



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Confort térmico y ahorro de energía en habitaciones de tipo hotel con
ventanas fotovoltaicas

presentada por

Ing. Samantha Moya Mondragón

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

Director de tesis

Dr. José Jasson Flores Prieto

Cuernavaca, Morelos, México. Enero de 2020.



“2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria”

Cuernavaca, Morelos **18/diciembre/2020**

OFICIO No. SAC/ 296/2020

Asunto: Autorización de impresión de tesis

SAMANTHA MOYA MONDRAGÓN
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTE

Por este conducto tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Confort térmico y ahorro de energía en habitaciones de tipo hotel con ventanas fotovoltaicas”**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

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

ATENTAMENTE

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

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

C.c.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Expediente
CMAZ/CHG



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Mecánica

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

Cuernavaca, Mor., 09/diciembre/2020

OFICIO No. DIM/187/2020

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

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la Ing. Samantha Moya Mondragón con número de control M19CE007, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado "Confort térmico y ahorro de energía en habitaciones de tipo hotel con ventanas fotovoltaicas" y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.


Dr. José Fassón Flores Prieto
Director de tesis


Dra. Sara Lilia Moya Acosta
Revisor 1


Dr. Efraín Simá Moo
Revisor 2


Dra. Alicia Martínez Rebollar
Revisor 3

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

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490Cuernavaca, Morelos.
Tel. (01) 777 3 62 77 70, ext. 1421, e-mail: dim@cenidet.edu.mx
www.tecnm.mx | www.cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico





Agradecimientos

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

A mí Madre, ***Rosa Isela Mondragón Concha*** por apoyarme en cada momento de mi vida, por confiar en mí y nunca dejarme caer en mis momentos más difíciles, por siempre darme la fortaleza que necesitaba para seguir adelante e incentivar me a perseguir mis sueños.

A mí Padre, ***Oscar Moya Gallardo*** por darme el carácter suficiente para afrontar mis adversidades, por siempre aconsejarme de lo que debo y no debo hacer, por abrirme los ojos y hacerme reflexionar en las decisiones de mi vida, por siempre apoyarme en todo.

A mí Hermana, ***Jessica Marlen Moya Mondragón*** por siempre acompañarme en todas mis aventuras y experiencias de vida, por regañarme y ayudarme a corregir mi camino cuando no sé qué hacer, por ser mi consejera y compañera de vida y que nunca me ha dejado caer.

Al director de tesis, ***Dr. José Jassón Flores Prieto*** por brindarme la confianza y paciencia necesaria para culminar y alcanzar mi meta, por brindarme siempre el apoyo necesario y consejos para mejorar cada vez más no solo para la realización del presente trabajo, sino que también para mejorar como persona.

Al amor de mi vida, ***Mauricio Almonte Lemus*** por siempre apoyarme y ayudarme a seguir a delante, por escucharme cuando necesitaba hablar, por los consejos y aportaciones que me daban en cada decisión tomada para la vida y proyectos.

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

A mis amigos y compañeros, ***Jessica G., Jessica A., Luis, Francisco, Sandra, Wendy, Ana*** y ***Ariel*** por brindarme su amistad y su apoyo siempre.



Dedicatorias

Dedico este trabajo con un gran amor y cariño a las personas más importantes en mi vida a Rosa Isela Mondragón
Concha, Oscar Moya Gallardo, Jessica Marlen Moya Mondragón y Mauricio Almonte Lemus.

¡LOS AMO!





Índice

Lista de figuras	V
Lista de tablas	VII
Nomenclatura.....	VIII
Resumen.....	X
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	2
1.2 Estado del arte	4
1.2.1 <i>Evaluación de ventanas fotovoltaicas</i>	4
1.2.2 <i>Evaluación de módulos fotovoltaicos en climas tropicales y su normativa..</i> 8	
1.2.3 <i>Evaluación térmica de edificaciones</i>	10
1.2.4 <i>Evaluación del confort térmico</i>	14
1.2.5 <i>Controladores solares</i>	19
1.2.6 <i>Conclusiones de la revisión bibliográfica</i>	20
1.3 Planteamiento del problema	22
1.4 Objetivos.....	22
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	22
1.4.2 <i>Objetivos particulares</i>	22
1.4.2 <i>Alcances</i>	23
1.5 Escritura de tesis.....	23
Capítulo 2. Localización y muestra	24
2.1 Muestra	25
2.1.1 <i>Edificación</i>	25
2.1.2 <i>Características de la ventana</i>	28
2.2 Localización.....	31
2.2.1 <i>Selección del lugar de estudio</i>	31



2.1.1	<i>Localización de la ventana en la edificación</i>	35
Capítulo 3. Fundamentos teóricos metodológicos		37
3.1	Fundamentos teóricos.....	40
3.1.1	<i>Mecanismos de transferencia de calor</i>	40
3.2	Modelo térmico de la edificación y la ventana fotovoltaica.....	42
3.3	Modelo fotovoltaico	45
3.4	Modelo de confort térmico	49
3.5	Modelo de grados día	51
3.6	Modelo ambiental.....	52
Capítulo 4. Desarrollo y pruebas de la plataforma de simulación		53
4.1	Plan de experimentos numéricos.....	54
4.2	Construcción del simulador	56
4.2.1	<i>Diagrama de flujo general</i>	56
4.2.2	<i>Configuración de la plataforma TRNSYS 17[®]</i>	60
4.3	Validación del Simulador	63
4.3.1	<i>Descripción caso BESTest 900FF y BESTest 900</i>	63
4.3.2	<i>Descripción caso Martínez (2019)</i>	68
4.3.3	<i>Comparativo con BESTest 900</i>	70
4.3.4	<i>Comparativo con BESTest 900FF</i>	71
4.3.5	<i>Comparativo con Martínez (2019)</i>	73
4.3.6	<i>Conclusiones de comparativos</i>	76
Capítulo 5. Resultados		77
5.1	Evaluación de VFV en habitación con VN	78
5.1.1	<i>Evaluación térmica en grados día (GD)</i>	78
5.1.2	<i>Evaluación confort térmico</i>	81
5.2	Evaluación de VFV en habitación con Ac	84
5.2.1	<i>Evaluación térmica</i>	84
5.2.2	<i>Evaluación del confort térmico</i>	87
5.2.3	<i>Evaluación fotovoltaica</i>	88



5.2.4	<i>Evaluación del impacto ambiental</i>	91
5.3	Análisis de resultados	93
Capítulo 6.	Conclusiones y recomendaciones	97
6.1	Conclusiones.....	98
6.2	Recomendaciones para trabajos futuros	101
Referencias	102



Lista de figuras

Figura 2.1 Representación del modelo de estudio, a) Presentación del modelo gráfico de la edificación de estudio, b) Planos de la habitación de hotel “raintree vacation club, club regina”.....	26
Figura 2.2 Diagrama de flujo del proceso de selección de la VFV.....	28
Figura 2.3 Diagrama de flujo de selección del lugar de estudio.....	31
Figura 2.4 Temperatura ambiente promedio mensual.....	34
Figura 2.5 Posición y altura del sol a lo largo de un día.....	36
Figura 3.1 Algoritmo general para el desarrollo del trabajo.....	39
Figura 3.2 Comportamiento térmico de una pared.....	43
Figura 3.3 Transferencia de calor y masa en edificaciones.....	44
Figura 3.4 Modelo físico del comportamiento y la descomposición de la ventana fotovoltaica.....	45
Figura 3.5 Componentes de la ventana fotovoltaica.....	46
Figura 3.6 Relación de área de ventana-pared.....	48
Figura 3.7 Relación entre el PMV y el PPD con el método de Fanger.....	50
Figura 3.8 Grados Día de enfriamiento y calentamiento.....	51
Figura 4.1 Plan de experimento numéricos.....	55
Figura 4.2 Diagrama de flujo del simulador.....	58
Figura 4.3 Proceso de construcción y simulación de la plataforma.....	59
Figura 4.4 Sección climatológica del programa de simulación.....	60
Figura 4.5 Sección de la simulación de la edificación con la integración del sistema fotovoltaico..	61
Figura 4.6 Sección de la visualización e impresión de los resultados.....	62
Figura 4.7 Configuración de la plataforma de simulación en TRNSYS 17®.....	62
Figura 4.8 Modelo gráfico de la edificación propuesta por BESTest 900FF y BESTest 900.....	64
Figura 4.9 Modelos gráfico de la edificación propuesta por BESTest.....	65
Figura 4.10 Modelos gráfico de la edificación propuesta por Martínez, 2019.....	68
Figura 4.11 Cargas térmicas de la edificación con ventana simple de doble cristal.....	70
Figura 4.12 Evolución de las temperaturas internas en la edificación.....	72
Figura 4.13 Evolución de las Qc en la edificación.....	74
Figura 4.14 Evolución de la Qpv en de la VFV.....	75



Figura 4.15 Evolución de las temperaturas internas.....	75
Figura 5.1 Evolución de los GD mensual.	79
Figura 5.2 Comportamiento de los GD en RA.....	80
Figura 5.3 Evolución del PMV y PPD con una RA 7-95% para VN.....	83
Figura 5.4 Evolución del confort térmico promedio anual.	84
Figura 5.5 Evolución de las cargas de enfriamiento con una RA 7-95%.....	85
Figura 5.6 Cargas de enfriamiento anuales.	87
Figura 5.7 Evaluación del PMV y PPD en relación del área de ventana.	88
Figura 5.8 Energía eléctrica mensual generada por las VFV.	89
Figura 5.9 Qpv anual para cada RA.	90
Figura 5.10 Comparativo de la reducción de CO2e.	92
Figura 5.11 Comparación del confort térmico para Ac y VN en RA del 7-95%.	94
Figura 5.12 Demanda y generación de energía eléctrica para cada RA.	95
Figura 5.13 Ahorro energético generado por las VFV en cada RA.	96



Lista de tablas

Tabla 2.1 Resumen de los materiales utilizados en los muros.	27
Tabla 2.2 Resumen de los materiales utilizados en el techo.	27
Tabla 2.3 Resumen de los materiales utilizados en el suelo.	27
Tabla 2.4 Presentación de las propiedades térmicas y ópticas de la VFV seleccionada.	29
Tabla 2.5 Presentación de las propiedades eléctricas de la VFV.	30
Tabla 2.6 Consumo energético total por sector [Petajuole].	32
Tabla 2.7 Principales consumidores energéticos en el sector residencial.	32
Tabla 2.8 Principales centros turísticos.	33
Tabla 4.1 Resumen del lugar y del clima.	65
Tabla 4.2 Resumen de materiales y sus propiedades termo-físicas.	66
Tabla 4.3 Propiedades ópticas de la ventana utilizada en BESTest.	67
Tabla 4.4 Propiedades ópticas de la ventana utilizada en Martínez, 2019.	68
Tabla 4.5 Propiedades ópticas de la ventana utilizada en BESTest 900.	69
Tabla 4.6 Tabla comparativa de las temperaturas.	70
Tabla 4.7 Tabla comparativa del ejercicio de BESTest 900FF.	71
Tabla 4.8 Tabla comparativa del ejercicio de BESTest 900FF y TRNSYS®.	71
Tabla 4.9 Tabla comparativa del ejercicio de Martínez (2019) y TRNSYS®.	73
Tabla 5.1 GD anuales para cada RA.	80
Tabla 5.2 Grados día anual.	83
Tabla 5.3 Cargas de enfriamiento anuales con RA 0-95%.	86
Tabla 5.4 Comparativo del PMV y PPD para Ac.	87
Tabla 5.5 Energía eléctrica promedio anual para cada RA.	90
Tabla 5.6 Comparación de las emisiones de CO _{2e} para cada tipo de ventana.	91
Tabla 5.7 Comparativo del confort térmico mensual para VN y Ac.	93
Tabla 5.8 Comparación de la demanda energética de las Q _c y Q _{pv}	95



Nomenclatura

<i>Simbología</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
A	Área	(m^2)
CO_{2e}	Emisiones de dióxido de carbono equivalentes a la atmósfera.	$(TonCO_{2e})$
G	Radiación incidente sobre la superficie.	(W/m^2)
GD	Grados día.	$(^{\circ}C-día)$
$T_{eq,i}$	Temperatura interior equivalente.	$(^{\circ}C)$
T_a	Temperatura ambiente.	$(^{\circ}C)$
T_{set}	Temperatura set point.	$(^{\circ}C)$
T_{min} y T_{max}	Temperatura mínima y máxima.	$(^{\circ}C)$
Q_c	Cargas térmicas de enfriamiento.	(kJ/h)
Q_{pv}	Cargas fotovoltaicas.	$(kJ/h \text{ ó } kWh)$
$\dot{Q}_{surf,i}$	Ganancia convectiva de las superficies.	(kJ/h)
$\dot{Q}_{inf,i}$	Ganancia por infiltración desde el flujo de aire desde el exterior.	(kJ/h)
$\dot{Q}_{vent,i}$	Ganancia por ventilación.	(kJ/h)
$\dot{Q}_{g,c,i}$	Ganancia de convección interna.	(kJ/h)
$\dot{Q}_{cplg,i}$	Ganancia del flujo del aire (convectivo) desde el nodo de aire.	(kJ/h)

Simbología Griega

α	Absortancia de la superficie del material.
τ	Transmitancia.
ρ	Reflectancia de la superficie.
ε	Emisividad.

Acrónimos



<i>Ac</i>	Aire acondicionado.
<i>a-Si</i>	Silicio amorfo.
<i>ASHRAE</i>	Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado.
<i>BESTest</i>	Prueba de simulación de Energía de Edificios.
<i>CdTe</i>	Telurio de cadmio.
<i>CRE</i>	Comisión Reguladora de Energía.
<i>ISO</i>	Organización Internacional para la Estandarización.
<i>NOM</i>	Normas Oficiales Mexicanas.
<i>SNV</i>	Sin ventanas fotovoltaicas.
<i>SENER</i>	Secretaría de Energía.
<i>PMV</i>	Voto medio predicho.
<i>PPD</i>	Porcentaje de personas insatisfechas.
<i>RA</i>	Relación de área de ventana.
<i>VFV</i>	Ventanas fotovoltaicas.
<i>VN</i>	Ventilación natural.
<i>VR</i>	Ventana de referencia.



Resumen

El estudio del confort térmico y ahorro de energía en habitaciones tipo hotel con ventanas fotovoltaicas presenta el desempeño termo-eléctrico de ventanas fotovoltaicas integradas a una habitación de $60 m^3$, en un clima cálido subhúmedo, en la Riviera Maya, Quintana Roo, México. Las ventanas fotovoltaicas que se han empleado en el estudio son telurio de cadmio, silicio amorfo y la ventana de referencia (BESTest 900FF) empleando una relación de área de 7-95% ($1-14 m^2$), orientada al sur. El estudio ha considerado la construcción de una plataforma de simulación basada en los modelos de balances de energía de transferencia de Mitalas y Arseneaul (1999), en el modelo de confort de Fanger de acuerdo con los estándares ASHRAE 55-2017 e ISO 7730 y por último el modelo ambiental establecida ~~de~~ por la Comisión Reguladora de Energía. La simulación se ha validado comparando las cargas de enfriamiento y calentamiento las simulaciones y los datos experimentales reportados por BESTest 900 con un error de 0.22 y 1.15% respectivamente, para el BESTest 900FF con de 8.4% y Martínez (2019) de 0.152% para cargas térmicas y 0.4999% para la energía fotovoltaica. Los resultados del estudio térmico con aire acondicionado reportan que las ventanas fotovoltaicas de silicio amorfo y telurio de cadmio reducen las cargas térmicas hasta de 24.17 y 25.04 $kWh-m^2$ promedio anual ~~para~~ en la habitación tipo hotel. Los grados día se han reducido, con el uso de ventanas fotovoltaicas, hasta $23.62^{\circ}C$ para silicio amorfo y $28.17^{\circ}C$ para telurio de cadmio. La demanda energética del aire acondicionado de la edificación se satisface el 53% con silicio amorfo y 65% con telurio de cadmio. El confort térmico ha mostrado diferencias porcentuales entre el Voto Medio Predicho y Porcentaje de Personas Insatisfechas promedio anual para aire acondicionado y ventilación natural para ~~en~~ cada ventana es de 60% y 68% para silicio amorfo, 60% y 67% para telurio de cadmio, 59% y 66% para la ventana de referencia. El uso de ventanas fotovoltaicas reduce las toneladas de dióxido de carbono equivalentes en un 80 y 98% para silicio amorfo y telurio de cadmio respectivamente. El uso de sistemas fotovoltaicos integrados a edificaciones genera ahorros energéticos, térmicos, de confort térmico y ambientales considerando sistemas de climatización, sin embargo, en ventilación natura el comportamiento térmico y de confort son afectados en gran medida por el encapsulamiento del calor, teniendo mayores cargas y por ende mayores sensaciones de calor.



Capítulo 1. Introducción

Este apartado presenta a detalle la motivación, el estado del arte, la problemática, los objetivos y los alcances del presente trabajo.



1.1 Motivación

La fuerte dependencia energética es mayormente obtenida por los combustibles fósiles en un 41% (Tian *et al.*, 2019). Hoy en día, alrededor del 22% del consumo energético se atribuye a las edificaciones, enfocadas principalmente en los sistemas de climatización en un 47% (Li *et al.*, 2013; Tian *et al.*, 2019). Para afrontar este desafío la implementación de nuevas tecnologías que sean amigables con el medio ambiente es una opción. Una de estas tecnologías es la fotovoltaica, y entre estas se encuentran las ventanas fotovoltaicas. Las ventanas fotovoltaicas cuentan con películas delgadas constituidas de silicio cristalino (c-Si), silicio amorfo (a-Si) y telurio de cadmio (CdTe). A escala mundial estima que, la producción de electricidad con ventanas fotovoltaicas (VFV) de silicio es de 132-143 kWh/m^2 -año y de telurio de cadmio 119.6 kWh/m^2 -año (Martínez., 2018; Sankar *et al.*, 2017). En general, el estudio de sistemas fotovoltaicos se ha realizado con diversos programas. Ha *et al.* (2015) simularon con TRNSYS® el rendimiento de un edificio residencial con un sistema de módulos fotovoltaicos integrados, donde también se adicionaron otras tecnologías pasivas. Sin embargo, hoy en día los programas de simulación de ventanas fotovoltaicas integradas a edificaciones aún son limitados. De manera general, se han observado que las ventanas fotovoltaicas son una alternativa para la generación de energía eléctrica y reducción de cargas térmicas. Chae *et al.* (2014) estudiaron los efectos eléctricos y ópticos de una ventana fotovoltaica integrada con diferentes tecnologías fotovoltaicas. Polo *et al.* (2013) propusieron una metodología de prueba para estudiar aspectos relacionados con la comodidad humana, en términos de la tasa metabólica, aceptabilidad y la temperatura operativa, con sistemas fotovoltaicos integrados (SFI) semitransparentes de silicio amorfo. Cristina *et al.* (2013) y más recientemente, Tian *et al.* (2019) reportan que con el uso de sistemas fotovoltaicos semitransparentes logra reducir el calentamiento excesivo de las edificaciones, las cargas térmicas y la acústica; a la vez, se logra mejorar el confort térmico de los ocupantes en términos de la aceptabilidad y de los porcentajes de insatisfacción de las personas. Hasta el momento, no se ha encontrado estudios de cargas térmicas en habitaciones tipo hotel con ventanas fotovoltaicas. En general, los estudios térmicos de ventanas fotovoltaicas se enfocan en oficinas y en espacios cerrados que cubren requerimientos térmicos en intervalos fijos de temperatura (Chae *et al.*, 2014; Tian *et al.*, 2019). Por su parte, los estudios de ventanas



fotovoltaicas en espacios cerrados se enfocan en el desempeño de aspectos termo-eléctricos y más recientemente Tian *et al.* (2019) reporta el efecto en el confort térmico al utilizar las VFV en referencia a una ventana convencional en un espacio cerrado de $3 \times 3 \times 3 \text{ m}$. El efecto de las ventanas fotovoltaicas en habitaciones de tipo hotel en climas cálido subhúmedo no han sido estudiados. En este trabajo se realiza un estudio en términos de las cargas térmicas, producción de electricidad, confort térmico y emisiones de dióxido de carbono para conocer el desempeño energético y térmico de ventanas fotovoltaicas en la Riviera Maya, Quintana Roo, México.



1.2 Estado del arte

La revisión bibliográfica se divide en cuatro partes: evaluación de ventanas fotovoltaicas (VFV), evaluación de módulos fotovoltaicos en climas tropicales y su normativa, evaluación térmica de edificaciones y evaluación del confort térmico.

1.2.1 *Evaluación de ventanas fotovoltaicas*

El estudio presentado por Wei *et al.*, (2010) muestra el rendimiento térmico de una oficina y la generación de energía de un sistema de ventanas fotovoltaicas de silicio amorfo (a-Si) de doble y simple acristalamiento en Hefei, región del este de China. El estudio se realizó mediante simulaciones numéricas de una cavidad con dinámica de fluidos computacionales y un estudio experimental de una oficina. Obteniendo ganancias de calor para las ventanas de simple y doble acristalamiento del 45.8 y 53.5% respectivamente en el estudio experimental, mediante la simulación un 41.0 y 49.3% respectivamente. Mostrando así que las ganancias de calor interior de la caja y las cargas de aire acondicionado son reducidas considerablemente por las ventanas de doble acristalamiento.

El estudio presentado por Lin *et al.*, (2012) muestra el rendimiento energético general de una ventana fotovoltaica de un solo vidrio semitransparente para una oficina en Hong Kong. La metodología permite realizar los estudios del comportamiento térmico y de potencia de la ventana. Las soluciones numéricas la desarrollaron utilizando un método explícito de diferencias finitas con la ayuda del programa de computadora Visual C ++. En la ventana fotovoltaica la proporción del área de la celda solar es del 80.0%, y se puede reducir alrededor del 65.0% de la ganancia total de calor. La prioridad de orientación para el beneficio general de electricidad es sur-este, sur, este, suroeste y oeste. En comparación con el vidrio transparente, alrededor del 65.0% de la ganancia de calor total se redujo mediante el uso de una ventana fotovoltaica durante todo un año. Los beneficios de electricidad anuales totales para los sistemas refrigerados por agua y refrigerados por aire fueron de aproximadamente 900.0 kWh y 1300.0 kWh correspondientemente. La investigación demostró que el



rendimiento energético depende de las propiedades térmicas, eléctricas y visuales de las ventanas fotovoltaicas.

El estudio reportado por Chae *et al.*, (2014) presenta los efectos eléctricos y ópticos de una VFV integrada con diferentes celdas solares semitransparentes. La evaluación la llevaron a cabo en un edificio comercial, con seis condiciones climáticas y tres celdas solares de silicio amorfo tomando sus espectros de longitud de onda frontal y posterior. La simulación energética del edificio la llevaron a cabo de forma anual. El consumo total de energía del edificio es variable dependiendo las características termo-ópticas de la ventana, ahorrando el 34.0% de energía de refrigeración y el 66.0% en energía de calefacción. La investigación mostró que las características ópticas espectrales de la ventana definen el rendimiento energético del edificio, y para maximizar su desempeño se debe considerar el espectro solar.

La comparación de diferentes sistemas fotovoltaicos integrados a una edificación dado por Debbarma *et al.*, (2016) muestra que los edificios fotovoltaicos integrados [BIPV por sus siglas en inglés] dependen principalmente de la irradiancia y la temperatura del módulo, tienen una vida útil de 20 a 25 años. Los edificios integrados fotovoltaico-térmico [BIPVT por sus siglas en inglés] generalmente convierte del 6 al 18% de la energía solar incidente en energía eléctrica y la energía solar restante se captura para ser utilizada como calor útil; mostrando un gran potencial para la integración en edificios de energía cero. Ambos sistemas muestran ser eficientes como aislantes térmicos, debido al control de temperaturas en las edificaciones, reduciendo significativamente las cargas de enfriamiento anual y mejorando el confort térmico en las edificaciones. El rendimiento de estos sistemas varía según el diseño y las condiciones climáticas. El sistema BIPV con orientación Norte y Sur genera más energía que el sistema Este y Oeste.

El estudio presentado por Sankar *et al.*, (2017) muestra los potenciales energéticos netos de cinco ventanas fotovoltaicas en India. El estudio se realizó mediante simulaciones en EnergyPlus y Window 7.3. Las muestras se constituyen de telurio de cadmio (CdTe) con diferentes transmitancias espectrales. Los resultados fueron comparados con datos experimentales del código de construcción de conservación de energía (ECBC). Los sistemas



fotovoltaicos entregaron $119.6 \text{ kWh/m}^2\text{-año}$, ahorrando un 60.4% en el consumo neto de energía. La investigación mostró que el sistema de ventanas basado en tecnología fotovoltaica tiene un gran potencial en el ahorro del consumo de energía eléctrica.

La evaluación presentada por Alarcón *et al.*, (2018) presenta el desempeño de ventanas fotovoltaicas en un edificio de oficinas en Santiago de Chile. La evaluación consideró las horas laborales, el uso de los equipos de oficinas y las condiciones climatológicas de un año. Las variables meteorológicas consideradas para el estudio es la radiación solar global y difusa, el porcentaje de cobertura de nubes, la temperatura de bulbo seco, la humedad relativa, la velocidad y la dirección del viento. El desempeño térmico lo estudiaron con Desing Builder y Energy Plus, empleando la base de datos epw (Energy Plus weather files). El cálculo de generación fotovoltaica se realizó con el PVsyst, que integra el aporte de la demanda horaria, considerando la fachada más soleada. Para la optimización energética de la edificación se simuló el rendimiento y la generación fotovoltaica con distintas propiedades constructivas, disposición y eficiencia de las ventanas. El desempeño eléctrico de las ventanas fotovoltaicas (VFV) entregó hasta un 40.0% del consumo total del edificio. Con el uso de ventanas fotovoltaicas se pueden reducir el consumo energético en edificaciones y lograr edificios de cero-energías.

El estudio de Martínez, (2018) del desempeño térmico y eléctrico de tres tipos de ventanas fotovoltaicas integradas a un edificio estándar de 129.6 m^3 con orientación al sur, y evaluadas en tres tipos de climas cálidos. La evaluación se realizó con TRNSYS 17, contemplando las características ópticas de vidriado, las propiedades termo-físicas de la edificación y las condiciones meteorológicas, en un periodo de simulación de 8760 horas. El desempeño térmico de las ventanas fotovoltaicas reporta coeficientes de ganancias de calor de 0.20, 0.14 y 0.15 kJ para VF1, 0.29 kJ para VF2 y 0.64, 0.64 y 0.65 kJ para VF3. La ventana con mejor desempeño eléctrico fue la VF2, en Veracruz y Acapulco, con 132.0 y 143.0 kWh/m^2 anuales respectivamente. La reducción de cero energías depende del área de captación de las ventanas fotovoltaicas, siendo las mejores áreas de 4.2, 1.9 y 5.7 m^2 . El desempeño eléctrico de la ventana es afectado por la orientación, las propiedades ópticas y las térmicas, así como



también por los materiales de construcción de la edificación y los datos meteorológicos del lugar de estudio.

El modelo de ventanas fotovoltaicas desarrollado por Yanyi *et al.*, (2018) se basa en los componentes del telurio de cadmio (CdTe) semitransparente en un cuarto de oficina en China. La simulación se llevó a cabo en el programa de simulación EnergyPlus y Window 7.6, se simularon cinco diferentes condiciones climáticas. Se encontraron reducciones de 2.2%, 1.6%, 7.0% y 8.2% para Harbin, Shanghai, Guangzhou y Kunming, respectivamente, con una relación ventana pared menor al 30%. El mayor ahorro de energía existe cuando se cubre el 80% del área de la ventana con acristalamiento fotovoltaico para un 75% en relación ventana-pared, ya que se pueden lograr reducciones en el consumo neto de energía del 71.5%, 67.9%, 50.8%, 36.9% y 72.0% para Harbin, Beijing. Este sistema puede generar ahorros energéticos siempre y cuando, el tamaño de la ventana en relación ventana-pared sea del 30% o mayor. El incremento del consumo de energía en iluminación bajo este sistema es debido a la baja transmitancia del acristalamiento, generando ahorros de energía en calefacción en invierno.

El estudio presentado por Jinqing *et al.*, (2019) muestra el rendimiento energético general de una VFV basada en silicio cristalino (c-Si). Realizaron una investigación experimental para la obtención de la potencia, el rendimiento térmico y la iluminación natural. La ventana fotovoltaica cuenta con un área de 3 m². La eficiencia de conversión de energía diaria del área activa de la celda solar fue aproximadamente 15% en días soleados, pero en días nublados fue del 12%. Sin embargo, la ganancia de calor fue de 0.25. El consumo de energía eléctrica artificial fue de 431 Wh/día, mientras que con el sistema fotovoltaico de 1940 Wh/día, esto indica que la generación neta de energía fotovoltaica fue de 1509 Wh/día. Estos sistemas muestran ser buenos generadores de energía en las edificaciones, pero también tienen un gran impacto en el consumo de energía en los sistemas de aire acondicionado, ya que aumentan las cargas de enfriamiento en verano y reduce las cargas de calefacción en invierno.



Las ventanas fotovoltaicas han permitido lograr climatizar edificaciones cero energías (Alarcón *et al.*, 2018). En estudios previos, una figura de mérito es la energía fotovoltaica producida en el año, y se ha observado que depende de la ubicación, las propiedades térmicas, eléctricas y visuales, sus materiales de construcción y el lugar de estudio (Sankar *et al.*, 2017; Lin *et al.*, 2012 & Martínez, 2018). Las características ópticas espectrales de la ventana fotovoltaica también definen el rendimiento energético, y para maximizar su desempeño se debe considerar el espectro solar (Chae *et al.*, 2014). Las ventanas de doble acristalamiento permiten reducir considerablemente las cargas térmicas y por consiguiente las cargas del aire acondicionado (Wei He *et al.*, 2010).

1.2.2 Evaluación de módulos fotovoltaicos en climas tropicales y su normativa

La norma oficial mexicana NOM-008-ENER-2001 normaliza la eficiencia energética de las edificaciones no residenciales, encaminada a mejorar el diseño térmico de edificios y lograr la comodidad de sus ocupantes con el mínimo consumo de energía. Logrando limitar las ganancias de calor de las edificaciones a través de sus envolventes para racionalizar el uso de energía, considerando el área, el coeficiente de sombreado, el tipo de materiales y sus características termo-físicas y su ángulo de orientación.

La norma oficial mexicana NOM-024-ENER-2012 establece las obligaciones de certificar las características ópticas y térmicas de los vidrios y sistemas vidriados, así como, los métodos de prueba de su verificación, esto teniendo con la finalidad asegurar el comportamiento térmico de la envolvente en una edificación. La importancia de esta norma radica en incrementar el ahorro de energía y la preservación de los recursos energéticos a través de la utilización de mejores materiales ofreciendo la mejor alternativa para su necesidad de aislar térmicamente la edificación.

La evaluación de Saber *et al.*, (2014) presenta el rendimiento de diferentes celdas solares y la predicción del rendimiento energético basado en la simulación en edificios en climas



tropicales. Analizaron los datos medidos *in situ* de los sistemas fotovoltaicos implementados en un edificio de energía cero en Singapur, instalando diferentes sistemas fotovoltaicos en tejados, fachadas, aparcamientos, entre otros. Todos los sistemas los simularon en EnergyPlus con varios modelos de rendimiento fotovoltaico, incluyendo Simple-Equivalent one-diode y Sandia. Se estudió el rendimiento energético fotovoltaico anual y el perfil diario de la potencia de salida y la temperatura de las celdas. En total, se implementaron 1540.0 m² de módulos fotovoltaicos con una potencia máxima del sistema de 190.0 kWp en el edificio para producir aproximadamente 207.0 MWh de electricidad cada año. La evaluación de los datos del programa ZEB en 2012 muestra que la producción de energía de las edificaciones con integración de una VFV fue un 5.0% más que el consumo de energía del edificio, los sistemas fotovoltaicos produjeron 201.0 MWh de electricidad en un año. Por lo que la orientación de la ventana fotovoltaica en la azotea de poca pendiente tiene un impacto insignificante en el rendimiento energético anual, pero en el caso de la sombrilla externa fotovoltaica, la fachada Este y la inclinación del panel debe de ser de 30-40°C siendo la ubicación e inclinación más adecuadas.

La simulación realizada por Vuong *et al.*, (2015) en sistemas fotovoltaicos integrados a una edificación en EnergyPlus y TRNSYS. Se consideraron cinco sistemas conectados en serie y orientados al sur con una inclinación establecida. La simulación permite determinar la generación de energía y el desempeño térmico en edificaciones. La generación energética producida por los sistemas fotovoltaicos simulados en TRNSYS y EnergyPlus fue de 8.84 kWh y 8.18 kWh respectivamente, teniendo una diferencial anual entre los programas de simulación del 8.58%. Las diferencias entre los dos diferentes programas de simulación son pocas, sin embargo, para poder considerar la implementación de sistemas fotovoltaicos semitransparentes integrados a una edificación, es de mayor facilidad la utilización del programa TRNSYS ya que EnergyPlus necesita de un software adicional para la construcción de la ventana e interconectar ambos softwares.

La revisión literaria realizada por Ogbomo *et al.*, (2016) de las tecnologías de módulos fotovoltaicos para un mayor rendimiento en el clima tropical. Llevaron a cabo una investigación referente a los tipos de módulos VF y sus características, posteriormente,



detallaron un análisis de las condiciones de diseño mecánico, térmico y eléctrico de los contactos. Calcularon las propiedades térmicas en climas tropicales. La celda policristalina tiene la mayor participación de mercado, que asciende al 54.0%. La celda telurio de cadmio (CdTe) exhibe una caída del 0.0% en eficiencia de conversión de energía a altas temperaturas y operaciones de baja irradiación. La potencia inicial casi no se ve afectada por las condiciones climáticas. Por lo que, los contactos posteriores y las tecnologías de interconexión espalda con espalda producen las pérdidas de recombinación mínima y demuestran la ausencia de sombreado además de poseer la mayor vida de fatiga de interconexión.

El rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en climas tropicales depende de las conexiones, las tecnologías de interconexión, la orientación y de su inclinación, produciendo las mínimas pérdidas de recombinación (Ogbomo *et al.*, 2016 & Esmail *et al.*, 2014). El rendimiento es regulado con normatividad que especifiquen las ganancias de calor y el consumo energético de las edificaciones, al igual que buscan incrementar el ahorro energético de las mismas (NOM-008-ENER-2001 & NOM-024-ENER-2012).

1.2.3 *Evaluación térmica de edificaciones*

El análisis y evaluación realizada por Chagolla, (2002) de las cargas térmicas en un edificio de la ciudad de Cuernavaca, Morelos, México. La simulación de las cargas térmicas en la edificación se llevó a cabo con el programa de cómputo TRNSYS. Los resultados obtenidos muestran que la orientación óptima resultó en la orientación Este-Oeste, recibiendo un 6.0% menos de energía por radiación solar sobre la envolvente. La dirección Norte-Sur propicia una disminución del 17.3% en las cargas de enfriamiento requeridas para mantener las condiciones del confort térmico, siendo la orientación óptima para disminuir las cargas de enfriamiento. La selección adecuada de los materiales de construcción, la forma arquitectónica y las orientaciones apropiadas contribuyen de forma importante en la reducción de las cargas de calor externas.



El estudio realizado por Chagolla, (2012) de la demanda energética, la calidad térmica y la calificación energética de las viviendas en el Estado de Morelos. Se llevó a cabo una simulación con el programa TRNSYS conociendo las propiedades térmicas de dos viviendas, una vivienda de dos plantas con $50.0 m^2$ de construcción, y otra de una planta con $96.0 m^2$, ambas con una envolvente convencional. No se consideran ganancias internas. La verificación del programa se realizó en la Plataforma Solar de Alemania (PSA), prediciendo en la simulación la temperatura al interior de un recinto del edificio. La diferencia máxima fue del 4.5%. Para Tlaquiltenango las condiciones de la envolvente reducen las cargas térmicas en un 85.0%, para Emiliano Zapata un 93.0%, siendo lo mismo para Huitzilac con climas templados. En donde concluye que, para climas cálidos y templados, el factor que tiene mayor impacto sobre las cargas térmicas es la absorción de la superficie del techo, también se tiene un efecto considerable al adicionar una pulgada de aislante en el techo.

El estudio térmico realizado por Sánchez-Vásquez, (2012) en un edificio vidriado en la ciudad de México y la evaluación de su habitabilidad para el confort. La edificación se simuló en el programa de cómputo TRNSYS. Se consideraron dos temperaturas del año (verano e invierno). Los vidrios utilizados son de baja emisividad y reflejantes. Para el periodo de “verano” se obtuvo una disminución de las cargas térmicas del 39.2%. Considerando vidrios reflejantes la temperatura máxima en el interior disminuyó hasta $3.6^{\circ}C$. Para vidrio de baja emisividad se logró disminuir hasta $3.5^{\circ}C$. Las cargas térmicas en condiciones de confort para vidrio de baja emisividad y vidrio reflectantes fueron de $65,893.8 kWh$ y $65,715.9 kWh$, teniendo disminuciones del 30.5% y 30.7% respectivamente. Los edificios con baja masa térmica, pero con alto porcentaje del área vidriada, necesita de técnicas pasivas para lograr mejorar las condiciones al interior de la edificación y disminuir el consumo energético. Es necesario controlar las infiltraciones en las edificaciones para poder lograr la disminución de las temperaturas al interior del edificio y mantener las condiciones de confort térmico.

El estudio del rendimiento de un edificio residencial realizado por Ha *et al.*, (2015) con un sistema fotovoltaico integrado (SFI) con configuraciones de techo frío y cálido de un edificio residencial de poca altura. El sistema se modeló con el programa TRNSYS, utilizando el Type 567, con 30.0° de inclinación cada techo, manteniendo el rango de



temperatura entre 20.0°C y 26.0°C para enfriamiento y calentamiento respectivamente. Utilizaron las condiciones típicas de datos meteorológicos por hora para Daejeon, los componentes principales incluían, lector de datos, procesador de radiación, modelo de construcción, multizona e inversor. La temperatura máxima y mínima de la habitación en verano e invierno fue de 28.0 y 17.5°C , respectivamente. Sin embargo, en el caso del techo frío, la demanda de calefacción es elevada debido a la transferencia de calor hacia el interior, en lugar del techo cálido con aislamiento aplicado entre el techo y la habitación. La demanda de enfriamiento para el techo frío es más baja que la del techo cálido, logrando un ahorro de energía de calefacción del 47.0 y 45.0% en invierno (diciembre, enero y febrero específicamente) y durante todo el año, respectivamente, para techos calientes.

La propuesta de una vivienda sostenible realizado por Quivén, (2016) en climas cálido-húmedo, en Chetumal, Q.R, México. La situación de las viviendas en México, así como de la vivienda social urbana y la vivienda vernácula de la zona de estudio son de gran importancia, ya que permite realizar un análisis de las oportunidades de mejora de las viviendas, para esto se tomó la decisión de tomar la vivienda vernácula debido a sus características, adaptándola a las costumbres del usuario. Se considera que la propuesta es viable para la aplicación en la zona de estudio.

El estudio del rendimiento energético y medioambiental realizado por Kyriaki *et al.*, (2017) en colectores solares en los edificios de hotel. El sistema Solar Combi Systems se simuló en el programa de simulación Polysun Simulation. El consumo de energía de la bomba en la temporada de verano es de cero ya que es suministrada por los colectores solares. Se redujo en un 85% del consumo anual de energía, el sistema se reduce un 67% las emisiones de dióxido de carbono equivalente a la atmosfera. Los colectores solares logran generar ahorros energéticos en sistemas de bombeo para hoteles, ya que sustituye la fuente de energía de la bomba. Estos sistemas de energía solar no solo tienen beneficios energéticos, también, presentan beneficios medio ambientales.

Las edificaciones vernáculas son poco aptas para el implemento de sistemas fotovoltaicas (Quivén, 2016). El desempeño térmico de una ventana fotovoltaica en una habitación se ve



afectado por el implemento de aislantes en la edificación y su absorción (Chagolla, 2012). El software TRNSYS permite simular el comportamiento térmico y eléctrico de un sistema fotovoltaico (Ha *et al.*, 2015). El comportamiento depende en cierta medida de la conductividad térmica del aislante, reduciendo hasta un 47.0 y 45.0% de energía en calefacción con diferentes configuraciones de techo (Ha *et al.*, 2015). Sin embargo, no se encontraron estudios que evalúen el comportamiento térmico en habitaciones tipo hotel.



1.2.4 Evaluación del confort térmico

El análisis del comportamiento térmico de una ventana fotovoltaica integrada a una edificación utilizando c-Si mediante un modelo de una capa presentado por Tina *et al.*, (2013) presenta que la temperatura del módulo fotovoltaico se utiliza para evaluar el campo de radiación térmica en una sala de muestra. Considerando tres tamaños de la VFV, de: 0.5, 0.3 y 0.1 m. El modelo de simulación fue limitado a 6:00 *am* y 18:00 *pm* horas diurnas, considerando parámetros ambientales y el entorno térmico. Los resultados indicaron una condición de incomodidad térmica muy inaceptable, especialmente para una distancia de la superficie fotovoltaica inferior a 0.5 m, con valores de voto promedio pronosticados que superan 1.50 (sensación de calor) y con un porcentaje muy alto de insatisfechos más del 58.0%. El campo térmico es bastante aceptable a una distancia mayor de 2.0 m desde la superficie VF, donde se pronosticó un voto promedio máximo estimado de alrededor de 1.0 (ligeramente cálido). Denotando que este modelo ayudará a proporcionar recomendaciones para los componentes de fachadas de alto rendimiento para reducir o eliminar el calentamiento del perímetro como una fuente secundaria.

La propuesta de una metodología de prueba presentada por Polo *et al.*, (2013) se enfoca en estudiar aspectos relacionados con la comodidad humana, en términos de la tasa metabólica, aceptabilidad y la temperatura operativa, cuando se utilizan un sistema fotovoltaico integrado (SFI) semitransparentes de *a-Si* probados en un entorno real y en condiciones climáticas al aire libre. En el estudio se consideraron dos salas de prueba idénticas de 10.0 m², en cada una se reproducen las condiciones interiores de un edificio de bajo consumo energético. La temperatura del aire promedio máxima al aire libre para toda la semana fue de 14.9°C y la humedad promedio mínima relativa fue de 62.7%. El valor promedio de la temperatura mínima del aire de bulbo seco fue de 8.0°C y el valor promedio de humedad relativa máxima fue de 93.5%. La metodología de evaluación del confort ambiental considera aspectos como el confort térmico y el confort visual. El balance general de energía del edificio considera el consumo de energía y la producción de energía fotovoltaica como un nuevo índice de rendimiento SFI. Las ventanas fotovoltaicas pueden alterar significativamente la percepción de la luz, pero al mismo tiempo, y dependiendo de



las condiciones ambientales externas, pueden favorecer una protección solar adecuada para disminuir el resplandor y los fenómenos de calentamiento excesivo no deseados.

El estudio de campo presentado por López *et al.*, (2018) permite conocer el confort térmico y los modelos de confort térmico adaptativos en edificios educativos en un clima tropical (Aw), considerando sistemas de aire acondicionado y ventilación natural. Para el modelo de confort térmico adaptativo se consideraron 496 conjuntos de datos recogidos en 27 edificios de Tuxtla, Gutiérrez-México, evaluando el voto de sensación térmica, la preferencia térmica, la sensación de humedad, la sensación del movimiento del aire y la aceptación térmica. En el modelado con aire acondicionado, el 48.1% de los encuestados sintieron comodidad, el 44.0% sintió frío y el 7.9% sintió calor. En el caso de ventilación natural, el 59.7% sintió comodidad, el 11.0% sintió frío y el 29.3% sintió calor. Los autores observaron que los encuestados en edificios educativos, en el modelo con aire acondicionado en climas tropicales (Aw), prefieren temperaturas de confort más altas, que pueden llegar a ser hasta 1.0°C mayor en referencia a los estándares actuales, y esta temperatura puede ir aumentando conforme aumenta el movimiento de aire. Con lo anterior, la satisfacción térmica de la gente podría mejorarse, ahorrando energía al mismo tiempo.

La evaluación del rendimiento térmico presentado por Lee *et al.*, (2018) en edificios de bajos ingresos en función de la temperatura interior, en Corea del Sur. La muestra de estudio fue de 40000 viviendas. Las viviendas se clasificaron en unifamiliares y multifamiliares con dimensiones de 14.1 m^2 y 14.4 m^2 respectivamente, considerando 2530 casos de estudio, divididos en tres grupos (A, B y C). Las simulaciones de las viviendas se realizaron con EnergyPlus v8.3.0. En el estudio consideran las ganancias de calor internas, el sistema de calefacción, la demanda energética, la temperatura interior de la habitación principal y la orientación del edificio (20.0° suroeste respecto al sur). En los tres grupos (A, B y C) de estudio, los errores absolutos máximos fueron de 0.09, 0.09, y 0.04 kWh, y los errores promedio fueron 0.03, 0.02, y 0.01 kWh, respectivamente. La temperatura interior no climatizada resultó dentro del intervalo del 30.0% del Error Medio solo para el Grupo A, para el Grupo B supera el 30.0% durante algunos períodos. Para la diferencia de temperatura interior acondicionada máxima anual de los grupos A, B y C fueron de 0.79, 1.65 y 3.52°C ,



respectivamente. La diferencia de temperatura máxima anual en el interior de habitaciones sin climatizar de los tres grupos fue de 0.85, 1.76 y 3.88°C, respectivamente. El voto medio predicho fue de 0.02 para 1536 muestras y para 1356 muestras fue de 0.07. El efecto de la temperatura no es dependiente del consumo energético de las edificaciones, especialmente para edificios pequeños. A pesar de que el consumo energético es elevado superando un error cuadrático medio del 30.0%, las temperaturas de las edificaciones seguirían sin presentar afectaciones significativas.

El estudio del confort térmico con radiación presentado por Zhang *et al.*, (2018) consideraron el Voto Medio Corregido Predicho (VMCP). En el estudio se seleccionaron tres tipos de edificios con envoltura semitransparente. Se consideraron tres casos de estudio, oficinas, bibliotecas y una estación de ferrocarril en Tianjin. Las preferencias térmicas en las edificaciones se identifican con un comparativo del voto medio corregido predicho y el Voto de Sensación Térmica (VST), establecidos por la Organización Internacional de Normalización (ISO) estableciendo la norma ISO 7730. En los tres tipos de edificaciones se presentó variaciones de la radiación solar. La desviación de VMCP se mantiene entre -0.17 y 0.18, la intensidad de la radiación solar directa alcanza 200.7 W/m² para voto de sensación térmica y voto medio corregido predicho. Para el caso del Voto Medio Predicho es de 1.28, 1.18 y 0,40 para cada caso. Se ha demostrado que el voto medio corregido predicho y el voto de sensación térmica tienen una relación lineal con la temperatura operativa corregida, y la temperatura neutra y los límites de aceptabilidad pronosticados por el modelo de voto medio corregido predicho coinciden con la sensación térmica real.

La evaluación realizada por Aritra, *et al.*, (2019) del confort térmico de manera numérica para una habitación sin amueblar que consta de acristalamiento al vacío BIPV para el clima del Reino Unido (UK). El acristalamiento al vacío semitransparente BIPV se fabricó utilizando un acristalamiento al vacío de 0.35 m × 0.2 m, una celda PV multicristalina y un solo vidrio de 0.155 m × 0.155 m. La diferencia de temperatura de la celda fotovoltaica entre estos dos tipos diferentes de acristalamiento fue de 24°C. Para el clima del Reino Unido, el acristalamiento al vacío BIPV ofrecía un 26% más de temperatura ambiente en un día claro y soleado en comparación con el sistema doble BIPV. El sistema de acristalamiento al vacío



BIPV proporcionó un confort térmico relajante o confortable durante el período de medio día para un día claro y soleado en clima templado. La construcción de un sistema fotovoltaico integrado es prometedora para la aplicación en ventanas debido a su capacidad de reducir la transferencia de calor, su control y la generación de energía eléctrica.

El estudio numérico presentado por Ghosh *et al.*, (2019) muestra el confort térmico en una habitación sin muebles integrada de un sistema fotovoltaico semitransparente para el clima del Reino Unido (UK). El estudio se realizó de forma experimental, utilizando balance de energía para el sistema semitransparente. El vidriado consiste en dos paneles que se encuentran al vacío (BIPV-vacuum) y una ventana de vidrio doble (PV-double). El confort térmico se obtuvo mediante el Voto Medio Predicho y el Porcentaje de Insatisfacción Térmica mediante ASHRAE 7-point scale. La diferencia de temperatura entre la celda PV y el vidrio interno para single-PV-vacuum fue de 28°C , ya que la estructura vacuum-PV-single aumenta por 5°C más. A la 1:00 p.m., la temperatura interior para el acristalamiento al vacío fue un 25% más alta que el acristalamiento doble, mejorando en un 39% el confort térmico para los climas templados. Los sistemas fotovoltaicos semitransparentes tienen un gran impacto en el confort térmico, llegando a generar ahorros energéticos.

La evaluación del confort térmico presentado por Tian *et al.*, (2019) en habitaciones con ventanas fotovoltaicas. El confort térmico se evaluó de manera experimental, utilizando dos unidades de pruebas cada una de 3.0 m de ancho, 3.0 m de profundidad y 3.0 m de alto. La primera unidad se utilizó como referencia, y en la segunda se integró la VFV. La humedad, la temperatura ambiente exterior, la velocidad y dirección del viento, la presión del aire, la radiación solar global y la radiación solar directa se midieron. En el comparativo, la diferencia máxima en la temperatura del aire fue en torno a 5.0°C entre la unidad de prueba y la unidad de comparación. El voto medio predicho (VMP) varió de 0.2 (naturaleza) a 1.3 (ligeramente cálido) en la unidad de prueba, y el de la unidad de comparación fue 0.7 (ligeramente cálido) a 2.0 (cálido). La diferencia máxima en los valores de porcentaje de porcentaje previsto de insatisfacción (PPD) al mediodía fue de 27.0%. Los puntajes de aceptabilidad del confort térmico, de iluminación y acústico fue de 73.8%, con una sensación térmica entre hombres y



mujeres de 5.0%. El uso de un sistema fotovoltaico semitransparente en habitaciones presentó altos niveles de aceptabilidad.

El estudio de confort térmico presentado por Zhibin *et al.*, (2019) en términos de la aceptabilidad y la temperatura neutra considerando el enfoque adaptativo. El estudio se realizó en 11 edificios de dormitorios con ventilación natural en zonas climáticas de veranos calurosos e inviernos fríos en China. La percepción térmica subjetiva de los ocupantes se registró mediante cuestionarios, y las variables ambientales se midieron simultáneamente. En el estudio se obtuvieron 467 conjuntos válidos de datos de medición y cuestionarios subjetivos. El modelo del voto medio predicho se adoptó en ISO 7730 y ASHRAE 55–2013. Tanto el análisis de regresión lineal como el de Griffiths mostraron que la temperatura operativa neutra, fue de 26.2°C . El límite superior de aceptabilidad fue del 80.0% a 28.5°C . La temperatura operativa más aceptable fue la de 26.6°C . El 80% de los ocupantes se encontraban cómodos en el intervalo de temperatura de $25\text{-}28.7^{\circ}\text{C}$. Los comportamientos de adaptación, como el ajuste de la ropa y el ajuste de la velocidad del aire, están estrechamente correlacionados con la temperatura operativa neutra. El confort térmico se puede determinar en términos de la aceptabilidad y la temperatura neutra considerando el enfoque adaptativo, y puede llegar al 80.0% de aceptación con un rango de temperatura de $25\text{-}28.7^{\circ}\text{C}$ en un clima cálido con inviernos fríos.

El confort térmico en edificaciones determina el nivel de aceptabilidad y el porcentaje de rechazo de las personas expuestas al estudio. Los modelos de confort térmico se adoptan a la norma ISO 7730 y a los estándares ASHRAE 55–2013, considerando diferentes enfoques de los diferentes rangos de aceptación de temperaturas en el interior de la edificación (Zhibin *et al.*, 2019). Las diferencias de temperaturas están directamente relacionadas con las condiciones climáticas presentes, pudiendo ir en aumento conforme aumenta el movimiento del aire (López *et al.*, 2018). El aumento de las temperaturas en una edificación no es afectado por el aumento del consumo energético (Lee *et al.*, 2018), sin embargo, el voto medio corregido pronosticado y el voto de sensación térmica están estrechamente relacionados con la temperatura operativa coincidiendo con las sensaciones térmicas reales (Zhang *et al.*, 2018 & Tina *et al.*, 2013). Sin embargo, el confort térmico también puede verse afectado por el



uso de materiales semi transparentes, los cuales pueden favorecer en la disminución del excesivo calentamiento no deseado en las edificaciones presentando altos niveles de aceptabilidad en el confort térmico (Cristina *et al.*, 2013 & Tian *et al.*, 2019). Sin embargo, el efecto de las ventanas fotovoltaicas en habitaciones de tipo hotel no ha sido estudiado.

1.2.5 Controladores solares

La síntesis de controladores predictivos no lineales presentada por Acosta *et al.*, (2016) está dedicado a la gestión energética de sistemas de aire acondicionado centralizado en las habitaciones de dos hoteles de la ciudad. El primer hotel lleva como nombre "Meliá Habana" y el segundo hotel lleva por nombre "Parque Central de la Torre". El modelo de predicción se basa en el método Radiant Time Series (RTS). Para el controlador predictivo no lineal (NLPC por sus siglas en inglés), se utiliza el modelo No Lineal. Los resultados obtenidos para el hotel "Meliá Habana", el ahorro potencial es de 455 *kWh* para el periodo de 2 de abril del 2012, lo que equivale al 5.4% del consumo eléctrico de los sistemas de aire acondicionado de las habitaciones ocupadas. Para el 1 de mayo del 2013, en el hotel "Parque Central de la Torre", se logra un ahorro de 63 *kWh*, lo que representa el 3.7% del consumo eléctrico del sistema de climatización. Los controladores implementados en hoteles ayudan a generar ahorros energéticos.

El estudio del estado del arte realizado por Kuhn, (2017) muestra los diferentes dispositivos avanzados de control solar en edificaciones, así como los tipos de tecnologías que los conforman. Considera dos aspectos importantes para la evaluación y entendimiento de los dispositivos "El diseño del espacio" y "El espacio de la evaluación". Considera ciertos criterios importantes para una apropiada evaluación tales como las ganancias de calor solar, confort térmico, confort visual, entre otros. Para obtener una adecuada producción de energía en edificaciones con controladores solares integrados, es necesario considerar el espacio de estudio y su diseño.



Los controladores solares permiten mantener estables la potencia y tensión del sistema fotovoltaico, sin embargo, es necesario considerar el diseño del espacio del sistema y el espacio de la evaluación (Acosta A., *et al.*, 2016 & Kuhn, 2017).

1.2.6 Conclusiones de la revisión bibliográfica

En la revisión bibliográfica se observó que el uso de las ventanas fotovoltaicas (VFV) presenta un gran potencial de ahorro de energía en las edificaciones, sin embargo, el potencial depende de la ubicación de las ventanas fotovoltaicas y de las características de cada una. Las cargas de aire acondicionado se lograron reducir hasta un 40% contribuyendo a la realización de edificaciones cero-energía, viéndose el mejor desempeño con las ventanas fotovoltaicas de telurio de cadmio (Wei *et al.*, 2010 & Sankar *et al.*, 2017).

Para los sistemas semitransparentes integrados a una edificación, la norma que se encarga de su evaluación y rendimiento es la norma oficial mexicana NOM-024-ENER-2012, siendo conveniente considerar las características ópticas espectrales del vidriado ya que el efecto es considerable en el desempeño energético del edificio incrementando así el ahorro energético (Yung *et al.*, 2014).

El comportamiento de las cargas térmicas en las edificaciones es simulado con el software TRNSYS y EnergyPlus el cual permite ingresar los datos necesarios de las propiedades de la edificación y climatológicas del lugar de estudio (Chagolla, 2012). Sin embargo, el software TRNSYS es un programa de simulación que nos permite realizar las simulaciones térmicas de las edificaciones y evaluaciones termo-eléctricas de sistemas semitransparentes integrados a edificaciones, sin la necesidad de utilizar programas de simulación adicionales para los estudios. Las temperaturas presentes en el lugar de estudio determinan el desempeño energético de los sistemas fotovoltaicos (Ha *et al.*, 2015).

La generación energética de las ventanas fotovoltaicas se evalúa en términos de kWh/m^2 -año, al integrar los resultados de la simulación, considerando las propiedades térmicas, eléctricas y ópticas se puede reducir hasta un 65.0% de la ganancia de calor total mediante el



uso de un sistema fotovoltaico integrado semitransparente durante todo un año (Lin *et al.*, 2012). El rendimiento puede llegar a ser mayor siempre y cuando los contactos y las tecnologías de interconexión tengan pérdidas de recombinación mínimas y la orientación en la que se encuentren sea la adecuada (Esmail *et al.*, 2014 & Ogbomo *et al.*, 2016). La NOM-008-ENER-2001 regula esto para controlar las ganancias de calor de la edificación y así disminuir el consumo energético de la misma. En climas tropicales se considera que las mejores edificaciones son de arquitectura tipo vernácula, ya que se pueden adaptar a las costumbres del usuario, pero no son tan eficientes para la integración de un sistema fotovoltaico integrado (Quivén, 2016).

El estudio del confort térmico determina el nivel de aceptabilidad y el porcentaje de rechazo de las personas. Los estudios consideran diferentes enfoques de los rangos de aceptación de temperaturas en el interior de la edificación. El resultado de estos estudios es que las personas presentan altos niveles de aceptabilidad en el confort térmico (Zhibin *et al.*, 2019 & Tian *et al.*, 2019). Las variaciones de temperatura están directamente relacionadas con las condiciones climatológicas (López *et al.*, 2018).



1.3 Planteamiento del problema

La aplicación de las ventanas fotovoltaicas permite reducir las cargas de aire acondicionado en una edificación hasta un 40.0% (Wei *et al.*, 2010 & Sankar *et al.*, 2017). El desempeño se ha identificado con la reducción de las ganancias de calor al interior y la generación de energía eléctrica a la vez. La generación de energía eléctrica y la reducción de las cargas térmicas de las ventanas fotovoltaicas se evalúa en términos de kWh/m^2 -año y kJ/m^2 -año, donde se consideran las propiedades térmicas, eléctricas y ópticas (Martínez, 2018 & Moya, 2018). Sin embargo, el efecto de las ventanas fotovoltaicas en habitaciones de tipo hotel no ha sido estudiado y se ha hecho poco énfasis en los efectos en el confort térmico con el uso de estos sistemas.

Este trabajo tiene como finalidad el conocer el comportamiento de las cargas térmicas, la generación energética y el impacto ambiental en términos de emisión de ton de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}), para poder generar un ahorro energético y un nivel de confort térmico aceptable dentro de las habitaciones.

1.4 Objetivos

En este apartado se presenta el objetivo general, los objetivos específicos y los alcances del trabajo de investigación.

1.4.1 Objetivo general

Realizar un estudio del desempeño de una ventana fotovoltaica en una habitación tipo hotel en términos de cargas térmicas, producción de electricidad y confort térmico.

1.4.2 Objetivos particulares

- ❖ Determinar el ahorro energético por el uso de una ventana fotovoltaica utilizando un software de simulación.
- ❖ Determinar la disminución de las cargas térmicas en una habitación tipo hotel con el uso de una ventana fotovoltaica.



- ❖ Determinar el efecto que tiene una ventana fotovoltaica en el confort térmico en un cuarto de tipo hotel.

1.4.2 Alcances

- ❖ Realizar el estudio en una habitación de tipo hotel con un clima cálido subhúmedo.
- ❖ Construir una plataforma de simulación para una habitación de hotel considerando la norma NOM-008-ENER-2001.
- ❖ Determinar las cargas térmicas y la generación fotovoltaica en un periodo de tiempo de acuerdo con las normas NOM-008-ENER-2001 y NOM-024-ENER-2012.
- ❖ Determinar el efecto de las ventanas fotovoltaicas en el confort térmico en el mismo periodo de tiempo conforme al método de Fanger especificado en la ISO-7730 y ASHRAE 55-2010.
- ❖ Determinar la mitigación de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) emitidas a la atmósfera con el uso de las ventanas fotovoltaicas propuestas mediante el método de la Comisión Reguladora de Energía.
- ❖ Realizar un comparativo de las cargas térmicas, la generación energética por las ventanas fotovoltaicas, el confort térmico y las emisiones de dióxido de carbono, con ventilación natural y con aire acondicionado.

1.5 Escritura de tesis

En el Capítulo 2 se muestra la localización y muestras. En el Capítulo 3 se presentan los modelos matemáticos térmicos, fotovoltaicos, de confort térmico y ambiental. En el Capítulo 4 se presenta la construcción de la plataforma de simulación y la validación de esta. En el Capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos en la simulación, obteniendo el comportamiento térmico (cargas térmicas), el comportamiento fotovoltaico y de confort térmico, variando el área de ventana en relación ventana pared, así como también las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) emitidas al ambiente. En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.



Capítulo 2. Localización y muestra

En esta sección se muestran las características de las edificaciones utilizadas para la validación del programa y para el desarrollo de este trabajo, así como también las características de las ventanas utilizadas. La localización de la edificación, la selección del lugar de estudio y la localización de la ventana en la edificación.

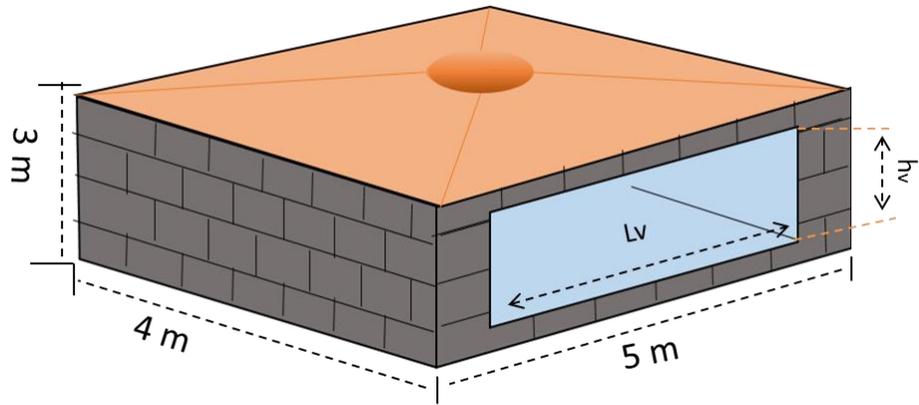


2.1 Muestra

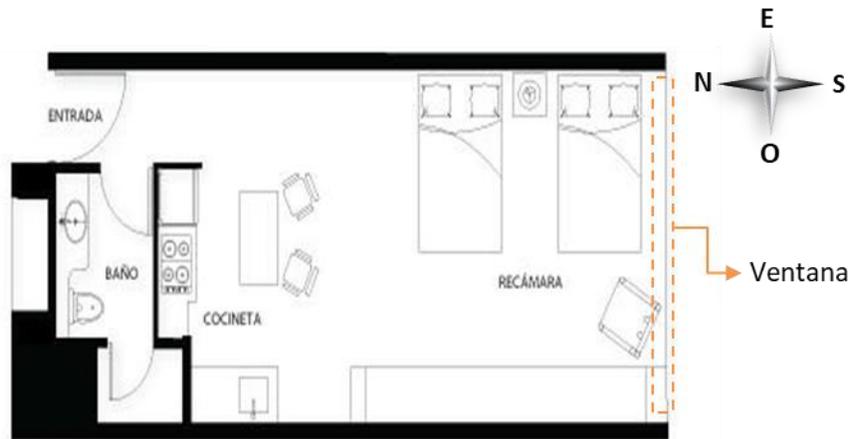
En esta sección se muestran las características de las edificaciones utilizadas para la validación del programa y para el desarrollo de este trabajo, así como también las características de las ventanas utilizadas.

2.1.1 Edificación

La habitación de hotel se encuentra ubicada en la Riviera Maya, Quintana Roo, México. Se considera como una Suite Junior, debido a las dimensiones que esta cuenta, siendo de $20 m^2$ en su totalidad, con un largo de $4 m^2$ y un ancho de $5 m^2$ y una altura de piso a techo de $3 m^2$. La edificación cuenta con la integración de una ventana la cual va desde la ventana de referencia de BESTest 900FF hasta las ventanas fotovoltaicas (VFV) con una relación de área del 7-95%, donde en la relación de área se considera la longitud de ventana (L_v) y la altura de ventana (h_v) con forme al área de la pared, dicha relación está especificada en la norma oficial mexicana NOM-008-ENER-2001 “Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales”, la norma oficial mexicana NOM-008-ENER-2001 recomienda un máximo del 40% de relación ventana-pared. En la **Figura 2.1** se puede observar la representación gráfica de la edificación de estudio y los planos de la habitación a modelar



a)



b)

Figura 2.1 Representación del modelo de estudio, a) Presentación del modelo gráfico de la edificación de estudio, b) Planos de la habitación de hotel “raintree vacation club, club regina”.

Los tipos de materiales utilizados en la edificación, así como sus propiedades termo-físicas se basan en la norma oficial mexicana NOM-008-ENER-2001, en la **Tabla 2.1**, **Tabla 2.2** y **Tabla 2.3** se pueden encontrar con más detalle.



Tabla 2.1 Resumen de los materiales utilizados en los muros.

Muros					
Materiales	Densidad	Conductividad térmica	Cp	Espesor	U-Value
	kg/m³	W/m°C	kJ/kg K	m	
Mortero 1	1249	2.52	1.09	0.020	1.398
Block	1400	3.24	0.30	0.110	
Mortero 2	1249	3.132	1.09	0.020	
Aislante	1200	0.612	1.00	0.005	

Tabla 2.2 Resumen de los materiales utilizados en el techo.

Techo					
Materiales	Densidad	Conductividad térmica	Cp	Espesor	U-Value
	kg/m³	W/m°C	kJ/kg K	m	
Mortero 1	1249	2.52	1.09	0.020	1.453
Concreto Ligero	1250	2.088	0.84	0.100	
Mortero 2	1249	3.132	1.09	0.020	
Aislante	1200	0.612	1.00	0.005	

Tabla 2.3 Resumen de los materiales utilizados en el suelo.

Suelo					
Materiales	Densidad	Conductividad térmica	Cp	Espesor	U-Value
	kg/m³	W/m°C	kJ/kg K	m	
Concreto Ligero	1250	2.088	0.84	0.100	2.920



2.1.2 Características de la ventana

Las características de las ventanas fotovoltaicas se realiza una revisión bibliográfica en la cual se consideran solo los estudios de mayor relevancia sobre ventanas fotovoltaicas, siendo Chae., *et al.* 2014 y Sankar 2017 los que presentan las ventanas fotovoltaicas de silicio amorfo y telurio de cadmio. Posteriormente, se seleccionaron las ventanas fotovoltaicas que presentaron la mayor eficiencia energética. En la **Figura 2.2** se muestra el proceso de selección de las ventanas fotovoltaicas.

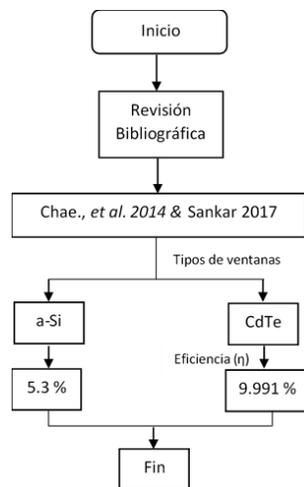


Figura 2.2 Diagrama de flujo del proceso de selección de la VFV.

Las ventanas fotovoltaicas fueron seleccionadas debido a que, en estudios previos, este tipo de ventanas presentaron un gran potencial en la generación de energía eléctrica teniendo ahorros en el consumo neto de energía reportados de 60.4 y 40% respectivamente (Sankar, 2017). En la **Tabla 2.4** se representa las características utilizadas para las ventanas fotovoltaicas, la cual está compuesta de telurio de cadmio (CdTe) y silicio amorfo (a-Si).



Tabla 2.4 Presentación de las propiedades térmicas y ópticas de la VFV seleccionada.

CdTe				
Propiedades	Banda	Lado	PV	Low-e
Transmitancia en incidencia normal	Solar		0.060	0.295
	Visible		0.070	0.902
Reflectancia en incidencia normal	Solar	frontal	0.079	0.631
		trasera	0.159	0.301
	Visible	frontal	0.063	0.048
		trasera	0.170	0.070
Emisividad		frontal	0.837	0.037
		trasera	0.840	0.837
Conductividad térmica			0.980	1.000
Eficiencia		9.991%		
α-Si				
Propiedades	Lado	Valor	Unidades	
Transmitancia solar		0.114	-	
Reflectancia solar	Frontal	0.080	-	
	Trasera	0.040	-	
Transmitancia visible		0.060	-	
Reflectancia visible	Frontal	0.120	-	
	Trasera	0.030	-	
Espesor		0.003 m	m	
Emisividad	Frontal	0.830	%	
	Trasera	0.900	%	
Eficiencia		6.3	%	



Las propiedades eléctricas de las ventanas fotovoltaicas fueron obtenidas mediante una revisión bibliográfica, donde se obtuvieron la potencia nominal, la corriente en el punto máximo de potencia y los coeficientes de temperatura. En la **Tabla 2.5** se muestran las propiedades eléctricas de las ventanas fotovoltaicas (VFV) a estudiar.

Tabla 2.5 Presentación de las propiedades eléctricas de la VFV.

Parámetros	Ventana fotovoltaica
CdTe	
Potencia nominal [P_m] (W)	71.34
Corriente en corto circuito [I_{sc}] (A)	0.88
Voltaje en circuito abierto [V_{oc}] (V)	116
Corriente en el punto máximo de potencia [I_{mp}] (A)	0.82
Voltaje en el punto de máxima potencia [V_{mp}] (V)	87.00
Coeficiente de temperatura en I_{sc} (%/°C)	0.060
Coeficiente de temperatura en V_{oc} (%/°C)	-0.321
Coeficiente de temperatura en P_m (%/°C)	-0.214
α-Si	
J_{sc} (mA/cm ²)	10.1
V_{oc} (mV)	904.6
FF (%)	68.6



2.2 Localización

En esta sección se muestran las características de las edificaciones utilizadas para la verificación del programa y para el desarrollo de este trabajo, así como también las características de las ventanas utilizadas.

2.2.1 Selección del lugar de estudio

Para determinar el lugar de estudio es necesario efectuar un análisis de la generación energética en México, para conocer los tipos de energía más utilizada para la activación de “*sistemas de acondicionamiento en edificios*”, ya que es el punto principal para estudiar en el presente trabajo. Posteriormente, se identifica los sectores con mayor consumo energético, se realiza una comparación de estos sectores el tipo de edificación con mayor consumo energético actual y posteriormente conocer sus principales puntos de interés. En la **Figura 2.3** se presenta un diagrama del proceso de la selección del lugar de estudio.

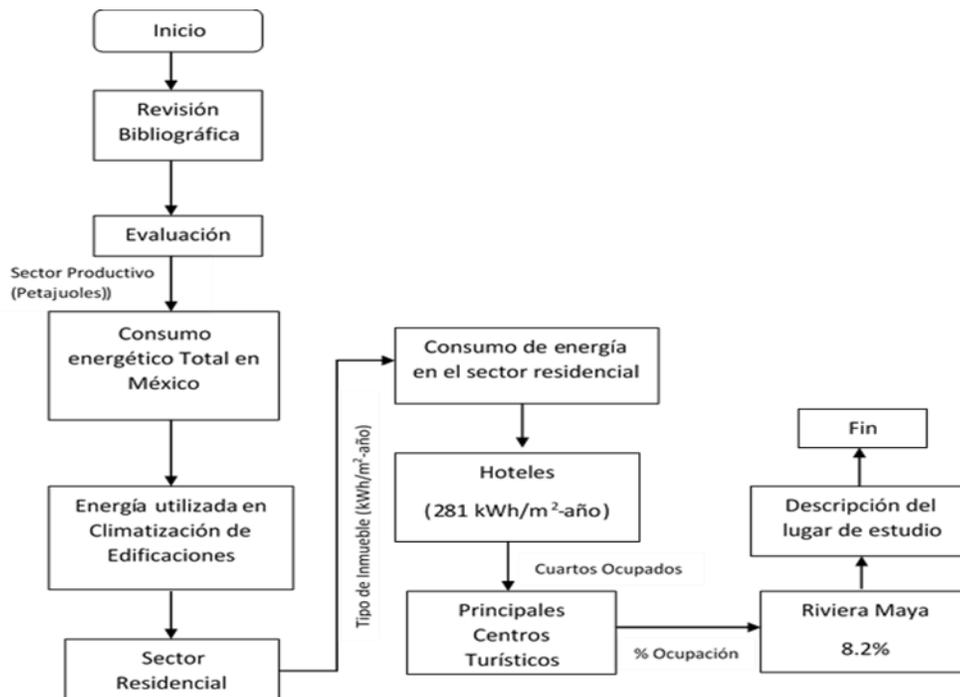


Figura 2.3 Diagrama de flujo de selección del lugar de estudio.



El alto desarrollo económico y social demanda un alto consumo energético, así, por ejemplo, en 2007 en México se obtuvo un suministro total de energía de 153 millos de toneladas de petróleo, equivalente a 1.5 toneladas al año por habitante (casi 5 kg diarios) aumentando año con año. Sin embargo, las pérdidas por transformación y transporte son muy altas, aprovechando una pequeña parte de este suministro.

Este consumo energético se divide por los diferentes sectores, con base a los datos obtenidos del balance nacional de energía en 2017. En la **Tabla 2.6** se observa que el sector residencial consume 751.61 PJ de energía eléctrica al año.

Tabla 2.6 Consumo energético total por sector [Petajoules].

Consumo energético total (Petajoules)						
Año	Agropecuario	Residencial	Comercial	Público	Industrial	Transporte
2016	180.26	756.85	171.85	31.22	1680.74	2484.95
2017	181.91	751.61	163.57	28.92	1876.65	2360.16

Gran parte de este consumo energético en el sector residencial es utilizado para la climatización en edificaciones con sistemas de aire acondicionado, estos sistemas se caracterizan por su alta dependencia y demanda energética. Sin embargo, en los lugares con altas temperaturas, la demanda de estos sistemas incrementa con el paso del tiempo. El sector residencial se subdivide por diferentes tipos de inmuebles, en la **Tabla 2.7** según la SENER y la CONUEE (2019) se muestran los principales consumidores energéticos.

Tabla 2.7 Principales consumidores energéticos en el sector residencial.

Consumidores energéticos en el sector industrial (kWh/m ² -año)	
Inmuebles	Cálido húmedo
Supermercados	443.1
Hospitales	393.4
Restaurantes	336.3
Hoteles	281



Como gran parte del consumo energético a nivel nacional es necesario utilizar un sistema de climatización de edificaciones, los inmuebles de mayor relevancia son los hospitales y los hoteles. Las mejoras de eficiencia energética en el sector de edificaciones hoteleras pueden contribuir a la promoción de la eficiencia energética en tres sectores clave: edificaciones, iluminación y equipos de climatización. En la **Tabla 2.8** se observan los principales centros turísticos en México, para el estudio de las edificaciones se consideran los cuartos ocupados a lo largo de todo el año, siendo la Riviera Maya la que cuenta con una mayor ocupación de cuartos del 82.6%.

Tabla 2.8 Principales centros turísticos.

No.	Ciudad	Cuartos ocupados promedio diario 2017	% ocupación
1	México	34,434	65.8
2	Riviera Maya	31,163	82.6
3	Cancún	25,767	76.6
4	Los Cabos	10,799	68.9
5	Guadalajara	10,164	55.9

La Riviera Maya ofrece más de 4,295.43 km^2 de extensión, en los que existen varios spots turísticos. Es una zona turística de México situada a lo largo del Mar Caribe en el Estado de Quintana Roo, a N 21 ° 10'27 " W 86 ° 50'48" se extiende 130 km , desde el Puerto Morelos al norte, hasta Punta Allen al sur. Los destinos turísticos que componen a la Riviera Maya son Puerto Morelos, Akumal, Playa del Carmen, la Reserva de la Biósfera Sian Ka'an, Boca Paila, Punta Allen, Tulum, Xel-Há, Xcaret y Cobá.

El clima en la Riviera Maya se considera cálido subhúmedo. La radiación horizontal promedio anual es de 5.4 kWh/m^2 -año (SECTUR, 2013). En la **Figura 2.4** se muestra que los meses más calientes son julio y agosto, con temperaturas máximas promedio diario de hasta 31.0°C, y los meses más fríos son diciembre y enero con temperaturas mínimas promedio diario de 21.0°C (Meteoblue, 2006). Los vientos predominantes son los del sureste, llegando



a ser hasta de 61 *km/h*, durante los periodos hidrometeorológicos de presión barométrica muy baja (Meteoblue, 2006). La precipitación pluvial anual oscila es de 1300-1500 *mm*, de marzo a octubre.

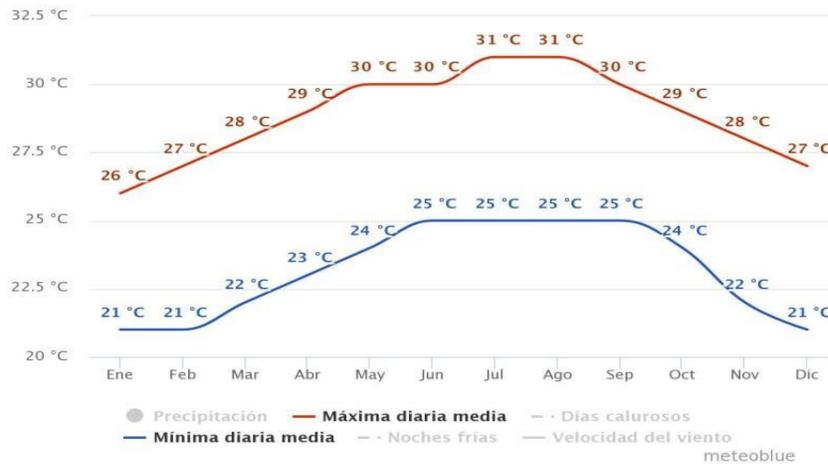


Figura 2.4 Temperatura ambiente promedio mensual.

El relieve a lo largo de la Riviera Maya es plano, y se ubica a 11 *msnm*, con la excepción del yacimiento de Tulum, que está cubierto de bosque semitropical seco o manglar bajo, por lo que en general las condiciones climáticas son similares en todo lo largo de la Riviera, con variaciones poco considerables.

La Riviera Maya es uno de los destinos turísticos mexicanos con crecimiento acelerado en cuanto a su demografía, economía y afluencia turística. Los servicios turísticos han dado lugar a una considerable tasa de crecimiento poblacional anual, que llegó a ser del 16.2 de 2000-2005 y se redujo solo a 5.8% de 2005-2010. Diferentes reconocimientos, muestran un marcado impulso en la calidad y cantidad de los espacios habitables para los turistas y para la población en general. De esto, se destaca la alta demanda de habitaciones de hoteles y departamentos de 20-30 *m*², donde la climatización es una constante. La demanda en climatización de habitaciones de hotel en la Riviera Maya va en aumento año con año, donde el consumo energético se estima de 281 *kWh/m*²-año, con un número de habitaciones ocupadas en el 2017 de 31,163 como se observa en la **Tabla 2.8** y hasta el momento no se ha reportado el uso de ventanas fotovoltaicas para mitigar el consumo energético proveniente



de fuentes convencionales. En el estudio se consideran dos muestras, la primera muestra es la de referencia, que se utiliza para verificar el buen funcionamiento del simulador, y la segunda es la de estudio, que corresponde a una habitación tipo hotel.

2.1.1 Localización de la ventana en la edificación

Para las aplicaciones de energía solar, es de suma importancia comprender el movimiento aparente del sol, en específico los ángulos sol-tierra. Dentro de los diseños arquitectónicos, la comprensión de estos movimientos solares es vitales para lograr optimizar la orientación a las edificaciones, para lograr efectos directos en el calentamiento, enfriamiento e iluminación a las edificaciones, teniendo como beneficio los ahorros energéticos y el confort térmico dentro de la edificación, para una mayor comodidad del usuario.

Sol y rotación terrestre

La tierra gira alrededor de su propio eje, conocido como eje Polar, los ejes donde intercepta la tierra son el Polo Norte y Polo Sur. La tierra se divide en hemisferios, el plano que contiene el ecuador es el plano ecuatorial, en donde se divide en los hemisferios norte y sur (Chagolla, 2012).

La posición del sol varía durante el día y la temporada debido a la rotación terrestre una vez al día. La tierra cambia su órbita alrededor del sol una vez al año, el sol es uno de los focos de la elipse. El plano que contiene a la órbita elíptica de la tierra se llama Plano Eclíptico, formando un ángulo de $23^{\circ}26'44''.7$ ($23^{\circ}27'$) con respecto al ecuador terrestre y de $66^{\circ}33'15''.3$ ($66^{\circ}33'$) con respecto al eje de rotación (Cattell *et al.*, 2001). Las estaciones del año son debidas a que la tierra es perpendicular al plano ecuatorial.

La radiación solar recibida en diferentes latitudes y en diferentes épocas del año varía porque el eje de rotación de la tierra no es perpendicular al plano eclíptico. Encontrando la radiación solar en el hemisferio norte de la tierra, siendo más directa en el solsticio de verano,



sin embargo, la radiación solar también se encuentra en el hemisferio sur de la tierra de forma oblicua (Menjívar, 2013).

Para términos arquitectónicos, la mejor posición de ventanas es la sur. Debido a la inclinación del sol, se recibe más radiación en invierno. Es de suma importancia tener radiación en esa época, para mantener calientes las edificaciones. Para temporadas de verano es más fácil colocar sombreado, por la inclinación que alcanza el sol, facilitando el mantener las condiciones de bienestar en el interior de la habitación y reducir el uso de costosos y contaminantes sistemas de climatización. En la **Figura 2.5** se puede observar la altura y posición del sol a lo largo de un día (Menjívar, 2013).

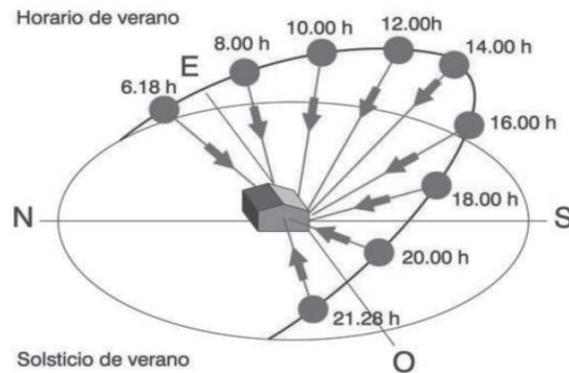


Figura 2.5 Posición y altura del sol a lo largo de un día.



Capítulo 3. Fundamentos teóricos metodológicos

En el Capítulo 3 se presentan los fundamentos teóricos matemáticos, modelos matemáticos térmicos, fotovoltaicos, de confort térmico y ambiental.



Los datos base para el programa de simulación son la geografía y el clima, las características termo-físicas de la edificación, las características ópticas y térmicas de la VFV y los requerimientos para el confort térmico. El desempeño del programa de simulación se evaluó comparando las temperaturas al interior de la habitación, las cargas de enfriamiento (Q_c) y la energía fotovoltaica generada (Q_{pv}) respecto al ejercicio Martínez (2019) en una habitación cerrada, con un volumen de $60 m^3$, ubicada en la Riviera Maya, Cancún, Quintana Roo, México. En la verificación, las desviaciones del comparativo de los resultados de la simulación respecto a los datos de referencia se considera que deben ser por debajo del 10% (ASHREA 134 A). Una vez verificado el programa, las cargas térmicas (Q_c , Q_{pv}), el confort térmico en términos del Voto Medio Predicho (**PMV**), el Porcentaje de Personas Insatisfechas (**PPD**) y las emisiones de dióxido de carbono equivalentes (CO_{2e}), se determinan mediante balances de energía, funciones de transferencia de acuerdo con Mitalas y Arseneaul (1999), el método de Fanger para el confort térmico y las toneladas de CO_{2e} dada por la Comisión Reguladora de Energía (CRE). En la **Figura 3.1** se muestra de manera gráfica el algoritmo utilizado para el desarrollo de este trabajo.

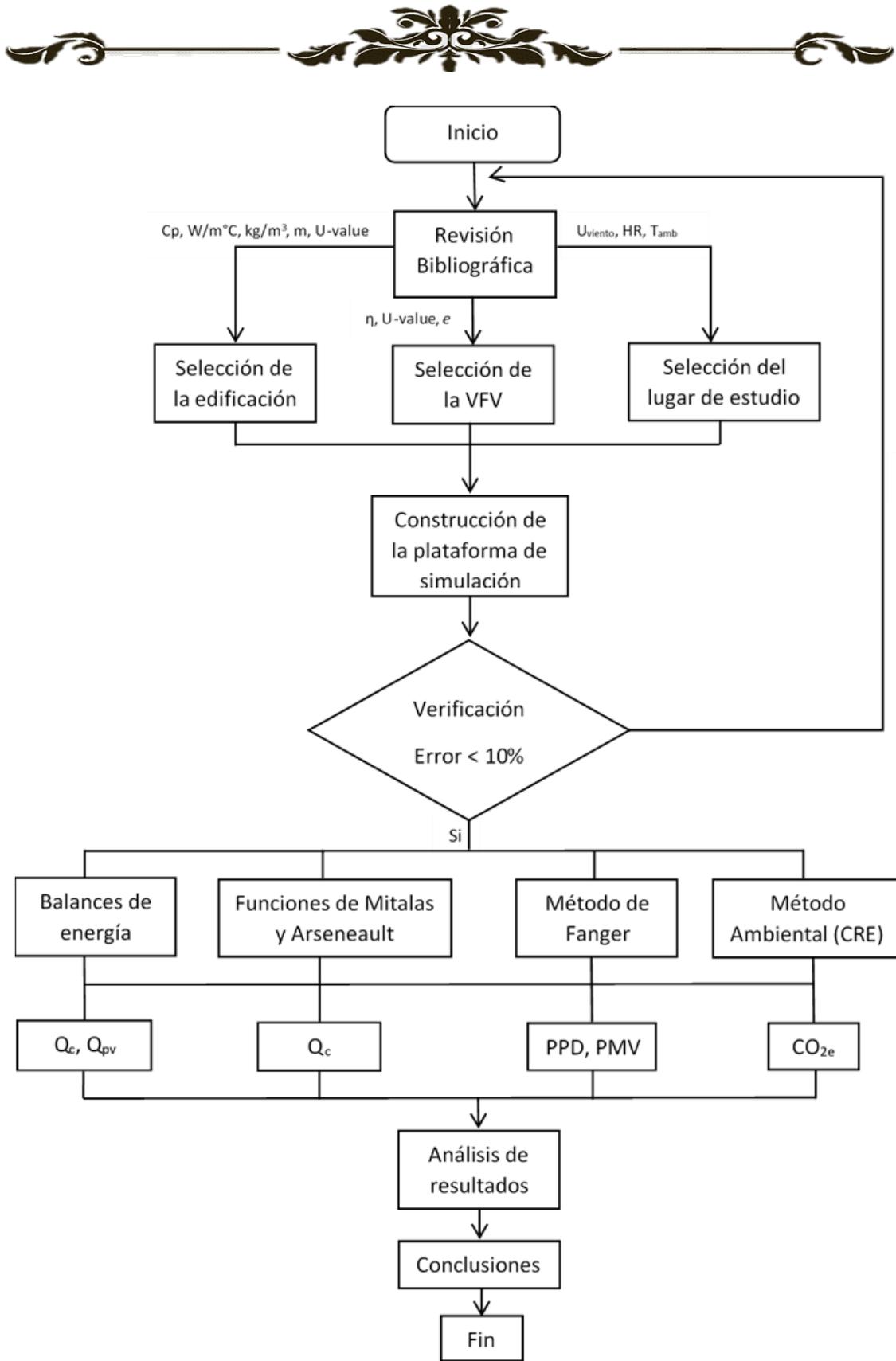


Figura 3.1 Algoritmo general para el desarrollo del trabajo.



3.1 Fundamentos teóricos

En este apartado se presentan los fundamentos teóricos que describen el comportamiento térmico de las edificaciones y los sistemas fotovoltaicos.

3.1.1 Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor es el modo microscópico de trabajo, donde la energía es transferida a través de la frontera de un sistema debida a una diferencia de temperatura. La transferencia de calor en edificaciones se da mediante tres mecanismos principales: conducción, convección y radiación.

Conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor en escala atómico a través de la materia por actividad molecular, se da entre dos sistemas por medio de la energía cinética de las partículas (choque de unas partículas con otras) mediante el contacto directo. La conducción de calor sólo ocurre si hay diferencia de temperatura entre dos partes del medio conductor. La ecuación general que rige la transferencia de calor por conducción a través de una placa plana esta representada por la Ecuación (3.1.1).

$$Q_{cond} = -kA\Delta T \quad (3.1.1)$$

donde Q_{cond} es el flujo de energía calorífica por conducción (W), k es la conductividad térmica del material ($W/m \cdot K$), A es el área expuesta al flujo de calor (m^2), ΔT es la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del cerramiento.

Convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de una sustancia o fluido. Puede ser natural producida solo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse



de un lugar a otro. Sólo se produce en líquidos y gases por medio de difusión, donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio.

La transferencia de calor por convección está regida por la Ley de enfriamiento de Newton, cuya expresión se presenta en la Ecuación (3.1.2).

$$Q_{conv} = h_{conv}A(T_s - T_{\infty}) \quad (3.1.2)$$

donde Q_{conv} es el flujo de calor por convección (W), h_{conv} es el coeficiente convectivo ($W/m \cdot K$), A es el área superficial expuesta (m^2) y $(T_s - T_{\infty})$ es la diferencia de temperatura entre la superficie y el aire.

Radiación

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada, se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas direcciones. Esta energía es producida por los cambios en las configuraciones electromagnéticas o fotones, por lo que se describe como “*radiación electromagnética*”. A diferencia de la conducción y la convección, o de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética es independiente de la materia para su propagación, de hecho, la transferencia de energía por radiación es más efectiva en el vacío. La transferencia de calor por radiación está regida por la Ley de Stefan-Boltzmann dada por la Ecuación (3.1.3).

$$q_{rad} = \sigma \varepsilon (T_s, in^4 - T in^4) \quad (3.1.3)$$



3.2 Modelo térmico de la edificación y la ventana fotovoltaica

Flujo de calor por convección al nodo de aire

Las soluciones analíticas y numéricas existentes son de las ecuaciones diferenciales de conservación de masa, energía y momentum, TRNSYS se basa en un modelo de solución a partir de un balance de energía dada por la Ecuación (3.2.1).

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{surf,i} + \dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{vent,i} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i} + \dot{Q}_{solar,i} + \dot{Q}_{ISHCCL,i} \quad (3.2.1)$$

donde $\dot{Q}_{surf,i}$ es la ganancia convectiva de las superficies, $\dot{Q}_{inf,i}$ es la ganancia por infiltración desde el flujo de aire desde el exterior, $\dot{Q}_{vent,i}$ es la ganancia por ventilación, $\dot{Q}_{g,c,i}$ es la ganancia de convección interna, $\dot{Q}_{cplg,i}$ es la ganancia del flujo del aire (convectivo) desde el nodo de aire, $\dot{Q}_{solar,i}$ es la fracción de radiación solar que ingresa a un nodo de aire a través de ventanas externas, $\dot{Q}_{ISHCCL,i}$ es la radiación solar absorbida en todos los dispositivos de sombreado internos de la zona.

Flujo de calor radiactivo de las ventanas

Para la modelación de las ventanas, se considera la suma de la radiación de onda corta absorbida por todas las ventanas distribuidas alrededor de la habitación evaluada presentada por la Ecuación (3.2.2).

$$U_{abs,i} = 0.5[Q_{abs} + h_i(T_i - T_{zone}) - h_{c,o}(T_o - T_{amb}) - Q_{sky}] \quad (3.2.2)$$

Donde $U_{abs,i}$ es la radiación de onda corta absorbida, Q_{abs} es la tasa de cambio del flujo de calor absorbido por el cristal, h_i es el coeficiente convectivo al interior, T_i es la temperatura de la superficie interior, T_{zone} es la temperatura del aire al interior, $h_{c,o}$ es el coeficiente convectivo exterior, T_o es la temperatura de la superficie exterior, T_{amb} es la temperatura ambiente y Q_{sky} es la tasa de cambio del flujo de calor de la bóveda celeste.



Integración de pared

En la **Figura 3.2** se puede observar los flujos de calor y las temperaturas que caracterizan el comportamiento térmico de cualquier pared o ventana.

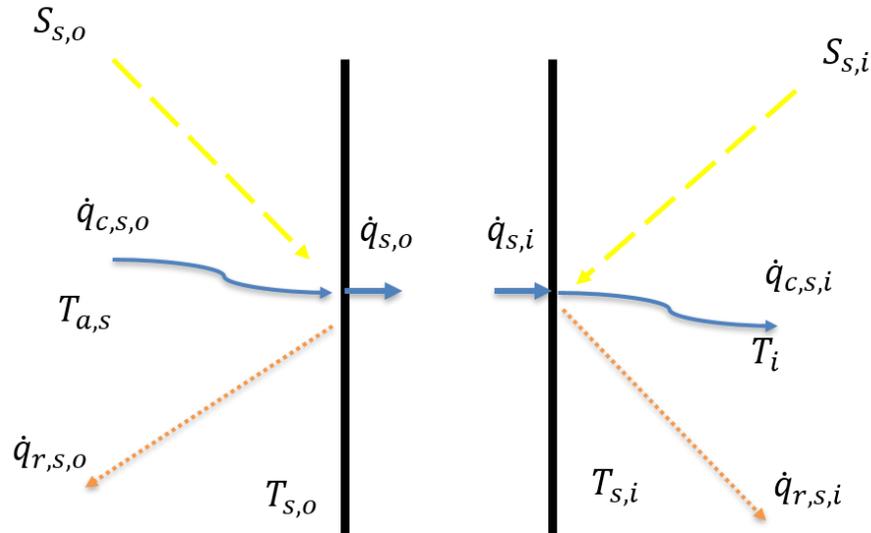


Figura 3.2 Comportamiento térmico de una pared.

donde $S_{s,i}$ es el flujo de calor de radiación absorbida en la superficie interior, $S_{s,o}$ es el flujo de calor de radiación absorbida en la superficie exterior, $\dot{q}_{r,s,i}$ es la transferencia de calor por radiación neta con todas las demás superficies dentro de la zona, $\dot{q}_{r,s,o}$ es la transferencia de calor por radiación neta con todas las demás superficies dentro de la zona, $\dot{q}_{w,g,i}$ es el flujo de calor definido por el usuario hacia la pared o la superficie de la ventana, $\dot{q}_{s,i}$ es la conducción del flujo de calor desde la pared hacia la superficie interior, $\dot{q}_{s,o}$ es la conducción del flujo de calor desde la pared en la superficie exterior, $\dot{q}_{c,s,i}$ es el flujo de calor por convección de la superficie interior al aire, $\dot{q}_{c,s,o}$ es el flujo de calor por convección a la superficie exterior desde el límite/ambiente, $T_{s,i}$ es la temperatura en la superficie interna, $T_{s,o}$ es la temperatura en la superficie exterior.

Los muros son modelados de acuerdo con las relaciones obtenidas de las funciones de transferencia de Mitalas y Arseneaul (1999), las cuales están definidas de superficies a superficie. Para cualquier tipo de muro, en donde la conducción de calor en las superficies está representada por las Ecuaciones (3.2.3 y 3.2.4):



$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} c_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} d_s^k \dot{q}_{s,i}^k \quad (3.2.3)$$

$$\dot{q}_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} d_s^k \dot{q}_{s,o}^k \quad (3.2.4)$$

Las ecuaciones (3.2.3 y 3.2.4), son las relaciones de los flux de calor obtenidas a partir de las relaciones de las funciones de transferencia. El superíndice k se refiere al término en la serie de tiempo. La hora actual es k=0, la hora anterior es para k=1, etc. El usuario especifica la base de tiempo en estos cálculos dentro de la descripción de la subrutina de la edificación. Los coeficientes de las series de tiempo (a_s , b_s , c_s , y d_s) se determinan dentro del programa en la subrutina de la edificación utilizando rutinas de referencia. En la **Figura 3.3** se muestran los principales fenómenos que intervienen en el comportamiento térmico de una edificación.

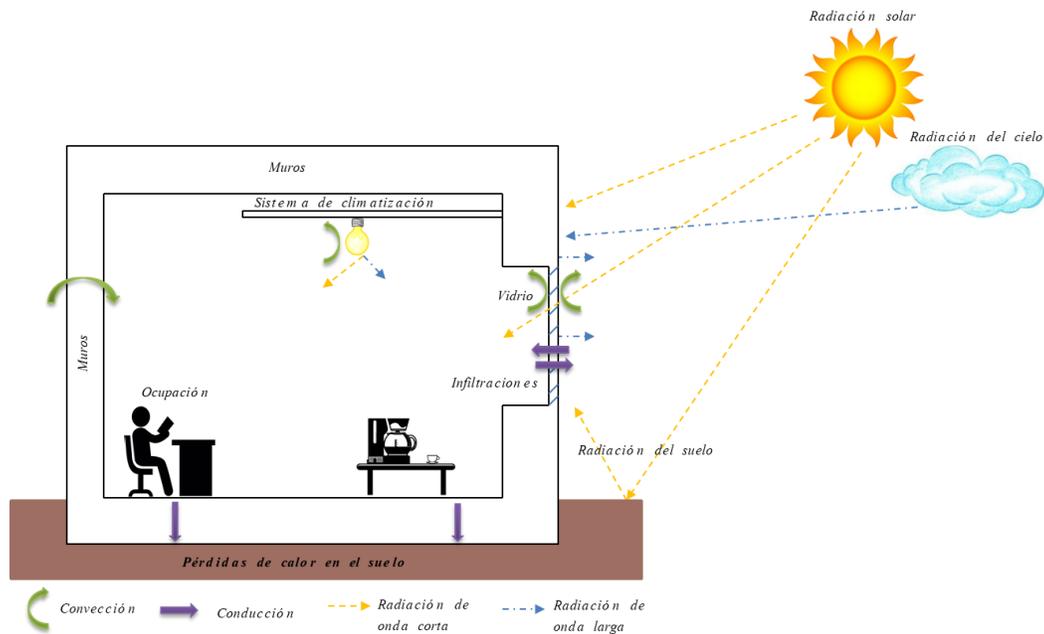


Figura 3.3 Transferencia de calor y masa en edificaciones.



3.3 Modelo fotovoltaico

Una ventana está expuesta a diferentes mecanismos de transferencia de calor como consecuencia a la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior de un cerramiento. Debido a esa diferencia, el calor fluye desde el foco con mayor temperatura al de menos temperatura, es decir, en invierno se pierde el calor desde el interior hasta el exterior y en verano el flujo se produce en sentido opuesto. El método de transferencia de calor por convección en un sistema vidriado se da mediante un gas que se encuentra entre dos paredes verticales a diferentes temperaturas, la parte del gas cercana a la superficie más caliente subirá y la de menor temperatura baja debido a la cercanía con la otra superficie haciendo descender al gas, provocando variaciones en la densidad del gas. La conducción en una ventana se da mediante el gas que queda atrapado entre las dos paredes verticales de la ventana. La transferencia de calor por radiación en sistemas vidriados se produce por los rayos solares incidentes sobre el cristal exterior, aumentando la temperatura y el flujo de calor hacia el interior. En la **Figura 3.4** se puede observar los flujos de calor y las temperaturas que caracterizan el comportamiento térmico de cualquier ventana.

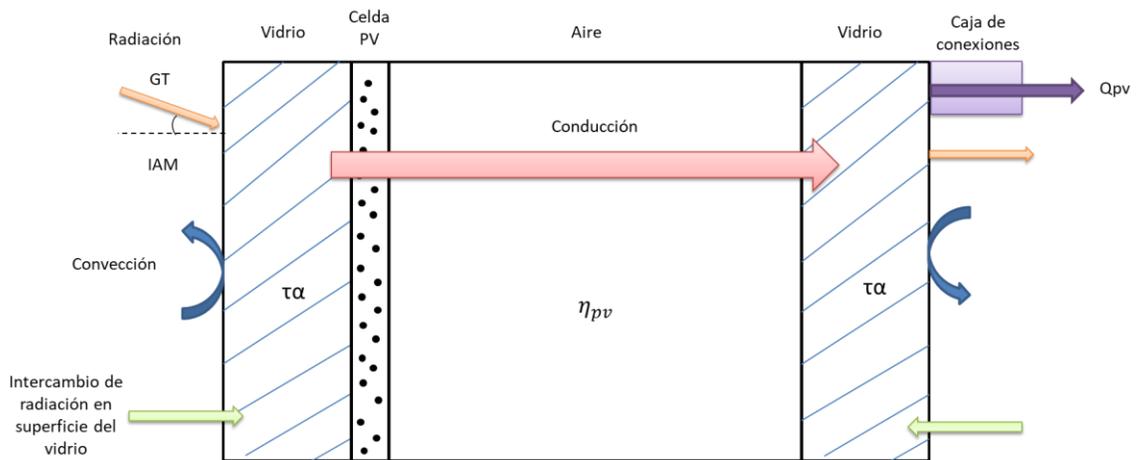


Figura 3.4 Modelo físico del comportamiento y la descomposición de la ventana fotovoltaica.



El efecto fotovoltaico es la transformación directa de la luz solar en electricidad y se obtiene cuando la energía de los rayos solares incide en un dispositivo semiconductor llamado celda solar, la cual absorbe la energía y la transforma directamente en electricidad de tipo corriente directa (CD). En la **Figura 3.5** se observa los componentes de la VFV.

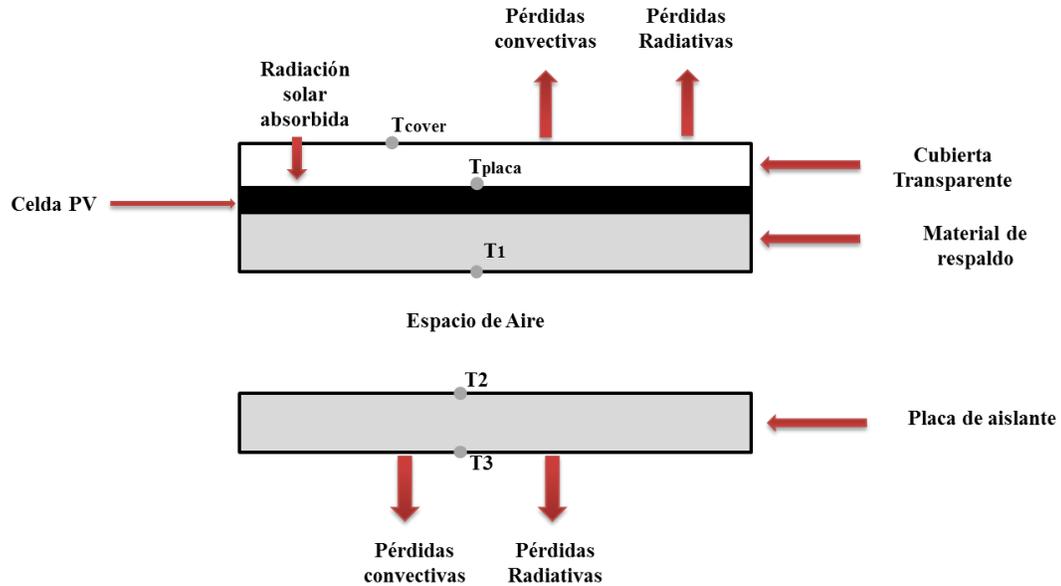


Figura 3.5 Componentes de la ventana fotovoltaica.

Para la modelación fotovoltaica de la ventana, se considera el ángulo de incidencia modificado (IAM por sus siglas en inglés), la eficiencia del colector y la potencia fotovoltaica dada por la Ecuación (3.3.1).

$$IAM = \frac{(\tau \alpha)}{(\tau \alpha)_n} = \frac{G_{bT} \frac{(\tau \alpha)_b}{(\tau \alpha)_n} + G_d \frac{(1 + \cos\beta)}{2} \frac{(\tau \alpha)_s}{(\tau \alpha)_n} + G_h \rho_g \frac{(1 + \cos\beta)}{2} \frac{(\tau \alpha)_g}{(\tau \alpha)_n}}{G_T} \quad (3.3.1)$$

$$\eta_{PV} = \eta_{nominal} X_{temp\ celda} X_{radiación} \quad (3.3.2)$$

$$Q_{PV} = Área (\tau \alpha)_n IAM G_T \eta_{PV} \quad (3.3.3)$$

donde:

$$X_{temp\ celda} = 12 + Eff_T (T_{PV} - T_{ref}) \quad (3.3.4)$$



$$X_{radiación} = 12 + Eff_G(G_T - G_{ref}) \quad (3.3.5)$$

El balance de energía de toda la VFV se expresa de la siguiente manera.

$$Q_{absorbida} + Q_{PV} = Q_u + Q_{pérdidas\ conv} + Q_{pérdidas\ rad} + Q_{pérdidas\ traseras} \quad (3.3.6)$$

Despejando la potencia fotovoltaica de la Ecuación (3.3.7) el balance de energía queda de la siguiente manera.

$$Q_{PV} = Q_u + Q_{pérdidas\ conv} + Q_{pérdidas\ rad} + Q_{pérdidas\ traseras} - Q_{absorbida} \quad (3.3.7)$$

Donde $\tau \alpha$ es la transmitancia-absortancia producto del colector solar, G_{bT} es la radiación directa incidente (W/m^2), G_d es la radiación incidente del cielo difuso (W/m^2), G_h es la radiación horizontal difusa (W/m^2), G_{ref} es la radiación solar referente del estándar de la eficiencia fotovoltaica (W/m^2), G_T es la radiación incidente total en la superficie del colector (W/m^2), ρ_g es la reflectancia del suelo, $X_{temp\ celda}$ es el multiplicador para la eficiencia de la celda fotovoltaica en función de la temperatura de la celda, $X_{radiación}$ es el modificador de la eficiencia fotovoltaica en función de la radiación incidente, Eff_T es modificador de la eficiencia fotovoltaica en función de la temperatura de la colector, Eff_G es el modificador de la eficiencia fotovoltaica en función de la radiación solar incidente.

Relación ventana-pared

Para conocer la relación de área de ventana en un cerramiento de una edificación es necesario considerar el área de pared total (m^2) y tener definidos las proporciones de altura y ancho de la pared de referencia y de la ventana, forma arquitectónica y orientación. En la **Figura 3.6** se presenta de forma gráfica la relación de área de ventana-pared.

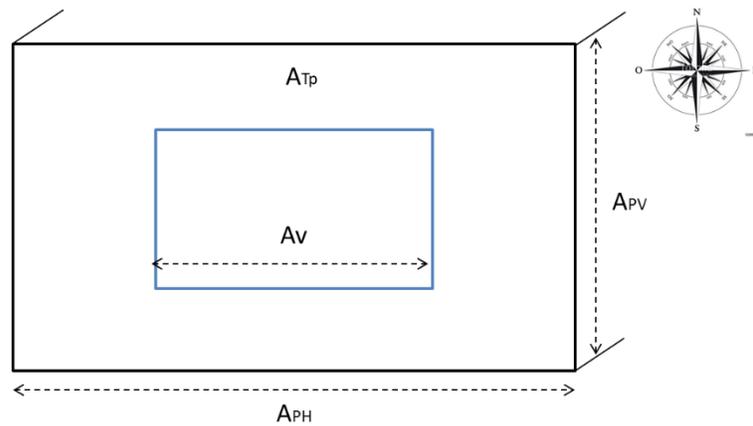


Figura 3.6 Relación de área de ventana-pared.

La ecuación que rige esta relación está dada por la Ecuación (3.3.8).

$$\mathbf{Ra} = \left(\frac{A_v}{A_{Tp}} \right) \times 100 = \left[\frac{A_v}{(A_{PH} * A_{PV}) - A_v} \right] \times 100 \quad (3.3.7)$$

$$\mathbf{A_{Tp}} = (A_{PH} * A_{PV}) - A_v \quad (3.3.8)$$

donde Ra es la relación de área de ventana-pared (%), A_v es el área de ventana (m^2), A_{PH} es el área de pared horizontal (m), A_{PV} es el área de pared vertical (m), A_{Tp} es el área total de la pared (m^2).



3.4 Modelo de confort térmico

El balance de calor con enfoque estático está basado en los experimentos de Fanger para una cámara climática, en el cual se controló una muestra de 1396 jóvenes daneses utilizando un modelo de transferencia de calor en estado estable. El modelo de confort permite determinar el Voto Medio Predicho (PMV) y el Porcentaje de Personas Insatisfechas (PPD), descrito en los estándares ASHRAE 55-2017 e ISO 7730 respectivamente. Estos parámetros permiten conocer los niveles de sensación térmica de las personas que se encuentran en una habitación cerrada. El confort térmico depende de diferentes variables las cuales son la ropa, la actividad física, la temperatura, la humedad y la velocidad del aire.

El **PMV** es un índice que refleja el valor medio de los votos emitidos por un grupo de personas respecto a una situación dada en una escala de sensación térmica de 7 niveles (frío, fresco, ligeramente fresco, neutro, ligeramente caluroso, caluroso, muy caluroso), basado en el equilibrio térmico del cuerpo humano. El **PMV** se determina con la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned}
 PMV = & [0.303 e^{-0.36 * M} + 0.028 \\
 & * \{(M - W) - 3.05 \times 10^{-3} * [5733 - 6.99(M - W) - Pa] \\
 & - 0.42[(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} * M(5867 - Pa) \\
 & - 0.0014M(34 - Ta) - 3.96 \times 10^{-8} * F_{cl}[Ta + 273]^4 \\
 & - [Tr + 273]^4 - F_{cl} * h_{cl} * [t_{cl} - Ta]\}
 \end{aligned} \tag{3.4.1}$$

$$\begin{aligned}
 t_{cl} = & 35.7 - 0.028(M - W) \\
 & - l_{cl} \{3.96 \times 10^{-8} F_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (Tr + 273)^4 - F_{cl} * h_{cl} \\
 & * [t_{cl} - Ta]]\}
 \end{aligned} \tag{3.4.2}$$

$$h_{cl} = \{2.38 |t_{cl} - Ta|^{0.25} \quad si \quad 2.38 |t_{cl} - Ta|^{0.25} > 12.1 \sqrt{Va} \quad 12.1 \sqrt{Va} \tag{3.4.3}$$

$$si \quad 2.38 |t_{cl} - Ta|^{0.25} < 12.1 \sqrt{Va} \tag{3.4.4}$$

$$F_{cl} = \{1.00 + 1.290 * l_{cl}\} \tag{3.4.5}$$

$$si \quad l_{cl} \leq 0.078 \frac{m^2}{W} \quad 1.05 + 0.645 * l_{cl} \tag{3.4.6}$$

$$si \quad l_{cl} > 0.078 \frac{m^2}{W} \tag{3.4.7}$$

$$Tr = TG + 1.9 \sqrt{Va} (TG - TS) \tag{3.4.8}$$



El **PPD** predice el porcentaje de personas insatisfechas mediante las sensaciones térmicas, mediante la escala de los siete puntos y se determina con la siguiente ecuación.

$$PPD = 100 - 95e^{(-0.03353PMV^4 - 0.2179PMV^2)} \quad (3.4.9)$$

donde M es la tasa metabólica en (W/m^2), W es la potencia mecánica efectiva en (W/m^2) (se puede estimar en 0), l_{cl} es el aislamiento de la ropa en (m^2k/W), F_{cl} es el factor de superficie de la ropa, T_a es la temperatura del aire interior en ($^{\circ}C$), T_r es la temperatura radiante media en ($^{\circ}C$), TG es la temperatura de globo ($^{\circ}C$), TS es la temperatura seca ($^{\circ}C$), V_a es la velocidad del aire interior en (m/s), P_a es la presión parcial del vapor de agua en Pascales, h_{cl} es el coeficiente de transmisión de calor por convección (W/m^2k) y t_{cl} es la temperatura de la superficie de la ropa ($^{\circ}C$). En la **Figura 3.7** se muestra el modelo de Fanger (PMV/PPD) para predecir el comportamiento del confort térmico en estado estable.

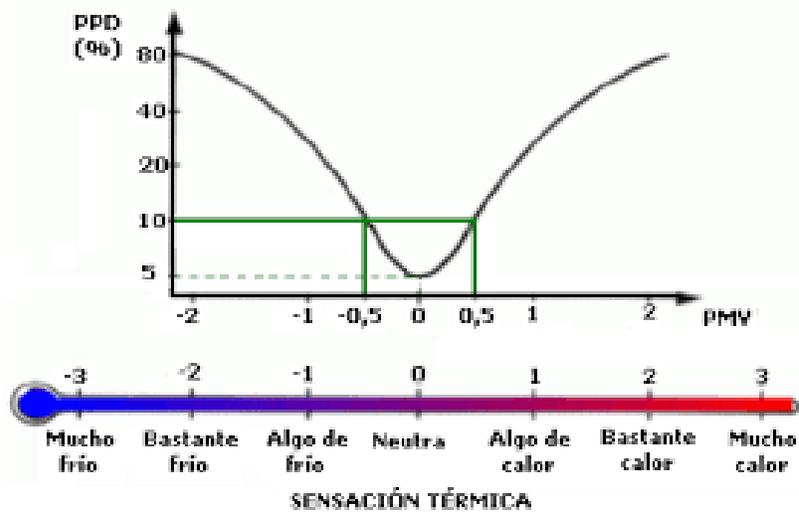


Figura 3.7 Relación entre el PMV y el PPD con el método de Fanger.



3.5 Modelo de grados día

Los grados día también llamado como Días-Grados, es un parámetro importante para la definición de las estrategias de diseño, los requerimientos de climatización ya sea natural o artificial, y por lo tanto la demanda de energía de una edificación. Los grados día son la diferencia que hay entre la temperatura base de referencia y la temperatura media diaria exterior (Freixanet, 2010).

El cálculo de los grados día se lleva a cabo en la siguiente ecuación.

$$GD = n (T - T_{base}) \quad (3.5.1)$$

Donde GD son los grados día en ($^{\circ}C$), n es el número de días del mes, T_{base} es la temperatura base (límite de referencia, inferior o superior de confort en ($^{\circ}C$), T es la temperatura media diaria en ($^{\circ}C$).

Con base en la zona de confort se pueden tener dos tipos de grados día las de calentamiento y las de enfriamiento como se puede ver en la **Figura 3.8**.

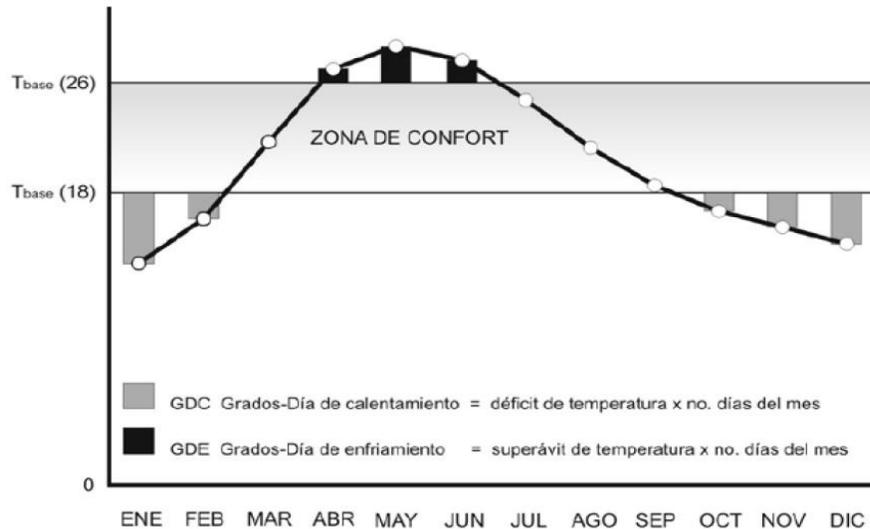


Figura 3.8 Grados Día de enfriamiento y calentamiento.



3.6 Modelo ambiental

En la producción de la energía eléctrica mediante la quema de combustibles fósiles, se emiten gases de efecto invernadero, siendo el más común el dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}). Para conocer el cálculo de prevención de CO_{2e} se utiliza un factor que indica la cantidad de dióxido de carbono equivalente que se produce en un país por kilovatio-megavatio/hora de electricidad. Según la Comisión Reguladora de Energía (CRE) el factor de emisión para el cálculo es de $0.582 \text{ ton}CO_2/MWh$. A continuación, se presenta la ecuación a utilizada en el cálculo de la prevención de CO_{2e} .

$$CO_{2e} = C_e * F_pCO_2 \quad (3.6.1)$$

donde CO_{2e} es la cantidad de dióxido de carbono en (*kg o Ton*) equivalentes, C_e es el consumo de electricidad en (*kWh o MWh*) en un periodo de un año y F_pCO_2 es el factor de prevención de dióxido de carbono en (*kg/kWh o Ton/MWh*).



Capítulo 4. Desarrollo y pruebas de la plataforma de simulación

En esta sección se presenta la construcción y las pruebas de la plataforma de simulación, que se subdividen en plan experimental numérico, construcción del simulador y la validación del simulador.



4.1 Plan de experimentos numéricos

En el diseño de experimentos numéricos se pretende determinar las cargas térmicas anuales (por sus siglas en inglés Q_c , Q_{pv}), el Porcentaje de Personas Insatisfechas (por sus siglas en inglés PPD), el Voto Medio Predicho (por sus siglas en inglés PMV) y los grados día, considerando el tipo de ventanas fotovoltaicas (VFV), sus áreas de captación y el tipo de ventilación dentro de la edificación. El plan experimental se parametriza el área de ventanas (bloque de estudio 1), y el tipo de ventilación, donde se considera con aire acondicionado (bloque de estudio 2) y con ventilación natural (bloque de estudio 3), como se muestra en la **Figura 4.1**.

En el primer bloque “Variación de área de ventana” se estudian las cargas térmicas y la energía fotovoltaica, considerando una ventana normal de vidrio simple en el intervalo de relación de área de ventana del 7-95%, donde la norma NOM-008-ENER-2001 recomienda una relación del 40%. Seguido, se varía el tipo de VFV donde se considera una de telurio de cadmio y otra de silicio amorfo, en el mismo intervalo de relación de área donde las variables de respuesta son las cargas térmicas de enfriamiento y fotovoltaicas (Q_c , Q_{pv}). Las salidas del estudio de variación de parámetros son las entradas para el bloque dos y tres.

En el segundo bloque “Ventilación con aire acondicionado” se determina el confort térmico, en el cual se realiza la corrida para el mismo intervalo de relación de área para cada una de las ventanas con aire acondicionado donde las segundas variables de respuesta son el voto medio predicho, porcentaje de personas insatisfechas.

En el tercer bloque “Ventilación natural” se determinan los grados días, en el cual se realiza la corrida para el mismo intervalo de relación de área de cada una de las ventanas, utilizando ventilación natural, siendo la tercera variable de respuesta el voto medio predicho.

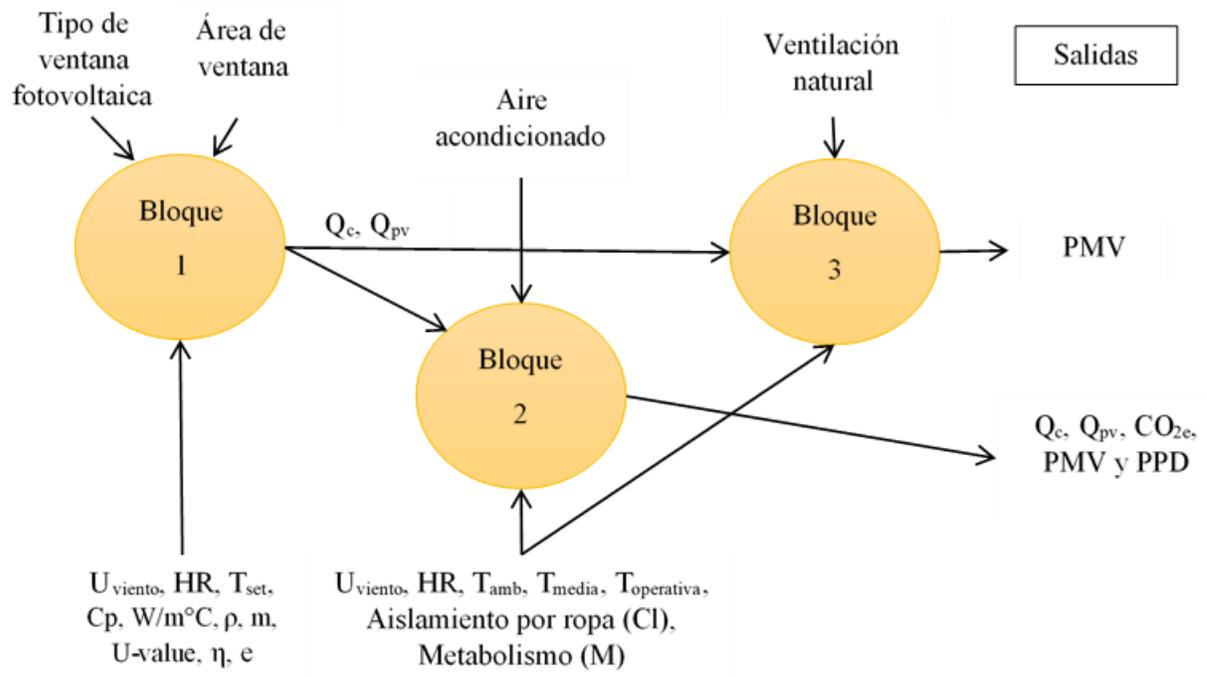


Figura 4.1 Plan de experimento numéricos.



4.2 Construcción del simulador

En esta sección se presenta la construcción del simulador, el diagrama de construcción del simulador y la configuración de la plataforma de simulación. La construcción del simulador se basa en las soluciones de balances de energía utilizando los modelados de las funciones de transferencia de Mitalas y Arseneault (1999), en el modelo de Fanger para el confort térmico y el factor de emisión de dióxido de carbono de la Comisión Reguladora de Energía (CRE). El programa permite determinar en una habitación con ventanas fotovoltaicas las cargas térmicas de enfriamiento (Q_c) y las cargas fotovoltaicas emitidas por las ventanas fotovoltaicas (Q_{pv}), las temperaturas internas, el voto medio predicho (**PMV**) y el porcentaje de personas insatisfechas (**PPD**) y se considera la Q_{pv} para la obtención del dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) emitidos a la atmosfera. La construcción del simulador se llevó a cabo en TRNSYS17[®].

4.2.1 Diagrama de flujo general

El simulador permite determinar el Q_c , Q_{pv} , PMV y PPD, con base en el Q_{pv} se determina el CO_{2e} en una habitación tipo hotel con ventanas fotovoltaicas integradas, en la Riviera Maya, México. Las condiciones climatológicas¹ del lugar son las entradas del simulador, siendo la velocidad del aire, el porcentaje de humedad, temperatura ambiente, entre otros. En la edificación se consideran las características termo-físicas de los materiales de construcción como lo son la capacidad calorífica (Cp), la densidad, la masa, la absorptividad, entre otros. En la VFV se consideran sus características térmicas, ópticas y su eficiencia². En la **Figura 4.2** se muestra un diagrama de flujo utilizado para la construcción de la plataforma de simulación.

¹ En el “Capítulo 2 Localización y muestra Sección 2.2 Localización”. Encontrarás la descripción del lugar de estudio.

² En el “Capítulo 2. Localización y muestra Sección 2.1 Muestra”. Encontrarás la descripción de la edificación utilizada para el estudio.



En el proceso se utilizan los modelos³ de simulación basados en los balances de energía, funciones de transferencia de Mitalas y Arseneault (1999), el método de Fanger para el confort térmico y las toneladas de CO_{2e} dada por la Comisión Reguladora de Energía (CRE). Para corroborar que la plataforma de simulación esté trabajando adecuadamente, se resuelven los ejercicios de BESTest 900 y 900FF donde se determinan las temperaturas internas y las cargas térmicas en una edificación, con una ventana normal de $6 m^2$. Seguido, se realiza el ejercicio de Martínez (2019) permitiendo determinar las cargas térmicas, las temperaturas internas y la energía eléctrica generada por la VFV integrada a una edificación con un área de ventana de $1 m^2$. Estos ejercicios nos permiten familiarizarse con el software y de cada uno de sus componentes. Para saber si la herramienta de simulación es adecuada, la desviación porcentual entre los ejercicios y lo obtenido según ASHRAE 134 A deberá ser menor del 10%. El modelado de la transferencia de calor en la edificación se codifica en TRNSYS 17[®], como se muestra en la siguiente sección.

³ En el “Capítulo 3 Fundamentos teóricos matemáticos”. Encontrarás los modelos matemáticos utilizados para el desarrollo del trabajo.

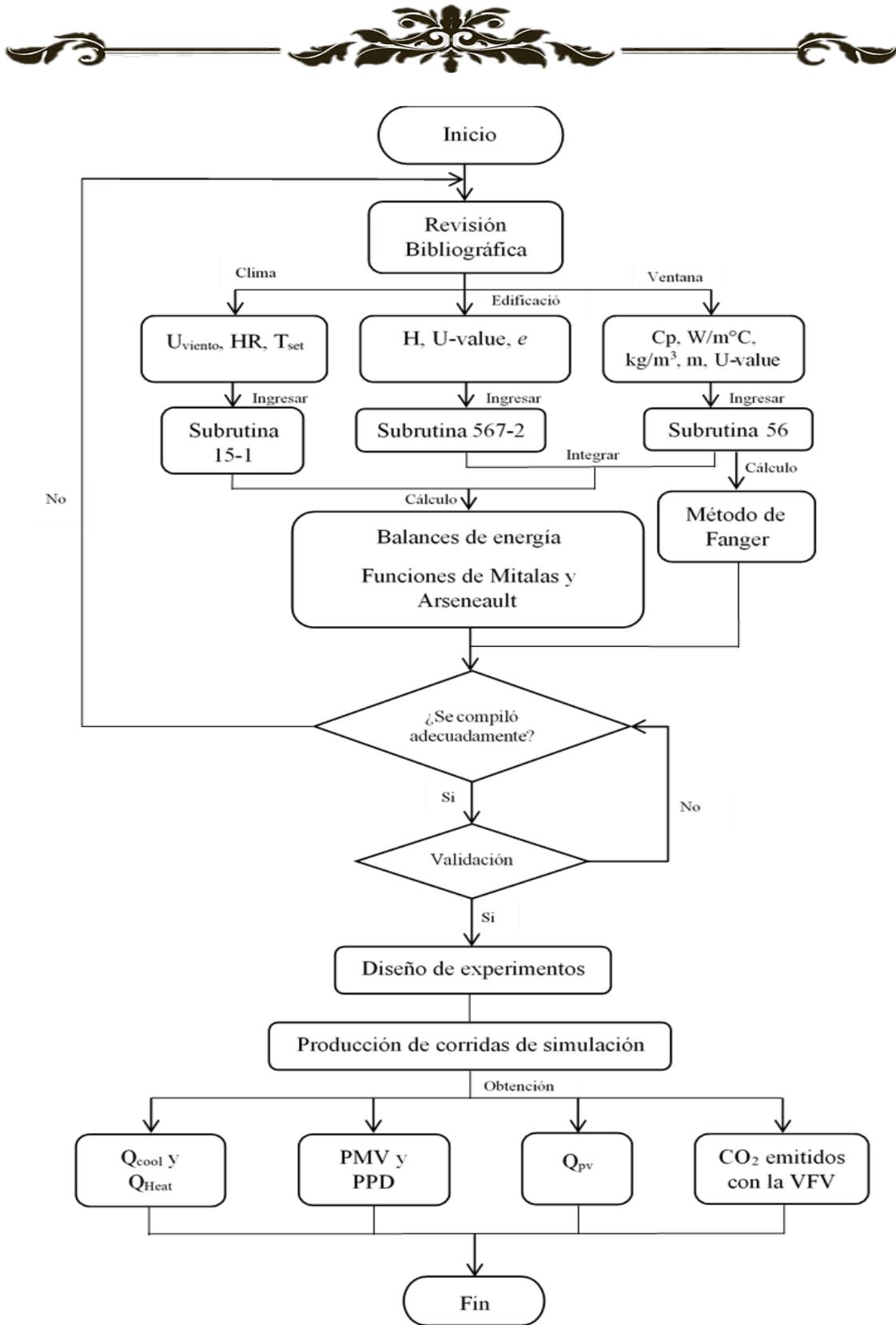


Figura 4.2 Diagrama de flujo del simulador.



La construcción y simulación de la plataforma de simulación inicia con la ingesión de los datos climatológicos de la zona de estudio, posteriormente, se realiza la construcción del modelo arquitectónico de estudio, se especifican las características térmicas y físicas de cada material de construcción que conforma al modelo arquitectónico. Se construye la construcción de las ventanas fotovoltaicas (VFV) especificando sus características termo-ópticas. Se realiza la simulación y visualización de los resultados obtenidos en términos de cargas térmicas, generación energética por las VFV y su efecto en el confort térmico. En la **Figura 4.3** se muestra la metodología general de construcción y simulación de la plataforma de simulación en TRNSYS 17[®].

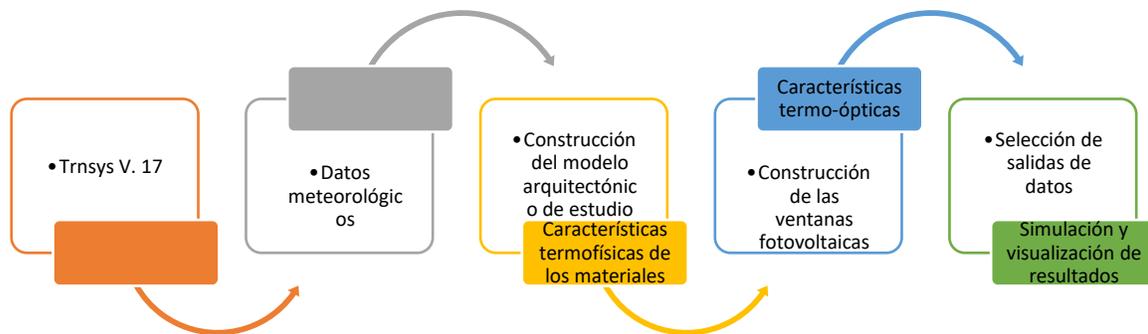


Figura 4.3 Proceso de construcción y simulación de la plataforma.

TRNSYS es un programa de simulación de cálculo que permite la resolución transitoria de cualquier tipo de sistema, centrándose en la evaluación del comportamiento térmico y eléctrico de sistemas solares. TRNSYS funciona mediante las conexiones gráficas de los componentes del sistema (types) por medio del interfaz visual Simulation Studio. Cada uno de los componentes del sistema se describe con un modelo matemático mediante lenguaje de programación Fortran y lleva asociado un Proforma en el Simulation Studio. Éste describe el componente como una caja negra por medio de entradas, salidas y parámetros. Las salidas de cada componente actúan como entradas de otros.



4.2.2 Configuración de la plataforma TRNSYS 17®

La configuración de la plataforma de simulación se basa en las subrutinas “15-2, 33e, 69b” en los cuales se le asignan solamente datos climáticos, estos datos son exclusivamente del lugar de estudio, ya sea humedad, temperatura de bulbo seco, temperatura del cielo, la radiación, etc. Esto para determinar el comportamiento de la temperatura y las cargas térmicas dentro del cuarto a evaluar. En la **Figura 4.4** se puede observar la primera sección de la plataforma de simulación partiendo de los datos climatológicos.

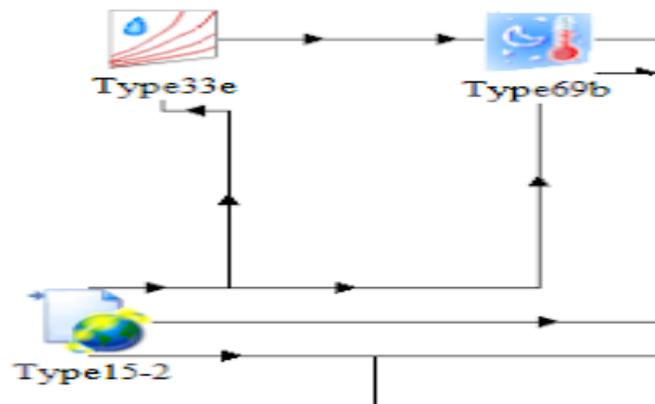


Figura 4.4 Sección climatológica del programa de simulación.

Los datos climatológicos obtenidos en las subrutinas “15-2, 33e, 69b” son ingresados a las subrutinas “15-2, CUARTO y VFV”. Una vez ingresados los datos climatológicos, se ingresan las características ópticas, térmicas y físicas de los materiales de construcción y de las ventanas. Esta segunda sección consiste en la utilización de la subrutina “CUARTO” en el cual se lleva a cabo la simulación de toda la edificación de estudio, en donde se incluyen las características térmicas y físicas de los materiales de construcción, los datos ingresados a la subrutina se encuentran bajo las normas mexicanas NOM-008-ENER-2001 “Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales”, así como sus dimensiones. La subrutina “VFV” se encarga de la generación de la energía eléctrica fotovoltaica y de la disminución de las cargas térmicas de la edificación, los datos ingresados a la subrutina se encuentran bajo las normas mexicanas NOM-024_ENER-2010



“Características térmicas y ópticas del vidrio y sistemas vidriados para edificaciones”⁴. En la **Figura 4.5** se muestra la segunda parte y más importante del programa de simulación.

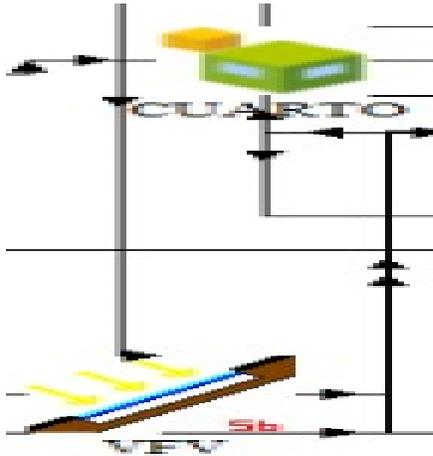


Figura 4.5 Sección de la simulación de la edificación con la integración del sistema fotovoltaico.

La subrutina de cálculo “GRADOS_DIA_VN” en el cual se realizó el cálculo de los grados día con ventilación natural. La visualización de los resultados con ayuda de las subrutinas “RADIACIÓN_ABS, Q&PV, CONFORT, TEMPERATURAS y GRADOS DÍA” se observa el comportamiento mediante gráficos de las cargas térmicas, de la generación de energía eléctrica fotovoltaica, la temperatura interna de la habitación, el confort térmico y los grados día. El cálculo de las cargas térmicas y la generación energética se basa en los balances de energía y las funciones de transferencia de Mitalas y Arseneault (1999), el método de Fanger para el confort térmico y las toneladas de CO_{2e} dada por la Comisión Reguladora de Energía (CRE). Posteriormente, imprimen de los resultados con la ayuda de la subrutina “25a” en el cual se manipulan los resultados en Excel o Block de notas. En la **Figura 4.6** se muestra la última sección del programa de simulación, en donde se lleva a cabo la integración de los resultados con ayuda de las subrutinas “24 y 24-2” permiten integrar la radiación absoluta, las cargas térmicas y los grados día.

⁴ Ver Capítulo 2. Localización y muestra, sección 2.1.1 Edificación y 2.1.2 Características de la ventana.

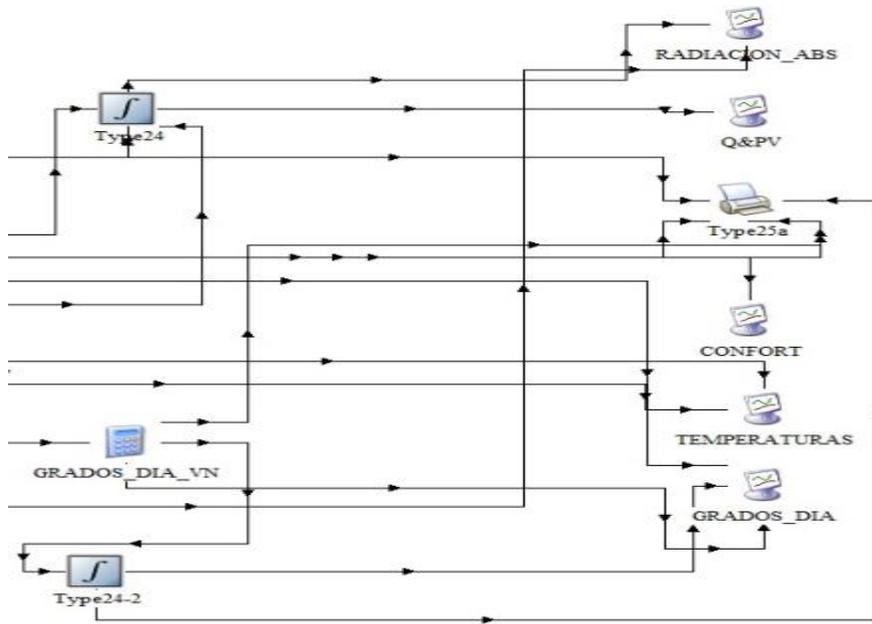


Figura 4.6 Sección de la visualización e impresión de los resultados.

La integración de cada una de las partes ya mencionadas anteriormente forma la plataforma de simulación, marcado en el recuadro amarillo la sección de datos climatológicos, en azul la construcción de la edificación y de la ventana, en verde el cálculo de las variables de salida y en naranja la impresión y visualización de los resultados. En la **Figura 4.7** se muestra la configuración del software de simulación en TRNSYS 17®.

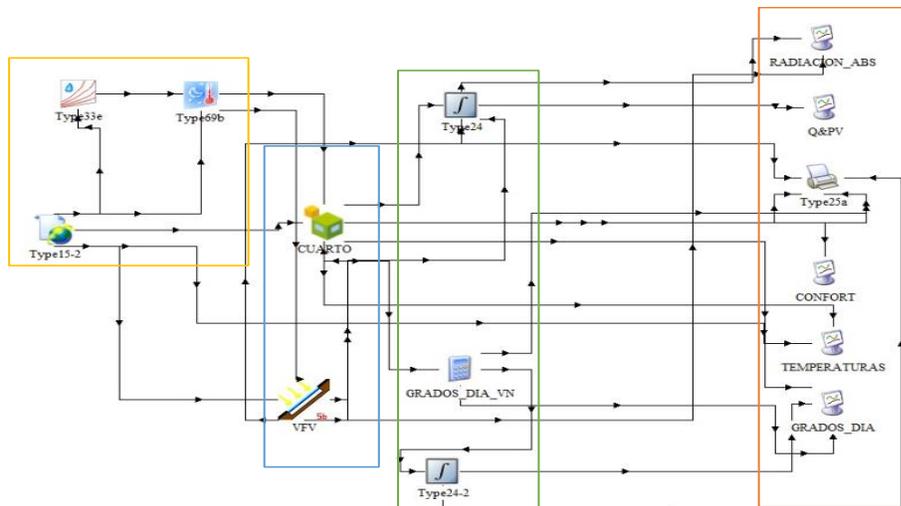


Figura 4.7 Configuración de la plataforma de simulación en TRNSYS 17®.



4.3 Validación del Simulador

En esta sección se muestran las características de las edificaciones utilizadas para la validación del programa y para el desarrollo de este trabajo, así como también las características de las ventanas utilizadas. El programa se verificó con tres casos, donde los comparativos se muestran a continuación. En la validación del programa de simulación se determinaron las temperaturas internas en una habitación, las cargas térmicas, la producción de energía con una VFV y la integración de todos estos casos en una edificación con una VFV. La herramienta de simulación debe presentar errores porcentuales menores del 10% según los estándares la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (por sus siglas en inglés ASHRAE 134 A). Esto nos permite familiarizarnos con el software y conocer cada uno de sus componentes.

4.3.1 Descripción caso BESTest 900FF y BESTest 900

En la simulación se realizaron diversas problemáticas, donde se abarca desde la obtención de las temperaturas internas en una habitación, las cargas térmicas y producción de energía fotovoltaica, hasta realizar la integración de estos casos. En la **Figura 4.8** se muestra la metodología realizada para la familiarización con el software.

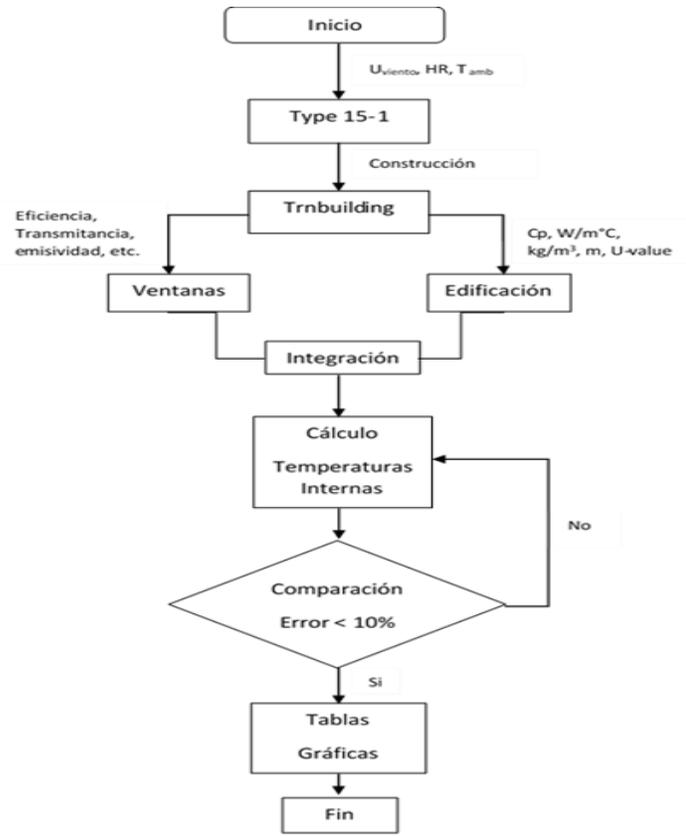


Figura 4.8 Modelo gráfico de la edificación propuesta por BESTest 900FF y BESTest 900.

A continuación, se presentan las representaciones gráficas de los modelos de la edificación establecida por el BESTest 900FF y BESTest 900.

La edificación para evaluar obtenida de BESTest 900FF y BESTest 900 la cual consta con una altura de 2.7 m, largo de 6 m y ancho de 8 m y un área de ventana 6 m², con una infiltración de 0.5. En la **Figura 4.9** se muestra la edificación a evaluar.

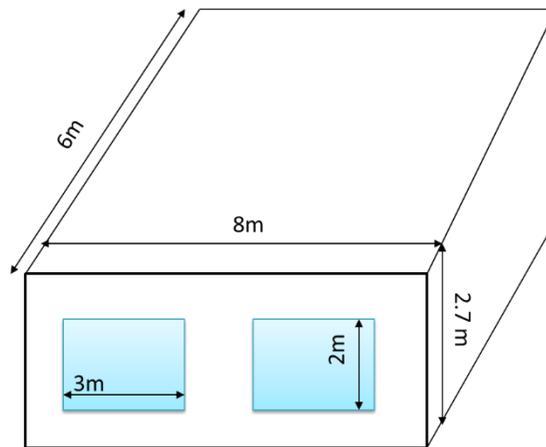


Figura 4.9 Modelos gráfico de la edificación propuesta por BESTest.

El lugar de estudio utilizado para la verificación del programa de simulación es Denver, Colorado localizado en Estados Unidos de América. En la **Tabla 4.1** se muestran las características del lugar de estudio, utilizadas en la verificación.

Tabla 4.1 Resumen del lugar y del clima.

Propiedad	Valor
Formato del archivo de clima	TMY
Tipo de clima	Invierno frío claro / Verano cálido seco
Latitud	39.8º norte
Longitud	104.9º oeste
Altitud	1609 m
Zona horaria	7
Reflectividad del suelo	0.2
Sitio	Plano, sin obstrucciones, localizado exactamente en la estación climática
Velocidad del viento promedio anual	4.02 m/s
Velocidad del viento máxima anual	14.89 m/s
Promedio anual de la temperatura de bulbo seco	9.71ºC
Temperatura mínima anual de bulbo seco	-24.39ºC
Temperatura máxima anual de bulbo seco	35.00ºC

En la **Tabla 4.2** se muestra el tipo de materiales utilizados en la verificación, así como sus propiedades termo-físicas, para cada sección de la construcción de la edificación (paredes, piso y techo).



Tabla 4.2 Resumen de materiales y sus propiedades termo-físicas.

PAREDES				
Elemento	Conductividad	Capacidad	Densidad	Espesor
	W/m K	J/kg K	kg/m³	m
Bloque concreto	0.510	1000	1400	0.100
Aislante	0.040	1400	10	0.0615
Capa madera	0.140	900	530	0.0009
PISO				
Losa de concreto	1.130	1000	1400	0.080
Aislamiento	0.040	1400	10	1.007
TECHO				
Recubrimiento de yeso	0.160	840	950	0.010
Fibra de Vidrio	0.040	840	12	0.1118
Capa madera	0.140	900	530	0.019

Esta edificación está conformada con dos ventanas de doble acristalamiento de 1/8 de pulgada y presenta un gap de 13.0 mm, con un coeficiente U del aire de 3.0 W/m²K. En la **Tabla 4.3** se presentan las propiedades ópticas utilizadas en la ventana propuesta.



Tabla 4.3 Propiedades ópticas de la ventana utilizada en BESTest.

PROPIEDADES	VALOR
Coefficiente de extinción	0.0196/mm
Número de paneles	2
Espesor del vidrio (vidrio estándar de 1/8")	3.175 mm
Espesor del espacio de aire (gap)	13mm
Índice de refracción	1.526
Transmisión de haz directo normal a través de un panel en el aire	0.86156
Conductividad del vidrio	1.6 W/mK
Conductancia para cada panel de vidrio	333 W/m ² K (R- .003 m ² K/W)
Coefficiente combinado de radiación y convección del espacio de aire (h_s)	6.297 W/m ² K (R- .1588 m ² K/W)
Coefficiente combinado de la superficie exterior (h_o)	21.00 W/m ² K (R- .0476 m ² K/W)
Coefficiente combinado de la superficie interior (h_i)	8.29 W/m ² K (R- .1206 m ² K/W)
Valor U del aire interior al aire ambiente	3.0 W/m ² K (R- .333 m ² K/W)
Emisión de infrarrojos hemisféricos de vidrio ordinario sin recubrimiento	0.84 (use 0.9 para la simplicidad de la entrada. Si su programa debe usar 0.84 esto es aceptable)
Densidad de vidrio	2500 kg/m ³
Calor específico del vidrio	750 J/kg K
Coefficiente de sombreado de doble panel (en incidencia normal)	0.916
Coefficiente de ganancias de calor solar de doble panel (en incidencia normal)	0.787



4.3.2 Descripción caso Martínez (2019)

A continuación, se presenta las representaciones gráficas de los modelos de la edificación establecida por el ejercicio de Martínez (2019). En la **Figura 4.10** se muestra la edificación a evaluar obtenida de Martínez (2019) la cual consta con una altura de 3 m, largo de 4 m y ancho de 5 m y un área de ventana 1 m², con una infiltración de 0.5.

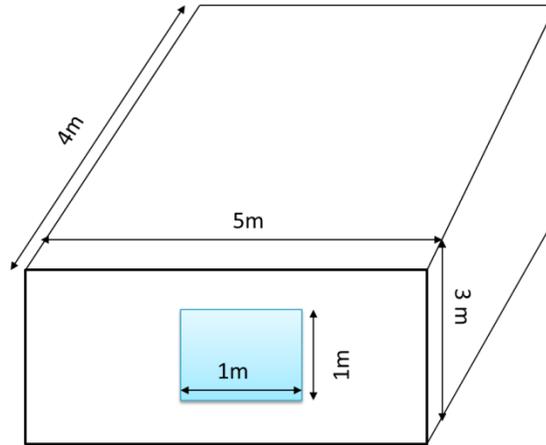


Figura 4.10 Modelos gráfico de la edificación propuesta por Martínez, 2019.

Las características de los materiales que componen a la edificación utilizados en las paredes, piso y techos, así como también los espesores de cada material en la construcción de cada uno de sus componentes de la edificación, como la conductividad, la capacidad calorífica, la densidad y el espesor. En la **Tabla 4.4** se muestra las características térmicas de los materiales

Tabla 4.4 Propiedades ópticas de la ventana utilizada en Martínez, 2019.

PAREDES				
Elemento	Conductividad	Capacidad	Densidad	Espesor
	<i>W/m K</i>	<i>J/kg K</i>	<i>kg/m³</i>	<i>m</i>
Mortero	2.52	1.09	1249	0.050
Block	3.24	0.3	1400	0.110
Mortero_2	3.132	1.09	1249	0.050
Impermeabilizante	0.612	1	1200	0.050



PISO				
Concreto_ligero	2.066	0.84	1250	0.100
TECHO				
Mortero	2.52	1.09	1249	0.020
Concreto_Ligero	2.066	0.84	1250	0.100
Mortero_2	3.132	1.09	1249	0.020
Impermeabilizante	0.612	1	1200	0.050

La edificación está conformada con una ventana de doble vidriado y presenta un espaciamiento de 13.0 mm, el cual permite que las variaciones de temperatura en el interior sean muy pequeñas. En la **Tabla 4.5** se muestran las propiedades ópticas de la ventana propuesta.

Tabla 4.5 Propiedades ópticas de la ventana utilizada en BESTest 900.

PROPIEDADES	VALOR
Número de paneles	1
Transmitancia Solar	0.114
Reflectancia Solar (Frontal)	0.080
Reflectancia Solar (Posterior)	0.040
Transmitancia Visible	0.060
Reflectancia Visible (Frontal)	0.120
Reflectancia Visible (Posterior)	0.030
Emisividad (Frontal)	0.830
Emisividad (Posterior)	0.900
Eficiencia	6.3
FF (%)	68.6
Voc	904.6
JSC (mA/cm ²)	10.1



4.3.3 Comparativo con BESTest 900

La comparación de los resultados obtenidos en la simulación respecto a lo reportado con BESTest 900 presentan valores de cargas de calentamiento de 1646.4 kWh y para las cargas de enfriamiento de 2447.8 kWh. En la **Tabla 4.6** se muestra la comparación de los resultados arrojados del presente trabajo en TRNSYS 17[®], BESTest 900.

Tabla 4.6 Tabla comparativa de las temperaturas.

Valores	Carga de calentamiento (kWh)	Carga de enfriamiento (kWh)
BESTest 900	1649.0	2476.0
Presente Trabajo	1646.4	2447.8
Promedio diferencial (%)	0.22	1.15

Las cargas térmicas de calentamiento y enfriamiento (por sus siglas en inglés QCOOL y QHEAT) de la edificación, representados en color naranja las cargas de calentamiento (QHEAT) y en azul las cargas de enfriamiento (QCOOL), estas cargas se producen mediante la cantidad de radiación presente en el lugar de estudio y de las propiedades ópticas de la ventana utilizada. En la **Figura 4.11** se muestra el comportamiento de las cargas térmicas en la edificación utilizando una ventana de doble acristalamiento, en un periodo de tiempo de un año.

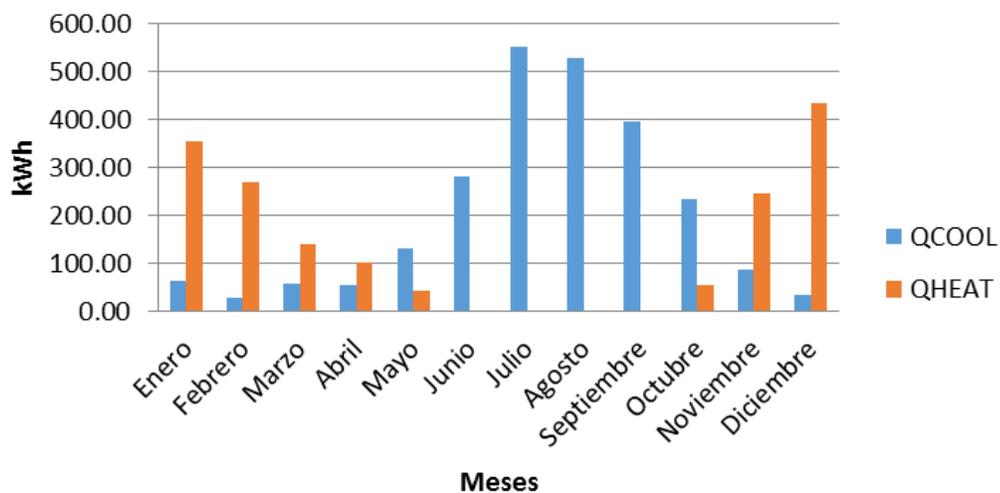


Figura 4.11 Cargas térmicas de la edificación con ventana simple de doble cristal.



Las cargas de calentamiento fueron de 1646.4 kWh/año y las de enfriamiento de 2447.8 kWh/año. Las desviaciones presentadas respecto al ejercicio BESTest 900 fueron de 0.22 y 1.15% para las cargas de calentamiento y enfriamiento respectivamente. La diferencia se atribuye a los datos climatológicos del TMY utilizado en la modelación.

4.3.4 Comparativo con BESTest 900FF

Las temperaturas obtenidas en la simulación fueron de 37.4°C como temperatura máxima y -6.4°C como temperatura mínima, con un promedio anual de 21.27°C. Este comportamiento de las temperaturas en comparación con los demás autores se puede deber a las diferentes condiciones climáticas, ya que todos los estudios están realizados en diferentes años. En la **Tabla 4.7** se muestran las diferencias porcentuales que existe entre estas temperaturas y las presentadas por otros artículos.

Tabla 4.7 Tabla comparativa del ejercicio de BESTest 900FF.

Valores	Presente trabajo	BESTest	Delphin (Woubishet, 2014)	CoDyBa (Jean, 2004)	ENERGYPLUS (ENergyPlus, 2011)	Domus (M.O. Abadie, 2010)
Temperatura máxima	37.4	42.5	42.2	42.2	43.2	42.94
Temperatura mínima	-6.4	-6.4	-5.9	-4.2	-6.4	-3.7
Temperatura promedio	21.27	24.5	24.9	24.7	26.0	25.3
Año	2019	1995	2014	2004	2011	2010

Las diferencias porcentuales que existe entre estas temperaturas y las presentadas por otros artículos se muestran en la **Tabla 4.8**.

Tabla 4.8 Tabla comparativa del ejercicio de BESTest 900FF y TRNSYS®.

Valores	Presente trabajo	BESTest	Delphin	CoDyBa	ENERGYPLUS	Domus
Diferencia Temperatura máxima %		12.0	0.7	0.7	1.6	1.0
Diferencia Temperatura mínima %		0.0	8.5	50.9	0.0	0.0



Diferencia Temperatura promedio %	13.2	13.5	13.8	5.8	3.2
Promedio de diferencia	8.4	7.6	21.8	2.5	1.4

El porcentaje de diferencia obtenido respecto a BESTest 900FF es del 8.4%, determinando que la plataforma de simulación es adecuada para el estudio térmico. En la **Figura 4.12** se muestra el comportamiento de la temperatura presentada en el BESTest 900FF y en la simulada en el presente trabajo con TRNSYS 17[®].

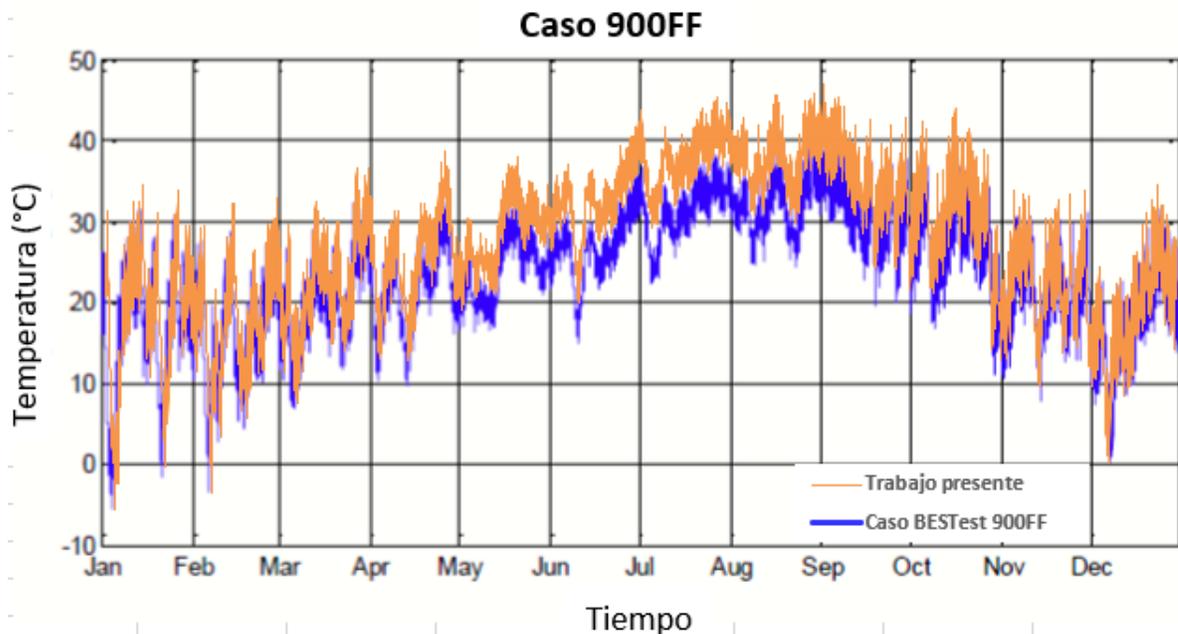


Figura 4.12 Evolución de las temperaturas internas en la edificación.

Se observa que el comportamiento de las temperaturas es muy similar, presentando pequeñas variaciones en la misma. Estas variaciones pueden ser debidas a los datos climatológicos en el TMY utilizado. La simulación fue para un periodo anual. La desviación fue del 8.4%.



4.3.5 Comparativo con Martínez (2019)

Las desviaciones obtenidas para las cargas, la energía fotovoltaica y la temperatura interna fueron de 0.152, 0.499 y 0.0003% respectivamente. En la **Tabla 4.9** se muestran las cargas térmicas, las temperaturas internas y la energía producida por las ventanas fotovoltaicas (VFV) de forma anual obtenida en la simulación.

Tabla 4.9 Tabla comparativa del ejercicio de Martínez (2019) y TRNSYS®.

	Q _c (kWh)	Q _c Martínez (kWh)	Energía PV (kWh)	Energía PV Martínez (kWh)	Temp Interior Oficina	Temp Interior Martínez
Total anual	27591.34	27633.34	2375.85	2387.77	26.92	26.92
Diferencia (%)		0.152%		0.499%		0.0003%

La carga de enfriamiento (Q_c) fue de 27591.34 kWh-mes y 27633.34, se puede observar que el comportamiento de las cargas térmicas (enfriamiento y calentamiento) en lo reportado con Martínez (2019) y lo obtenido con TRNSYS presenta diferencias mínimas de hasta 0.157%. Esto debido a los datos climatológicos utilizados, ya que la base de datos que se utilizó para el estudio fue la misma. En la **Figura 4.13** se muestran las cargas de enfriamiento y fotovoltaicas (Q_c , Q_{pv}) y la temperatura interna comparadas con el ejercicio de Martínez, (2019) y lo simulado en TRNSYS 17® para periodos mensuales.

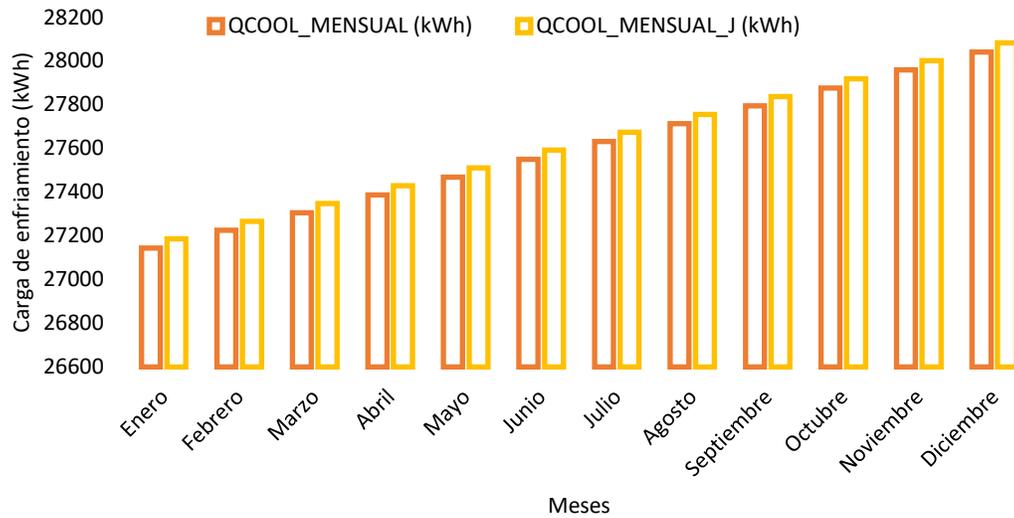


Figura 4.13 Evolución de las Q_c en la edificación.

Las ventanas fotovoltaicas (VFV) en ambos casos se consideraron de silicio amorfo (a-Si), siendo de la Q_{pv} de 2375.85 kWh-mes para el presente trabajo y lo reportado por Martínez fue de la Q_{pv} de 2387.77 kWh-mes con una desviación del 0.499%. En la **Figura 4.14** se presenta la generación energética (Q_{pv}) de las ventanas fotovoltaicas (VFV) en ambos estudios.

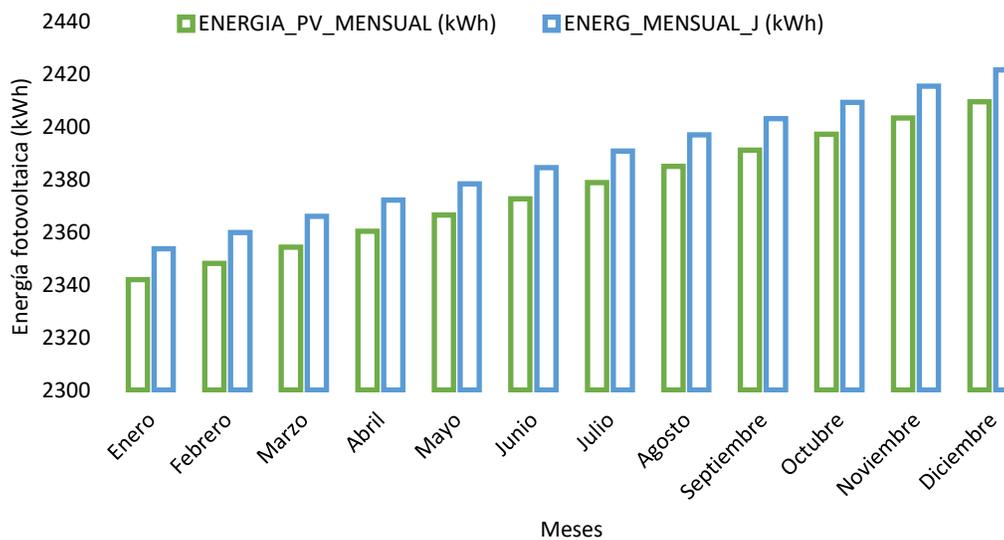




Figura 4.14 Evolución de la Q_{pv} en de la VFV.

La temperatura interna de la edificación reportada por TRNSYS y por Martínez fue de 26.92°C para ambos casos, teniendo una desviación del 0.0003% . Esto es debido que se utilizaron las mismas condiciones climatológicas, mismo procedimiento, etc. En la **Figura 4.15** se presenta la temperatura interna de la edificación.

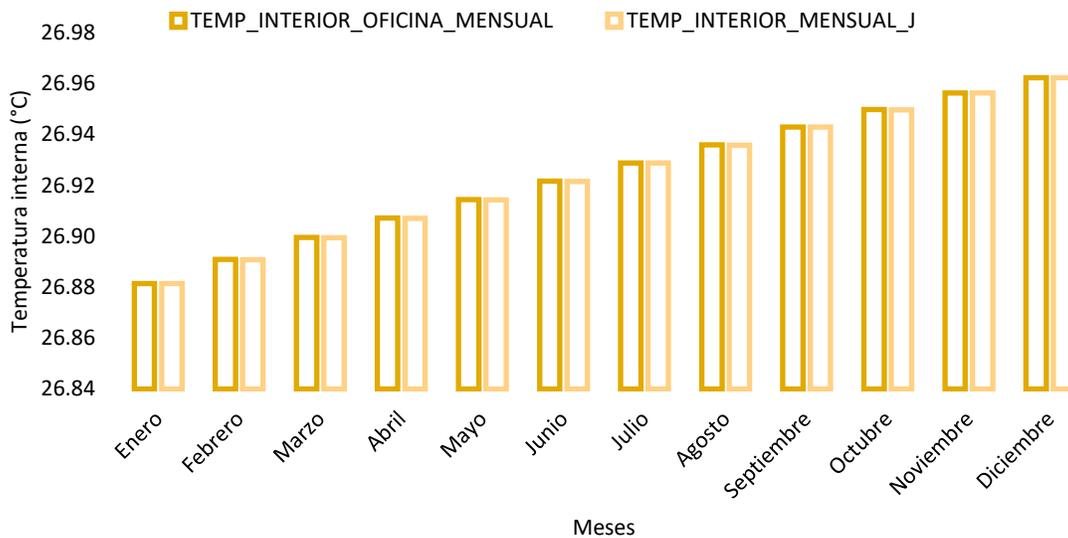


Figura 4.15 Evolución de las temperaturas internas.

Las desviaciones son menores al 10% , en concordancia con ASHRAE 134 A, por lo que se observa que el programa es adecuado para las simulaciones requeridas en el presente trabajo.



4.3.6 Conclusiones de comparativos

Las cargas de calentamiento fueron de 1646.4 *kWh/año* y las de enfriamiento de 2447.8 *kWh/año*. Las desviaciones presentadas respecto al ejercicio BESTest 900 fueron de 0.22 y 1.15% para las cargas de calentamiento y enfriamiento respectivamente. En el ejercicio BESTest 900FF se observa que el comportamiento de las temperaturas es muy similar con variaciones del 8.4%. En el caso del ejercicio de Martínez (2019), se presentan desviaciones de las cargas térmicas, generación de energía fotovoltaica y temperaturas internas de 0.152, 0.499, 0.0003%, respectivamente. Las desviaciones se encuentran por debajo del 10% conforme a lo establecido en los estándares ASHRAE 134 A, por lo que se considera que la plataforma de simulación es adecuada.



Capítulo 5. Resultados

En esta sección se presentan los resultados del comportamiento térmico, energético y de confort en una habitación tipo hotel con ventanas fotovoltaicas. La simulación se realizó para una habitación tipo hotel de la Riviera Maya, Quintana Roo, México⁵. La edificación consta de una sola planta con dimensiones de altura de 3 m, largo de 4 m y ancho de 5 m y una relación de área (RA) de ventana del 7-95% (1-14 m²) en relación pared-ventana, la norma NOM-008-ENER-2001 recomienda una relación de área máxima del 40%. El comparativo de las cargas de enfriamiento, la generación de energía fotovoltaica y el efecto del confort térmico se llevó a cabo con tres tipos diferentes de ventanas, donde se considera un muro ciego sin ventana (SN/V), la ventana de referencia (VR), la de telurio de cadmio (CdTe) y la de silicio amorfo (a-Si), como se especifica en la Sección 2.1.

⁵ En el “Capítulo 2 Localización y muestra Sección 2.1 Muestra”. Encontrarás la descripción de la edificación utilizada en el estudio.

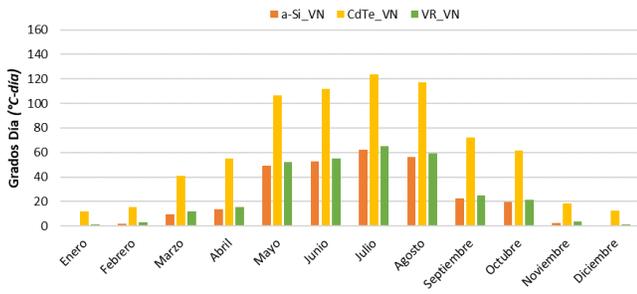


5.1 Evaluación de VFV en habitación con VN

En esta sección se presenta la evaluación térmica y de confort con ventilación natural (VN), la evaluación térmica, la generación de energía eléctrica y de confort térmico con aire acondicionado (Ac). Por último, se presenta el comparativo de ambos estudios en términos de cargas térmicas y de confort térmico y la evaluación del impacto ambiental con la utilización de ventanas fotovoltaicas (VFV).

5.1.1 Evaluación térmica en grados día (GD)

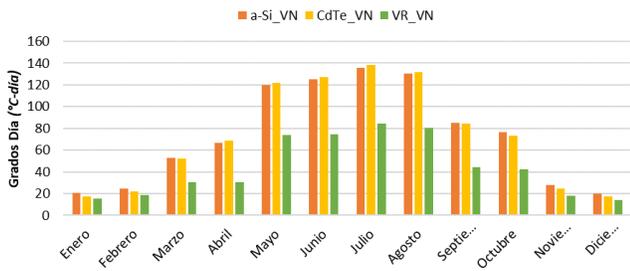
Para la realización de este proyecto se cuenta con datos climatológicos obtenidos de la base de datos de METEONORM. Para el modelado de la transferencia de calor en la edificación se utiliza TRNSYS 17[®], la simulación se realizó de forma transitoria. En el estudio se realizó una comparación térmica de diferentes tipos de ventanas fotovoltaicas de silicio amorfo y telurio de cadmio (a-Si y CdTe), una ventana de referencia (VR) y muro ciego sin ventana (SN/V), en donde se variaron áreas de captación y el tipo de ventilación dentro de la habitación tipo hotel. Para la evaluación de los grados día y las cargas térmicas se estableció un control de energía, estableciendo los límites de temperatura (T_{set}) donde la $T_{max}=25^{\circ}C$ para enfriamiento y $T_{min}=19^{\circ}C$ para el calentamiento e infiltraciones de 0.6 cambios de aire por hora (NOM-008-ENER-2001). La edificación de estudio consta de una relación de área del 7-95% equivalente a 1-14 m^2 para cada una de las ventanas a utilizar. Los porcentajes de diferencia se obtienen mediante la fórmula de diferencia porcentual, donde se toma el valor nuevo y se resta por el valor anterior y se dividen estos dos entre el valor anterior y el resultado de multiplica por cien, para obtener la diferencia porcentual. En la **Figura 5.1** se muestran los grados día para la ventana de referencia, la ventana fotovoltaica de telurio de cadmio (CdTe), de silicio amorfo (a-Si) y muro ciego sin ventana (SN/V), con una relación de relación de área (RA) del 7-95%. Los meses con mayor carga son desde mayo a agosto con un pico en julio.



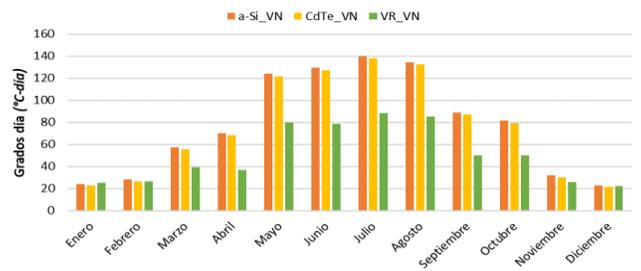
(a) 7% de área de ventana



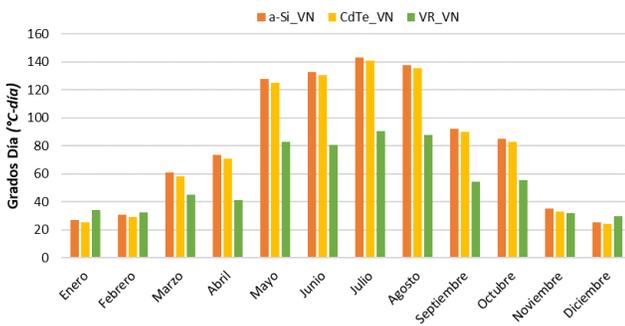
(b) 20% de área de ventana



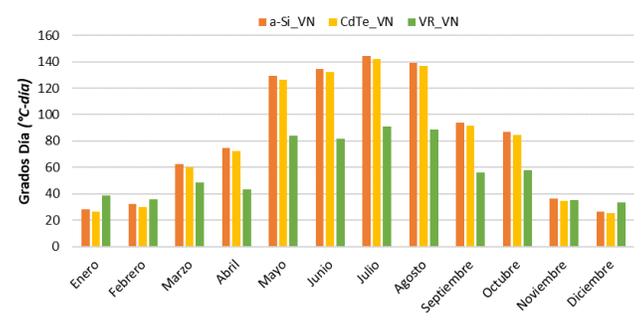
(c) 40% de área de ventana



(d) 60% de área de ventana



(e) 80% de área de ventana



(f) 95% de área de ventana

Figura 5.1 Evolución de los GD mensual.



Las ventanas fotovoltaicas de silicio amorfo (a-Si) y telurio de cadmio (CdTe) para una relación de área (RA) de 7-95% presentan un residual de 30.28 y 28.17 °C-día promedio anual respecto a lo reportado con la ventana de referencia (VR). En la **Tabla 5.1** muestran los grados día en la habitación de tipo hotel durante un año.

Tabla 5.1 GD anuales para cada RA.

RA	VR	a-Si	CdTe
	Grados Día (°C-día)		
7%	26.24	64.37	62.31
20%	34.20	70.85	67.13
40%	44.02	73.82	73.20
60%	50.74	77.79	75.91
80%	55.43	80.91	78.77
95%	57.86	82.45	80.19

Los grados día (GD) representa la cantidad de calor que se encuentra fuera de la zona de confort térmico con ventilación natural en la habitación tipo hotel durante un año para un clima semihúmedo. En la **Figura 5.2** se muestra la evolución de los grados día respecto a la relación de área (RA).

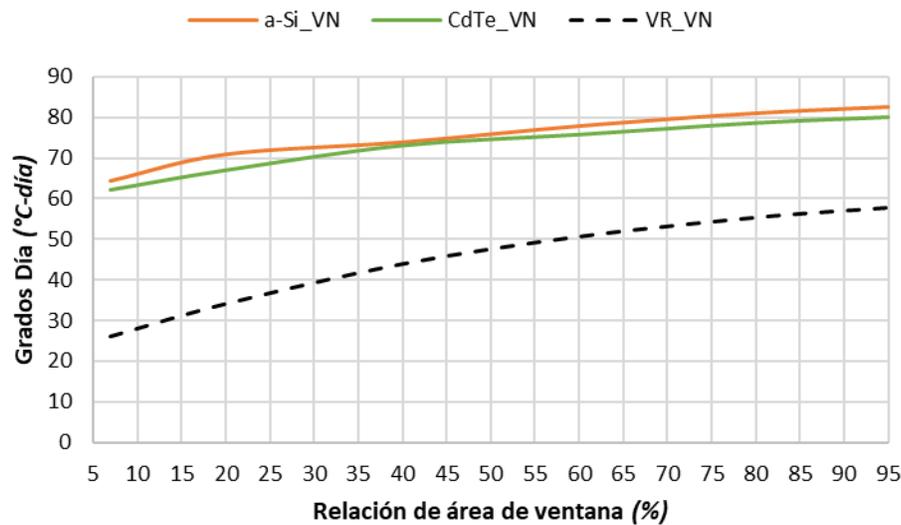


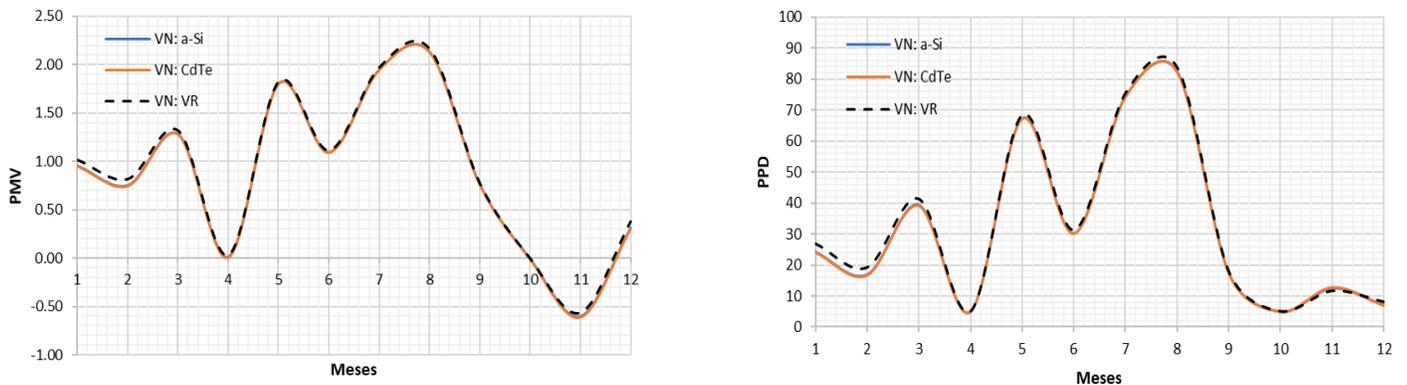
Figura 5.2 Comportamiento de los GD en RA.



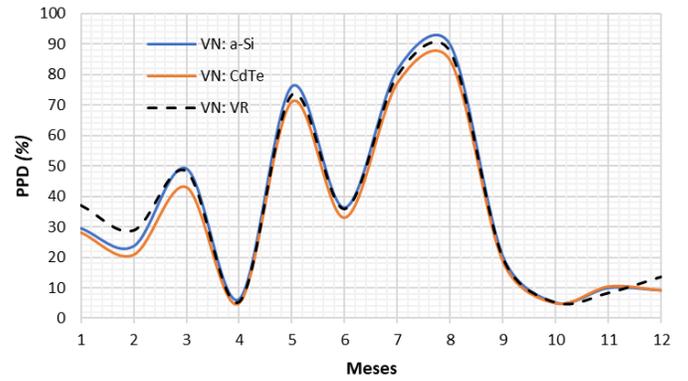
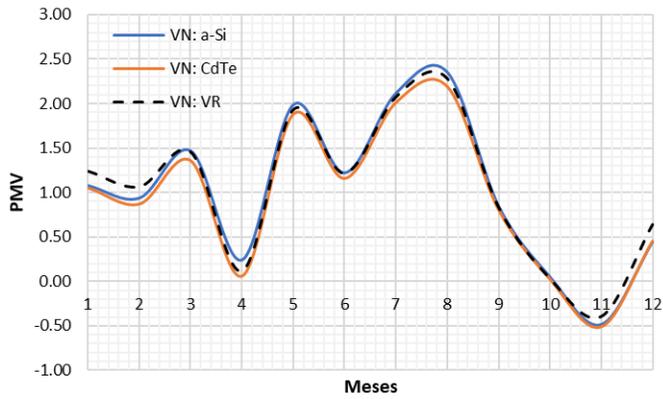
Se observa que la ventana de telurio de cadmio (CdTe) para una relación de área del 7% presenta grados día de $62.31^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$ promedio anual, estando muy por encima de lo reportado por la ventana de a-Si y VR. La ventana de CdTe muestra no ser tan viable para un área de 1 m^2 (RA=7%), sin embargo, el comportamiento de la ventana a partir de un área de 3 m^2 en adelante muestra tener grados día menores a la ventana de a-Si, aumentando su eficiencia conforme se aumenta la RA.

5.1.2 Evaluación confort térmico

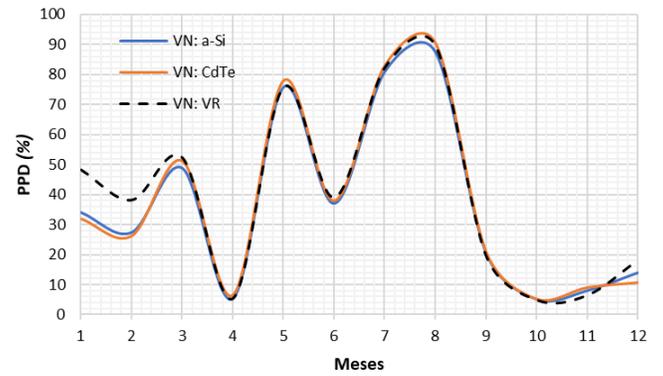
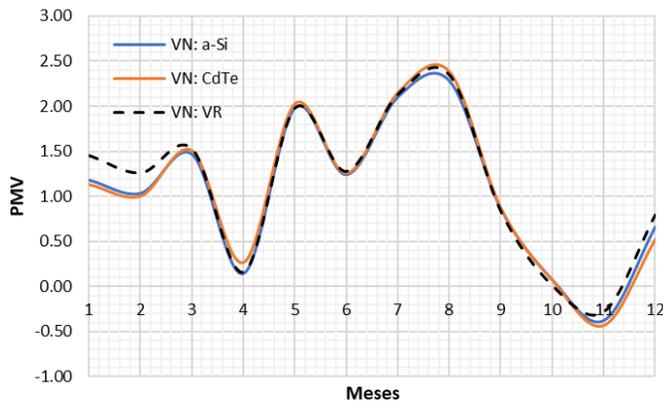
Los meses con mayor sensación térmica y porcentaje de personas insatisfechas son de junio-agosto teniendo sensaciones de calor (PMV) superiores al nivel 2 para cada una las de las relaciones de área y porcentajes superiores del 80%. En la **Figura 5.3** se muestran el confort térmico en términos de grados día con las diferentes ventanas con una relación de área de ventana (RA) del 7-95%.



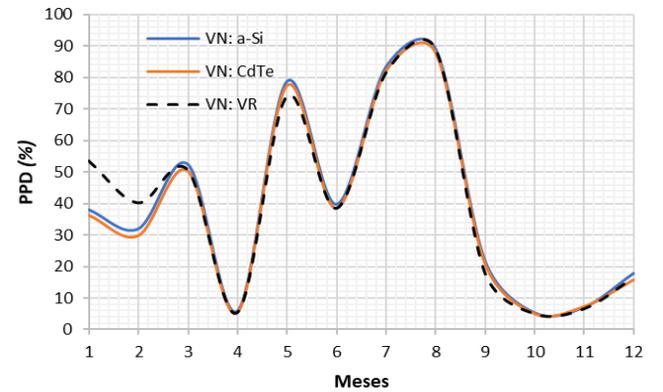
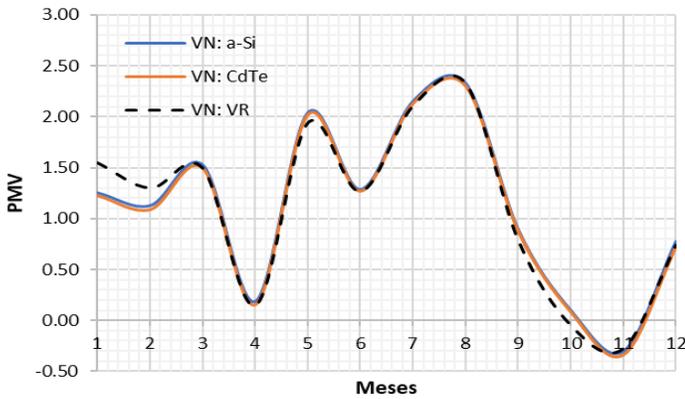
(c) 7% de área de ventana voto medio predicho (PMV) y personas insatisfechas (PPD)



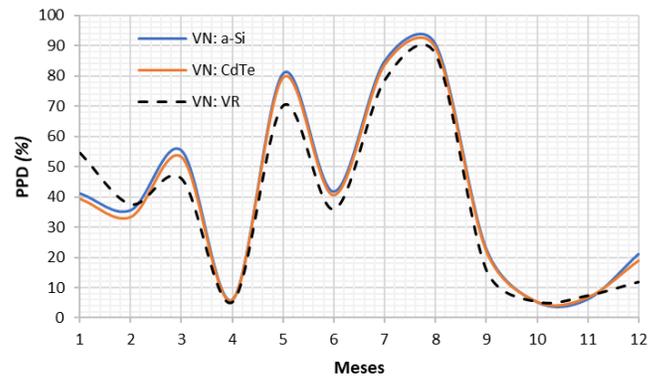
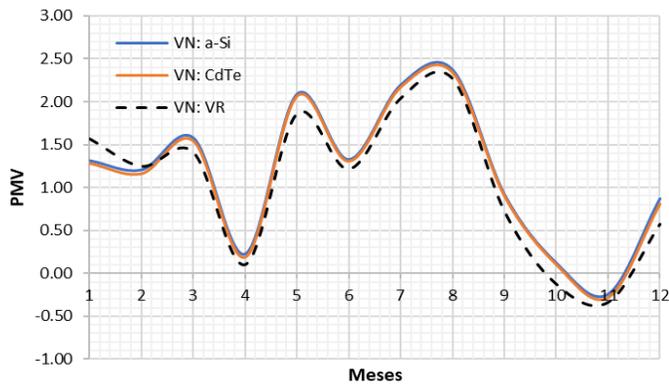
(d) 20% de área de ventana voto medio predicho (PMV) y personas insatisfechas (PPD)



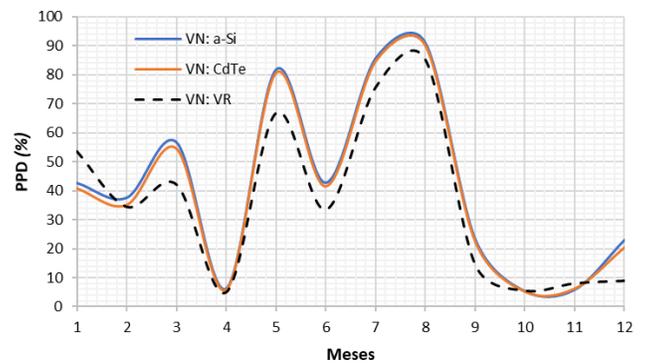
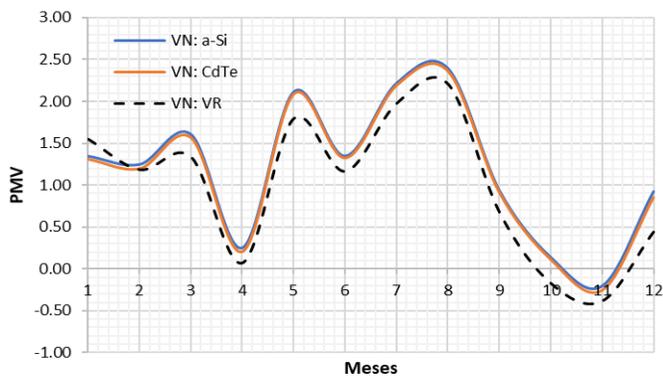
(e) 40% de área de ventana voto medio predicho (PMV) y personas insatisfechas (PPD)



(f) 60% de área de ventana voto medio predicho (PMV) y personas insatisfechas (PPD)



(g) 80% de área de ventana voto medio predicho (PMV) y personas insatisfechas (PPD)



(h) 95% de área de ventana PMV y PPD

Figura 5.3 Evolución del PMV y PPD con una RA 7-95% para VN.

Las ventanas fotovoltaicas de silicio amorfo (a-Si) y telurio de cadmio (CdTe) para una relación de área (RA) de 7-95% en promedio anual se tiene un comportamiento de PMV y PPD de 1.07 y 37.89% para a-Si, 1.04 y 36.96% para CdTe. En la **Tabla 5.2** se muestran los grados día en la habitación de tipo hotel durante un año.

Tabla 5.2 Grados día anual.

RA	PMV			PPD (%)		
	a-Si	CdTe	VR	a-Si	CdTe	VR
7%	1.19	1.16	0.99	41.85	40.64	36.21
20%	0.87	0.87	0.91	31.86	31.70	32.78
40%	1.02	0.94	1.04	36.41	33.85	36.89
60%	1.05	1.06	1.13	37.11	37.58	40.11
80%	1.11	1.08	1.11	39.19	38.21	39.95
95%	1.17	1.13	1.04	40.95	39.80	37.94



La evolución del confort térmico a lo largo de un año respecto a la relación de área de ventana en términos de sensación térmica (PMV) y porcentaje de personas insatisfechas (PPD), representa la cantidad de energía térmica a remover para lograr las condiciones de confort térmico en la habitación tipo hotel durante un año para un clima semihúmedo. En la **Figura 5.4** se muestra la evolución del confort térmico promedio anual.

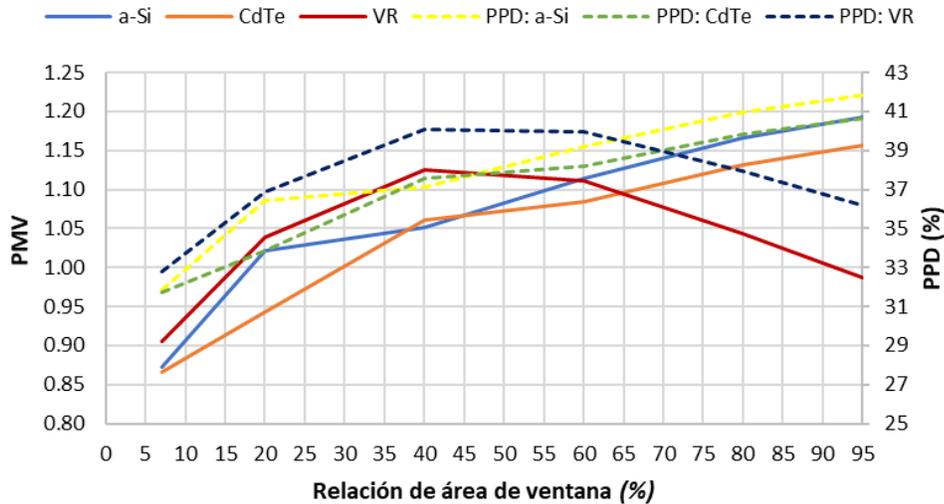


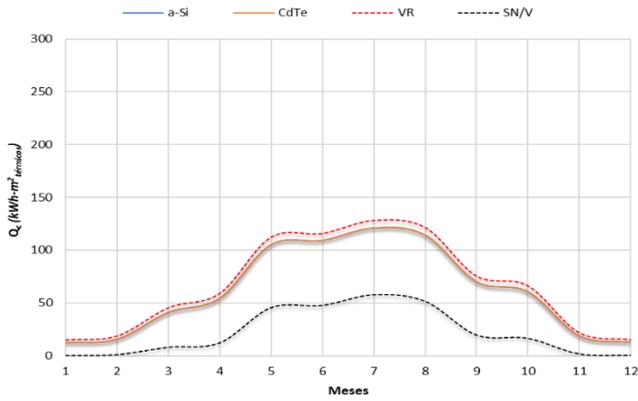
Figura 5.4 Evolución del confort térmico promedio anual.

5.2 Evaluación de VFV en habitación con Ac

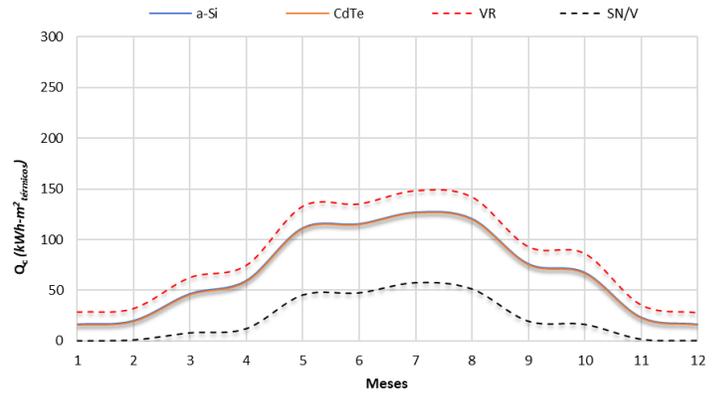
En esta sección se presenta la evaluación térmica, el confort térmico, la energía eléctrica generada por las ventanas fotovoltaicas (VFV) y la evaluación del impacto ambiental con aire acondicionado (Ac).

5.2.1 Evaluación térmica

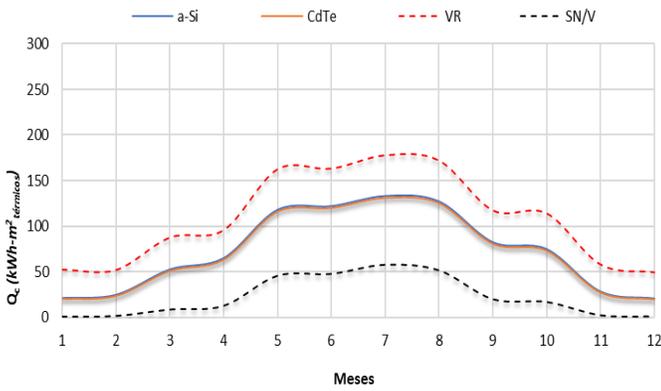
Los meses con mayor carga son desde mayo a agosto con un pico en julio. Representando la menor carga térmica a alcanzar sin VFV (SN/V) del 21.99 kWh/m^2 al año. En la **Figura 5.5** se muestran las cargas de enfriamiento con las diferentes ventanas (VR, CdTe, a-Si y SN/V), con una relación de área de ventana (RA) del 7-95%.



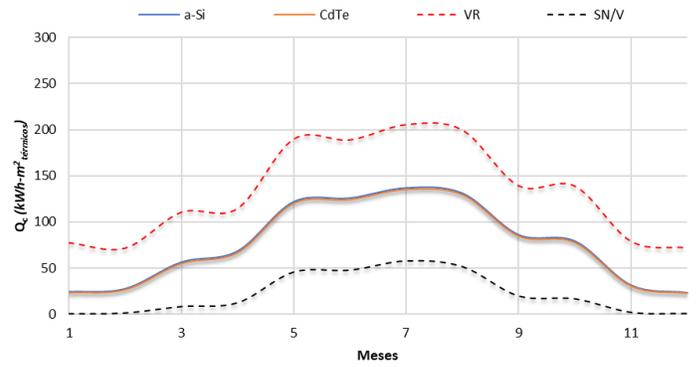
(a) 7% de área de ventana



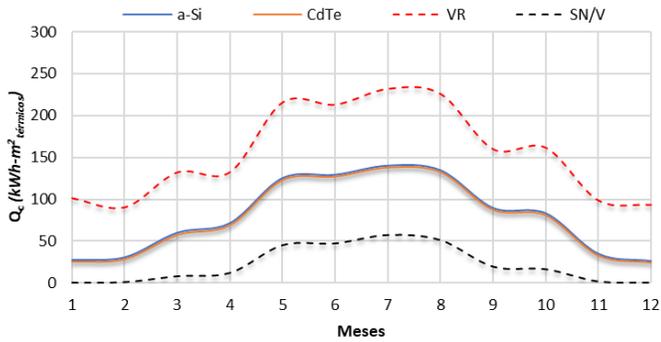
(b) 20% de área de ventana



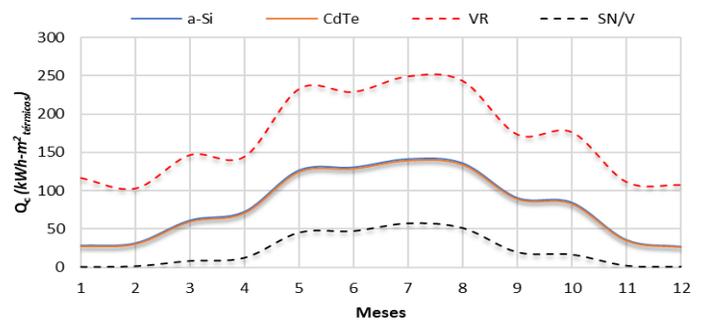
(e) 40% de área de ventana



(f) 60% de área de ventana



(g) 80% de área de ventana



(h) 95% de área de ventana

Figura 5.5 Evolución de las cargas de enfriamiento con una RA 7-95%.



Las ventanas fotovoltaicas (VFV) de silicio amorfo (a-Si) y telurio de cadmio (CdTe) para una relación de área (RA) de 7-95% presentan una reducción promedio anual respecto a la ventana de referencia de 42.84 y 44.11 kWh/m^2 promedio anual respecto a lo reportado con la ventana de referencia (VR) siendo de 48.3 kWh/m^2 promedio anual. En la **Tabla 5.3** muestran las cargas térmicas en la habitación de tipo hotel durante un año.

Tabla 5.3 Cargas de enfriamiento anuales con RA 0-95%.

RA	VR	a-Si	CdTe
	Q _c _Anual [kWh/m^2]		
0%	21.99	21.99	21.99
7%	66.28	61.40	61.06
20%	83.33	66.68	65.78
40%	108.67	72.35	70.88
60%	132.46	76.25	74.41
80%	154.80	79.31	77.21
95%	169.16	80.82	78.60

Las cargas representan la cantidad de energía térmica a remover para lograr las condiciones de confort térmico en la habitación tipo hotel, durante un año para un clima semihúmedo. En la **Figura 5.6** se muestra la evolución de las cargas térmicas en términos de kWh/m^2 -año.

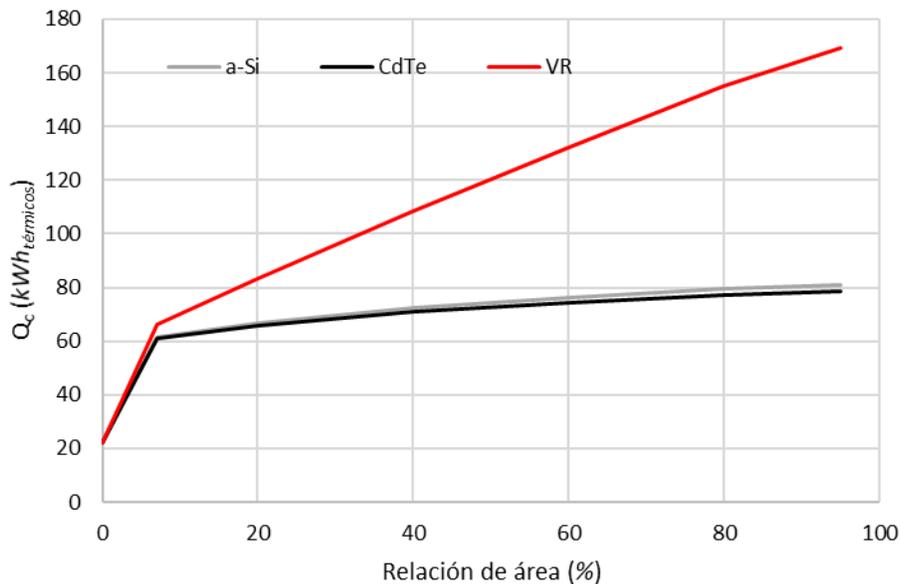




Figura 5.6 Cargas de enfriamiento anuales.

5.2.2 Evaluación del confort térmico

El confort térmico es mayormente definido por las condiciones térmicas de una edificación. La edificación aumenta su edificación si las ganancias de calor son mayores que las pérdidas, por otra parte, si las pérdidas de calor son mayores que las ganancias, disminuye las temperaturas internas en la habitación de hotel.

El modelo estático Fanger (ASHRAE 55-2017 e ISO 7730) presenta valores para voto medio predicho (PMV) y del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) conforme a la relación de área del 40% es del 0.87 y 25.97% para a-Si, 0.86 y 25.60% para telurio de cadmio (CdTe) y 0.90 y 26.71% para la ventana de referencia (VR), teniendo sensaciones térmicas de neutro a ligeramente cálido. La relación de área de ventana óptima es la del 60% debido a que es la que presenta valores del PMV y del PPD más bajos. En la **Tabla 5.4** se muestra el comparativo del PMV y el PPD entre la relación de área de las ventanas fotovoltaicas.

Tabla 5.4 Comparativo del PMV y PPD para Ac.

RA	PMV			PPD (%)		
	a-Si	CdTe	VR	a-Si	CdTe	VR
0%	0.79	0.79	0.79	23.57	23.57	23.57
7%	0.81	0.80	0.81	24.92	24.02	24.24
20%	0.84	0.83	0.86	24.92	24.76	25.46
40%	0.87	0.86	0.90	25.87	25.60	26.71
60%	0.80	0.79	0.83	24.25	23.95	25.23
80%	0.82	0.80	0.83	24.74	24.41	25.32
95%	0.83	0.81	0.82	25.02	24.66	25.13

El modelo estático Fanger muestra tener un buen desempeño en la determinación del voto medio predicho (PMV) y del porcentaje de personas insatisfechas (PPD), sin embargo, la sensación térmica y el porcentaje de personas insatisfechas son favorables para una relación de área del 60%, mostrando que el porcentaje de área del 40% recomendada por la norma NOM-008-ENER-2001 es la que presenta los valores más altos en comparación con el resto



de las relaciones de área para el confort térmico. Este comportamiento se puede apreciar mejor en la **Figura 5.7**.

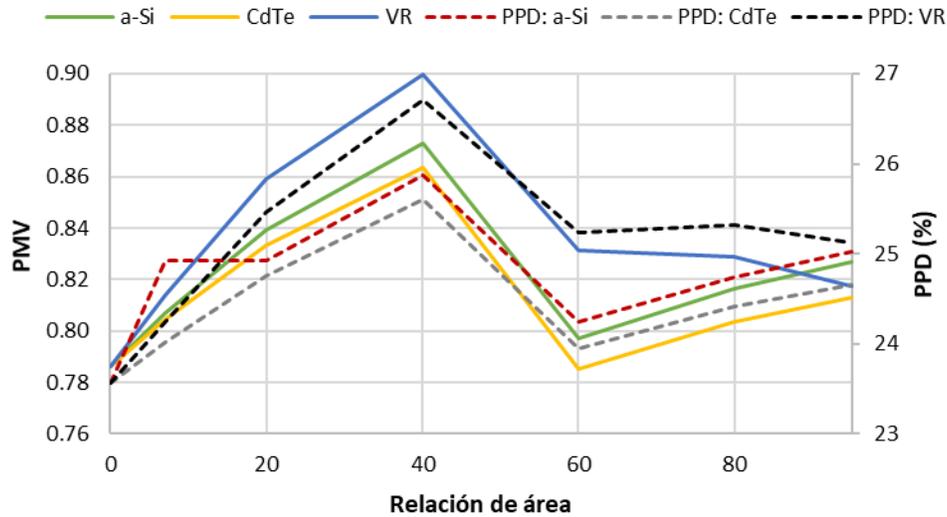
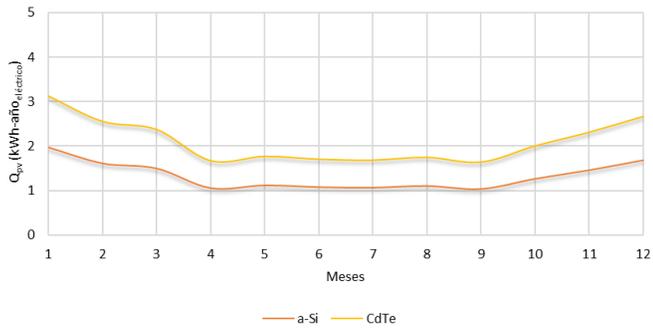


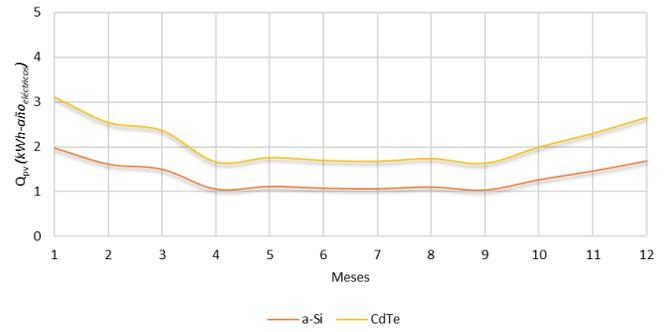
Figura 5.7 Evaluación del PMV y PPD en relación del área de ventana.

5.2.3 Evaluación fotovoltaica

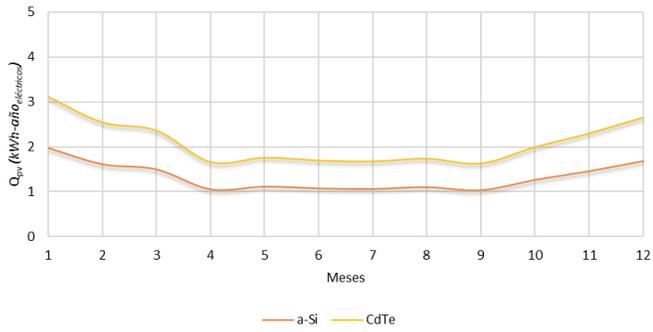
Se realizó un análisis comparativo energético con dos ventanas fotovoltaicas (VFV) de silicio amorfo y telurio de cadmio (a-Si y CdTe) con diferentes relaciones de área del 7-95% mencionados anteriormente. El análisis se llevó acabo al mismo tiempo de la toma de datos de las cargas térmicas, con el mismo ambiente térmico. En la **Figura 5.8** se muestran la generación de energía fotovoltaica con las ventanas con una relación de área (RA) del 7-95%. Los meses con mayor carga de enfriamiento son diciembre y enero.



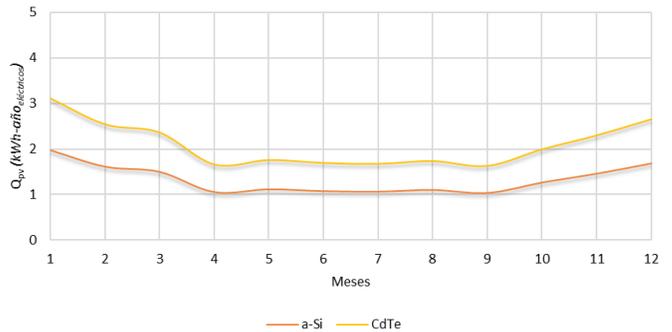
(a) 7% de área de ventana



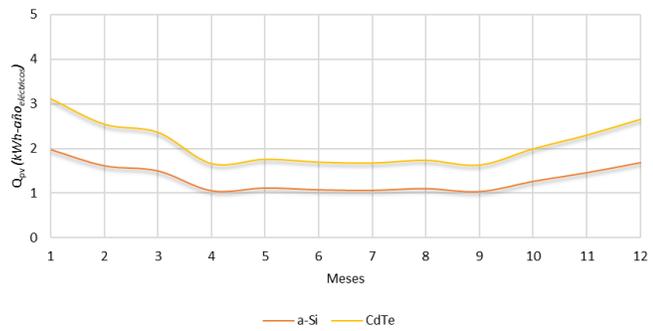
(b) 20% de área de ventana



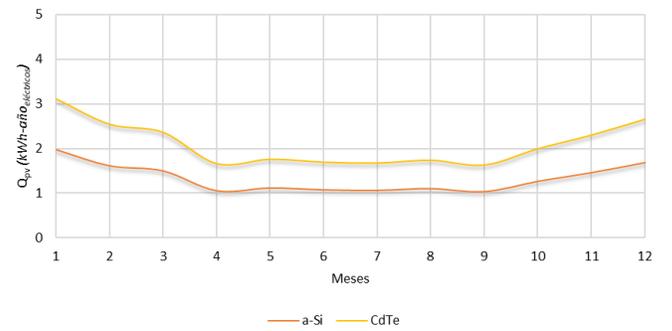
(c) 40% de área de ventana



(d) 60% de área de ventana



(e) 80% de área de ventana



(f) 95% de área de ventana

Figura 5.8 Energía eléctrica mensual generada por las VFV.



La generación energética por las ventanas fotovoltaicas (VFV) presentan una máxima para silicio amorfo (a-Si) y telurio de cadmio (CdTe) de 225.60 y 357.77 kWh-año respectivamente para una relación de área (RA) del 95%. En la **Tabla 5.5** se muestra la generación de energía generada por las ventanas fotovoltaicas (VFV).

Tabla 5.5 Energía eléctrica promedio anual para cada RA.

RA	Energía generada por VFV (kWh-año _{eléctricos})	
	a-Si	CdTe
0%	-	-
7%	15.88	25.18
20%	47.63	75.53
40%	95.26	151.06
60%	142.88	226.60
80%	192.89	308.42
95%	225.60	357.77

La evolución eléctrica generada por las ventanas fotovoltaicas va en incremento conforme se incrementa la relación de área. En la **Figura 5.9** se muestra la evolución de la energía eléctrica generada por las VFV en promedio de un año.

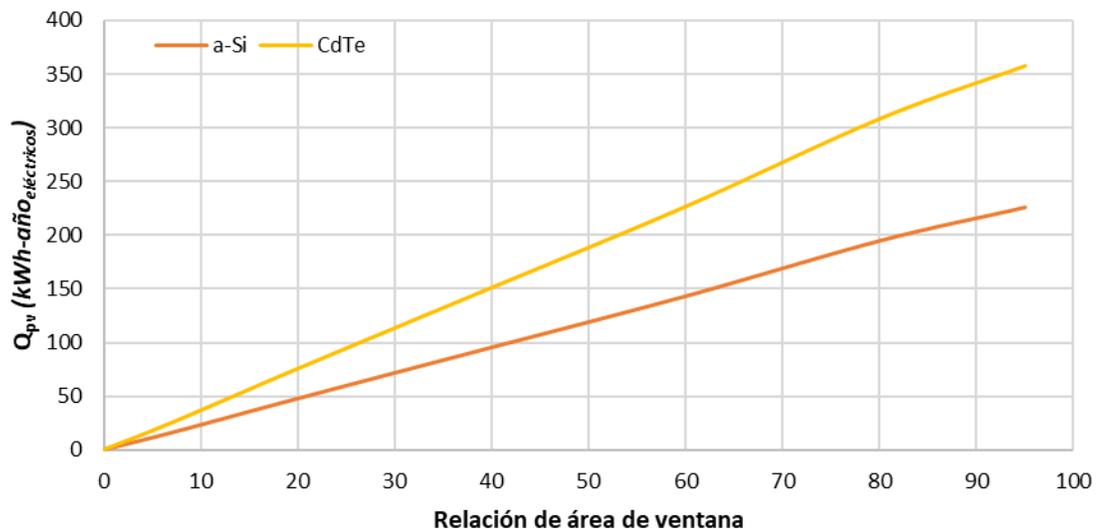


Figura 5.9 Q_{pv} anual para cada RA.



5.2.4 Evaluación del impacto ambiental

Las ventanas de silicio amorfo (a-Si) y telurio de cadmio (CdTe) presentan reducciones en promedio 53 y 65% respectivamente. En la **Tabla 5.6** se muestran las toneladas de dióxido de carbono equivalente (*Ton CO_{2e}*) emitidos al ambiente con el uso de las ventanas de referencia (VR), CdTe, a-Si.

Tabla 5.6 Comparación de las emisiones de CO_{2e} para cada tipo de ventana.

RA	Demanda energética final de la habitación (<i>Ton CO_{2e}</i>)			Porcentaje de ahorro (%)	
	a-Si	CdTe	VR	a-Si	CdTe
0%	0.14	0.14	0.14		
7%	0.16	0.16	0.19	12	16
20%	0.16	0.14	0.23	32	40
40%	0.15	0.11	0.30	52	64
60%	0.13	0.08	0.37	65	79
80%	0.11	0.04	0.43	75	92
95%	0.09	0.01	0.47	80	98

El comportamiento de las toneladas de dióxido de carbono (*Ton CO_{2e}*) para cada relación de área (RA) muestra disminuir la emisión conforme se incrementa el RA, llegando a reducir las emisiones hasta 80 y 98% *Ton CO_{2e}*. Sin embargo, considerando el área recomendada por la norma oficial mexicana NOM-008-ENER-2001 de 40% se tienen emisiones de 0.15 y 0.11 *Ton CO_{2e}* para a-Si y CdTe con reducciones de 52 y 64%. En la **Figura 5.10** se muestran las toneladas de *CO_{2e}* emitidos al ambiente con el uso de las ventanas de referencia (VR), de telurio de cadmio (CdTe) y silicio amorfo (a-Si).

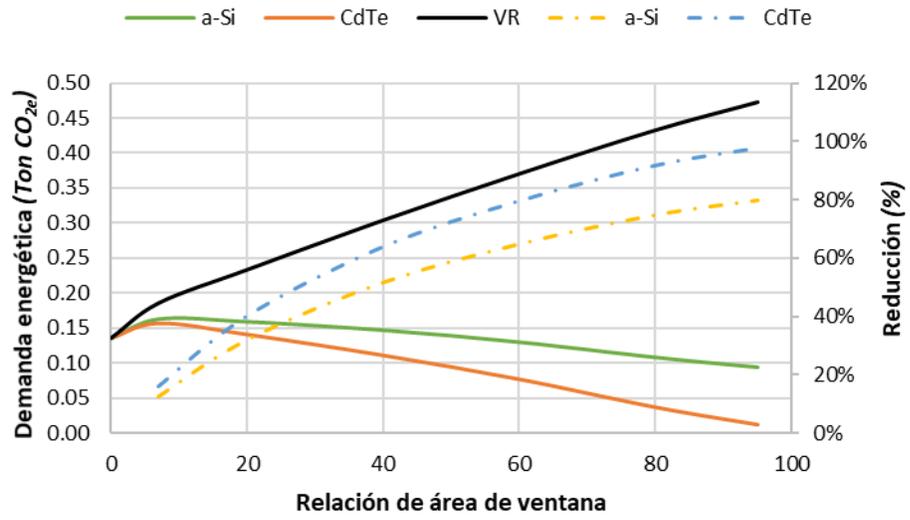


Figura 5.10 Comparativo de la reducción de CO_{2e}.



5.3 Análisis de resultados

El confort térmico para el caso con ventilación natural (VN) se ve mayormente afectado, debido a que no cuenta con un sistema de control de temperaturas que logre mantener las ganancias de calor dentro del T_{set} establecido. Las diferencias entre el voto medio predicho (PMV) y el porcentaje de personas insatisfechas (PPD) promedio anual para aire acondicionado (Ac) y ventilación natural (VN) en cada ventana es del 60% y 68% para a-Si, 60% y 67% para CdTe, 59% y 66% para ventana de referencia (VR). En la **Tabla 5.7** se muestra el comparativo del confort térmico mensual para ventilación natural (VN) y aire acondicionado (Ac).

Tabla 5.7 Comparativo del confort térmico mensual para VN y Ac.

RA	Ac						VN					
	PMV			PPD (%)			PMV			PPD (%)		
	a-Si	CdTe	VR	a-Si	CdTe	VR	a-Si	CdTe	VR	a-Si	CdTe	VR
0%	0.33	0.33	0.35	11.47	11.01	11.17	0.87	0.87	0.91	31.86	31.70	32.78
7%	0.38	0.37	0.41	11.47	11.38	11.95	1.02	0.94	1.04	36.41	33.85	36.89
20%	0.42	0.41	0.46	12.05	11.88	12.86	1.05	1.06	1.13	37.11	37.58	40.11
40%	0.46	0.44	0.47	12.53	12.29	13.21	1.11	1.08	1.11	39.19	38.21	39.95
60%	0.48	0.46	0.45	12.96	12.67	13.20	1.17	1.13	1.04	40.95	39.80	37.94
80%	0.50	0.48	0.43	13.20	12.88	13.09	1.19	1.16	0.99	41.85	40.64	36.21

Las sensaciones de calor para el caso de VN son calurosas la mayor parte del año, las sensaciones térmicas para el caso de Ac son neutrales durante todo el año. Las sensaciones de calor para Ac son neutrales debido al control de temperatura utilizado. En la **Figura 5.11** se muestra el comparativo del confort térmico de VN y Ac para cada RA 7-95%.

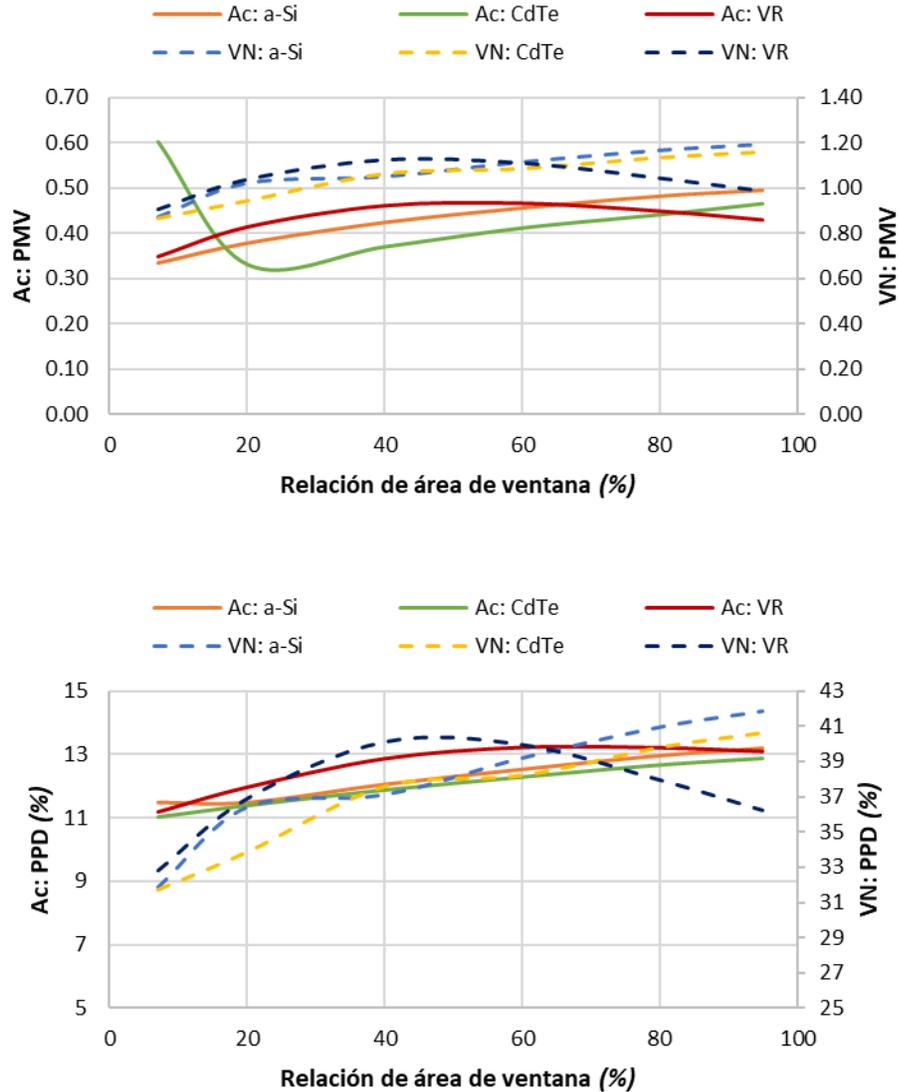


Figura 5.11 Comparación del confort térmico para Ac y VN en RA del 7-95%.

Para la ventana de telurio de cadmio (CdTe) con una relación de área del 80-95% la producción de la energía por parte de las ventanas fotovoltaicas es mayor a la demanda de la habitación presentando valores como 62.20 y 19.53 kWh-año eléctricos respectivamente, sin embargo, conforme al área recomendada por la norma oficial mexicana NOM-008-ENER-2001 siendo del 40% la generación de energía eléctrica es de 252.04, 189.15, 521.62 kWh-año para silicio amorfo (a-Si), telurio de cadmio (CdTe) y ventana de referencia (VR)



respectivamente. En la **Tabla 5.8** se muestra el comparativo de la demanda energética de la habitación de hotel con forme a la relación de área (RA) y la energía fotovoltaica producida por las ventanas fotovoltaicas (VFV).

Tabla 5.8 Comparación de la demanda energética de las Q_c y Q_{pv} .

RA	Q_c (kWh eléctricos)			Q_{pv} (kWh eléctricos)		Demanda energética final (kWh eléctricos)		
	a-Si	CdTe	VR	a-Si	CdTe	a-Si	CdTe	VR
0%	231.96	231.96	231.96	0	0	231.96	231.96	231.96
70%	294.73	293.09	318.16	15.88	25.18	278.86	267.91	318.16
20%	320.06	315.76	400.00	47.63	75.53	272.43	240.23	400.00
40%	347.30	340.22	521.62	95.26	151.06	252.04	189.15	521.62
60%	366.00	357.16	635.80	142.88	226.60	223.12	130.57	635.80
80%	380.69	370.63	743.02	194.48	308.42	186.20	62.20	743.02
95%	387.92	377.30	811.95	225.60	357.77	162.32	19.53	811.95

Teniendo producciones máximas de energía en promedio de 225.60 y 357.77 kWh-año para a-Si y CdTe y producciones mínimas de energía en promedio de 15.88 y 25.18 kWh-año para a-Si y CdTe. En la **Figura 5.12** se muestra la comparación de la demanda y generación de energía fotovoltaica.

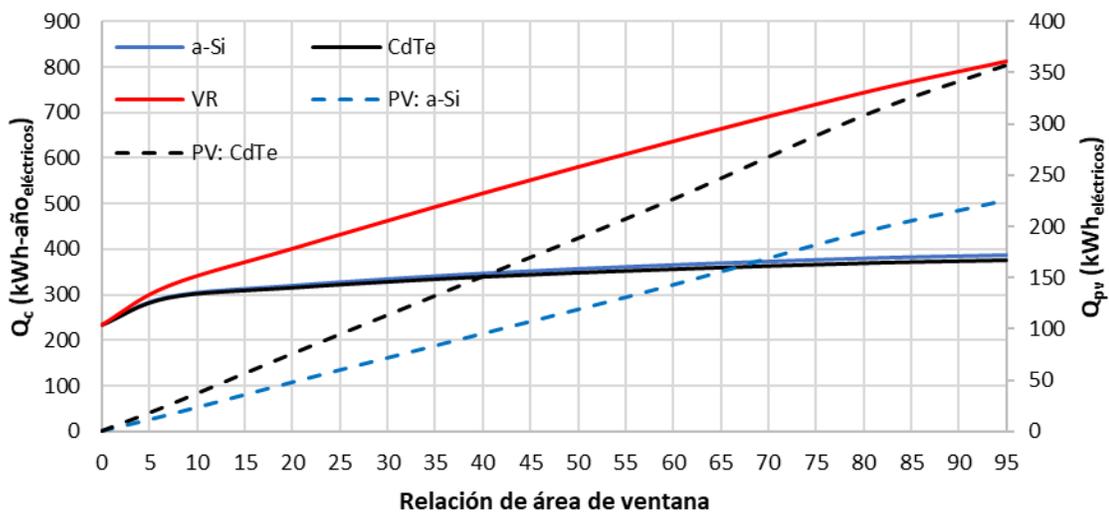


Figura 5.12 Demanda y generación de energía eléctrica para cada RA.



El ahorro energético de las ventanas fotovoltaicas (VFV) de silicio amorfo (a-Si) y telurio de cadmio (CdTe) en promedio es de 293.66 y 360.14 $kWh-año$ respectivamente. La generación energética por las VFV en comparación a la demanda energética de la edificación se logra abastecer hasta un 45% con a-Si y 55% con CdTe. En la **Figura 5.13** se muestra el ahorro energético generado por cada VFV para cada relación de área (RA) respecto a ventana de referencia (VR).

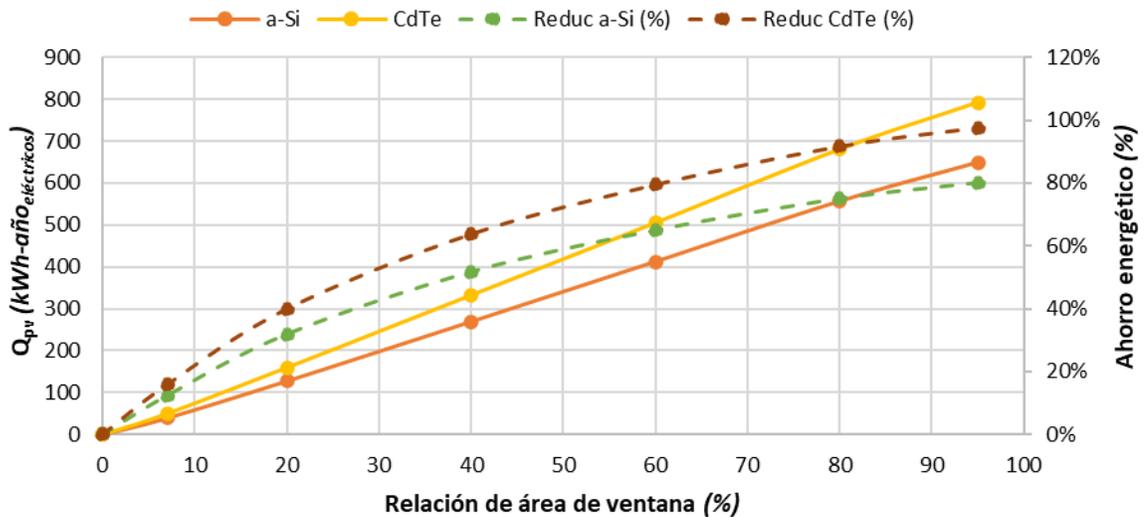


Figura 5.13 Ahorro energético generado por las VFV en cada RA.



Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones de trabajo y las recomendaciones para trabajos futuros.



6.1 Conclusiones

En el estudio se observa que el uso de ventanas fotovoltaicas en espacios con aire acondicionado (Ac) permiten ahorros de cargas térmicas considerables sin afectar la sensación térmica, mientras que su uso en espacios con ventilación natural (VN) representa mayores cargas de enfriamiento, sin considerables cambios en la sensación térmica.

- ✚ Se realizó un estudio comparativo en términos de cargas térmicas, confort térmico y energía eléctrica generada por las ventanas fotovoltaicas (VFV), en un cuarto tipo hotel categoría Suite Junior para la ciudad de Riviera Maya, Quintana Roo, México con clima cálido subhúmedo. Se encontró que es posible reducir en promedio cargas anuales hasta un 62%, manteniéndose en la zona de confort con un voto medio predicho (PMV) promedio anual de 0.86.
- ✚ Las ventanas fotovoltaicas (VFV) de telurio de cadmio (CdTe) presentó la mayor reducción de cargas anuales con 62%, seguida por la de silicio amorfo (a-Si) con 61%, en ambos casos el PMV fue menor a 0.90. La producción fotovoltaica anual representó ahorros energéticos del 80 y 98% para a-Si y CdTe respectivamente con una relación de área (RA) del 95% con fracciones fotovoltaicas respecto a la ventana de referencia (VR) del 28% para a-Si y 44% para CdTe.
- ✚ El efecto de la relación de área en las cargas térmicas en la ventana de telurio de cadmio (CdTe) fue lineal, presentando un ahorro de cargas térmicas para una relación de área (RA) conforme a la norma oficial mexicana NOM-008-ENER-2001 fue del 30.17%, un máximo de 53.53% (RA: 95%) y el mínimo ahorro de 7.88% (RA:7%). Por su parte, la ventanas fotovoltaicas (VFV) de silicio amorfo (a-Si) también el comportamiento fue lineal, con un ahorro del 29.17% conforme a la norma oficial mexicana, un máximo de 52.22% (RA: 95%) y el mínimo ahorro para de 7.36% (RA:7%).



- ✚ En el estudio del caso de ventilación natural (VN) se observa que los grados día promedio anual de enfriamiento se incrementan con el uso de las ventanas fotovoltaicas (VFV) de telurio de cadmio (CdTe) de 44.75-72.92 (162%) y con la de silicio amorfo (a-Si) de 44.75-68.37 (153%), respecto de cuando se utiliza la ventana de referencia.
- ✚ El confort térmico se disminuyó con el uso de las ventanas fotovoltaicas (VFV) al compararse el desempeño con la ventana de referencia (VR). El voto medio predicho (PMV) promedio anual fue de 1.04 para la ventana de telurio de cadmio (CdTe) y la ventana de referencia (VR), mientras que para la de silicio amorfo (a-Si) fue de 1.07. El PPD promedio anual de las ventanas de CdTe, a-Si y VR fueron de 36.96, 37.89 y 37.31% respectivamente. Con lo anterior se observa que los cambios en el confort térmico son poco significativos al utilizar VFV en espacios con ventilación natural (VN).
- ✚ El confort térmico para Ac se muestra muy estable a lo largo de todo el año con valores de voto medio predicho (PMV) y porcentaje de personas insatisfechas (PPD) de 0.43 y 12.28% para a-Si, 0.42 y 12.02% para telurio de cadmio (CdTe) y 0.43 y 12.58% para ventana de referencia (VR). Esto debido al uso de un sistema de climatización el cual permite mantener las ganancias de calor dentro de la zona de confort.
- ✚ El efecto del confort térmico para aire acondicionado (Ac) y ventilación natural (VN) muestra diferencias para voto medio predicho (PMV) y el porcentaje de personas insatisfechas (PPD) del 60% y 68% para a-Si, 60% y 67% para telurio de cadmio (CdTe) y 59% y 66% para la ventana de referencia (VR).
- ✚ La ventana de telurio de cadmio (CdTe) para una relación de área del 7% ($1 m^2$) muestra casi el mismo comportamiento que la ventana de silicio amorfo (a-Si) con cargas de enfriamiento (Q_c) de 48.3 y 48.3 $kWh-m^2$ respectivamente. Sin embargo, la ventana de CdTe presenta mayores reducciones en las cargas de enfriamiento con reducciones del 34.03 y 35.20 % anual para a-Si y CdTe respectivamente.



- ✚ Las ventanas fotovoltaicas (VFV) de silicio amorfo (a-Si) y telurio de cadmio (CdTe) logran abastecer en un 53 y 65% la demanda energética total de la habitación tipo hotel.
- ✚ Las ventanas de silicio amorfo (a-Si) y telurio de cadmio (CdTe) presentan reducciones en promedio 53 y 65% respectivamente. Las reducciones de las emisiones de dióxido de carbono (*Ton CO_{2e}*) utilizando las ventanas fotovoltaicas (VFV) se encuentran afectadas por las relaciones de área. Por su parte, las VFV de a-Si presenta ahorros del 52% y para CdTe de 64% conforme a la NOM-008-ENER-2001.



6.2 Recomendaciones para trabajos futuros

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

- ✚ Para la simulación se recomienda considerar espacios adyacentes a la habitación tipo hotel y subdivisiones en el interior de esta para conocer como se ve afectado el comportamiento de las cargas térmicas, el confort térmico y la producción de energía eléctrica con las ventanas fotovoltaicas.
- ✚ Para el estudio del confort térmico se recomienda implementar diferentes modelos de confort tanto adaptativos como estáticos para identificar la afectación de la temperatura óptima de confort con el uso de las ventanas fotovoltaicas.
- ✚ Realizar el estudio para diferentes orientaciones de la habitación para identificar el efecto que esta tiene sobre las cargas térmicas, el confort térmico y la generación de energía eléctrica producida por las ventanas fotovoltaicas.
- ✚ Realizar un estudio económico para identificar la viabilidad económica de las utilizar ventanas fotovoltaicas en una habitación tipo hotel en clima cálido.
- ✚ Estudiar el impacto de los modelos adaptativos en viviendas residenciales con la integración de diferentes tipos de ventanas fotovoltaicas.



Referencias

Acosta A., González A., Zamarreño M. J., Álvarez V., (2016). “Energy savings and guaranteed thermal comfort in hotel rooms through nonlinear model predictive controllers”. *Energy and Buildings*, 129, 59-68.

Agencia Estatal de Meteorología (AEMet)., (2013). “Radiación solar”. Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino Obtenido de www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/observacion/radiacion/Radiacion_Solar.pdf. Fecha de consulta 01 mayo 2019.

Aritra Ghosh., Nabin Sarmah., Senthilarasu Sundaram., Tapas K. Mallick., (2019). “Numerical studies of thermal comfort for semi-transparent building integrated photovoltaic (BIPV)-vacuum glazing system”. *Solar Energy*, 190, 608-616.

Alarcón J., Alvarado R., Frieria P., Ania A., (2018). “Evaluación de Ventanas Fotovoltaicas con Concentradores Solares Luminiscentes para Edificios Cero-energía en Santiago de Chile”. *Informes de la Construcción*, 70, 550.

Beckman. W., (2014). “Mathematical Reference”. *A Transient System Simulation Program*, 4, 1-474.

Beckman. W., (2014). “Multizone Building Modeling with Type 56 and TRNBuild”. *A Transient System Simulation Program*, 5, 1-230.

Chae Y., Kim J., Park H., Shin B., (2014). “Building energy performance evaluation of building Integrated photovoltaic (BIPV) window with semi-transparent solar cells”. *Applied Energy*, 129, 217-227.



Cattell, C., Dombeck, J., Keiling, A., Wygant, J., Bergmann, R., Hudson, M. K., & Parks, G. (2001). “Disclaimer: The following material is being kept online for archival purposes”. NASA. Obtenido de <https://pwg.gsfc.nasa.gov/stargaze/Meclipt.htm>. Fecha de consulta 10 octubre 2020.

Chagolla M., (2002). “Análisis y evaluación de cargas térmicas en edificios aplicando el paquete de cómputo TRNSYS”. Tesis de Maestría. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET), Cuernavaca, Morelos, México.

Chagolla M., (2012). “Estudio de la demanda energética, la calidad térmica y la calificación energética de las viviendas en el estado de Morelos”. Tesis de Doctorado. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET), Cuernavaca, Morelos, México.

Comisión Reguladora de Energía-CRE., (2017). “Factor de Emisión del Sector Eléctrico Nacional”. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/registro-nacional-de-emisiones-rene>. Fecha de consulta 12 febrero 2019.

De Atenas Grecia, P. A. T., 3. “Principios de la Geometría Solar”. Obtenido de https://www.labri.fr/perso/billaud/travaux/Helios/Helios2/resources/es03/chapter_3_ES.pdf. Fecha de consulta 12 febrero 2019.

Debbarma Mary., Sudhakar K., Baredar Prashant., (2017). “Comparison of BIPV and BIPVT: A review”. *Resource-Efficient Technologies*, 3, 263-271.

EnergyPlus 8.3.0-b45b06b780., (2011). “Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2011”. 31-32.

Freixanet V. A. F., (2010). “Los Grados-Día herramienta de diseño Bioclimático para el ahorro de energía en las edificaciones”. *SNES2010-ABC-039*, 3-5.



Ghosh A., Sarmah N., Sundaram S., Mallick K. T.; (2019). “Numerical studies of thermal comfort for semi-transparent building integrated photovoltaic (BIPV)-vacuum glazing system”. *Solar Energy*, 190, 608-616.

Ha-Ryeon Kima., Boafao F., Jin-Hee Kimb., Jun-Tae Ki., (2015). “Investigating the effect of roof configurations on the performance of BIPV system”. *Energy Procedia*, 78, 1974-1979.

Hernando Paredes Rubio., Erick Garfias Arroyo., Juan Quintero., (2013). “Diseño de un benchmarking energético: Sector hotelero PyME y acompañamiento en su implementación en destinos turísticos mexicanos”. *SENER/GIZ. ProNAMA*, 1, 21-30.

International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method., (1995).

Jean NOË., (2004). “CoDyBA BESTEST Qualification”. 17-18.

Jinqing Peng., Dragan C. Curcija., Anothai Thanachareonkit., Eleanor S. Lee, Howdy Goudey., Stephen E. Selkowitz., (2019). “Study on the overall energy performance of a novel c-Si based semitransparent solar photovoltaic window”. *Applied Energy*, 242, 854-872.

Kuhn, T. E., (2017). “State of the art of advanced solar control devices for buildings”. *Solar Energy*, 154, 112-133.

Kyriaki E., Giama E., Papadopoulou A., Drosou V., Papadopoulou A.M., (2017). “Energy and Environmental Performance of Solar Thermal Systems in Hotel Buildings”. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 36-43.

Lee Junghun., Kim Seohoon., Kim Jonghun., Song Doosam., Jeong Hakgeun., (2018). “Thermal performance evaluation of low-income buildings based on indoor temperature performance”. *Applied Energy*, 221, 425-436.



Lin L., Law K., (2012). “Overall energy performance of semi-transparent single-glazed photovoltaic (PV) window for a typical office in Hong Kong”. *Renewable Energy*, 49, 250-254.

Polo López Cristina S., Marco Sangiorgi., (2013). “Comparison assessment of BIPV façade semitransparent modules: further insights on human comfort conditions”. *Energy Procedia*, 48, 1419-1428.

López-Pérez L. A., J.J. Flores-Prieto., C. Ríos-Rojas., (2018). “Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid climate”, *Building and Environment*, 150, 181-194.

Martínez J. J., (2018). “Desempeño termo-eléctrico de ventanas fotovoltaicas”. Tesis de Maestría. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET), Cuernavaca, Morelos, México.

Menjívar M., (2013). “Arquitectura Bioclimática como parte fundamental para el ahorro de energía en edificaciones”. *ING-NOVACIÓN*, 5, 1-12.

Moya-Mondragón Samantha., (2018). “Evaluación termo-eléctrica de una ventana fotovoltaica en la Riviera Maya para la mitigación de gases efecto invernadero”. Tesis Licenciatura. Universidad Politécnica del Estado de Morelos (UPEMOR), Cuernavaca, Morelos, México.

M. O. Abadie., (2010). “DOMUS Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007”. 29-30.

NORMA Oficial Mexicana NOM-024-ENER-2012. “Características térmicas y ópticas del vidrio y sistemas vidriados para edificaciones. Etiquetado y métodos de prueba”.



NORMA Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2012. “Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales”.

Ogbomo O., Amalu E., Olagbegi P., (2016). “A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1225-1238.

Quivén J. J., (2016). “Propuesta de vivienda social sostenible para climas cálidos. aplicación en la ciudad de Chetumal, Q.R., México”. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Catalunya.

Saber E., Lee S., Manthapuri S., Yi W., Deb C., (2014). “PV (photovoltaics) performance evaluation and simulation-based energy yield prediction for tropical buildings”. *Energy*, 71, 588-595.

Sánchez-Vásquez L.J., (2012). “Estudio térmico de un edificio vidriado ubicado en la ciudad de México y evaluación de su habitabilidad para el confort”. Tesis de Maestría. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET), Cuernavaca, Morelos, México.

Sankar B., Chowdhury A., Mathur S., Mathur J., (2017). “Assessment of the efficiency of window integrated CdTe based semitransparent photovoltaic module”. *Sustainable Cities and Society*, 37, 250-262.

Tian., Wei Zhang., Lingzhi Xie., Zhichun Ni., Qingzhu Wei., Xinwen Wu., Wei Wang and Mo Chen., (2019). “Thermal Comfort Evaluation of Rooms Installed with STPV Windows”. *Energies*, 12, 808.

Tina G.M., A.Gagliano., F.Nocera., F.Patania., (2013). “Photovoltaic Glazing: Analysis of Thermal Behavior and Indoor Comfort”. *Energy Procedia*, 42, 367-376.



Vuong E., Kamel R. S., & Fung A. S., (2015). “Modelling and Simulation of BIPV / T in EnergyPlus and TRNSYS”. *Energy Procedia*, 78, 1883–1888.

Woubishet Zewdu Taffese., (2014). “Improving Accuracy with Minimal Computational Effort through Coupled Building Envelope and CFD Mode”. 9 y 54.

Wei H., Zhang Y. X., Sun W., Hou J. X., Ji J. J., (2010). “Experimental and numerical investigation on the performance of amorphous silicon photovoltaics window in East China”. *Building and Environment*, 46, 363-369.

Yanyi Sun., Katie Shanks., Hasan Baig., Wei Zhang., Xia Hao., Yongxue Li., Bo He., Robin Wilson., Hao Liu., Senthilarasu Sundaram., Jingquan Zhang., Lingzhi Xie., Tapas Mallick., Yupeng Wu., (2018). “Integrated semi-transparent cadmium telluride photovoltaic glazing into windows: Energy and daylight performance for different architecture designs”. *Applied Energy*, 231, 972-984.

Zhang., Ruiqiao Yang., Shijun You., Wandong Zheng., Xuejing Zheng., Tianzhen Ye., (2018). “The CPMV index for evaluating indoor thermal comfort in buildings with solar radiation”. *Building and Environment*, 134, 1-9.

Zhibin Wu., Nianping Li., Pawel Wargocki., Jingqing Peng., Jingming Li., Haijiao Cui., (2019). “Adaptive thermal comfort in naturally ventilated dormitory buildings in Changsha, China”. *Energy and Building*, 186, 56-70.