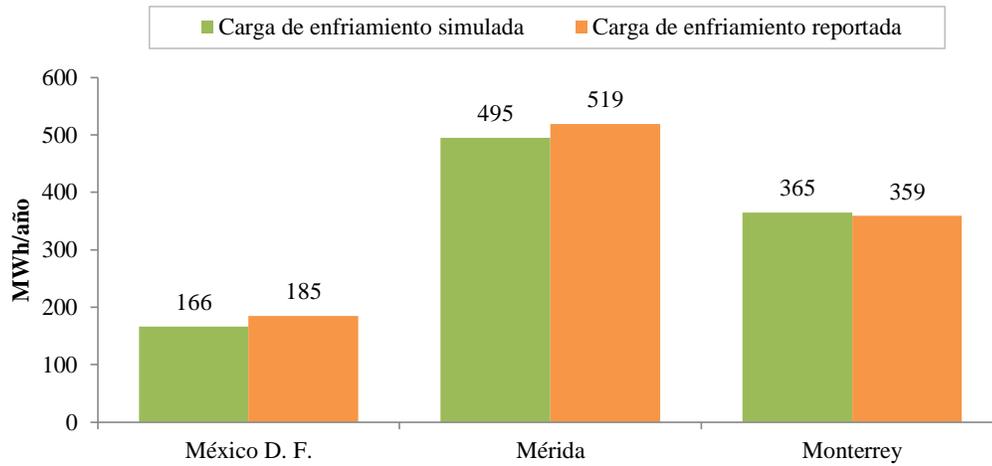


Figura 4. 7 Carga de enfriamiento para diferentes edificaciones, con RAVP del 40%.

Por otro lado, la Fig. 4.8, muestra que las cargas de calentamiento en Mérida y Monterrey se acercaron a los valores reportados, mientras que México D. F. tuvo la mayor diferencia, aumentando en 73 MWh.

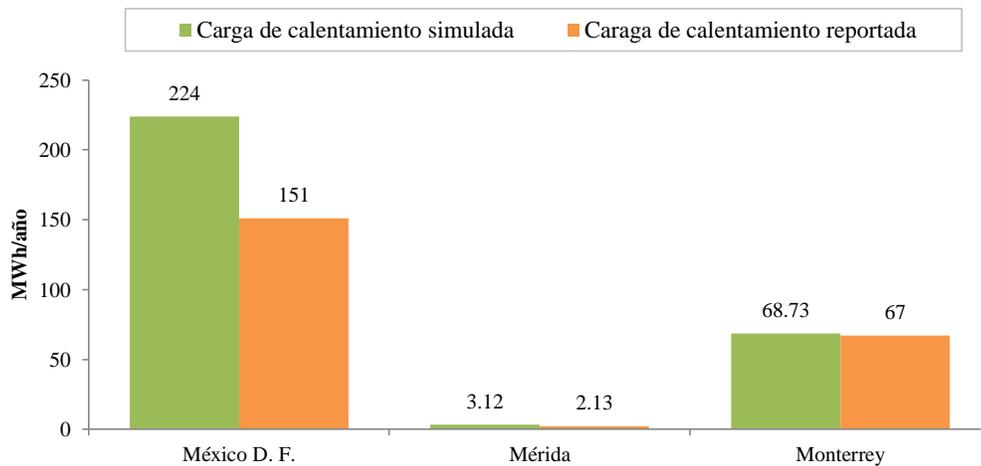


Figura 4. 8 Carga de calentamiento para diferentes edificaciones, con RAVP del 40%.

Los resultados en la calibración comparados con los reportados por *Álvarez et al . (2014)* mostraron diferencias considerables principalmente para la ciudad de México D. F. en cargas de enfriamiento y calentamiento. Esto puede deberse principalmente a la diferencia entre los archivos climatológicos y a

las versiones de los simuladores. La Tabla 4.4, muestra un resumen de las cargas térmicas simuladas y reportadas.

Tabla 4. 4 Resumen de las cargas térmicas simuladas y reportadas
(Álvarez et. al., 2014), con vidriado claro de 4 mm con RAVP del 40%.

Edificio no residencial	Cargas térmicas simuladas		Cargas térmicas reportadas	
	<i>[MWh]</i>		<i>[MWh]</i>	
	Enfriamiento	Calentamiento	Enfriamiento	Calentamiento
México D. F.	166	224	185	151
Mérida	495	3.12	519	2.13
Monterrey	365	68.73	359	67

En general, *EnergyPlus* es un programa muy flexible y los resultados obtenidos en las simulaciones se aproximaron a los valores reportados en la literatura, por lo que el siguiente paso fue modificarle a la edificación base los vidriados, la RAVP y climas seleccionados.

CAPÍTULO 5

Resultados y Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones con los programas *DesignBuilder* y *EnergyPlus*. Se consideraron las seis regiones climáticas propuestas por el INEGI; se emplearon siete tipos de vidriados y se utilizaron RAVP (Razón de aspecto Área Vidriada-Pared) del 20%, 40%, 70% y 90% con un albedo del 0.25 y una RAVP del 40% con un albedo del 0.80. Los resultados muestran las ganancias y pérdidas de calor y el consumo energético total anual para cada clima de la República Mexicana con albedo en techo y paredes de 0.25 y 0.80.

5.1 Datos climatológicos mensuales: irradiación global, temperatura y humedad relativa

El comportamiento térmico de los vidriados y su correcta selección depende mucho de las condiciones climatológicas donde se encuentra ubicada la edificación, por ello es importante conocer las variables que influyen en determinado clima, como por ejemplo, temperatura ambiente (T_{amb}), irradiación global (G_b), velocidad del viento (FF), humedad relativa (HR) e índice de nubosidad (N_b), principalmente. En conjunto, éstas variables crean un determinado clima e influyen en el diseño (geometría, orientación, selección de materiales, ubicación de productos de fenestración, entre otros) y en el comportamiento térmico de las edificaciones (pérdidas y ganancias de calor). Los datos climatológicos fueron obtenidos del software *Meteonorm v7*, tomando un periodo del año 2000-2009 para temperatura y de 1986-2005 para datos de radiación.

En el capítulo tres, se hace una breve introducción de las regiones climáticas marcadas por el INEGI y se describe de forma general las ciudades seleccionadas resaltando su ubicación geográfica, características climáticas, población, entre otros datos generales. En este capítulo, se describe el tipo de clima de cada ciudad y su variación mensual a lo largo de un año de variables climatológicas como temperatura ambiente, irradiación global, velocidad del viento, índice de nubosidad y humedad relativa.

Para las edificaciones de las seis ciudades seleccionadas, la orientación no fue considerada debido a que el área vidriada es homogénea en las cuatro direcciones (norte, sur, este y oeste), por lo tanto, los datos de irradiación solo se contemplaron para la horizontal.

5.1.1 Villahermosa

La ciudad de Villahermosa se caracteriza por tener un clima *cálido húmedo*, cuyas variables climáticas principales en promedios anuales son, 27 °C para temperatura ambiente, 4.8 MWh/m^2 de radiación solar, velocidad del viento de 3.1 m/s y se alcanzaron las 5 partes de cielo cubierto de nubes y finalmente, la humedad relativa llegó al 74%, también, estas variables climáticas pueden visualizarse en promedios mensuales (Tabla 5.1).

Dentro de las variables climáticas que permiten visualizar de forma general el clima de cada ciudad son, la irradiación, la temperatura ambiente y la humedad relativa e influyen directamente en el comportamiento térmico de la edificación.

Tabla 5. 1 Clima para la ciudad de Villahermosa (promedios mensuales).

MES	$T_{prom} [^{\circ}C]$	$G_h [MWh/m^2]$	$FF [m/s]$	$N_b [adim]$	$HR [\%]$
Ene	23.8	3.6	3.1	6	78
Feb	25	4.2	3.3	5	76
Mar	27.2	5.4	3.3	5	69
Abr	29	6.0	3.3	5	66
May	30	5.7	3.2	4	67
Jun	29.6	5.7	3	5	72
Jul	29.7	5.9	3.6	4	71
Ago	29.3	5.5	3.1	5	73
Sep	28.6	5.0	2.5	5	77
Oct	27.5	4.3	2.7	6	79
Nov	25.6	3.8	2.7	6	79
Dic	24.2	3.1	2.9	6	80
Año	27.5	4.8	3.1	5	74

Para todo el año, la ciudad de Villahermosa tuvo una radiación solar superior a $3 \text{ MWh}/m^2$, para los meses de marzo a septiembre la radiación fluctuó entre los $5.4 \text{ MWh}/m^2$ a $6 \text{ MWh}/m^2$, siendo Abril el mes que mayor radiación obtuvo, como se muestra en la Fig. 5.1.

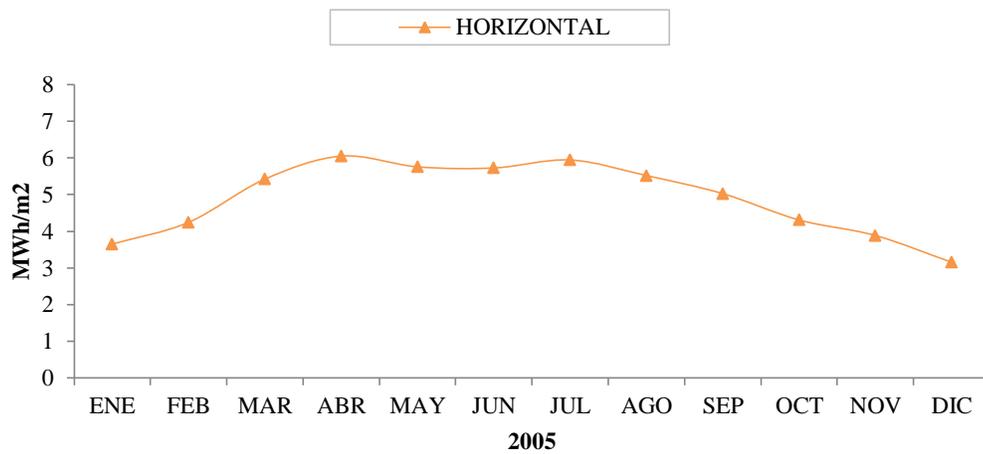


Figura 5. 1 Radiación solar promedio acumulado diario para la ciudad de Villahermosa.

En la Fig. 5.2, se muestra la temperatura ambiente promedio mensual y la humedad relativa para la ciudad de Villahermosa, se aprecia un ambiente muy húmedo a lo largo de todo el año, superando el 66% en el mes de abril y llegando hasta el 80% de humedad relativa en el mes de diciembre. Los meses más calurosos son de abril a agosto, por arriba de los 29 C.

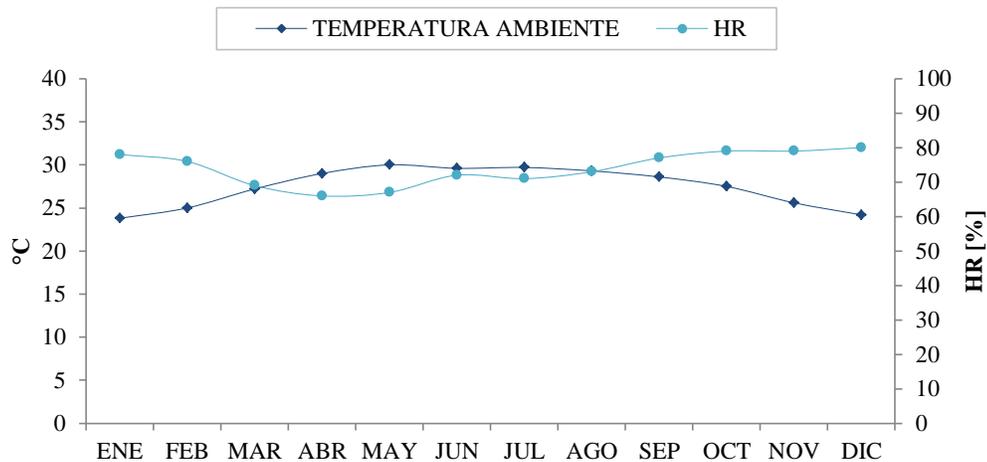


Figura 5. 2 Temperatura ambiente y humedad relativa para Villahermosa.

5.1.2 Mérida

El clima de la ciudad de Mérida es *cálido subhúmedo* y tiene una temperatura promedio anual de 26.5 °C y una radiación sobre la horizontal de aproximadamente 5.2 MWh/m^2 . La velocidad promedio anual alcanzó los 2.4 m/s , 5 partes de cielo cubierto de nubes y 73% de humedad relativa. La Tabla 5.2, muestra algunas variables climáticas en promedios mensuales.

Tabla 5. 2 Clima para la ciudad de Mérida (promedios mensuales).

MES	T_{prom} [°C]	G_h [kWh/m^2]	FF [m/s]	N_b [adim]	HR [%]
Ene	22.2	4.1	2.3	4	76
Feb	24	4.7	2.7	5	71
Mar	26.4	5.7	3.4	4	63
Abr	28.5	6.5	3.5	3	57
May	30	6.1	3.3	5	60
Jun	29.2	5.8	2.7	5	72
Jul	28.6	6.2	2.1	5	75
Ago	28.2	5.8	1.6	5	79
Sep	27.5	5.2	1.4	4	84
Oct	26.4	4.6	1.7	5	83
Nov	24.1	4.1	1.7	5	81
Dic	22.6	3.6	1.8	5	81
Año	26.5	5.2	2.4	5	73

Mérida obtuvo una radiación sobre la horizontal de 3.6 MWh/m^2 para el mes de diciembre, siendo la más baja, mientras que para los meses de marzo a agosto, la radiación tuvo variaciones de 5.7 MWh/m^2 a 6.5 MWh/m^2 , notando en la Fig. 5.3 que abril es el mes con la más alta radiación.

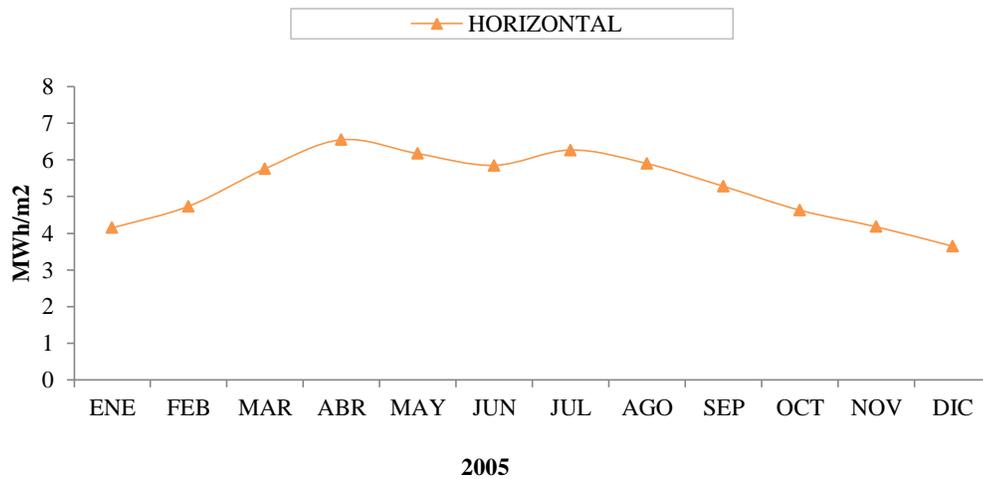


Figura 5.3 Radiación solar promedio acumulado diario para la ciudad de Mérida.

En Mérida es notable que las temperaturas son elevadas a lo largo de todo el año, por lo cual, aunque es indispensable equipo de aire acondicionado, la calefacción para climas cálidos no debería ser necesaria, debido a que las temperaturas superan los 22 °C en épocas de invierno y alcanza los 30 °C en el mes de mayo, como se muestra en la Fig. 5.4. Aunque las temperaturas máximas son semejantes a la ciudad de Villahermosa, Mérida tuvo en promedio anual 1 °C de temperatura y 1% de humedad relativa menos que Villahermosa, aun cuando la radiación en Mérida es mayor. La diferencia entre la ciudad de Villahermosa y Mérida, representantes del clima cálido, radica en que la primera suele ser más húmeda. En Mérida, de agosto a enero fueron los meses más húmedos con un intervalo de 76% a 84% de humedad relativa, mientras que los meses más secos fueron de febrero a julio con una mínima de 57% y una máxima de 75%.

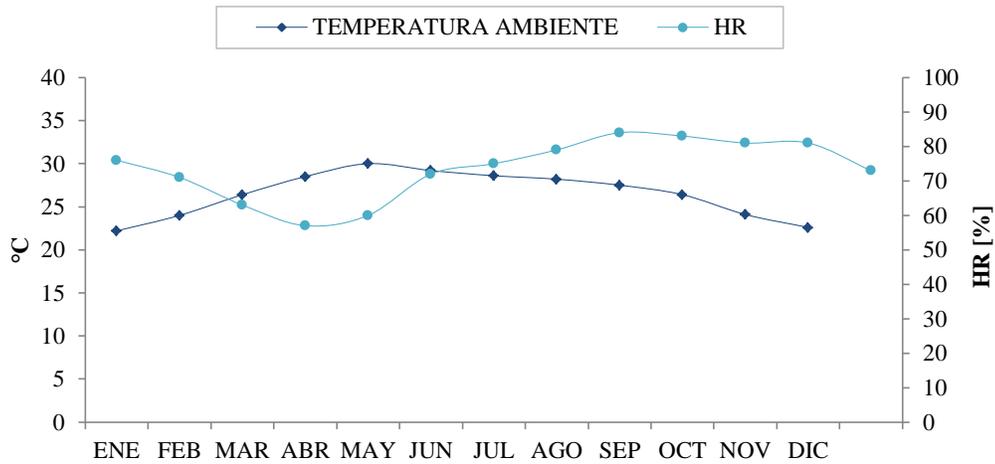


Figura 5. 4 Temperatura ambiente y humedad relativa para Mérida.

5.1.3 Monterrey

La ciudad de Monterrey tiene un clima que se caracteriza por tener elevadas temperaturas en verano y muy bajas en invierno, teniendo una temperatura promedio anual de 22.5 °C. Pertenece al clima *seco*, debido a que la humedad relativa en promedio anual no supera el 65%, la velocidad del viento es variada a lo largo del año, que va entre 3 y 4.3 m/s y solo en enero y diciembre el índice de nubosidad alcanzó las 6 partes de cielo cubierto. La radiación promedio anual es de 5.1 MWh/m² y Monterrey se caracteriza por tener un clima extremo, donde se requiere una selección adecuada de los materiales de construcción y del vidriado que permitan reducir las ganancias de calor en verano y las incrementen en invierno. La mayoría de las variables climáticas varía a lo largo del año, esto como consecuencia de que es un clima extremo (Tabla 5.3).

Tabla 5. 3 Clima para la ciudad de Monterrey (promedios mensuales).

MES	$T_{prom} [^{\circ}C]$	$G_h [kWh/m^2]$	$FF [m/s]$	$N_b [a \text{ dim}]$	$HR [\%]$
Ene	14.9	3	3.3	6	64
Feb	17.1	3.9	3.4	5	60
Mar	20.7	4.9	3.8	5	58
Abr	24.1	5.6	4	4	60
May	26.8	6.3	4	4	63
Jun	28.5	7	4.3	3	61
Jul	28.4	6.9	4.1	4	61
Ago	28.5	6.6	3.8	3	61
Sep	25.8	5.5	3	5	71
Oct	22.8	4.5	3.2	4	74
Nov	18.3	3.7	3.1	5	70
Dic	14.5	2.7	3.3	6	65
Año	22.5	5.1	3.6	4	64

En la Fig. 5.5, se aprecia que para Monterrey, diciembre fue el mes con la radiación más baja con $2.7 \text{ MWh}/m^2$ y de mayo a agosto se superaron los $6 \text{ MWh}/m^2$. Al caracterizarse como un clima extremo, el mes de junio alcanzó la máxima radiación con $7 \text{ MWh}/m^2$.

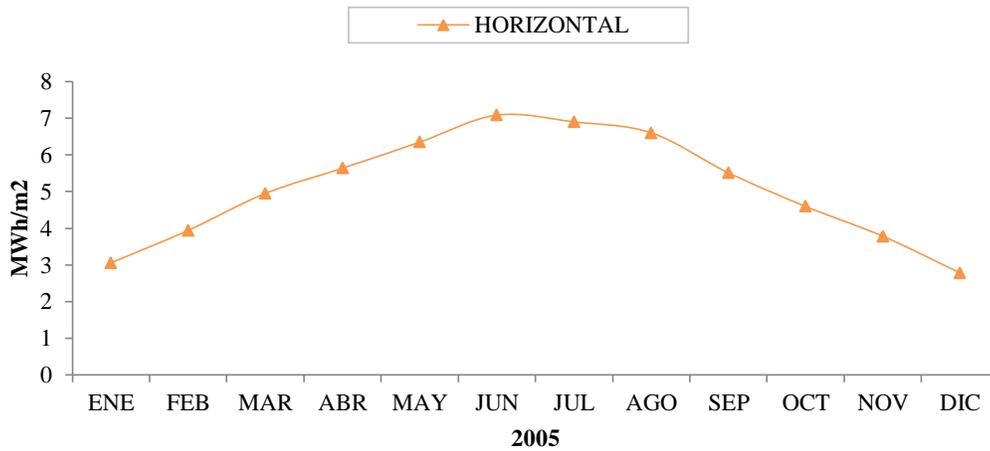


Figura 5. 5 Radiación solar promedio acumulado diario para la ciudad de Monterrey.

En épocas de invierno, principalmente en los meses de diciembre y enero, la ciudad de Monterrey alcanzó en promedio los 14 °C y de junio a agosto, superó los 28 °C. Estos cambios en la temperatura son característicos de la regiones secas, donde se registran temperaturas elevadas en verano y los inviernos suelen ser muy fríos, como se parecía en la Fig. 5.6. Por otra parte, la humedad relativa alcanza niveles de hasta 74% como la máxima en el mes de octubre y 58% en el mes de marzo, siendo éste el mes más seco.

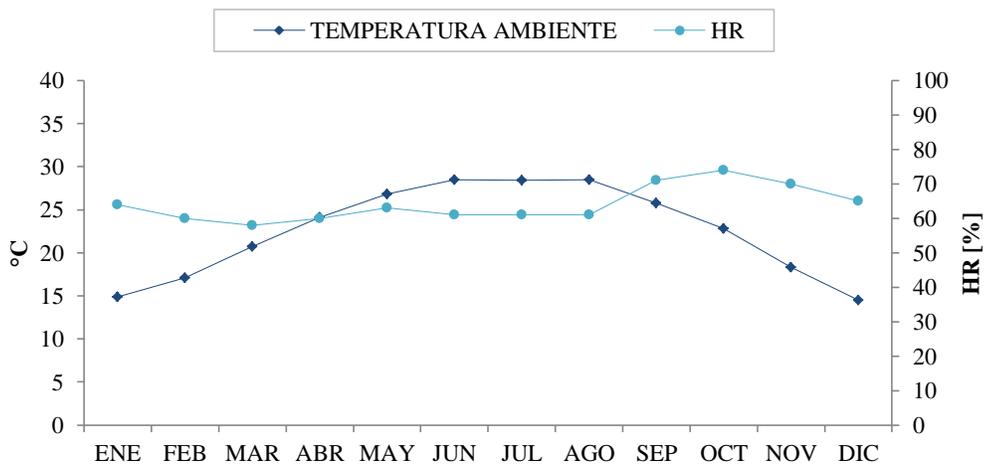


Figura 5. 6 Temperatura ambiente y humedad relativa para Monterrey.

5.1.4 Hermosillo

La Tabla 5.4, muestra las variables climáticas en promedios mensuales para la ciudad de Hermosillo, que se caracteriza por tener un clima *muy seco*; se registró una temperatura promedio anual de 25.2 °C y una radiación anual de 5.7 MWh/m^2 , la radiación solar más alta de todas las ciudades analizadas. Así mismo, el índice de nubosidad es muy bajo, teniendo un promedio anual de 3 partes de cielo cubierto de nubes, 1.8 m/s de velocidad del viento y una humedad relativa de 39%. Al igual que Monterrey, la ciudad de Hermosillo tiene un clima extremo por sus elevadas temperaturas en verano y muy frías en invierno. Es apreciable (Tabla 5.4) que a diferencia de Monterrey, la ciudad de Hermosillo tiene temperaturas más elevadas y el clima es más seco por su escaso índice de nubosidad y baja humedad del ambiente.

Tabla 5. 4 Clima para la ciudad de Hermosillo (promedios mensuales).

MES	T_{prom} [°C]	G_h [kWh/m^2]	FF [m/s]	N_b [adim]	HR [%]
Ene	16.8	3.7	1.2	4	43
Feb	18.2	4.6	1.4	3	38
Mar	21.2	6	1.8	3	31
Abr	24.7	7	2.1	3	27
May	29	7.8	2.4	1	25
Jun	32.5	7.7	2.6	2	31
Jul	33.1	6.8	2.5	3	45
Ago	32.2	6.4	1.8	3	52
Sep	31.1	5.8	1.7	4	50
Oct	26.2	4.9	1.4	4	44
Nov	21.1	4.1	1.3	3	40
Dic	16.2	3.6	1.1	3	43
Año	25.2	5.7	1.8	3	39

En la Fig. 5.7, se muestra la radiación en promedio acumulado diario para cada mes del año para la ciudad de Hermosillo y se aprecia la más baja irradiación en los meses de enero y diciembre con tan solo $3.7 \text{ MWh}/\text{m}^2$ y $3.6 \text{ MWh}/\text{m}^2$, respectivamente. Por otra parte, en el mes de mayo se tuvo la mayor radiación de $7.8 \text{ MWh}/\text{m}^2$.

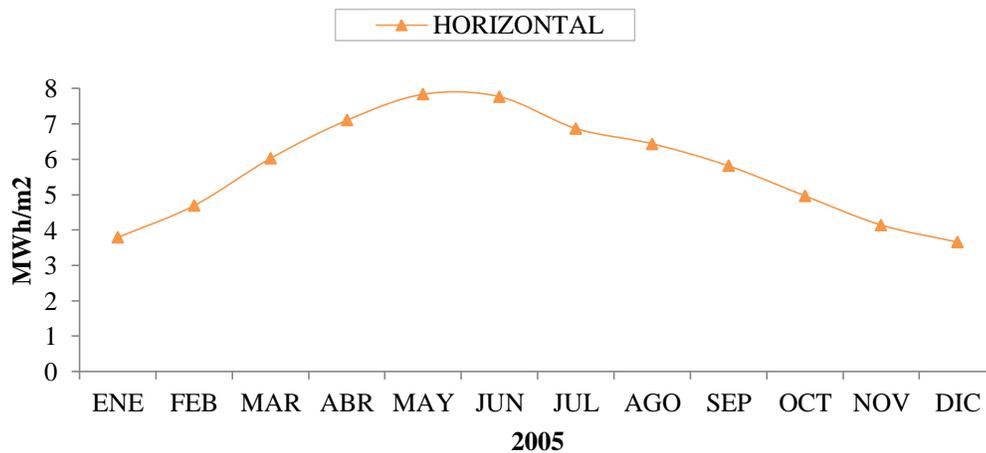


Figura 5. 7 Radiación solar promedio acumulado diario para la ciudad de Hermosillo.

Se puede notar en la Fig. 5.8, que en los meses de enero y diciembre se registraron temperaturas de 16°C aproximadamente y en verano, en el mes de julio se registraron temperaturas de hasta 33°C ; éstas temperaturas suelen ser típicas de los climas muy secos. En cuanto a la humedad relativa, mayo fue el mes más seco con tan solo 25% y agosto tuvo un 52%, siendo éste el mes más húmedo para Hermosillo.

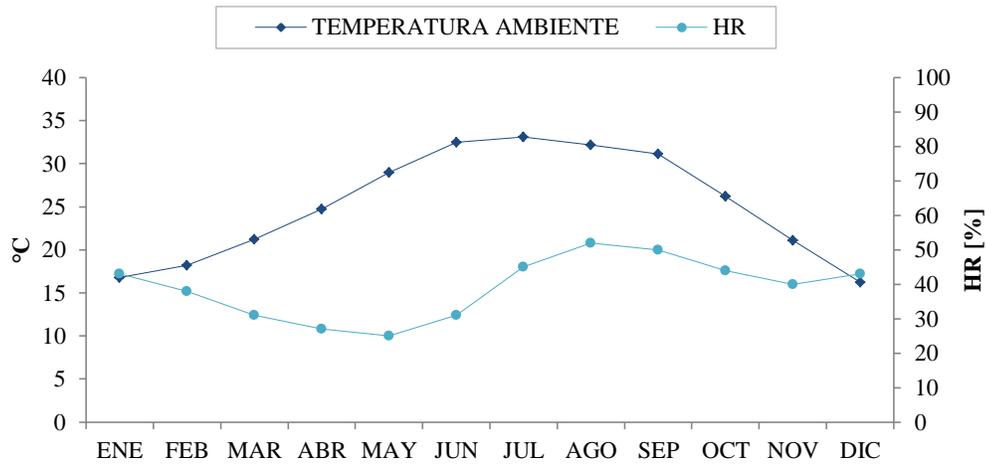


Figura 5.8 Temperatura ambiente y humedad relativa para Hermosillo.

Es muy notable que la ciudad de Hermosillo tiene un clima más cálido y más seco que Monterrey y pese a que ambas ciudades pertenecen a la misma región climática, la escasa humedad relativa y las temperaturas elevadas en verano y bajas en invierno deben ser contempladas a la hora del diseño, ya que contemplar las diferencias de dichas variables entre Monterrey y Hermosillo permitirán lograr una mayor eficiencia en el funcionamiento de las edificaciones.

5.1.5 México D. F.

La ciudad de México D. F. pertenece a la región climática *templado subhúmedo*. Este tipo de clima se caracteriza por tener temperaturas bajas en invierno y moderadas en verano, teniendo un promedio anual en la temperatura ambiente de 16.7 °C, esto puede apreciarse en la Tabla 5.5. Así mismo, la irradiación global alcanzó los 1812 kWh/m² al año, la velocidad del viento fue de 2.9 m/s, hubo 5 partes de cielo cubierto de nubes y se alcanzó un 50% de promedio anual de humedad relativa.

Tabla 5. 5 Clima para la ciudad de México D. F. (promedios mensuales).

MES	$T_{prom} [^{\circ}C]$	$G_h [kWh/m^2]$	$FF [m/s]$	$N_b [\alpha dim]$	$HR [\%]$
Ene	13.7	4.3	2.6	4	44
Feb	15.5	5.1	2.9	5	38
Mar	17.4	5.8	3.1	4	34
Abr	19	5.9	3.1	5	36
May	19	5.7	3.2	5	43
Jun	18.2	5.1	3.2	5	55
Jul	17.5	5.1	3	5	61
Ago	17.5	4.9	3	6	62
Sep	17.2	4.4	3	6	66
Oct	16.5	4.4	3	4	59
Nov	14.7	4.4	2.7	4	51
Dic	13.8	4	2.5	4	45
Año	16.7	4.9	2.9	5	50

La radiación promedio mensual para la ciudad de México se muestra en la Fig. 5.9 y puede apreciarse que los meses con mayor radiación son de marzo a mayo, alcanzando los $5.9 \text{ MWh}/m^2$. El mes de diciembre tuvo la menor irradiación de todo el año con tan solo $4 \text{ MWh}/m^2$. Es notable que la radiación en la ciudad de México D. F. no alcanza altos valores a diferencia de los climas cálidos y secos.

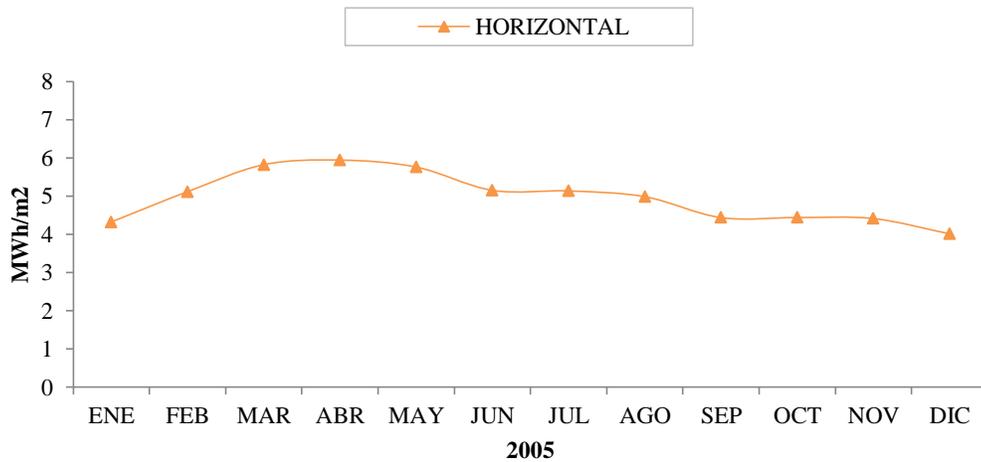


Figura 5.9 Radiación solar promedio acumulado diario para la ciudad de México D. F.

La ciudad de México tiene un clima con una temperatura que fluctúa de los 13.7 °C a los 19 °C a lo largo de todo el año. En la Fig. 5.10, se puede apreciar junto con las temperaturas promedio mensuales, la variación de la humedad relativa y es notable que los meses más escasos de humedad son de febrero a mayo y el mes de marzo alcanzó un 34%, siendo este mes el más seco de todo el año, mientras que en los meses de junio a enero se alcanzó una humedad relativa superior al 44%, llegando hasta el 66% en el mes de septiembre.

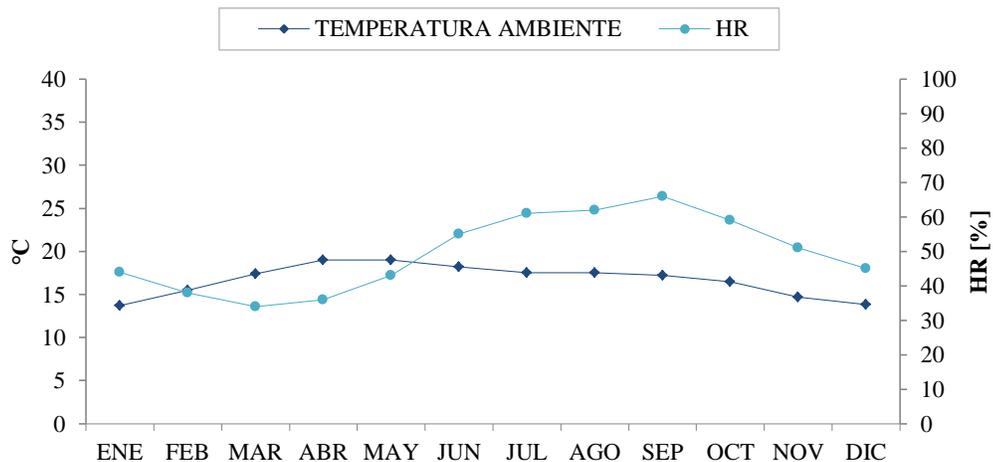


Figura 5.10 Temperatura ambiente y humedad relativa para México D. F.

5.1.6 Xalapa

De las ciudades analizadas, Xalapa es la que cuenta con mayor humedad e índice de nubosidad, en promedio anual tuvo un 79% de humedad relativa y 6 partes de cielo cubierto de nubes. La ciudad de Xalapa tuvo un promedio anual de temperatura de 18.3 °C y una radiación de 4.2 MWh/m^2 , la más baja de todas las ciudades analizadas. Así mismo, la velocidad del viento apenas llegó al metro por segundo. De acuerdo a la clasificación climática, Xalapa es un tipo de clima *templado húmedo*, siendo ligeramente más caluroso y más húmedo que la ciudad de México.

Tabla 5. 6 Clima para la ciudad de Xalapa (promedios mensuales).

MES	$T_{prom} [^{\circ}C]$	$G_h [kWh/m^2]$	$FF [m/s]$	$N_b [a dim]$	$HR [%]$
Ene	14.6	3.2	1	6	80
Feb	16	4	1.1	6	76
Mar	18.1	4.5	1.1	6	73
Abr	20.1	5.1	1.1	6	71
May	20.7	4.6	1.1	6	76
Jun	20.2	4.6	1	6	82
Jul	19.9	5	1.1	5	80
Ago	20	4.7	1	6	80
Sep	19.7	4.1	1	6	83
Oct	18.6	3.8	1	6	83
Nov	16.6	3.6	1	6	81
Dic	15.2	3	0.9	6	80
Año	18.3	4.2	1	6	79

Durante los meses de abril y julio superaron los 5 MWh/m^2 , la radiación más alta de todo el año, mientras que enero y diciembre presentaron una irradiación menor a los 3.2 MWh/m^2 . Xalapa fue la ciudad con la menor radiación de todas las ciudades analizadas.

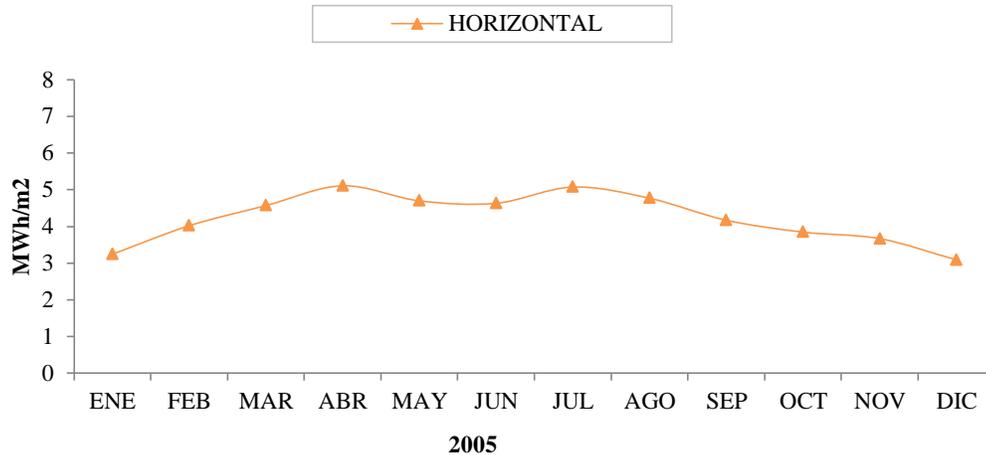


Figura 5. 11 Radiación solar promedio acumulado diario para la ciudad de Xalapa.

En la Fig. 5.12, se aprecia que el comportamiento de la temperatura ambiente y la humedad relativa a lo largo de todo el año en la ciudad de Xalapa es opuesto al de Hermosillo, esto significa que en Xalapa todo el año es húmedo con un 83% en el mes septiembre y octubre y del 71% en el mes de abril. Así mismo, la temperatura también fue incrementando gradualmente de $15 \text{ }^\circ\text{C}$ en enero hasta llegar a los $20 \text{ }^\circ\text{C}$ en los meses de abril a agosto y fue disminuyendo a partir de septiembre hasta llegar de nuevo a los $15 \text{ }^\circ\text{C}$ en diciembre.

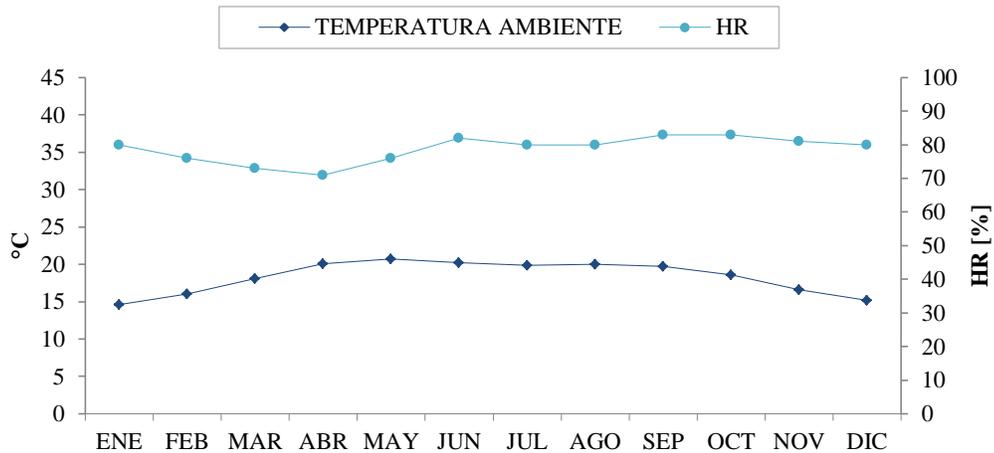


Figura 5. 12 Temperatura ambiente y humedad relativa para Xalapa

Xalapa tiene el clima más húmedo de las seis climas analizados, así mismo, suele ser más cálido que la ciudad de México y también durante todo el año, los cambios en las variables climáticas suelen ser menos drásticos.

5.2 Ganancias y pérdidas de calor de la edificación base no residencial por efecto del vidriado

Debido a que se utilizaron siete tipos de vidriados diferentes, cuatro de ellos sencillos o de un solo vidrio y tres vidriados dobles, se eligió una escritura abreviada para diferenciar a cada uno de ellos. Estas abreviaciones fueron, para el vidriado sencillo claro, SCL, vidriado sencillo reflectivo, SR, vidriado low-e, SLE, vidriado tintado, STI; para los vidriados dobles se les asignó el nombre de dispositivos de doble vidriado, DDV y estos fueron, para el DDV claro+claro, DCLCL, DDV claro+reflectivo, DCLRE y finalmente para el DDV claro+low-e, DCLLE.

Para conocer la eficiencia térmica de los vidriados seleccionados se calcularon las ganancias y pérdidas de calor, únicamente por efecto del vidriado. De ésta forma, se puede visualizar de forma global y parcial (Apéndice A) cual es el vidriado con mayores ganancias de calor y cuál es el vidriado que tiene más pérdidas. En las siguientes figuras se muestran los porcentajes de las ganancias y

pérdidas de calor en $kW/año$ para cada vidriado con RAVP del 40%, como lo recomienda la norma, tomando como referencia el vidriado SCL, que es aquel que cuenta con las máximas ganancias y pérdidas de calor que un vidriado puede tener y se representa con el 100%. Las ganancias y pérdidas de calor dependen de las propiedades ópticas del vidriado, mientras menos eficiente sea el vidriado (alto valor en el $SHGC$ y $valor-U$), tendrá elevadas ganancias y pérdidas de calor.

5.2.1 Villahermosa

Se aprecia en la Fig. 5.13, que conforme el valor del $SHGC$ aumenta (los vidriados están distribuidos de menor a mayor valor del $SHGC$), las ganancias de calor incrementan su valor, sin embargo, las pérdidas de calor modifican el comportamiento del vidriado, lo cual, para este tipo de climas puede resultar beneficioso, ya que al haber mayores pérdidas de calor, las cargas térmicas de refrigeración pueden disminuir considerablemente junto con el consumo total de energía. Para la ciudad de Villahermosa, el DCLRE fue el vidriado con el menor porcentaje de ganancias de calor y en total, aproximadamente un 54% de ganancias y pérdidas de calor del 100% que representa el vidriado SCL.

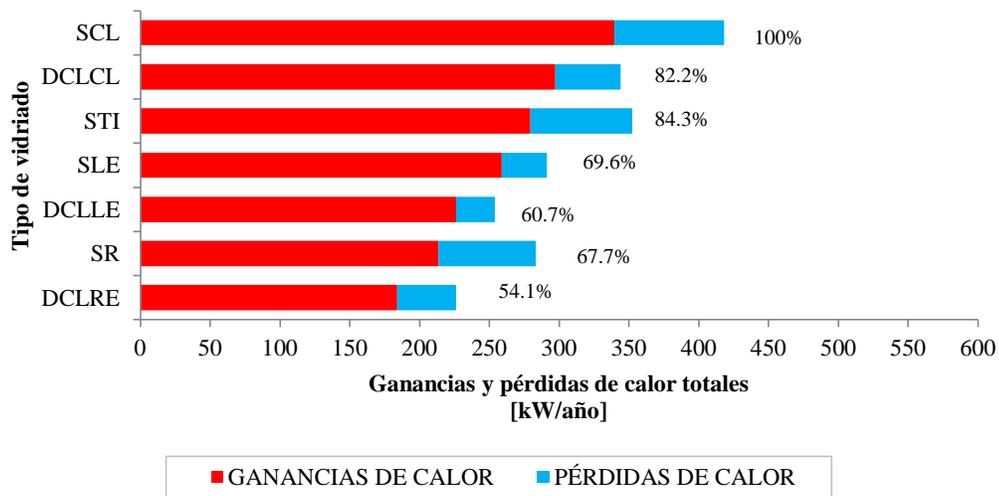


Figura 5. 13 Ganancias y pérdidas de calor para la ciudad de Villahermosa.

5.2.2 Mérida

Al igual que Villahermosa, el vidriado DCLRE resulta ser el mejor vidriado ya que reduce en gran proporción las ganancias y pérdidas de calor hasta llegar a un 54% del total, como se muestra en la Fig. 5.14. Sin embargo, el vidriado SR, podría ser más eficiente que un DCLRE ya que tiende a incrementar las pérdidas de calor, que como se mencionó, este flujo de energía puede disminuir el consumo de energía al reducir las cargas de refrigeración.

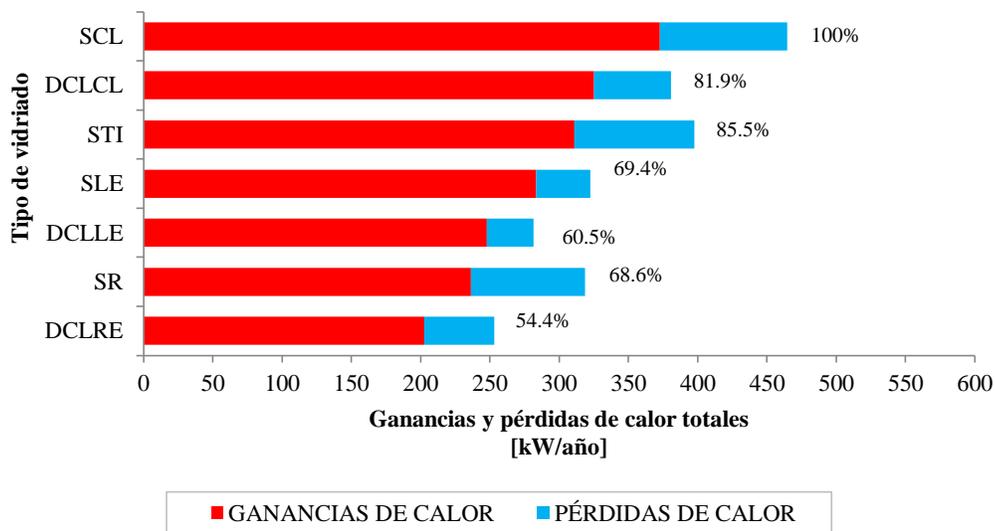


Figura 5. 14 Ganancias y pérdidas de calor para la ciudad de Mérida.

5.2.3 Monterrey

En la Fig. 5.15, se aprecia que el vidriado DCLRE es el más eficiente ya que obtuvo solo el 54% de las ganancias y pérdidas de calor con respecto al vidriado SCL. Por otra parte, el vidriado DCLLE puede ser una segunda opción ya que solo obtuvo el 60% de las ganancias y pérdidas de calor y a pesar de que éste incrementa las ganancias de calor, fue el vidriado con las mayores pérdidas de calor, lo cual puede ser benéfico cuando se requiere conservar el calor en horas nocturnas y en invierno.

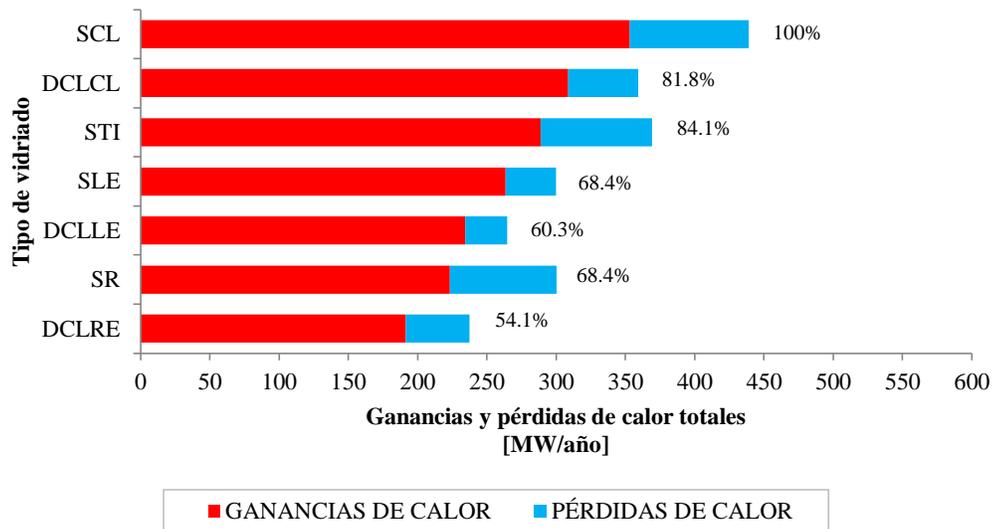


Figura 5. 15 Ganancias y pérdidas de calor para la ciudad de Monterrey.

5.2.4 Hermosillo

Para la ciudad de Hermosillo, la edificación con vidriado DCLRE también reduce las ganancias y pérdidas de calor y obtiene aproximadamente un 54% de KW al año con respecto al SCL. Y al igual que Monterrey, si se desean reducir las pérdidas de calor, el vidriado DCLLE es una opción para lograr este fin, como se muestra en la Fig. 5.16.

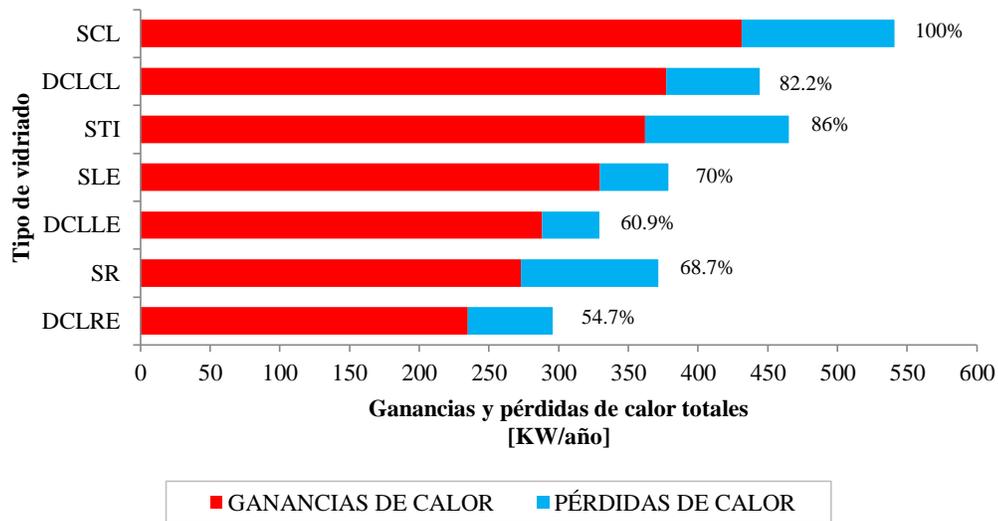


Figura 5. 16 Ganancias y pérdidas de calor para la ciudad de Hermosillo.

5.2.5 México

Como ya se mostró en los resultados anteriores, el doble vidriado con película reflejante DCLRE juega un papel importante en las ganancias de calor, ya que se reduce aproximadamente un 50% de KW al año con respecto al vidriado sencillo claro SCL, sin embargo, reduce también las pérdidas de calor (en comparación con los vidriados sencillos) lo cual, dependiendo del clima puede resultar viable. En lugares templados como la ciudad de México D. F., el emplear un vidriado DCLRE o un vidriado SR resulta prácticamente semejante, debido a que las ganancias de calor se igualan. Ahora bien, las pérdidas de calor juegan un rol importante en el comportamiento del vidriado en climas templados, ya que lo ideal es que el vidriado pierda la menor cantidad de energía posible en épocas de invierno pero que pierda a su vez, en épocas de verano la mayor cantidad de calor para reducir las cargas de refrigeración. De forma general, el vidriado DCLRE, si bien no es el que pierde más calor si es el que gana menos, como se aprecia en la Fig. 5.17.

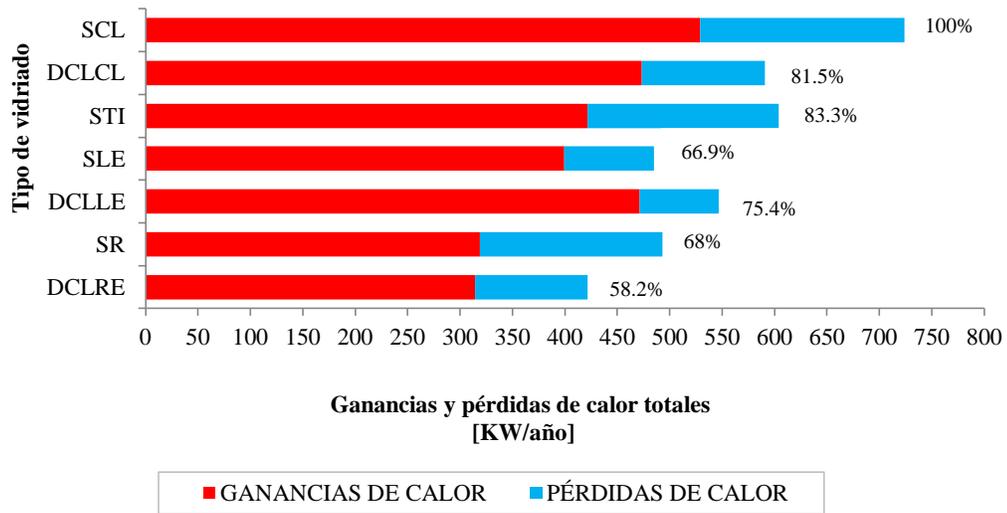


Figura 5. 17 Ganancias y pérdidas de calor para la ciudad de México D. F.

5.2.6 Xalapa

En la Fig. 5.18, se aprecia que el vidriado SR gana ligeramente más calor que el vidriado DCLRE, aunque el SR es el que sigue perdiendo más energía. En total, el vidriado DCLRE gana y pierde energía hasta un 59%, mientras que el SR gana y pierde calor hasta un 69%. Debido a que el vidriado SR es el que pierde más calor, puede resultar en un menor consumo energético al reducir las cargas térmicas.

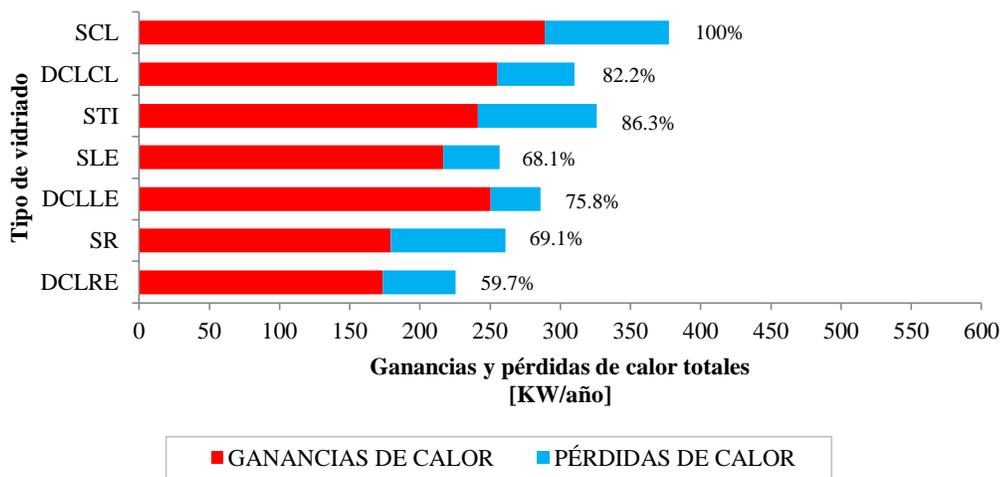


Figura 5. 18 Ganancias y pérdidas de calor para la ciudad de Xalapa.

El cálculo de las ganancias y pérdidas de calor refleja el comportamiento térmico real del vidriado, ya que no interviene otro tipo de ganancia de calor, como en el cálculo del consumo energético. Los valores obtenidos de las ganancias y pérdidas de calor representan la eficiencia térmica de cada vidriado en KW y estos valores pueden conservarse siempre y cuando los elementos de la envolvente de la edificación tengan una alta eficiencia térmica para que solo las ganancias y pérdidas de calor sean originadas por efecto de los vidriados.

En el Anexo A, se muestran los resultados obtenidos de la simulaciones del cálculo de las ganancias y pérdidas de calor de forma parcial, con la finalidad de apreciar el comportamiento térmico del vidriado cuando gana y pierde energía.

En general, para cada clima, el vidriado DCLRE fue el que obtuvo menores ganancias de calor al año, sin embargo las pérdidas de calor disminuyen las cargas térmicas de refrigeración, por lo que el vidriado SR en climas templados resulta ser una buena opción.

En la siguiente sección se muestran los resultados del consumo energético de la edificación base no residencial y se aprecia como la eficiencia térmica de los vidriados disminuye al involucrar el efecto térmico de techos y muros, ya que se incrementan las ganancias de calor.

5.2 Consumo energético anual para la edificación base no residencial con reflectancia de 0.25

En los resultados obtenidos se puede apreciar que el efecto en el consumo energético de los vidriados cuando la edificación tiene un albedo de 0.25, es menor que el efecto que tienen otros elementos de la envolvente de la edificación, como los techos, principalmente. Esto se debe a que la edificación base no residencial en sus materiales de construcción tiene propiedades con baja eficiencia térmica, por ejemplo, en las paredes y techos se tiene una reflectancia o albedo de 0.25, lo cual incrementa las ganancias de calor en la edificación. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones de la edificación base no residencial y se muestra el consumo energético anual (cargas de refrigeración y calefacción) para cada ciudad seleccionada.

5.2.1 Villahermosa

El vidriado SCL (sencillo claro) es el más utilizado en edificaciones mexicanas, aun sabiendo que tiene una eficiencia térmica muy baja, por tal motivo se ha tomado como referencia para el comparativo del consumo energético anual con los demás vidriados analizados.

Para toda RAVP (Razón de aspecto Área Vidriada-Pared), el vidriado DCLRE resultó ser el más eficiente, como se muestra en la Fig. 5.19, ya que se reduce en un 5%, 8%, 11% y 12% el consumo energético para RAVP de 20%, 40%, 70% y 90%, respectivamente. Sin embargo, al incrementar la RAVP, el vidriado SR igualó prácticamente el consumo energético con el vidriado DCLRE con una RAVP del 90%.

Se puede apreciar también que un vidriado SCL con RAVP del 70% puede sustituirse por un vidriado DCLRE o SR con RAVP del 90% ya que consume menos energía pese al incremento del área vidriada.

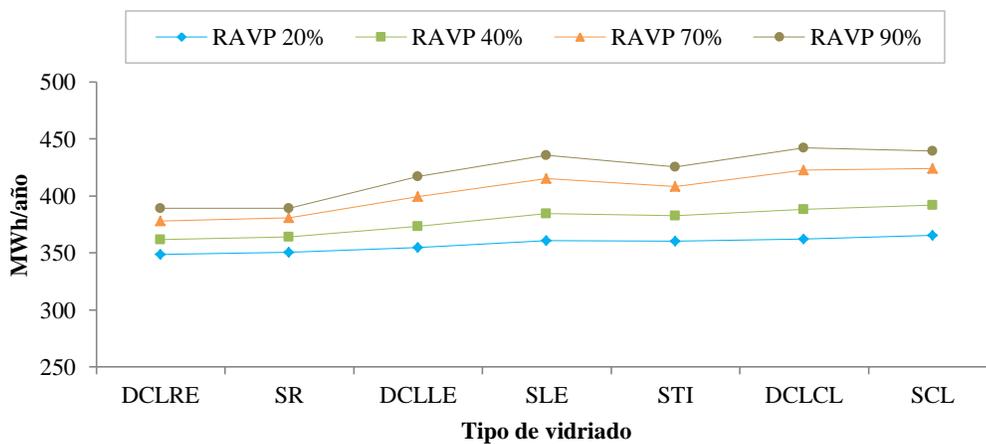


Figura 5. 19 Consumo energético total para la ciudad de Villahermosa.

5.2.2 Mérida

Para la edificación ubicada en la ciudad de Mérida con vidriado DCLRE (doble claro+reflectivo) se obtuvo una reducción en el consumo de energía de un 5% y 12 % para cada RAVP respectivamente,

esto con respecto al vidriado SCL. En la Fig. 5.20 se aprecia que el vidriado SR se asemeja un 99.9 % en el consumo energético al vidriado DCLRE.

Para cada RAVP, todos los vidriados disminuyen el consumo energético, excepto el SLE y el DCLCL con respecto a un SCL. Por otra parte, los vidriados DCLRE y SR con una RAVP del 90% disminuyen el consumo energético en comparación con un vidriado SCL con RAVP del 70%.

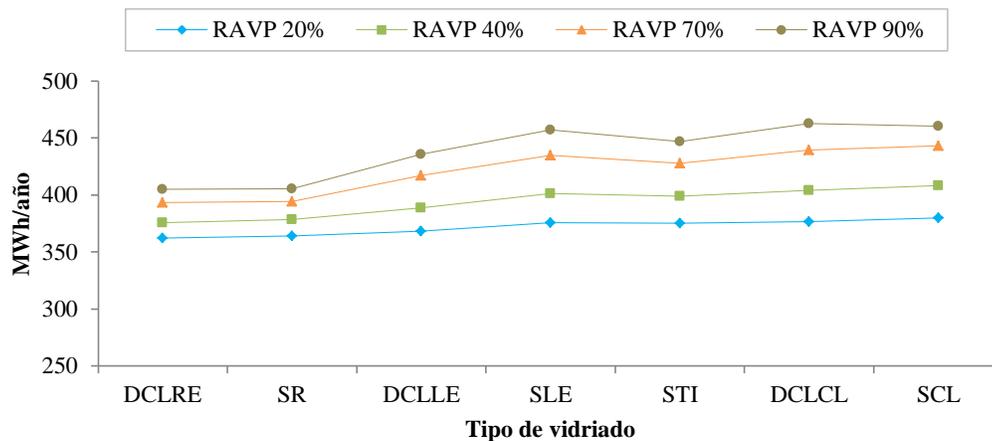


Figura 5. 20 Consumo energético total para la ciudad de Mérida.

Como se observó en los resultados mostrados en las Figs. 5.19 y 5.20, ambas ciudades, Villahermosa y Mérida coincidieron en que la edificación con vidriado DCLRE es una buena opción al reducir las cargas térmicas al igual que un vidriado SR. También se aprecia en los resultados, que el vidriado STI puede ser una tercera opción, a pesar de aumentar el consumo energético en comparación con el SR, se podría compensar en el precio, ya que los vidriados tintados suelen ser más económicos y reducir el deslumbramiento causado por los vidriados SCL.

5.2.3 Monterrey

La Fig. 5.21, muestra que las edificaciones que consumieron menos energía al año en la ciudad de Monterrey, fueron aquellas con vidriado DCLRE y SR; el vidriado DCLRE consume entre un 5% y 12% menos energía que el vidriado SCL. La diferencia entre usar un vidriado DCLRE y un SR es de aproximadamente del 2%.

Para climas extremos donde se requiere conservar el calor en horas nocturnas y en épocas de invierno con bajas temperaturas, los vidriados *low-e* (bajo emisivos) podrían ser una buena opción debido a sus propiedades térmicas que permiten disminuir la transferencia de calor hacia el exterior. Sin embargo, aunque Monterrey tiene un clima extremo, para este tipo de edificaciones, el horario de ocupación de 8:00 a 22:00 hrs, permite en las horas más frías que el edificio esté prácticamente desocupado y el seleccionar un vidriado LE, si bien reduce las pérdidas de calor en la noche, estaría incrementando las ganancias de calor en un horario donde la densidad de ocupación llega casi al 100%, por lo tanto, un vidriado con película *low-e* sería más eficiente en un clima donde se alcancen temperaturas bajo cero y el tiempo de permanencia de las personas sea mayor.

Aunque los resultados mostraron que Monterrey tuvo un consumo de 15 MWh al año en cargas de calefacción en comparación con los 0.2 MWh al año que tuvieron los climas cálidos, es de esperarse que este consumo de energía debido a la calefacción sea originado principalmente en las horas nocturnas y en una ocupación baja.

Por otra parte, se aprecia también que se puede colocar un vidriado DCLRE o SR con RAVP del 90% en lugar de un vidriado SCL con RAVP del 70%, ya que reducen el consumo de energía; de igual forma, un vidriado SCL con RAVP del 40% puede ser sustituido por un DCLRE con RAVP del 70% ya prácticamente iguala el consumo energético.

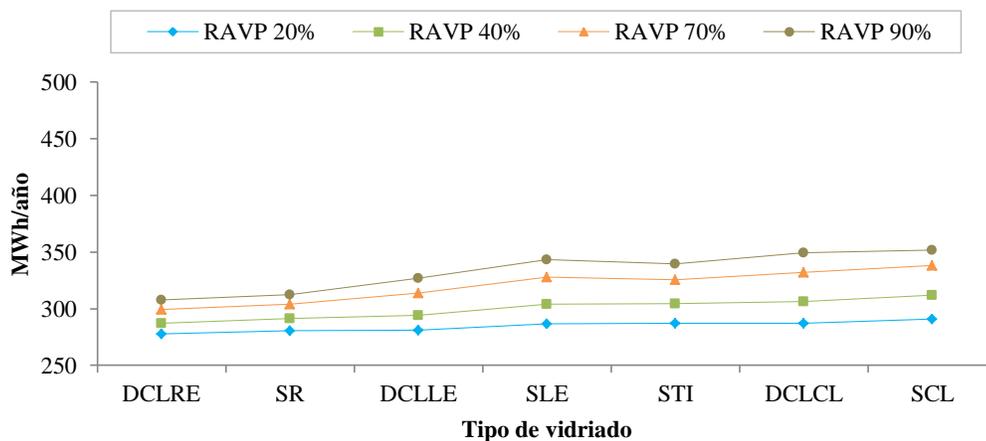


Figura 5. 21 Consumo energético total para la ciudad de Monterrey.

5.2.4 Hermosillo

Hermosillo recibe la mayor radiación solar y es la ciudad mexicana que mayor energía consume. El consumo energético con una RAVP del 90% llegó hasta los 495 MWh con el vidriado SCL y alcanzó los 437 MWh con el vidriado DCLRE, teniendo una diferencia entre ellos del 12%, con un albedo de 0.25. El DCLRE es el vidriado que reduce en mayor cantidad el consumo de energía en comparación con un vidriado SCL, entre un 4% y 12%, aproximadamente, sin embargo, el SR iguala el consumo de energía con el DCLRE hasta en un 99%, por lo que los vidriados sencillos con películas reflejantes pueden ser una buena opción para reducir el consumo de energía sin invertir en dispositivos de doble vidriado.

En la Fig. 5.22, se aprecia que el vidriado SCL consume más energía, hasta un 9% más que un vidriado DCLRE al incrementar la RAVP del 20% al 90%. Así mismo, se aprecia que todos los vidriados consumen menos energía que un vidriado SCL. Por otra parte, el vidriado SCL con RAVP del 70% puede sustituirse por un vidriado DCLRE o SR con una RAVP del 90% ya que las edificaciones con estos vidriados consumen menos energía a pesar del aumento del área vidriada.

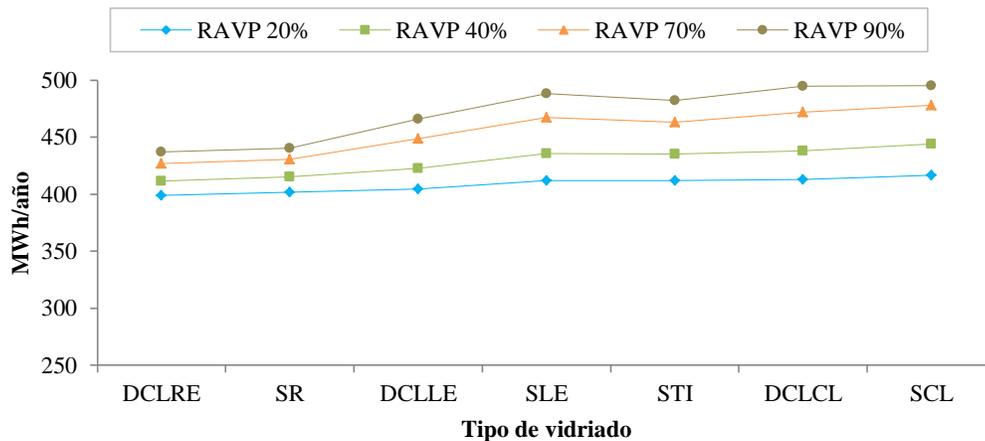


Figura 5. 22 Consumo energético total para la ciudad de Hermosillo.

5.2.5 México D. F.

La ciudad de México D. F. es un caso muy particular, es la ciudad con las temperaturas más bajas en todo el año con respecto a las otras 5 ciudades seleccionadas y la única edificación con 5 pisos. Para toda RAVP, la edificación con vidriado DCLLE (doble claro+low-e) es la que consume mayor energía en comparación con un vidriado SCL, ya que aunque es el vidriado que reduce en mayor proporción las pérdidas de calor, también el DCLLE eleva las ganancias de calor considerablemente, incrementando el consumo energético. Para México D. F. el vidriado que resultó ser más eficiente fue el SR ya que reduce las cargas térmicas un 28% con respecto al SCL y hasta un 51% con respecto al vidriado DCLLE, como se aprecia en la Fig. 5.23.

Se puede observar en la misma figura que una edificación con vidriado SCL con RAVP del 40% puede ser sustituido por un vidriado SR, ya que consume menos energía que el SCL, así mismo, un vidriado SCL con RAVP del 70% consume más energía que un vidriado SR con RAVP del 90%, por lo cual, el empleo de grandes áreas vidriadas con películas reflejantes en lugar de vidriados claros con áreas reducidas resulta conveniente.

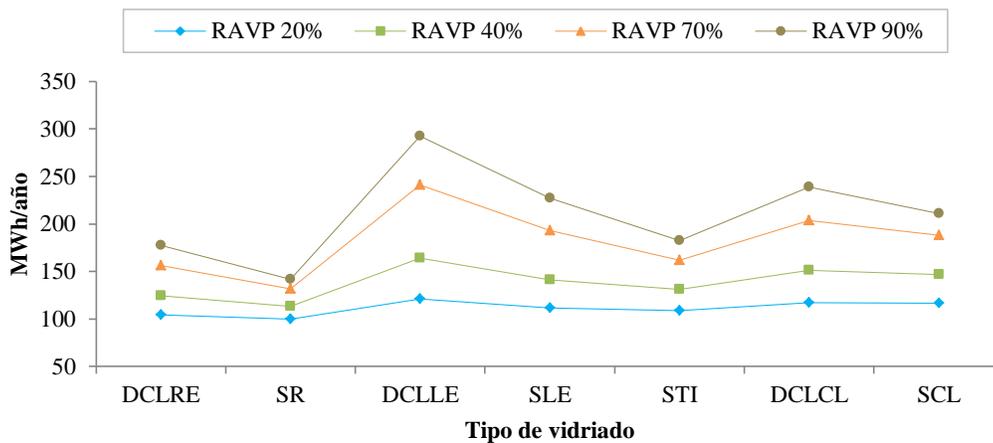


Figura 5. 23 Consumo energético total para la ciudad de México D. F.

5.2.6 Xalapa

El consumo energético de la edificación en la ciudad de Xalapa alcanzó un máximo de 185 MWh al año con vidriado DCLLE con una RAVP del 90%, como se muestra en la Fig. 5.24 y obtuvo el menor consumo de energía con el vidriado SR con RAVP del 20% con tan solo 100 MWh al año. Al igual que en la ciudad de México D. F., en Xalapa predominan las bajas temperaturas y a pesar de ello, las cargas de calefacción no rebasan los 4 MWh al año con vidriado SR. Por otra parte, la edificación con vidriado SR logró reducir un 21% el consumo de energía con respecto al vidriado SCL y hasta un 33% con respecto al DCLLE para RAVP del 90%. Por lo tanto, el vidriado SR es la mejor opción para reducir el consumo de energía para la ciudad de Xalapa.

Por otra parte, los vidriados SCL con RAVP del 40% y 70%, pueden ser sustituidos por vidriados SR con RAVP del 70% y 90%, respectivamente, ya que como se aprecia en la Fig. 5.24 consumen menos energía y tiene la ventaja de tener áreas vidriadas más grandes.

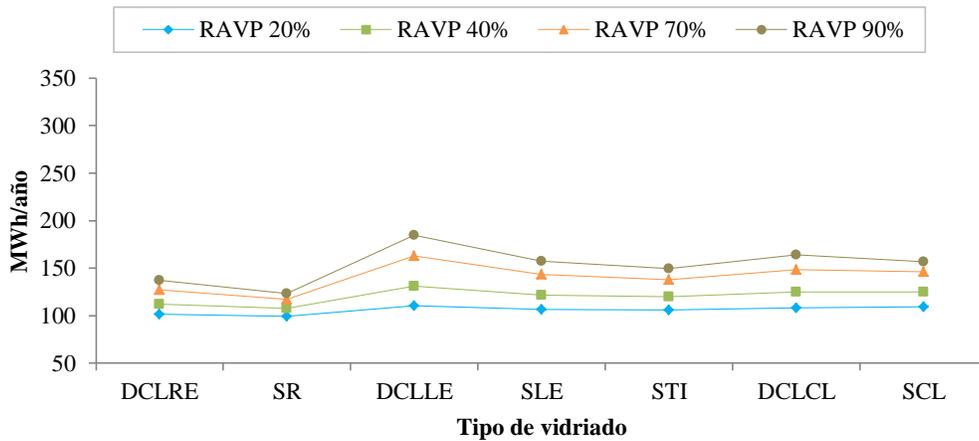


Figura 5. 24 Consumo de energía total para la ciudad de Xalapa.

Cuando se tiene una reflectancia o albedo en techos y muros de 0.25 en climas cálidos, el 99.98% del consumo energético se debe a cargas de refrigeración, mientras que la calefacción ocupa menos del 0.02% de la energía consumida y pese a que el vidriado DCLRE suele tener el menor consumo energético, el vidriado SR prácticamente iguala las cargas térmicas que el DCLRE. En climas secos, para mantener el nivel de confort se requiere consumir entre 95% y 99% de cargas de refrigeración, el

resto de la energía se debe a las cargas de calefacción y a aunque los climas secos suelen ser extremosos, el vidriado que mejor comportamiento térmico tiene al disminuir el consumo de energía es el DCLRE. Finalmente, en climas templados, las cargas de calefacción aumentaron de tal manera que son responsables de entre un 3% y 8% de la energía consumida en la edificación, el 92% de la energía se debe a cargas de refrigeración; y aunque los climas templados suelen tener las temperaturas más bajas que el resto, el vidriado SR resultó ser el más efectivo de los vidriados analizados.

Es importante resaltar que los vidriados *low-e* tienden a usarse en climas fríos, sin embargo, en los climas cálidos, secos y templados, las cargas de refrigeración son la que tienen mayor impacto en el consumo energético y el comportamiento de las edificaciones con vidriados con películas bajo emisivas no es eficiente debido a que en climas templados incrementan el consumo energético, incluso más que un vidriado SCL, por lo tanto, seleccionar vidriados *low-e* no es buena opción.

Por supuesto, es importante recalcar que los resultados anteriores corresponden a las características y parámetros de operación de la edificación que fueron mencionados en la Tabla 3.4, cuya característica más importante es la reflectancia en techos y muros del 0.25, esto aumenta las ganancias de calor en los techos y trae como consecuencia, que el efecto de los vidrios sea poco perceptible. Habrá que analizar como es el comportamiento de la edificación cuando la reflectancia en techos y muros aumenta, para ello, en el punto 5.3 se muestran los resultados de las simulaciones empleando una reflectancia en techos y muros de 0.80.

5.3 Consumo energético anual para la edificación base no residencial con reflectancia de 0.80

Como se muestra en los resultados obtenidos de las simulaciones de la edificación base no residencial con reflectancia de 0.25, los materiales de la envolvente son poco eficientes debido a que incrementan la transferencia de energía ocasionando que el efecto de los vidriados sea poco evidente. Es por ello que se realizaron simulaciones modificando únicamente la reflectancia a 0.80, conservando la misma edificación base no residencial, con los mismos materiales de construcción y los parámetros de operación. Con los resultados obtenidos se puede observar que el comportamiento de los vidriados en edificaciones con reflectancia del 0.80 permite ahorrar hasta un 22% de energía, en comparación con el 8% que ahorra la edificación con reflectancia de 0.25, ambos resultados, considerando el vidriado más eficiente que es el DCLRE, con respecto al SCL con una RAVP del 40%, en la ciudad de Mérida.

En las siguientes figuras se muestra el comportamiento térmico de los vidriados y el efecto que estos tienen en el consumo de energía; se realiza una comparación del consumo energético total entre la edificación base con reflectancia en techo y muros de 0.25 (BB-25) y la edificación base con reflectancia de 0.80 (BB-80). Cabe mencionar que para las comparaciones de la reducción de cargas térmicas, entre la edificación BB-25 y BB-80 se utilizó como referencia la edificación BB-25 con vidriado de tipo claro de 6 mm SCL, con una RAVP del 40% como lo recomienda la NOM-008-ENER-2001. Para el consumo de energía total, se suman las cargas térmicas y se aprecia que las cargas de refrigeración son las que predominan con respecto a las de calefacción cuando se emplean modelos de confort térmico, como se explicó con anterioridad.

5.3.1 Villahermosa

La Tabla 5.7, muestra un resumen de las cargas térmicas de refrigeración y calefacción, el consumo de energía total y la energía ahorrada de los diferentes vidriados con RAVP del 40%. La edificación BB-25 con vidriado SCL tuvo un consumo de energía de 392 MWh al año (vidriado de referencia).

Tabla 5. 7 Consumo y ahorro energético anual por vidriados en la ciudad de Villahermosa.

RAVP 40% CON REF 0.80					RAVP 40% CON REF 0.25				
VIDRIO	CARGAS DE ENFRIAMIENTO [MWh]	CARGAS DE CALENTAMIENTO [MWh]	TOTAL	ENERGÍA ANUAL AHORRADA [MWh]	VIDRIO	CARGAS DE ENFRIAMIENTO [MWh]	CARGAS DE CALENTAMIENTO [MWh]	TOTAL	ENERGÍA ANUAL AHORRADA [MWh]
DCLCL	338.46	0.06	338.52	53.60	DCLCL	388.03	0.04	388.07	4.05
STI	335.91	0.08	335.98	56.13	STI	382.49	0.05	382.54	9.57
SLE	334.75	0.07	334.82	57.30	SLE	384.61	0.04	384.65	7.47
DCLLE	323.66	0.07	323.73	68.39	DCLLE	373.51	0.04	373.55	18.57
SR	318.49	0.10	318.59	73.53	SR	364.21	0.07	364.28	27.83
DCLRE	314.21	0.09	314.30	77.81	DCLRE	361.80	0.05	361.85	30.26

La Fig. 5.25, muestra el comparativo de la energía ahorrada en MWh de la edificación BB-80 y BB-25. Las edificaciones BB-80 y BB-25 con el vidriado DCLRE, siendo este el más eficiente, pueden ahorrar hasta 78 MWh y 30 MWh al año; esto significa un ahorro del 20% y 8%, respectivamente. Los vidriados DCLRE y SR al consumir menos energía, son los vidriados que ahorran más MWh al año.

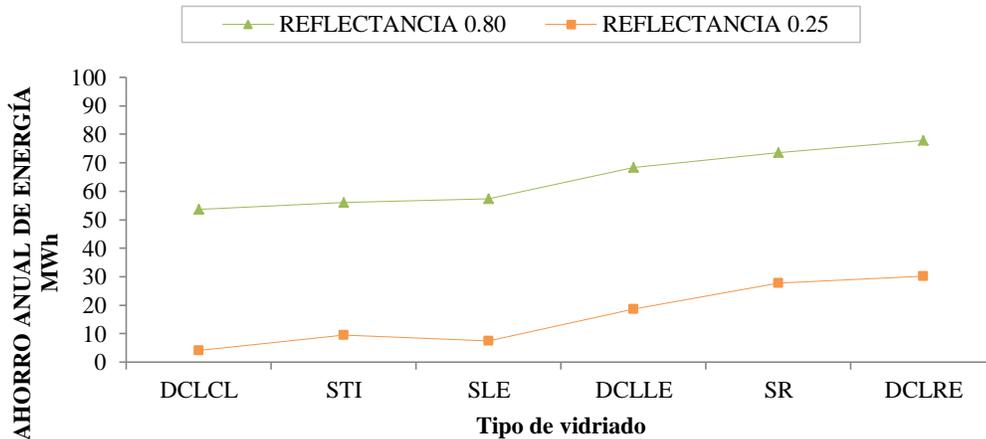


Figura 5. 25 Ahorro anual de energía para la ciudad de Villahermosa.

5.3.2 Mérida

La edificación BB-25 localizada en la ciudad de Mérida tuvo un consumo energético de 408 MWh con vidriado SCL. En la Tabla 5.8, se aprecia que las cargas térmicas de calefacción son prácticamente despreciables en comparación con las de refrigeración, esto indica que el uso de sistemas de calefacción no es importante en climas cálidos.

Tabla 5. 8 Consumo y ahorro energético anual por vidriados en la ciudad de Mérida.

RAVP 40% CON REF 0.80					RAVP 40% CON REF 0.25				
VIDRIO	CARGAS DE ENFRIAMIENTO [MWh]	CARGAS DE CALENTAMIENTO [MWh]	TOTAL	ENERGÍA ANUAL AHORRADA [MWh]	VIDRIO	CARGAS DE ENFRIAMIENTO [MWh]	CARGAS DE CALENTAMIENTO [MWh]	TOTAL	ENERGÍA ANUAL AHORRADA [MWh]
DCLCL	344.66	0.21	344.87	63.56	DCLCL	403.98	0.13	404.11	4.33
STI	343.10	0.24	343.34	65.10	STI	398.94	0.16	399.10	9.34
SLE	341.60	0.21	341.81	66.63	SLE	401.06	0.13	401.19	7.24
DCLLE	329.16	0.23	329.39	79.05	DCLLE	388.66	0.14	388.80	19.63
SR	323.52	0.35	323.87	84.57	SR	378.20	0.23	378.43	30.01
DCLRE	319.03	0.30	319.33	89.11	DCLRE	375.75	0.19	375.93	32.50

Con un vidriado DCLRE la edificación BB-80 obtuvo el menor consumo de energía con tan solo 319 MWh al año, esto significa un ahorro del 22% en comparación con el vidriado SCL. Por otra parte, para la edificación BB-25 con vidriado DCLRE se obtuvo un ahorro en el consumo energético del 8%, como se observa en la Fig. 5.26.

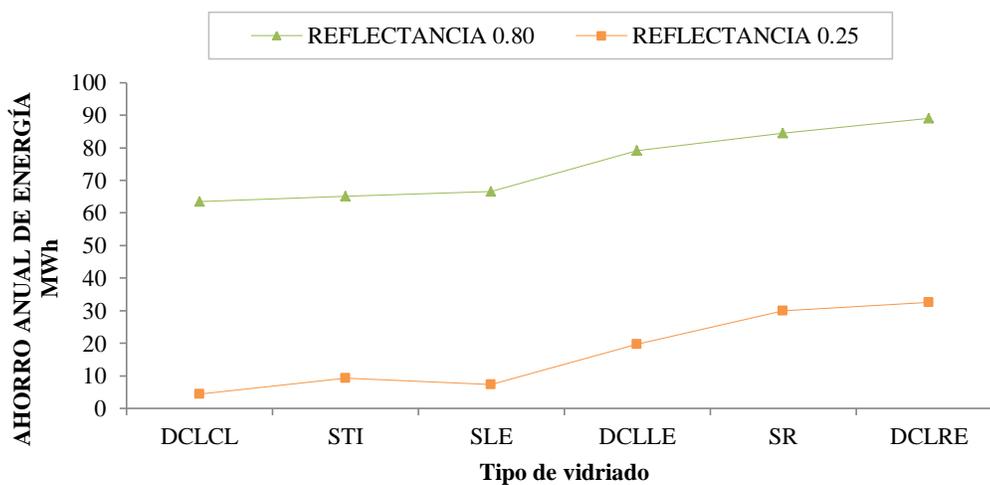


Figura 5. 26 Ahorro anual de energía para la ciudad de Mérida.

5.3.3 Monterrey

Para la edificación BB-80 ubicada en la ciudad de Monterrey, las cargas de enfriamiento disminuyeron hasta 38 MWh con el vidriado DCLRE, pero las de calefacción aumentaron hasta llegar a los 19 MWh al año, en comparación con los 13 MWh de la edificación BB-25. Por supuesto, las cargas térmicas de refrigeración siguen siendo causantes del mayor consumo de energía de la edificación, como se observa en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9 Consumo y ahorro energético anual por vidriados en la ciudad de Monterrey.

RAVP 40% CON REF 0.80					RAVP 40% CON REF 0.25				
VIDRIO	CARGAS DE ENFRIAMIENTO [MWh]	CARGAS DE CALENTAMIENTO [MWh]	TOTAL	ENERGÍA ANUAL AHORRADA [MWh]	VIDRIO	CARGAS DE ENFRIAMIENTO [MWh]	CARGAS DE CALENTAMIENTO [MWh]	TOTAL	ENERGÍA ANUAL AHORRADA [MWh]
DCLCL	255.66	14.28	269.94	41.81	DCLCL	295.16	11.05	306.21	5.54
STI	254.29	16.59	270.88	40.88	STI	291.26	13.09	304.35	7.40
SLE	252.58	15.52	268.10	43.65	SLE	292.02	11.99	304.01	7.75
DCLLE	243.38	14.75	258.13	53.62	DCLLE	283.01	11.19	294.20	17.55
SR	240.82	18.59	259.41	52.35	SR	276.92	14.66	291.57	20.18
DCLRE	236.51	16.96	253.47	58.28	DCLRE	274.18	12.99	287.17	24.58

El hecho de que exista un aumento en las cargas de calefacción, causado por el tipo de clima y por el tipo de edificación, significa que en la selección del vidriado óptimo se deberá tomar en cuenta no solo el vidriado que disminuya las ganancias de calor sino también el que disminuya las pérdidas. Si bien esto es difícil de conseguir, el vidriado DCLRE es el que obtuvo un mayor ahorro en el consumo de energía, Fig. 5.27. Esto significa que con el vidriado DCLRE, la edificación BB-80, ahorra en total 58 MWh al año, mientras que BB-25 sólo 25 MWh, lo que se refleja en un 19% y 8% de ahorro, respectivamente.

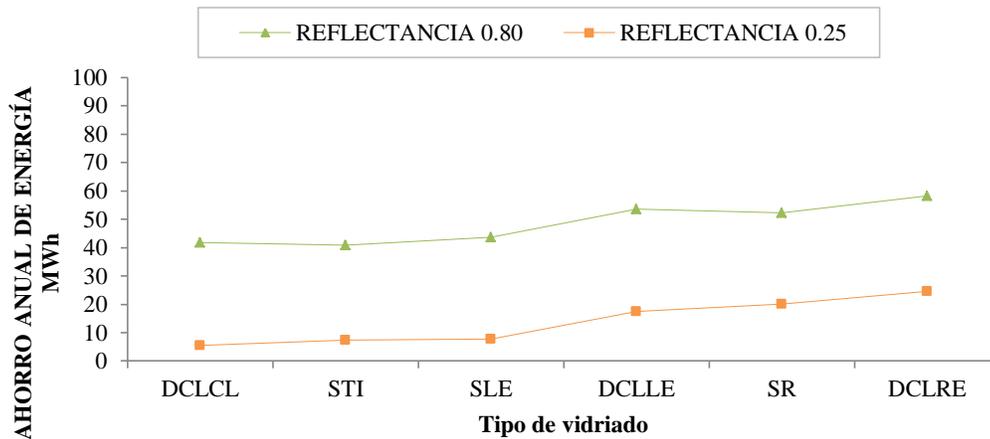


Figura 5. 27 Ahorro anual de energía para la ciudad de Monterrey.

5.3.4 Hermosillo

En la Tabla 5.10, se aprecia el mismo comportamiento térmico en ambas edificaciones como sucedió con Monterrey, cuando la reflectancia en la edificación aumenta, las cargas de enfriamiento disminuyen, pero incrementan las de calefacción, sin embargo, siguen predominando las cargas de refrigeración. Esto significa que el uso de vidriados con películas reflejantes satisface los niveles de confort sin comprometer el uso excesivo de la energía, como en el caso de vidriados claros.

Tabla 5. 10 Consumo y ahorro energético anual por vidriados en la ciudad de Hermosillo.

RAVP 40% CON REF 0.80					RAVP 40% CON REF 0.25				
VIDRIO	CARGAS DE ENFRIAMIENTO [MWh]	CARGAS DE CALENTAMIENTO [MWh]	TOTAL	ENERGÍA ANUAL AHORRADA [MWh]	VIDRIO	CARGAS DE ENFRIAMIENTO [MWh]	CARGAS DE CALENTAMIENTO [MWh]	TOTAL	ENERGÍA ANUAL AHORRADA [MWh]
DCLCL	371.80	5.74	377.54	66.42	DCLCL	434.90	3.36	438.26	5.69
STI	371.81	6.48	378.29	65.66	STI	431.16	3.94	435.10	8.86
SLE	369.09	6.20	375.29	68.66	SLE	431.92	3.57	435.49	8.47
DCLLE	356.04	6.31	362.36	81.60	DCLLE	419.33	3.53	422.85	21.10

SR	352.54	8.45	360.99	82.96	SR	410.35	4.98	415.34	28.62
DCLRE	346.79	7.83	354.62	89.33	DCLRE	406.98	4.39	411.37	32.59

En la Fig. 5.28, se muestra que la edificación BB-80 disminuyó un 20% el consumo total de energía con un vidriado DCLRE, esto significa que se ahorró 89 MWh al año, comparado con el vidriado SCL de la edificación BB-25 que tuvo un máximo consumo de 444 MWh al año. La edificación BB-25, con vidriado DCLRE ahorró un 7%, equivalente a 33 MWh, aproximadamente.

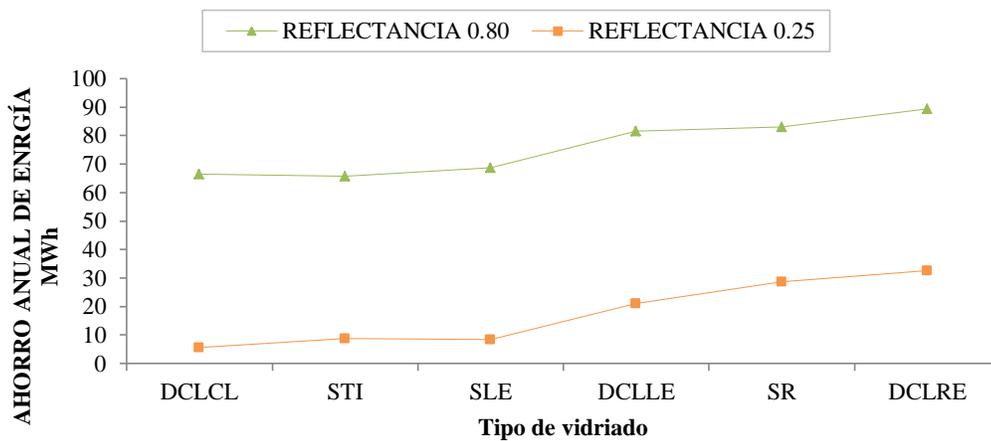


Figura 5. 28 Ahorro anual de energía para la ciudad de Hermosillo.

5.3.5 México D. F.

La ciudad de México D. F. muestra un comportamiento diferente a las ciudades ya analizadas, principalmente porque esta cuenta con las temperaturas más bajas y porque el intervalo de confort térmico (set point) disminuyó para el equipo de HVAC. A pesar de que las temperaturas son bajas en invierno, las cargas térmicas de calefacción con el vidriado que ahorró mayor energía SR, no superan los 14 MWh al año; para la edificación BB-80 y 10 MWh para la edificación BB-25. En la Tabla 5.11, se muestra que el vidriado SR fue el que menos cargas de refrigeración obtuvo, en ambas edificaciones, por lo tanto, es el que ahorró más energía. También se puede apreciar en la misma tabla

que para la edificación BB-25 los vidriados DCLCL y DCLLE en la columna de energía anual ahorrada cuentan con un signo negativo, esto indica que no se tuvo un ahorro de energía, sino que estos dos vidriados, consumen más energía que un vidriado SCL, es decir, el vidriado DCLCL consume 4MWh más energía que un vidriado claro, mientras que el DCLLE hasta 17 MWh al año.

Tabla 5. 11 Consumo y ahorro energético anual por vidriados en la ciudad de México D.F.

RAVP 40% CON REF 0.80					RAVP 40% CON REF 0.25				
VIDRIO	CARGAS DE REFRIGERACIÓN [MWh]	CARGAS DE CALEFACCIÓN [MWh]	TOTAL	ENERGÍA ANUAL AHORRADA [MWh]	VIDRIO	CARGAS DE REFRIGERACIÓN [MWh]	CARGAS DE CALEFACCIÓN [MWh]	TOTAL	ENERGÍA ANUAL AHORRADA [MWh]
DCLCL	98.44	8.44	106.88	40.04	DCLCL	145.36	5.72	151.08	-4.16
STI	81.53	11.21	92.75	54.17	STI	123.07	7.82	130.89	16.03
SLE	88.63	9.12		49.17	SLE	135.19	6.02	141.21	5.71
DCLLE	109.14	6.72	115.86	31.06	DCLLE	159.25	4.50	163.75	-16.83
SR	63.79	14.39	78.18	68.74	SR	103.35	9.85	113.20	33.72
DCLRE	73.04	11.10	84.14	62.78	DCLRE	117.06	7.28	124.34	22.58

El vidriado que tiene un mayor ahorro en el consumo total de energía es el SR, para ambas edificaciones; para la edificación BB-80 se tuvo un ahorro de 69 MWh al año, mientras que la edificación BB-25 ahorró 34 MWh, esto equivale a un 47% y 23% de ahorro de energía, respectivamente, con vidriado SR, considerando que la edificación BB-25 con vidriado SCL consumió 147 MWh de energía total.

En ambas edificaciones el vidriado DCLLE resultó ser el menos eficiente, debido a que la película *low-e* no permite que el calor ganado sea transferido al exterior, esto incrementa las cargas de refrigeración y por ende el consumo energético total. En la Fig. 5.29, se puede ver que para la edificación BB-25, tanto el vidriado DCLCL y el DCLLE no tienen un ahorro en el consumo energético total y consumen hasta un 3% y 11% más energía que el vidriado SCL. Sin embargo, los vidriados DCLCL y DCLLE de la edificación BB-80 incrementaron el ahorro de energía hasta un 27% y un 21% respectivamente. Esto

significa, que cuando la edificación tiene una reflectancia de 0.25 los vidriados DCLCL y DCLLE son menos eficientes en la reducción del consumo de energía que un vidrio claro.

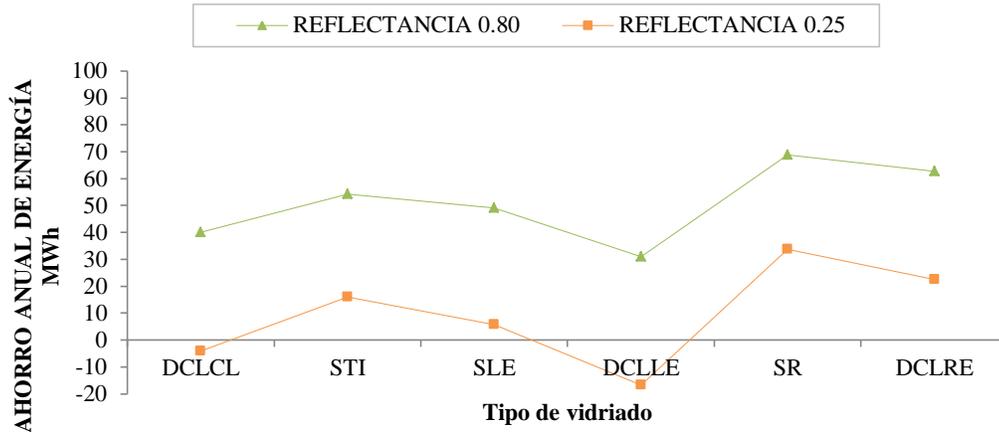


Figura 5. 29 Ahorro anual de energía para la ciudad de México D. F.

5.3.6 Xalapa

Para la ciudad de Xalapa, se obtuvieron resultados semejantes a los de la ciudad de México, sólo que el consumo energético fue menor. En la Tabla 5.12, se muestra que el vidrioado SR resultó ser el más eficiente por que redujo las cargas de refrigeración en ambas edificaciones, BB-80 y BB-25. Y como es de esperarse, los vidrioados con películas reflejantes aumentan las cargas de calefacción, tan solo entre, 6 MWh y 4 MWh al año. Con el vidrioado SR, la edificación BB-82 consumió un 35% menos energía comparada con la BB-25.

Tabla 5. 12 Consumo y ahorro energético anual por vidriados en la ciudad de Xalapa.

RAVP 40% CON REF 0.80					RAVP 40% CON REF 0.80				
VIDRIO	CARGAS DE REFRIGERACIÓN [MWh]	CARGAS DE CALEFACCIÓN [MWh]	TOTAL	ENERGÍA ANUAL AHORRADA [MWh]	VIDRIO	CARGAS DE REFRIGERACIÓN [MWh]	CARGAS DE CALEFACCIÓN [MWh]	TOTAL	ENERGÍA ANUAL AHORRADA [MWh]
DCLCL	78.58	4.22	82.80	42.39	DCLCL	122.39	2.79	125.17	0.01
STI	75.82	4.71	80.53	44.65	STI	116.85	3.16	120.01	5.17
SLE	75.26	4.37	79.63	45.56	SLE	118.88	2.85	121.73	3.45
DCLLE	82.82	3.52	86.35	38.84	DCLLE	128.55	2.32	130.86	-5.68
SR	64.05	5.99	70.04	55.15	SR	103.73	3.90	107.63	17.56
DCLRE	66.71	5.02	71.73	53.46	DCLRE	108.90	3.19	112.08	13.10

Con relación al ahorro energético, la edificación BB-80 con vidriado SR tuvo un ahorro de 55 MWh, equivalente a un 44% de ahorro, mientras que la edificación BB-25 con vidriado SR ahorró tan solo 18 MWh al año, igual a un 14% de energía ahorrada. En la Fig. 5.24, se aprecia que la edificación BB-80 los vidriados SR y DCLRE tienen prácticamente el mismo ahorro energético, aproximadamente un 44% con respecto al vidriado SCL con reflectancia del 0.25.

De igual manera que para la ciudad de México, la edificación BB-25 ubicada en la ciudad de Xalapa, en la Fig. 5.24, se muestra que el vidriado DCLLE fue el menos eficiente, ya que consumió aproximadamente 6 MWh más que un vidriado SCL, pero para la edificación BB-80 ahorró el vidriado DCLLE un 31% de energía. También se puede apreciar en la misma figura que los vidriados DCLCL y STI, así como los vidriados SR y DCLRE, para edificación BB-80, consumen aproximadamente, la misma cantidad de energía.

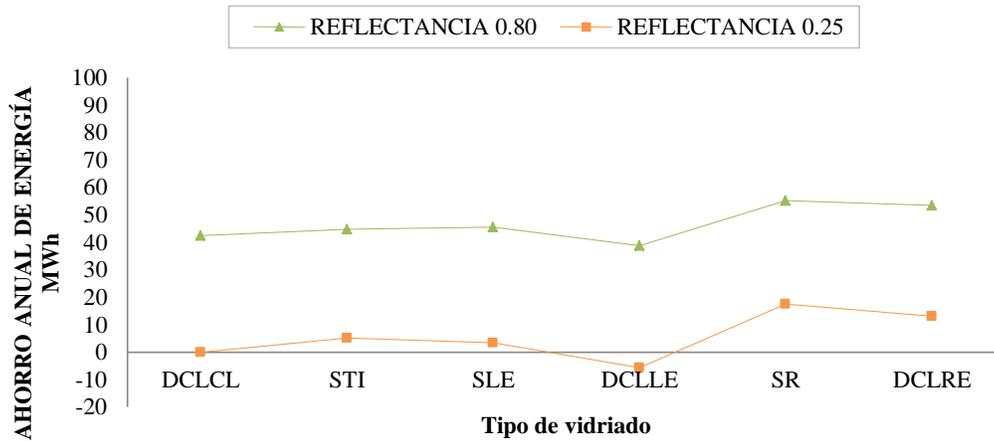


Figura 5. 30 Ahorro anual de energía para la ciudad de Xalapa.

Como se mostró en los resultados, el vidriado óptimo para cada edificación dependerá principalmente del tipo de clima. Para los climas existentes en la República Mexicana, los vidriados con películas *low-e* no suelen ser efectivos ya que no se aprovecha de manera eficiente el incremento de las ganancias de calor, ya que los climas templados de México no suelen ser fríos con temperaturas bajo cero en gran parte del año.

CAPÍTULO 6

Conclusiones y Recomendaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos de las simulaciones y se presentan algunas recomendaciones para trabajos futuros y poder establecer parámetros que permitan la construcción de normativas en edificaciones no residenciales mexicanas.

6.1 Conclusiones

Los resultados mostraron para la edificación BB-25 (reflectancia en techos y muros de 0.25) ubicada en la ciudad de Villahermosa, el vidriado DCLRE y el SR, tienen el mismo consumo energético cuando la RAVP (Razón de aspecto Área Vidriada-Pared), por lo tanto, un vidriado doble incrementará solo el costo de instalación y mantenimiento, por lo que el vidriado SR es la mejor opción para este estado de la república. Para la ciudad de Mérida, el vidriado DCLRE es el que reduce mayormente el consumo de energía, sin embargo, al igual que Villahermosa, el SR igual casi al 100% el consumo energético que un DCLRE. Aunque la diferencia en el consumo energético es mínima entre un vidriado DCLRE y un SR, el realizar un análisis de costos podría justificar el uso de DDV (dispositivos de doble vidriado) por encima de los sencillos.

Para la ciudad de Monterrey, la edificación BB-25 con vidriado DCLRE resultó ser el más eficiente, sin embargo, el vidriado SR consumió un 2% más energía que el DCLRE. Para la ciudad de Hermosillo, el mejor vidriado es el DCLRE y el SR iguala el consumo de energía hasta un 99%.

Los resultados muestran que se consume más energía cuando un vidriado SCL incrementa la RAVP en comparación con un vidriado DCLRE, es por ello que se recomienda grandes áreas vidriadas pero con películas reflejantes.

Al tener la ciudad de México bajas temperaturas, en comparación con las demás ciudades analizadas, se esperaba que el vidriado DCLLE fuese el más eficiente, sin embargo, pese a que es el vidriado con menos pérdidas de calor, el aumento en las ganancias de calor, el uso de vidriados DCLLE incrementa el consumo energético. Está claro que las películas LE y DDV son ideales para edificaciones donde las cargas de calefacción sean predominantes ya que el incremento en las ganancias de calor puede reducir las cargas de calefacción y lograr un mayor confort térmico al reducir las pérdidas de calor cuando se tiene bajas temperaturas. Para la ciudad de Xalapa, al igual que la ciudad de México, el vidriado DCLLE incrementa el consumo de energía, porque el incremento en el *SHGC* aumenta las ganancias de calor.

Así mismo, los resultados mostraron que para la edificación BB-25 en el comportamiento de los siete vidriados no hubo grandes diferencias entre usar un vidriado SCL y un DCLRE, sin embargo, a pesar de que las diferencias máximas de los vidriados fueron aproximadamente del 10% con respecto al SCL, para climas cálidos y templados el vidriado SR resultó ser una buena opción, mientras que para climas secos, el DCLRE disminuye el consumo de energía. Cabe mencionar que una de las causas por

las que no se logra visualizar a mayor escala el efecto de los vidriados en la reducción del consumo energético, es debido a las altas ganancias de calor provenientes del techo ya que éste solo refleja el 25% de la energía solar incidente.

Como se mostró en los resultados, la edificación BB-25 resultó ser poco eficiente en el ahorro de energía, sin embargo, en México, es la edificación base y de referencia para la elaboración de indicadores que utiliza la norma. Sin embargo, conservando la misma edificación base pero incrementando la reflectancia en techo y muros a 0.80, los resultados mostraron grandes ahorros de energía. Se observa en los resultados que la edificación BB-80, en comparación con la edificación BB-25 con vidriado SCL, tuvo un ahorro máximo de energía del 22% con vidriado DCLRE, esto para climas cálidos y secos, mientras que para climas templados, el ahorro de energía alcanzó un 47% con vidriado SR. Los resultados anteriores confirman que la reflectancia en conjunto con el tipo y tamaño de los vidriados, juegan un papel muy importante en el consumo energético de edificaciones no residenciales.

Cuando la reflectancia en techos y muros se incrementa, mayores ahorros de energía se pueden alcanzar y mientras mayor sea la RAVP, se consiguen grandes ganancias de calor, sin embargo, actualmente las edificaciones están diseñadas con muro tipo cortina, lo que hace inevitable que dichas edificaciones empleen grandes áreas vidrias, por lo tanto, la selección adecuada de los materiales de construcción y seleccionar vidriados DCLRE y SR son buenas opciones para reducir las cargas térmicas.

En el Anexo 1, se muestran las gráficas por separado de las ganancias y pérdidas de calor para cada tipo de vidriado y para cada tipo de clima. Se logra ver que cuando el valor del *SHGC* incrementa, las ganancias de calor también aumentan, lo cual, no es ideal para climas cálidos, porque incrementaría el uso de sistemas de refrigeración, sin embargo, en climas fríos o en climas donde las bajas temperaturas predominan, la selección de vidriados con altos valores en el *SHGC* resulta ideal. Por el contrario, cuando el *valor-U* incrementa su valor, el mayor impacto se refleja en las pérdidas de calor, es por ello, que mientras más bajo sea el *valor-U* habrá mayor aislamiento térmico en el vidriado, por lo que en climas fríos, se recomiendan vidriados con película bajo emisiva (*low-e*) y DDV porque que disminuyen las pérdidas de calor.

En general, el consumo de energía en todos los climas de México, está gobernado por las cargas de refrigeración, lo cual no hace necesario el uso de vidriados *low-e* ni de DDV que reduzcan las pérdidas de calor como los vidriados DCLLE y SLE. Si bien, en climas secos y templados predominan las bajas

temperaturas principalmente en invierno, las cargas de refrigeración siguen predominando en estos climas.

Con respecto a los resultados del cálculo de las ganancias y pérdidas de calor por efecto del vidriado, para climas cálidos y secos el vidriado DCLRE reduce de las pérdidas y ganancias de calor aproximadamente un 45% en comparación con un SCL, sin embargo, para climas secos, cuando el confort está por encima del consumo energético, los vidriados DCLLE son buenas opciones porque reducen las pérdidas de calor en comparación con las películas reflejantes. Para climas templados, el DCLRE sigue siendo el vidriado ideal para reducir las cargas térmicas ya que del 100% de $kW/año$ que el vidriado SCL obtiene en ganancias y pérdidas de calor, el DLRE las reduce hasta un 40% y cuando se requieran altos niveles de confort térmico, el vidriado SLE por sus propiedades, cumple este fin pero solo reduce los $kW/año$ aproximadamente un 32%. Cabe mencionar que los resultados en la eficiencia del vidriado varían cuando se incluye el efecto de las ganancias de calor de muros y techos principalmente.

De forma general, los resultados obtenidos de las simulaciones de las ganancias y pérdidas de calor y del consumo energético nos dan una idea del comportamiento térmico de la edificación base para establecer estándares y mejorar las propiedades de los materiales de construcción. Los paquetes comerciales *DesignBuilder* y *EnergyPlus* nos permiten calcular un sinnúmero de variables relaciones al confort térmico de edificaciones, sin embargo, a pesar de ser programas muy flexibles, es necesario conocer el buen funcionamiento de ambos programas, debido a que cualquier cambio en algún elemento puede ser muy sensible en los resultados.

6.2 Recomendaciones

- Analizar climas fríos como Canadá para visualizar el comportamiento térmico de los vidriados *low-e* y observar el efecto de la ubicación de la película bajo emisiva.
- Estudiar el comportamiento térmico de edificaciones incrementando el número de pisos, para determinar la relación entre el número de pisos y el consumo energético debido al techo-paredes-área vidriada.
- Diseñar y evaluar una edificación, con materiales de construcción novedosos, ecológicos, altamente eficientes que reduzcan el consumo energético, que estén disponibles en el mercado mexicano y analizar el comportamiento térmico por efecto del vidriado y su impacto en las cargas térmicas de refrigeración y calefacción.
- Realizar un análisis de costos de acuerdo a los resultados obtenidos de la eficiencia térmica de cada vidriado para conocer si los DDV pueden satisfacer los costos de inversión con el ahorro de energía con respecto a vidriados sencillos.

Referencias

Al-tamimi, Nedhal Ahmed M., Sharifah Fairuz, Syed Fadzil y Adel Abdullah (2009). “The Effect of Orientation and Glazed Area to the Indoor Air Temperature in Unventilated Buildings in Hot-Humid Climate”. 3 rd International Conference on Built Environment in Developing Countries, 424–33.

Álvarez G., Rubin F., Gilbert H., Domínguez I. y Shickman K. (2014). **Evaluación Del Impacto Del Uso de “Cool Roof ” En El Ahorro de Energía En Edificaciones No- Residenciales Y Residenciales En México.** Informe de resultados, Comisión Nacional de Uso Eficiente de Energía (CONUEE), México.

ASHRAE (2009). *Handbook of Fundamentals* (SI).

Cengel Y. (2007). *Transferencia de Calor Y Masa.* 3rd ed. Mc Graw Hill.

Chagolla M. (2013). **Estudio Térmico de Viviendas Para Diferentes Climas de La República Mexicana.** Tesis de maestría, Ing. Mecánica, CENIDET, México.

Comisión Nacional del Agua (2010). “Clima en México”. Obtenido en <http://smn.cna.gob.mx>

Crawley D., Lawrie L., Winkelmann F., Bulhl W. y Huang Y. (2001). “EnergyPlus: Creating a New-Generation Building Energy Simulation Program”. *Energy and Buildings*, 33:319–31.

DesignBuilder (2011). DesignBuilder v3 EnergyPlus Simulation Documentation.

Energy Plus, 2013. EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations.

Gasparella A., Pernigotto G, Cappelletti F., Romagnoni P. y Baggio P. (2011). “Analysis and Modelling of Window and Glazing Systems Energy Performance for a Well Insulated Residential Building”. *Energy and Buildings*, 43:1030–37.

Halverson M. A., Stucky D. J., Fredrich M., Godoy P.-Kain, Keller J. M. y Somasundaran S. (1994). “Energy Effective and Cost Effective Building Energy Conservation Measures for Mexico”. Pacific NW Laboratory, Richland, Washington.

Heard C. (1993). **Notes on the typical house description as used with SUNCODE.**

Hernández E. (2013). **Estudio de La Influencia de Las Ventanas En El Funcionamiento Térmico de Las Edificaciones.** Tesis de maestría, Ing. Mecánica, CENIDET, México.

Incropera F. y Dewitt D. 2002. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 5th ed. John Wiley & Sons.

ISO 15099 (2012). **Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices-Detailed Calculations.**

Iturriaga A. (2008). **La Ventana: Análisis Y Estrategias Respecto a La Energía Solar.** España.

Jiménez I. (2012). **Estudio de La Transferencia de Calor En Ventanas Mexicanas En Condiciones de Clima Frío Mediante Una Cámara de Ambiente Controlado.** Tesis de maestría, Ing. Mecánica, CENIDET, México.

Kim S., Kim S., Kim K. y Cho Y. (2014). “A Study on the Proposes of Energy Analysis Indicator by the Window Elements of Office Buildings in Korea.” *Energy and Buildings*, 73:153–65.

LBNL (2011). **NFRC Simulation Manual: THERM 6.3/WINDOW 6.3.**

Lee B., Kim S., Cho Y. y Seong Y. (2012). “A Study on the Energy Consumption of Office Buildings with Variation Fenestration Design”.

Lee J., Juang H., Park J., Lee J. y Yoon Y. (2013). “Optimization of Building Window System in Asian Regions by Analyzing Solar Heat Gain and Daylighting Elements”. *Renewable Energy*, 50:522–31.

Leskovar V. y Premrov. (2012). “Influence of Glazing Size on Energy Efficiency of Timber-Frame Buildings”. *Construction and Building Materials*, 30:92–99.

Nicol J. y Humphreys. (2002). “Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings.” *Energy and Buildings* 34:563–72.

NORMA Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001 (2001), **Eficiencia Energética En Edificaciones, Envolverte de Edificios No Residenciales**. Secretaría de Energía, México.

NORMA Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011 (2011). **Eficiencia Energética En Edificaciones, Envolverte de Edificios Para Uso Habitacional**. Secretaría de Energía, México.

Ochoa C., Aries M., van Loenen E. y Hensen J. (2012). “Considerations on Design Optimization Criteria for Windows Providing Low Energy Consumption and High Visual Comfort”. *Applied Energy*, 95:238–45.

Omar E. y Al-Ragom F. (2002). “On the Effect of Glazing and Code Compliance.” *Applied Energy*, 71:75–86.

Orosa J y Oliveira A. (2011). “Software Tools for HVAC Research”. *Advances in Engineering Software*, 42:846–51.

Özkan D. y Onan C. (2011). “Optimization of Insulation Thickness for Different Glazing Areas in Buildings for Various Climatic Regions in Turkey”. *Applied Energy* 88:1331–42.

Pérez C. (2012). **Análisis Térmico de Una Ventana de Vidrio Doble**. Tesis de maestría, Ing. Mecánica, CENIDET, México.

Pérez-Lombard L., Ortiz J. y Pout C. (2008). “A Review on Buildings Energy Consumption Information”. *Energy and Buildings*, 40:394–98.

Santamouris M. y Asimakopoulos D. (1996). *Passive Cooling of Buildings*. UK: James & James.

Secretaría de Energía (2015). Balance Nacional de Energía 2014. 1ª ed., México. Obtenido en: <http://www.gob.mx/sener>.

Stegou-Sagia A., Antonopoulos K, Angelopoulou C. y Kotsiovelos G. (2007). “The Impact of Glazing on Energy Consumption and Comfort”. *Energy Conversion and Management*, 48:2844–52.

Su X. y Zhang X. (2010). “Environmental Performance Optimization of Window-Wall Ratio for Different Window Type in Hot Summer and Cold Winter Zone in China Based on Life Cycle Assessment”. *Energy and Buildings*, 42:198–202.

Tahmasebi M. , Banihashemi S. y Hassanabadi M. (2011). “Assessment of the Variation Impacts of Window on Energy Consumption and Carbon Footprint”. *Procedia Engineering*, 21:820–28.

Tapia A. (2012). “Energía Solar: Aprovechamiento eficiente”. *HYPATIA*, 43:21.

Tian C., Chen T., Yang H. y Chung T. (2010). “A Generalized Window Energy Rating System for Typical Office Buildings”. *Solar Energy*, 84:1232–43.

Yu Z., Zhang W. y Fang T. (2013). “Impact of Building Orientation and Window-Wall Ratio on the Office Building Energy Consumption”, *Applied Mechanics and Materials*, 409-410:606–11.

ANEXO **A**

Ganancias y pérdidas de calor por efecto del vidriado

En este apartado se muestran por separado los resultados de las ganancias y pérdidas de calor de la edificación base no residencial por efecto únicamente del vidriado. Los resultados se muestran para cada ciudad y para cada RAVP (Razón de aspecto Área Vidriada-Pared).

Conocer el comportamiento térmico real de cada vidriado seleccionado para cada tipo de clima permite conocer la eficiencia térmica de cada uno de los vidriados y esto se logra mediante el cálculo de las ganancias y pérdidas de calor anuales en kW , modelando la edificación base no residencial con un albedo de 0.25 en techos y muros. Cabe mencionar que los resultados obtenidos de las ganancias y pérdidas de calor son efecto de la superficie de la ventana únicamente.

Es importante señalar que el software *EnergyPlus* no considera para el cálculo de ganancias y pérdidas de calor por efecto del vidriado el albedo en techo y muros, sin embargo, el albedo se estableció desde la selección de los materiales de construcción de la edificación base no residencial. La edificación con mayores ganancias de calor se encuentra ubicada en la ciudad de México D. F. debido a que cuenta con 5 pisos, mientras que para una edificación de 3 pisos, la edificación ubicada en la ciudad de Hermosillo obtuvo las mayores ganancias de calor.

Con respecto a las pérdidas de calor, los resultados son mostrados de acuerdo al incremento en el *valor-U*, es decir, los vidriados están distribuidos de tal manera, que muestran de forma creciente las pérdidas de calor, la primera sección corresponde a dobles vidriados y la segunda sección a vidriados sencillos. Los valores de *U* en los resultados corresponden a los vidriados, DCLLE, DCLRE, DCLCL, SLE, SR, STI y SCL, respectivamente.

A.1 Villahermosa

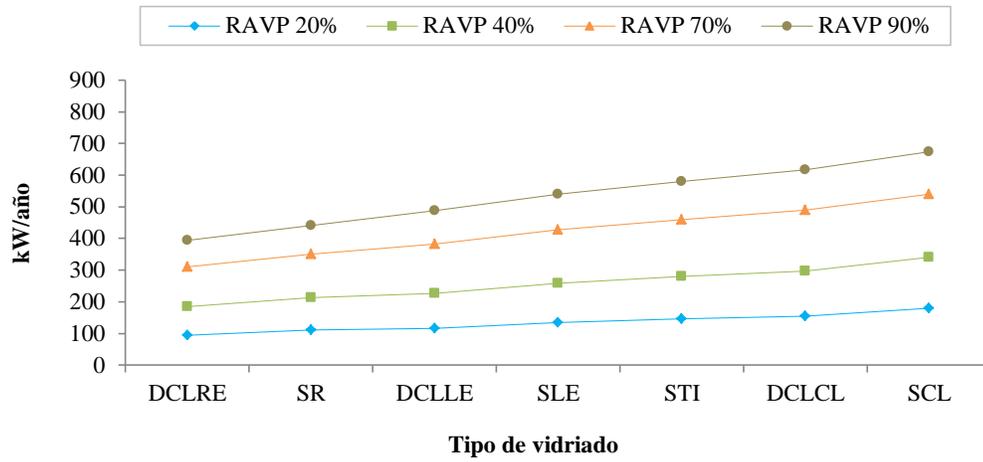


Figura A. 1 Ganancias de calor para la ciudad de Villahermosa.

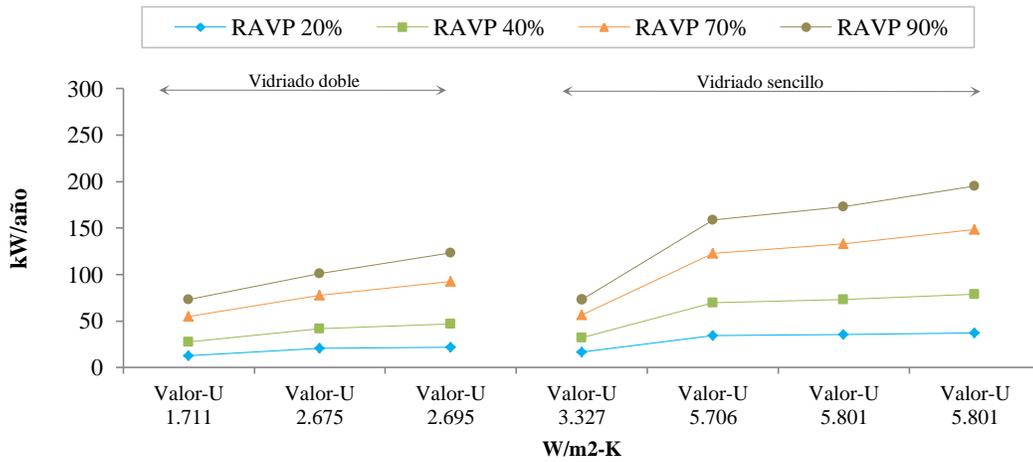


Figura A. 2 Pérdidas de calor para la ciudad de Villahermosa.

A.2 Mérida

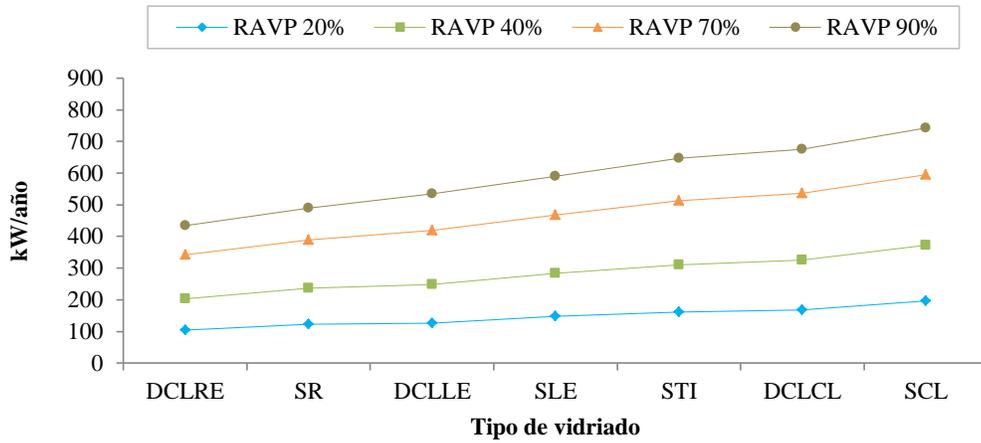


Figura A. 3 Ganancias de calor para la ciudad de Mérida.

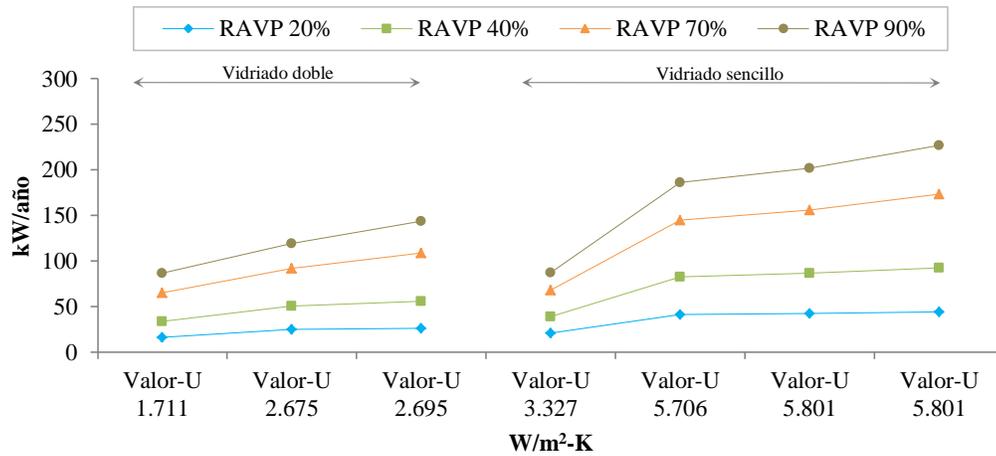


Figura A. 4 Pérdidas de calor para la ciudad de Mérida.

En climas cálidos, las pérdidas de calor no son tan importantes como en climas templados y fríos, de hecho, las pérdidas de calor pueden conservar más fresca la edificación y contribuir con la reducción de la energía.

A.3 Monterrey

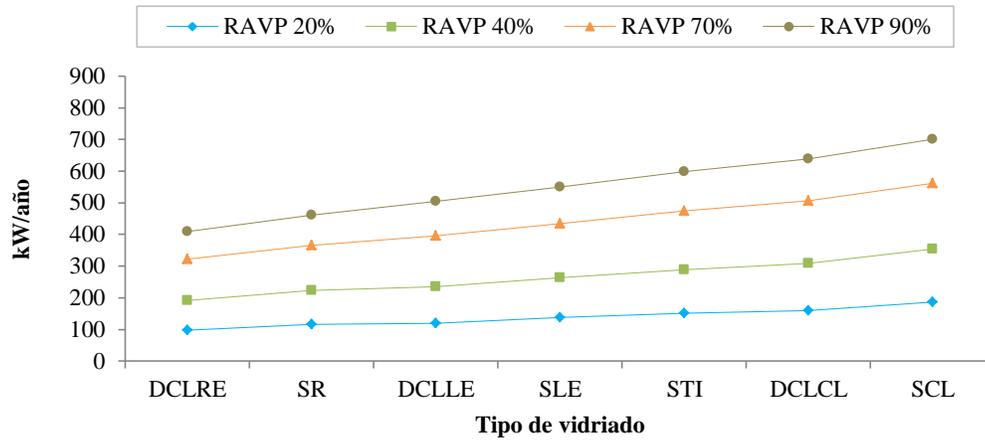


Figura A. 5 Ganancias de calor para la ciudad de Monterrey.

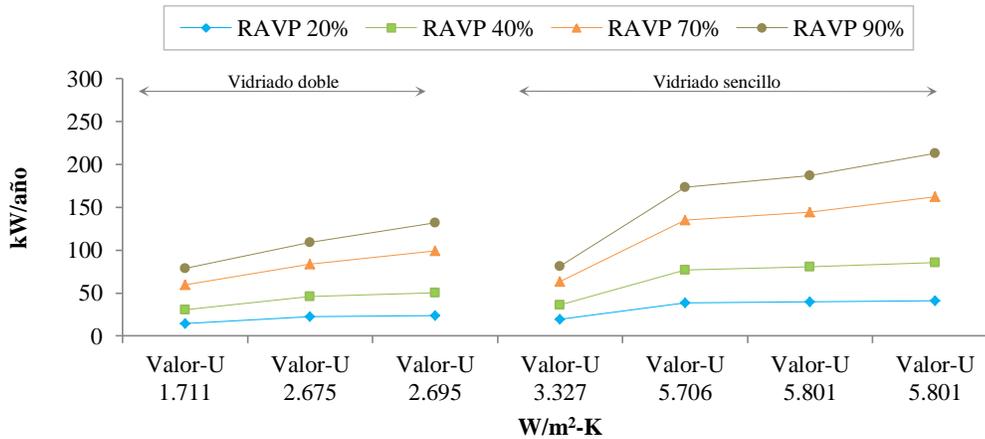


Figura A. 6 Pérdidas de calor para la ciudad de Monterrey.

A.4 Hermosillo

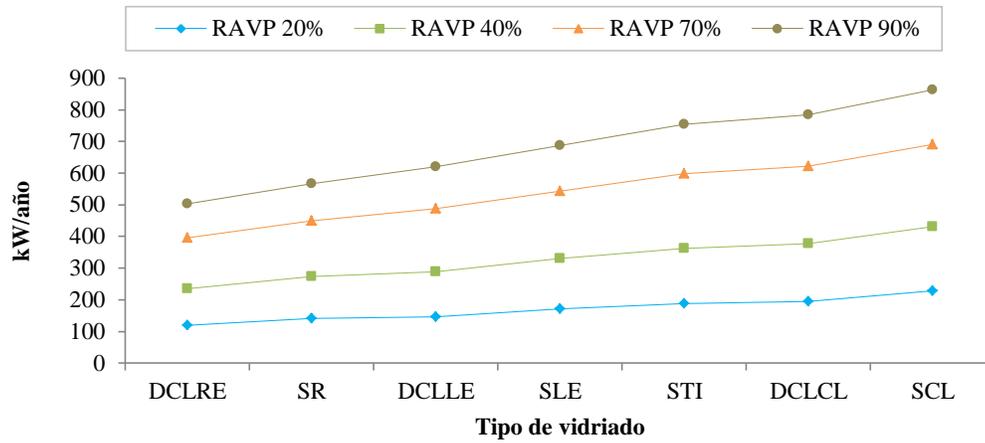


Figura A. 7 Ganancias de calor para la ciudad de Hermosillo.

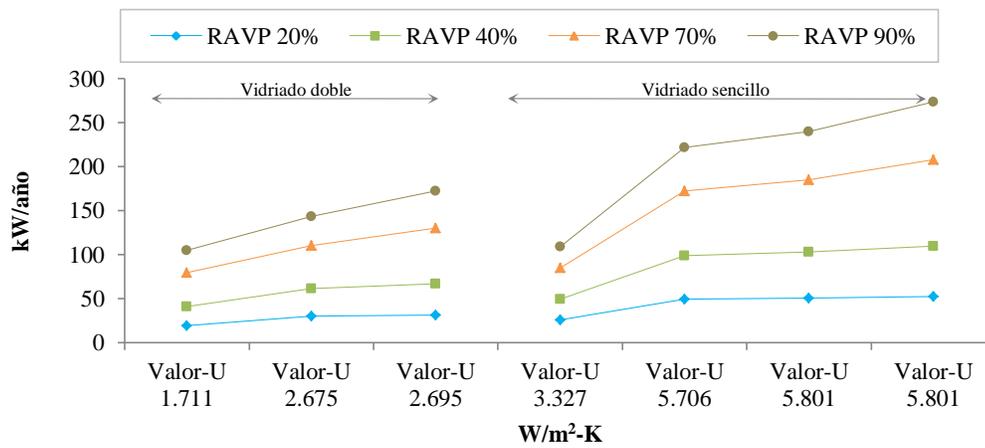


Figura A. 8 Pérdidas de calor para la ciudad de Hermosillo.

A.5 México D. F.

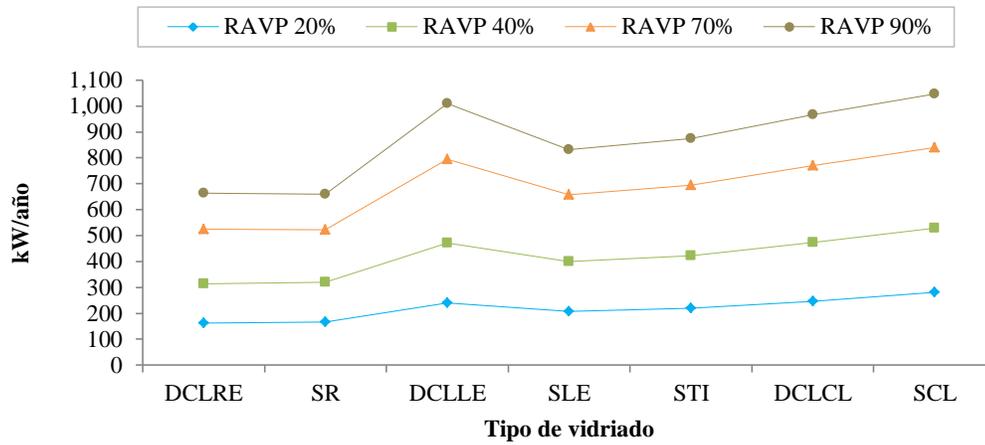


Figura A. 9 Ganancias de calor para la ciudad de México D. F.

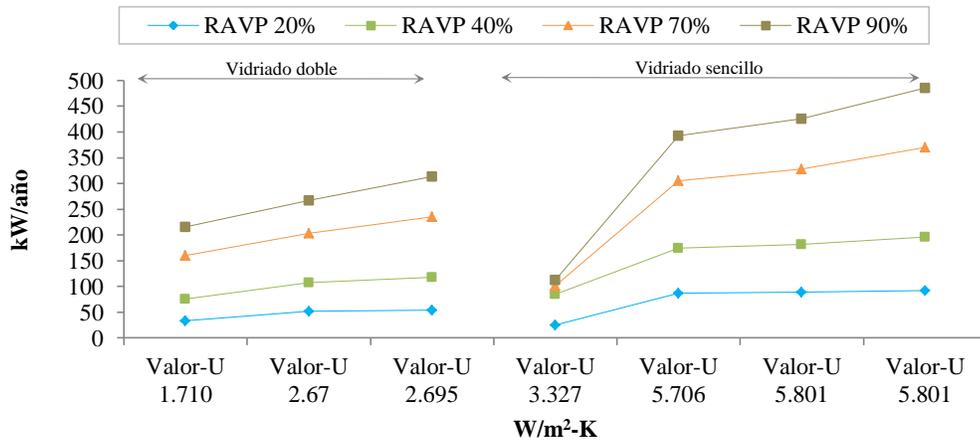


Figura A. 10 Pérdidas de calor para la ciudad de México D. F.

A. 6 Xalapa

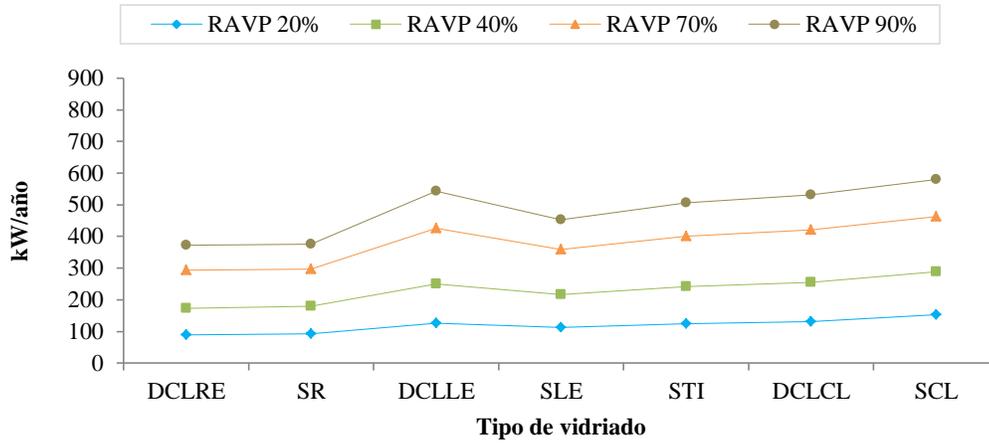


Figura A. 11 Ganancias de calor para la ciudad de Xalapa.

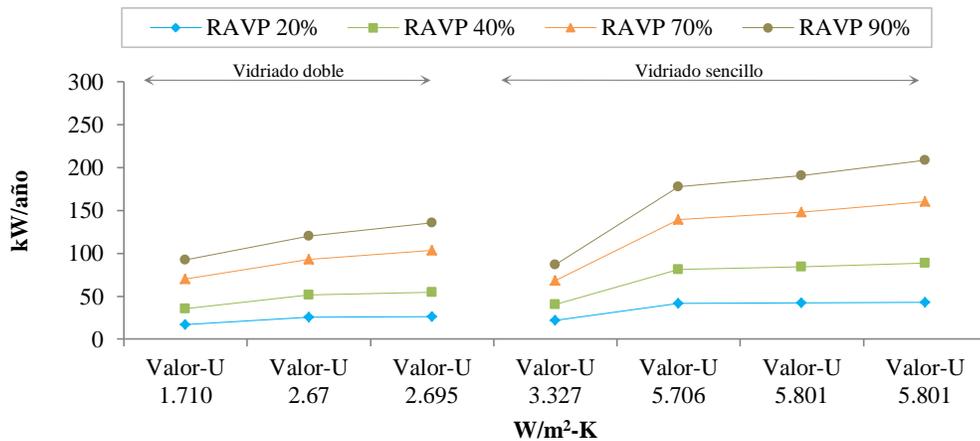


Figura A. 12 Pérdidas de calor para la ciudad de Xalapa.

ANEXO **B**

*Análisis térmico de la R.ATP en
edificaciones no residenciales: simulación en
Energy Plus*

Dentro de los resultados obtenidos, se logró la publicación de un artículo para el XXI Congreso Internacional Anual de la SOMIM, el cual se llevó a cabo del 23 al 25 de septiembre de 2015 en la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz.

Tema A5. Termofluidos: Energía en edificaciones

“Estudio de la razón de aspecto de área vidriada-pared (RAVP) en edificaciones no residenciales”

P. Hernández Castillo*, G. Álvarez, E. Simá, M. Chagolla Aranda

Departamento de Ingeniería Mecánica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor., C. P. 62490, México.

*Autor contacto. Dirección de correo electrónico: polar_hc@cenidet.edu.mx

RESUMEN

En este artículo se presenta un estudio del análisis térmico del efecto de la razón de aspecto de área vidriada-pared (RAVP) en el consumo energético de edificaciones no residenciales; la edificación base fue la utilizada para elaborar indicadores para la Norma NOM-008-ENER-2001. Se determinaron las cargas térmicas mediante los paquetes comerciales DesignBuilder y EnergyPlus. Se emplearon cuatro valores de RAVP 20%, 40%, 70% y 90% y dos tipos de vidrios; claro y reflectivo. El análisis se llevó a cabo para las seis regiones climáticas de la República Mexicana reportadas por el INEGI, con la finalidad de establecer el vidriado y la RAVP óptimos para cada una de ellas. Los resultados muestran que el vidrio reflectivo es más eficiente en climas cálidos ya que reduce las cargas de enfriamiento; en climas templados, el vidrio claro disminuye las cargas de calentamiento con el incremento de RAVP.

Palabras Clave: Razón de Aspecto de Área Vidriada-Pared (RAVP)

ABSTRACT

This article presents a study of the thermal analysis of the effect of the Glazed-Wall Area Ratio (GWAR) in the energy consumption of non-residential buildings; based building was used to develop indicators for Standard NOM-008-ENER-2001. Thermal cooling and heating loads were determined using commercial packages DesignBuilder and EnergyPlus. Four GWAR were employed, 20%, 40%, 70% and 90% and two types of glass, clear and reflective glass. The analysis was conducted for the six climatic regions of Mexico reported by the INEGI, in order to establish the optimum glazing and GWAR for each climatic region. The results show that the reflective glass is more efficient in hot climates because it reduces cooling loads; in temperate climates, clear glass heating load decreases with increasing GWAR.

Keywords: Glazed-Wall Area Ratio (GWAR)

Nomenclatura	
RAVP	Razón de Aspecto de Área Vidriada-Pared
SC	Coefficiente de sombreado
SHGC	Coefficiente de ganancia de calor solar
HVAC	Acondicionamiento de aire, calefacción y ventilación.
ϵ	Emitancia
k	Conductividad térmica [W/m-K]
Q	Flujo de energía a través de una superficie vidriada [W]
Factor-U	Coefficiente total de transferencia de calor [W/m ² -°C]
A _g	Área total del vidrio [m ²]
G	Radiación solar total incidente [W/m ²]
t _{in}	Temperatura interior del aire [°C]
t _{out}	Temperatura exterior del aire [°C]
Q _s	Ganancias solares [W]
Q _i	Ganancias internas [W]
Q _c	Ganancias y pérdidas por conducción [W]
Q _v	Ganancias y pérdidas por ventilación-convección [W]
Q _m	Ganancias y pérdidas por sistemas mecánicos de climatización [W]

Q_e Pérdidas por evaporación [W]

1. Introducción

A nivel global, los edificios son responsables de entre 30 y 40 % del uso de toda la energía primaria, emisiones de gases de efecto invernadero y generación de residuos. La iluminación y sistemas de aire acondicionado (HVAC) representan el mayor uso de energía total en un edificio típico [1]. En edificios comerciales que utilizan acondicionamiento de aire, la mayor cantidad de energía consumida es debido a la energía de calentamiento y enfriamiento, la cual es principalmente influenciada por el tipo de clima y sistemas de fenestación [2].

Las ventanas pueden proveer luz, vista y aire fresco a los residentes y juegan el rol más importante en el consumo

energético de un edificio. El tipo de vidrio, el tamaño y la orientación de la ventana desempeñan un papel fundamental en el consumo de energía de los edificios ya que a través de ellos se puede ganar o perder energía.

Los edificios comerciales en el mundo emplean grandes áreas vidriadas ya sea por cuestiones estéticas o por estatus económico, en donde los diseñadores no toman en cuenta el efecto que tiene el tipo y tamaño de vidrio en climas cálidos. Particularmente en México, el consumo energético en edificaciones no residenciales está limitado por la Norma NOM-008-ENER-2001 y proporciona formatos para el cálculo del presupuesto energético, determinando las ganancias de calor del edificio de referencia (es el edificio en el que se basa la norma) y las del edificio proyectado (es el edificio que se pretende construir), así mismo, optimiza el diseño desde el punto de vista del comportamiento térmico de la envolvente de la edificación, obteniéndose como beneficios, entre otros, el ahorro de energía por la disminución de la capacidad de los equipos de enfriamiento y mejorar el confort térmico de los ocupantes [3].

Autores como Al-Tamimi *et al.* [4], analizaron el efecto que tiene la orientación y la variación de la razón de aspecto de área vidriada pared (RAVP) en el incremento de la temperatura dentro de una edificación. Estos autores obtuvieron como resultado que el tamaño, la ubicación y la orientación de áreas vidriadas en un edificio tendrán un efecto crítico en las ganancias de calor de un edificio debido a que las áreas vidriadas tienen la mayor ganancia de calor por unidad de área.

Algunas investigaciones determinaron la ganancia de calor solar y el consumo energético en edificaciones considerando parámetros como la RAVP, orientación, tipo de vidriado y variación de climas [1,5,6]. En estas investigaciones los autores concluyeron que para el caso de climas fríos un valor alto en el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC) ofrece grandes ventajas, lo que significa que la edificación obtiene una cantidad considerable de ganancia de calor solar a través de sus sistemas vidriados. Así mismo, el aumento en el tamaño del vidriado y la orientación afecta considerablemente el consumo energético de la edificación.

En climas cálidos, a mayores áreas vidriadas el consumo de energía aumenta debido al uso de sistemas de aire acondicionado por el incremento en las ganancias solares, sin embargo, con una elección adecuada del desempeño térmico del vidrio, las edificaciones pueden emplear grandes áreas vidriadas cumpliendo el consumo energético limitado por la norma.

En este artículo se presenta un estudio del efecto que tiene la razón de aspecto de área vidriada-pared (RAVP) y el tipo de vidriado en el consumo energético de edificaciones no residenciales utilizando cuatro RAVP 20%, 40%, 70% y 90%, así mismo, 2 tipos de vidriados, claro y reflectivo. Se emplearon para las simulaciones las 6 regiones climáticas de la República Mexicana establecidas por el INEGI.

Se determinaron las cargas térmicas de enfriamiento y calentamiento utilizando paquetes comerciales empleados por diversos autores para el cálculo del consumo energético en edificaciones [7,8], estos son, *DesignBuilder v3.4* [9] y *EnergyPlus v8.1* [10], con el objetivo de establecer el vidriado óptimo en cuanto a tipo y tamaño para cada región climática.

2. Antecedentes climáticos

En la Tabla 1, se muestran las ciudades seleccionadas para cada región climática de la República Mexicana. Los datos climatológicos fueron obtenidos del software *Meteonorm v7* [11], tomando un periodo del año 2000-2009 para temperatura y de 1986-2005 para datos de radiación.

Tabla 1 - Regiones climáticas y ciudades representativas.

Grupos de climas	Subgrupo	Ciudad
Cálido	Cálido Húmedo	Villahermosa
	Cálido Subhúmedo	Mérida
Seco	Seco	Monterrey
	Muy seco	Hermosillo
Templado	Templado Húmedo	Ciudad de México
	Templado Subhúmedo	Xalapa

En la Fig. 1, se muestran las temperaturas mínima, media y máxima promedio anual para cada región climática de la República Mexicana y se observa que Hermosillo es la ciudad con la temperatura máxima más alta, mientras que Monterrey tiene temperaturas extremas ya que cuenta con una de las temperaturas más altas en verano y la más baja en invierno.

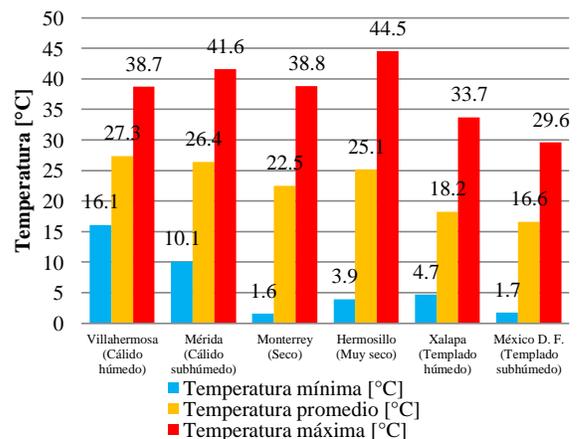


Figura 1 - Temperaturas mínima, media y máxima promedio anual.

La radiación solar incidente acumulada anual para cada ciudad se muestra en la Fig. 2. Es posible observar que para clima cálido, en el mes de abril, la ciudad de Mérida tuvo una

radiación solar incidente de 6.55 MWh/m²; para el clima seco, la ciudad de Hermosillo tuvo la mayor radiación solar incidente sobre la horizontal, aproximadamente, 7.8 MWh/m² en el mes de mayo, mientras que los climas templados son los que tuvieron la menor radiación solar incidente, tal es el caso de la ciudad de Xalapa con 5.1 MWh/m² en el mes de abril.

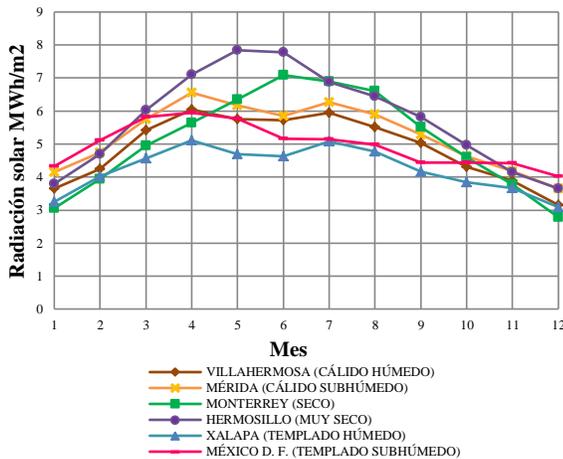


Figura 2 - Radiación solar incidente anual acumulada.

Así mismo, existen otras variables climáticas que aunadas a la radiación solar y a la temperatura determinan el tipo de clima en determinada región. Estas variables son: humedad relativa, índice de nubosidad y velocidad del viento, principalmente. En la Fig. 3, se pueden observar dichas variables climáticas de las ciudades seleccionadas para las simulaciones.

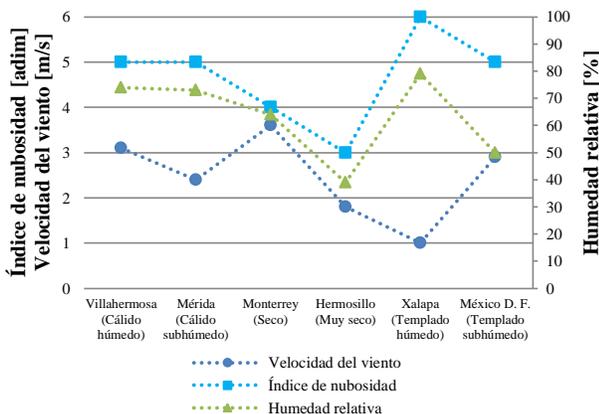


Figura 3 - Velocidad del viento, índice de nubosidad y humedad relativa.

3. Descripción del modelo típico de la edificación

La edificación no residencial considerada en este trabajo fue la utilizada para la realización de la NOM-008-ENER-2001. Se emplearon dos tipos de edificaciones no residenciales, de 3 pisos (para las ciudades de Villahermosa, Mérida, Monterrey, Hermosillo y Xalapa) y 5 pisos (para la ciudad de México D. F.). Los pisos son cuadrados de 669 m² y los vidriados son homogéneos en todas direcciones. En la Tabla 2, se muestra la descripción de los materiales de construcción de la envolvente del edificio y sus propiedades termofísicas.

Tabla 2 - Materiales de construcción, dimensiones y propiedades termofísicas.

Elemento del edificio	Material	Densidad [kg/m ³]	Calor específico [kJ/kg-K]	Conductividad térmica [W/m-K]
Pared	Yeso	800	1000	0.372
	Ladrillo	1600	800	0.81
	Mortero	1890	837	0.72
Techo	Yeso	800	1000	0.372
	Concreto	2300	840	1.740
	Impermeabilizante	1127	800	0.17
Piso nivel del suelo	Azulejo	2600	795	1.136
	Concreto	2300	840	1.740
Pisos superiores	Azulejo	2600	795	1.136
	Concreto	2300	840	1.740
	Yeso	800	1000	0.372
Ventana	Varios vidrios	-	-	-

Para el estudio se consideró vidrio claro y vidrio reflectivo de 6 mm de espesor, así mismo, cuatro RAVP 20%, 40%, 70% y 90%, con la finalidad de determinar la RAVP y el vidriado térmicamente más eficiente de acuerdo a cada región climática.

En la Tabla 3, se muestra la ficha técnica de los vidrios seleccionados para las simulaciones. Para el cálculo de propiedades ópticas y térmicas de los vidriados se empleó el software WINDOW 7.3 [12], en conjunto con el manual técnico de la empresa Vitro [13].

Tabla 3- Ficha técnica de los vidrios seleccionados.

Tipo de vidriado	Coeficientes de ganancia solar		
	SC	factor-U	SHGC
Claro	0.94	5.82	0.82
Reflectivo	0.386	5.79	0.336

El factor-U y el SHGC son índices de desempeño en estado permanente. El factor-U cuantifica el valor de aislamiento de un vidrio; esto indica la tasa de flujo de calor a través de un sistema vidriado. El factor-U es el coeficiente de transferencia de calor total en un sistema vidriado, en W/(m²-°C), lo cual incluye transferencia de calor por radiación, conducción y convección, para determinadas

condiciones ambientales. El SHGC representa la ganancia de calor solar a través de un sistema vidriado con respecto a la radiación solar incidente.

Aunque el SHGC puede ser determinado para cualquier ángulo de incidencia, la referencia utilizada comúnmente es la radiación solar incidente normal. El SHGC se refiere al desempeño total de un sistema vidriado y es un indicador de la ganancia solar bajo un amplio rango de condiciones. El SHGC se expresa como un número adimensional en un intervalo de 0 a 1.0. Un alto valor en el SHGC significa una ganancia de calor elevada, mientras que un valor bajo significa una ganancia de calor baja. El coeficiente de sombreado (SC) representa la razón de la ganancia de calor solar a través de un sistema vidriado con respecto a un vidrio claro de 3 mm en incidencia normal.

El SC define la capacidad de control solar de un sistema vidriado, es decir, proporciona la trasmittancia de energía solar a través de la ventana.

En la Tabla 4, se muestran las propiedades ópticas de los vidrios seleccionados. Donde T_{sol} es la transmitancia solar, T_{vis} es la transmitancia visible, R_{sol} es la reflectancia solar, R_{vis} es la reflectancia visible, ϵ es la emitancia, para vidrio claro ϵ_1 y ϵ_2 es 0.84 y para vidrio reflectivo ϵ_1 y ϵ_2 es 0.837; k es la conductividad térmica, para el vidrio claro es 1 W/m-K y para el vidrio reflectivo es 0.703 W/m-K. Los subíndices 1 y 2 se refieren al lado exterior e interior del vidrio, respectivamente.

Tabla 4 - Propiedades ópticas y térmicas de los vidrios seleccionados.

Tipo de vidrio	T_{sol}	R_{sol1}	R_{sol2}	T_{vis}	R_{vis1}	R_{vis2}
Claro	0.772	0.073	0.074	0.878	0.084	0.085
Reflectivo	0.202	0.363	0.148	0.256	0.534	0.322

3.1 Parámetros de simulación

En *DesignBuilder* se modifican los parámetros de simulación, es decir, se establecen las condiciones de operación de la edificación, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de simulación de la edificación no residencial.

Descripción	Valor
Número de pisos	Ciudad de México-5 Otras ciudades-3
Altura entre pisos	4 m
Área por piso	669 m ²
Relación de aspecto	1:1
Nivel de iluminación	16 W/m ²
Contactos	8 W/m ²
Densidad ocupacional	9 m ² por persona
Índice de ventilación	0.46 m ³ /min-m ²
Índice de infiltración	1 ACH
Albedo pared	0.25
Albedo techo	0.25

Horas de ocupación y operación	8:00-22:00 (Lunes-Viernes)
Set point de temperatura	25° C
RAVP	20%, 40%, 70%, 90%
Vidrio	Claro y reflectivo

4. Balance térmico en edificaciones

En términos generales, las condiciones térmicas de un edificio dependen de la magnitud de las pérdidas y ganancias de calor que está teniendo en un momento dado por conducción, convección y radiación. El edificio tenderá a calentarse cuando las ganancias de calor sean mayores que las pérdidas, y a enfriarse en la situación contraria. En cualquiera de los dos casos, se puede llegar fácilmente a la falta de confort térmico y en situaciones extremas, exigirán sistemas de climatización artificial (refrigeración y/o calefacción) para ser contrarrestadas [14]. En la Fig. 4, se muestran las pérdidas y ganancias de una edificación.

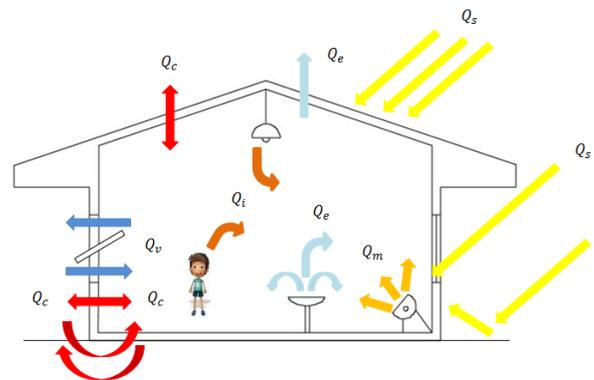


Figura 4 - Balance térmico de una edificación.

De acuerdo con la ecuación del balance térmico para una edificación, el equilibrio térmico ocurre cuando la suma de las pérdidas y ganancias de calor es igual a cero, llegando a un punto neutral que se expresa mediante la ec. (1).

$$Q_s + Q_i \pm Q_c \pm Q_v \pm Q_m - Q_e = 0 \quad (1)$$

4.1 Flujo de energía a través de una superficie vidriada

El flujo de energía a través de una superficie vidriada fluye vía:

- Transferencia de calor por convección y conducción, causada por una diferencia de temperaturas entre el aire interior y exterior.
- Transferencia de calor por radiación de onda larga (mayor de 2,500 nm) entre la superficie vidriada y sus alrededores y entre capas vidriadas.

- Radiación solar incidente de onda corta (menor de 2,500 nm) en la superficie vidriada, ya sea directamente del sol o reflejada del suelo u objetos adyacentes.

Con estas suposiciones, la ecuación básica para el flujo de energía Q en estado permanente a través de una superficie vidriada es:

$$Q = UA_g(t_{out} - t_{in}) + (SHGC)A_gG \quad (2)$$

5. Programas de simulación energética

Las simulaciones se realizaron en dos paquetes comerciales, *DesignBuilder v3.4* y *EnergyPlus v8.1*. En el software *DesignBuilder* se construyó la geometría y se introdujeron los datos climatológicos, éstos se importaron de un archivo de datos meteorológicos junto con los detalles del sitio en formato EPW (*Energy Plus Weather*), posteriormente se seleccionaron los materiales de construcción con sus respectivas propiedades y se establecieron los parámetros de simulación. La Fig. 5(a) y la Fig. 5(b) muestran la edificación no residencial de 5 y 3 pisos respectivamente, empleadas para las simulaciones.

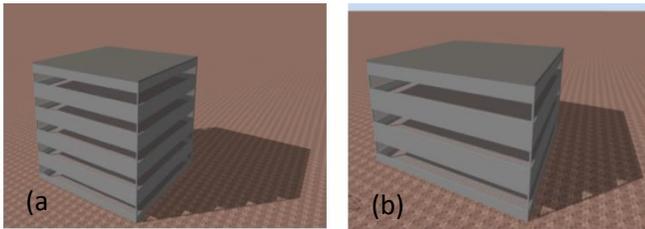


Figura 5 - (a) Edificio no residencial de cinco pisos para la ciudad de México D. F.; (b) Edificio no residencial de tres pisos para otras ciudades.

Por otra parte, en el software *EnergyPlus* se seleccionaron las variables de salida y se realizaron los cálculos de la edificación ya que es una colección de muchos módulos de programas que trabajan juntos para calcular la energía necesaria para calentar y enfriar un edificio utilizando una variedad de sistemas y fuentes de energía; el núcleo de la simulación es un modelo del edificio que se basa en los principios fundamentales de balance de calor. En la Fig. 6, se presenta un diagrama de flujo en *EnergyPlus* del proceso de simulación [15], a través de la interface *DesignBuilder*.

Calibración del programa

Para corroborar el buen uso del software *EnergyPlus* se realizaron una serie de simulaciones; se reprodujo una edificación no residencial con los mismos materiales de construcción empleados por la NOM-008-ENER-2001 y con los mismos parámetros de simulación empleados en el

presente trabajo, con una RAVP del 40% y vidrio claro de 6 mm.

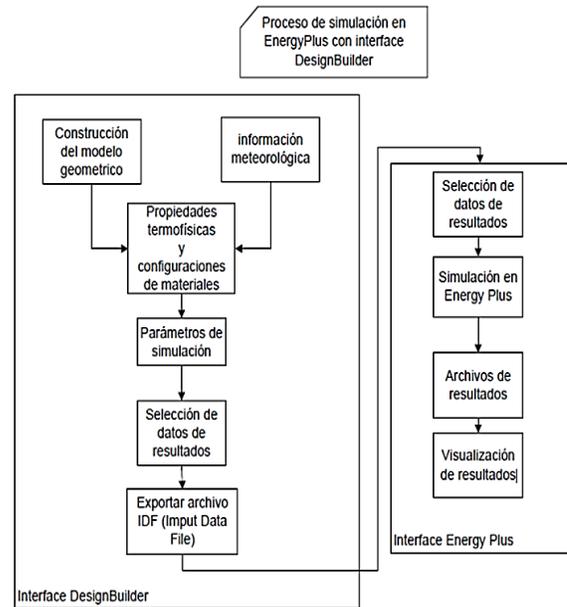


Figura 6 - Proceso de simulación en *EnergyPlus* con interface *DesignBuilder*.

De esta forma se obtuvieron las cargas de enfriamiento para la ciudad de México, Mérida y Monterrey. Las cargas de enfriamiento simuladas fueron comparadas con las cargas de enfriamiento reportadas en la literatura [16]. La Tabla 6, muestra la comparación entre los resultados simulados y los reportados para las tres ciudades de la República Mexicana.

Tabla 6 - Resumen del porcentaje de diferencia entre las cargas de enfriamiento simuladas y reportadas.

Edificio no residencial	Carga de enfriamiento simulada [kWh]	Carga de enfriamiento reportada [kWh]	Diferencia [%]
México D. F.	467,428.84	524,319.00	10.85
Mérida	479,749.46	475,037.00	0.99
Monterrey	397,785.27	398,594.00	0.20

6. Resultados

De acuerdo a los resultados de las simulaciones, el tipo de vidriado, la RAVP y el tipo de clima desempeñan un rol importante en el consumo energético de edificaciones no residenciales. La orientación no fue considerada debido a que la distribución del vidriado es homogénea.

En la Fig. 7, se muestran las cargas térmicas para el clima cálido y se observa que Mérida es la ciudad que más energía por enfriamiento requiere, tanto para vidrio claro como

reflectivo. Era de esperarse que el vidrio claro tuviese el peor desempeño térmico en comparación con el vidrio reflectivo, de acuerdo a las propiedades ópticas y térmicas mencionadas en la Tabla 4. Tomando como referencia el vidrio claro, el más empleado en edificaciones en México, el vidrio reflectivo disminuye aproximadamente un 10% las cargas de enfriamiento con RAVP del 90%; es importante mencionar que en comparación con las cargas de enfriamiento, las cargas térmicas son prácticamente despreciables en Villahermosa y Mérida y por lo general, es nulo el uso de calefacción en climas cálidos.

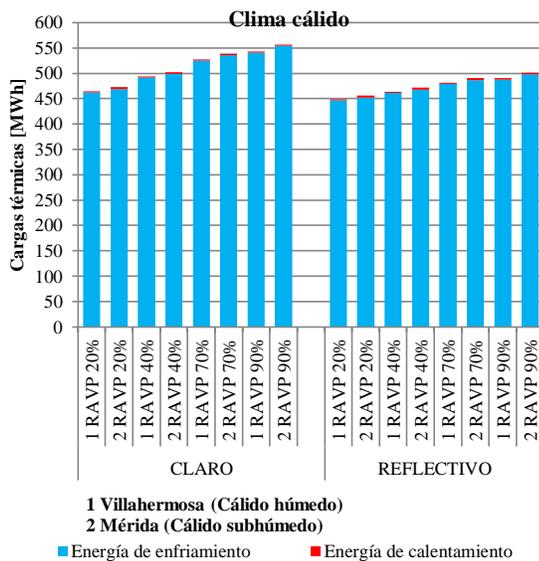


Figura 7 - Cargas térmicas para clima cálido.

Para el clima seco, el vidrio reflectivo sigue siendo la mejor opción comparado con el vidrio claro, ya que las cargas de enfriamiento se reducen con el incremento de RAVP, hasta a un 12%, pero las cargas térmicas incrementan hasta a un 15%. En la Fig. 8, se muestran los resultados de las simulaciones para la ciudad de Monterrey y Hermosillo.

Para climas templados, el empleo de vidrio reflectivo disminuye las cargas de enfriamiento hasta a un 35% en áreas vidriadas grandes y aumenta las cargas de calentamiento hasta a un 18%, como se muestra en la Fig. 9.

De forma general, los resultados muestran que el mayor consumo de energía por enfriamiento es para grandes RAVP, ya que aumentan las ganancias térmicas al interior de la edificación, tanto para vidrio claro como reflectivo, siendo mayor el consumo energético para el vidrio claro ya que cuenta con un valor alto en el SHGC. Por otra parte, para ambos vidriados, las cargas de calentamiento disminuyen cuando la RAVP incrementa, pero el vidrio claro es el que tiene menores cargas por calentamiento con respecto al vidrio reflectivo.

En la Tabla 7, se presenta el concentrado de valores de la energía de enfriamiento para vidrio claro y reflectivo.

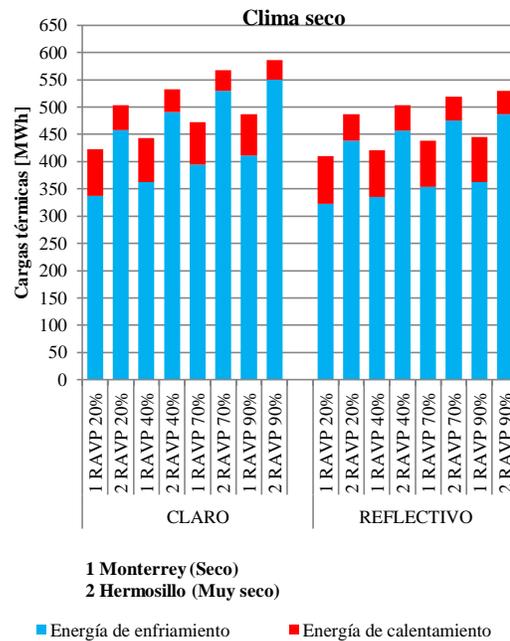


Figura 8 - Cargas térmicas para clima seco.

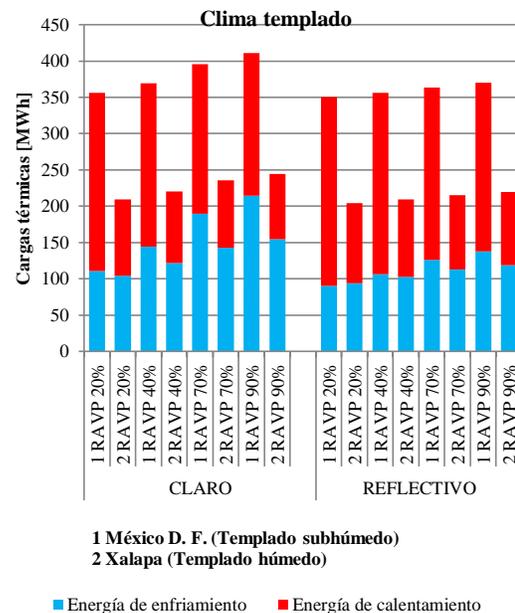


Figura 9 - Cargas térmicas para clima templado.

Tabla 7 - Energía de enfriamiento [MWh] para las 6 regiones climáticas de la República Mexicana.

Vidrio claro (energía de enfriamiento MWh)						
RAVP [%]	Villahermosa (Cálido húmedo)	Mérida (Cálido subhúmedo)	Monterrey (Seco)	Hermosillo (Muy seco)	México D. F. (Templado húmedo)	Xalapa (Templado subhúmedo)
20	462.24	469.13	337.55	458.08	110.67	104.20
40	491.29	498.92	362.50	491.06	144.51	121.48
70	525.35	535.93	394.37	529.90	189.65	143.10
90	540.53	554.10	410.65	549.71	214.35	154.41
Vidrio reflectivo (energía de enfriamiento MWh)						
RAVP [%]	Villahermosa (Cálido húmedo)	Mérida (Cálido subhúmedo)	Monterrey (Seco)	Hermosillo (Muy seco)	México D. F. (Templado húmedo)	Xalapa (Templado subhúmedo)
20	446.29	451.54	322.47	438.51	90.73	94.39
40	460.85	467.46	335.55	456.76	106.35	102.55
70	478.87	486.66	353.69	475.56	126.44	113.16
90	487.69	497.62	362.37	486.68	138.23	118.83

En la Tabla 8, se muestran los resultados de las cargas de calentamiento de las 6 regiones climáticas, para vidrio claro y reflectivo.

Es de observar que el consumo energético para las ciudades con climas cálidos y secos, para vidriados con RAVP de 40% con vidrio claro, puede igualarse a una ventana de RAVP de 90% siempre y cuando se utilice un vidrio reflejante (Fig. 7 y Fig. 8). En climas templados como la ciudad de México D. F. o Xalapa (Fig. 9), puede utilizarse el vidrio reflectivo para RAVP hasta de 70% ya que es conveniente tener la mayor área de vidriada para ahorrar energía por calefacción sin incrementar considerablemente las cargas por enfriamiento, que más o menos igualaría el consumo de energía de un vidrio claro para RAVP de 40%.

Tabla 8 - Energía de calentamiento [MWh] para las 6 regiones climáticas de la República Mexicana.

Vidrio claro (energía de calentamiento MWh)						
RAVP [%]	Villahermosa (Cálido húmedo)	Mérida (Cálido subhúmedo)	Monterrey (Seco)	Hermosillo (Muy seco)	México D. F. (Templado húmedo)	Xalapa (Templado subhúmedo)
20	2.59	3.94	85.22	45.38	245.66	105.22
40	2.32	3.47	80.98	41.65	224.95	99.27
70	2.08	3.04	77.76	37.96	206.27	92.45
90	2.00	2.83	75.82	36.50	196.91	89.73
Vidrio reflectivo (energía de calentamiento MWh)						
RAVP [%]	Villahermosa (Cálido húmedo)	Mérida (Cálido subhúmedo)	Monterrey (Seco)	Hermosillo (Muy seco)	México D. F. (Templado húmedo)	Xalapa (Templado subhúmedo)
20	2.83	4.33	87.50	48.47	259.48	110.08
40	2.68	4.07	85.67	46.28	249.60	106.89
70	2.52	3.81	84.55	43.81	237.03	102.39
90	2.46	3.67	82.97	42.75	232.03	101.07

7. Conclusión

En este trabajo se presentó un análisis térmico del efecto de la RAVP para dos tipos de vidriados en el consumo energético de edificaciones no residenciales, mediante programas de simulación energética, así mismo, las simulaciones se realizaron para 6 ciudades representativas de las regiones climáticas reportadas por el INEGI. De forma general, en climas cálidos, secos y templados los resultados mostraron que el consumo energético por enfriamiento aumenta cuando la RAVP se incrementa y por el contrario, las cargas de calentamiento disminuyen con el incremento de RAVP, para vidrio claro como reflectivo.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el vidrio reflectivo es el que disminuye las cargas en comparación con el vidrio claro. Cabe mencionar que el vidrio claro en comparación con el vidrio reflectivo y otros vidrios, es el que cuenta con el desempeño térmico más bajo, es decir, es un vidrio poco eficiente para emplearse en edificaciones no residenciales. Debido a que el vidrio claro tiene un alto valor del SHGC y del factor-U se generan grandes ganancias de calor y una elevada transferencia de calor. En el caso del vidrio reflectivo, las cargas de enfriamiento disminuyen considerablemente debido a que gran parte de la energía que incide sobre la superficie del vidrio es reflejada, por lo que es

recomendable en climas cálidos y secos. Si bien, el vidrio reflectivo no es eficiente en climas templados o fríos, los resultados muestran que las cargas térmicas totales, de enfriamiento y calentamiento son considerablemente menores en comparación con un vidrio claro.

Para cada ciudad seleccionada, el vidrio reflectivo fue el que menor energía total consumió, con una RAVP del 20%; sin embargo, hay que considerar que cuando el área vidriada es menor el paso de la luz natural disminuye, por lo tanto, las cargas de calefacción incrementarán el consumo de energía de la edificación. En la actualidad, las edificaciones modernas emplean grandes áreas vidriadas, lo cual, conlleva al análisis de varios tipos de vidriados con RAVP superiores al 40%.

Por supuesto, los resultados en el consumo energético pueden variar considerablemente debido principalmente a los materiales de construcción de la envolvente de la edificación. Por ejemplo, la reflectancia del techo de la edificación que se utilizó en este trabajo es de 0.25, lo que ocasiona una mayor ganancia de calor a través del techo que debido al vidriado, sin embargo, mientras la reflectancia en el techo vaya incrementando, el efecto del vidriado tendrá mayor importancia en el consumo energético al aumentar las ganancias térmicas.

Es importante el uso de programas de simulación energética debido a que se pueden realizar análisis del efecto en el consumo energético de varios tipos de vidriados y de esta forma realizar estudios más completos, ya que para cada ciudad las condiciones climáticas varían y la selección del vidriado para edificios no residenciales es totalmente diferente.

REFERENCIAS

- [1] J. W. Lee, H. Jung, J. Park, J. B. Lee y Y. Yoon. *Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements*, Renewable Energy **50** (2013) 522.
- [2] ASHRAE Handbook fundamentals (2009).
- [3] NOM-008-ENER-2001, NORMA OFICIAL MEXICANA. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales.
- [4] N. A. Al-Tamimi, S. F. Fadzil y A. Abdullah. *The effect of orientation and glazed area to the indoor air temperature in unventilated buildings in hot-humid climate*, 3rd International Conference on Built Environment in Developing Countries (2009).
- [5] Z. Yu, W. Zhang y T. Fang. *Impact of building orientation and window-wall ratio on the office building energy consumption*, Applied Mechanics and Materials **409-410** (2013) 606.
- [6] E. A. Omar y F. Al-Ragom. *On the effect of glazing and code compliance*, Applied Energy **71** (2002), 75.
- [7] C. Li, J. Tan, T.-T. Chow y Z. Qiu, *Experimental and theoretical study on the effect of window films on building energy consumption*, Energy and Buildings **102** (2015) 129.
- [8] C. E. Ochoa, M. B. C. Aries, E. J. van Loenen y J. L. M. Hensen. *Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort*, Applied Energy **95** (2012) 238.
- [9] DesignBuilder v3.4 sitio web, www.designbuilder.es
- [10] EnergyPlus v8.1 sitio web, apps1.eere.energy.gov
- [11] Meteonorm v7 sitio web, www.meteonorm.com
- [12] Window v7.3 sitio web, windows.lbl.gov
- [13] Vitro sitio web, www.vitro.com
- [14] M. Santamouris, D. Asimakopoulos. *Passive cooling of buildings* (2nd ed.), London: James&James (1997).
- [15] M. A. Chagolla. *Estudio térmico de viviendas para diferentes climas de la República Mexicana*, México: CENIDET-DGEST-SEP, Tesis de maestría (2013).
- [16] M. A. Halverson, D. J. Stucky, M. Friedrich, P. Godoy-Kain, J. M. Keller y S. Somasundaram. *Energy Effective and Cost-Effective Building Energy Conservation Measures for Mexico*, Pacific Northwest Laboratory Richland (1994).