

**Universidad
Autónoma
Metropolitana**



Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

DIVISIÓN DE CIENCIAS Y ARTES PARA EL DISEÑO

Especialización, Maestría y Doctorado en Diseño

**EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LOS EFECTOS
TERMOENERGÉTICOS DE SISTEMAS DE ACRISTALAMIENTO EN 2
CLIMAS DE MÉXICO**

PRESENTA:

ARQ. LUZ ELENA MOREYRA GONZÁLEZ

TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN DISEÑO BIOCLIMÁTICO

Miembros del Jurado:

Dr. Pablo David Elías López
Director de Tesis

Dr. Guillermo Barrios del Valle
Dr. Jorge Armando Ojeda Sánchez
Dr. José Roberto García Chávez
Mtro. Hector Valerdi Madrigal
Mtro. Roberto Barnard Amosurrutia

*Permite que tus sueños sean tan grandes como las montañas
y ojala tengas el coraje de escalar sus cumbres.*
Anónimo

*La simplificación es la barbarie del pensamiento.
La complejidad es la civilización de las ideas.*
Morin, 1984:291.

*A mis padres **Mercedes y Rogelio***

Por ser mis siempre constantes. Porque son mi más grande motivación como ejemplos de coraje, tenacidad y éxito en todas las áreas. Por su consejo, sabiduría y preocupación, a pesar de mi resistencia. Por el gran esfuerzo y apoyo incondicional.

Porque son el amor más grande en mi vida

*A mis hermanos **Mariana y Rogelio***

Por apoyarme en este camino desde muchos y variados frentes. Por ser cariño, amor y compañía en mi vida. Por ser ejemplo de éxito, fortaleza y perseverancia. Por aguantarme y quererme siempre.

*A mis amores chiquitos **Emilio y Elena,***

Por llenar de vida y ternura mi alma.

Por entender que este viaje fue mi camino elegido y necesario, y a pesar de todo, mantenerse a mi lado con cariño y amor. Es por ustedes que hoy, este proyecto académico y de vida, alcanza todos sus objetivos.

Agradecimientos

Dr. Pablo Elías López

Por guiar con firmeza y confianza este camino. Por enseñarme y contagiarme la pasión a la investigación y la ciencia. Por impulsar mi crecimiento académico y personal en muchos aspectos. Por su apoyo, amistad y compañía.

Dr. Guillermo Barrios del Valle

Por su valiosa participación y aportes sin los cuales este trabajo no hubiera sido posible. Por su siempre disposición y compromiso con la investigación. Por su amplio conocimiento siempre dispuesto a compartirlo, retando y motivando a cada paso mi aprendizaje.

*Jurados y lectores, **Dr. Jorge Armando Ojeda Sánchez, Mtro. Héctor Valerdi Madrigal y Mtro. Roberto Barnard Amosurrutia, Dr. José Roberto García Chávez***

Por su tiempo y aportes al mejoramiento de la investigación.

Maestros del posgrado

Por presentarme el amplio mundo de la Arquitectura Bioclimática.

*A los que siempre estuvieron, **Lucia y Rodrigo***

Por su cariño, compañía, motivación y comprensión. Se quedan en mi corazón con todo mi cariño y gratitud.

Personal administrativo de posgrado Cyad,

Por las facilidades otorgadas para el desarrollo de la investigación, el apoyo y confianza.

UAM Azcapotzalco

Por abrirme sus puertas y ser el medio para mi crecimiento académico y personal.



RESUMEN

En el presente trabajo se muestra la evaluación numérica de 7 sistemas de acristalamiento en dos climas de México a través del motor de cálculo EnergyPlus™ en su interfaz DesigBuilder®. El objetivo central fue la caracterización y evaluación de los efectos del intercambio de calor de 7 sistemas de acristalamiento al interior de un módulo de experimentación virtual. Se analizaron los resultados del comportamiento térmico de los 7 sistemas, bajo dos condiciones interiores: libre desempeño de la temperatura, y con uso de sistemas de acondicionamiento ambas bajo un modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo. Se compararon los efectos de cada sistema orientados hacia dos puntos cardinales distintos, SUR y ESTE.

Los períodos de evaluación fueron: Día Típico de verano (DTv) y Día Típico de Invierno (DTi) para condiciones de libre desempeño de la temperatura, y desempeño anual para condiciones de con uso de sistemas de acondicionamiento. Los parámetros de evaluación utilizados fueron las temperaturas operativas máximas y mínimas al interior, la relación entre factor de decremento (FD) y tiempo de retardo (TR), y el consumo energético anual en kWh, por cargas térmicas de calentamiento y de enfriamiento.

Los resultados muestran que con base en la temperatura de confort o temperatura de neutralidad (T_n), distintos climas requerirán distintos tipos de acristalamiento. Se observó que sistemas dobles de acristalamiento no presentan diferencias significativas en su desempeño en referencia a sistemas monolíticos en condiciones de libre desempeño de la temperatura.

En condiciones con uso de sistemas de acondicionamiento, los sistemas dobles presentan una mejor evaluación, sin embargo se registraron diferencias pequeñas en el consumo de la carga térmica total anual entre ellos. Ya que el alto costo económico y ambiental de la aplicación de los sistemas de mayor aislamiento, se recomienda la combinación con estrategias bioclimáticas complementarias en función de disminuir el impacto económico y ambiental.



INDICE GENERAL

Resumen

Índice de figuras

1. PLANTEAMIENTO GENERAL	1
1.1. Planteamiento general y delimitación del problema	1
1.2. Justificación	3
1.3. Hipótesis	4
1.4. Objetivos	4
1.5. Metas	5
1.6. Antecedentes	5
2. MARCO TEORICO	8
2.1. Mecanismos de intercambio de calor en los sistemas de acristalamiento	9
2.2. Tecnologías en sistemas de acristalamiento	14
2.3. Parámetros de evaluación	24
2.3.1. Temperatura operativa	24
2.3.2. Factor de decremento FD	24
2.3.3. TR tiempo de retardo	25
2.3.4. Carga Térmica	25
2.3.5. Carga Térmica Total	26
3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	27
3.1. Algoritmo metodológico	27
3.2. Caracterización climática de ciudades de referencia	29
3.2.1. Monterrey	31
3.2.2. Toluca	35
3.3. Descripción del caso de estudio	38
3.4. Simulaciones térmicas:	42
3.4.1. EnergyPlus (E+) y DesignBuilder	43
3.4.2. Modelo de la distribución de la radiación solar en E+	44
3.4.3. Modelado de transferencia de calor en ventanas	46
3.5. Diseño experimental	48
3.5.1. Módulo de experimentación virtual (MEV)	48
3.5.2. Periodos de evaluación	50
3.5.3. Análisis de orientaciones	51

4. RESULTADOS	56
4.1. Monterrey	56
4.1.1. Orientación SUR	56
4.1.1.a Día Típico de Verano	57
4.1.1.b Día Típico de Invierno.....	63
4.1.1.c Resumen anual.....	70
4.1.2. Orientación ESTE	73
4.1.2.a Día Típico de Verano	73
4.1.2.b Día Típico de Invierno	79
4.1.2.c Resumen anual	86
4.2. Toluca	88
4.2.1. Orientación SUR	88
4.2.1.a Día Típico de Verano	88
4.2.1.b Día Típico de Invierno	93
4.2.1.c Resumen Anual	99
4.2.2. Orientación ESTE	101
4.2.2.a Día Típico de Verano	101
4.2.2.b Día Típico de Invierno.....	107
4.2.2.c Resumen anual	112
5. CONCLUSIONES	114
6. Bibliografía	
7. Anexo	



INDICE DE FIGURAS

FIGURA	CONTENIDO	PAG.
2.1	Flujo de calor a través de un sistema de acristalamiento.....	10
2.2	Propiedades ópticas de los cristales	10
2.3	Flujo de calor general por tres tipos de acristalamiento.....	11
2.4	Ganancias por radiación en la ciudad de Monterrey (A) y Toluca (B), en las cuatro orientaciones a través de un cristal claro de 6mm.....	13
2.5	Numeración utilizada para la designación de la cara del cristal en donde se aplicaran los recubrimientos o capas.....	16
2.6	Comparación del flujo de calor a través de (A) un sistema monolítico y por (B) un sistema doble	17
2.7	Comparación del flujo de calor a través de un sistema monolítico (A, C) y por un sistema doble (B,D) por temporada para un espacio con uso de sistemas de acondicionamiento.....	18
2.8	Tabla de propiedades de casos presentados.....	21
2.9	Intercambio de calor por radiación (A) y conducción (B) por 7 sistemas de acristalamiento en la ciudad de Monterrey.....	22
2.10	Gráfica de la relación entre FD y TR.	25
3.1	Clasificación por Bioclimas, Elaboración propia con base en “Uso eficiente de la energía en la vivienda” (CONAVI, 2006).	30
3.2	Temperaturas promedio, máxima (Tex max), media (Tex med) y mínima (Tex min), Temperatura de neutralidad (Tn) para la ciudad de Monterrey.	31
3.3	Radiación global horizontal y difusa horizontal, mensual para la ciudad de Monterrey. (<i>Meteonorm 7.0</i>)	32
3.4	Carta psicrométrica anual con horas de confort para la ciudad de Monterrey. (<i>Climate Consultant 5.5</i>)	33
3.5	Temperaturas promedio, máxima (Tex max), media (Tex med) y mínima (Tex min), Temperatura de neutralidad (Tn) y Humedad relativa.....	35
3.6	Radiación global horizontal y difusa horizontal, mensual para la ciudad de Toluca. (<i>Meteonorm 7.0</i>).....	36
3.7	Carta psicrométrica anual con horas de confort para la ciudad de Toluca. (<i>Climate Consultant 5.5</i>)	37

3.8	Descripción de casos de estudio, sistemas monolíticos (A) y sistemas dobles (B)	40
3.9	Distribución de la radiación solar proveniente del cielo (http://www.designbuilder.co.uk/helpv4.2).	44
3.10	Geometría y dimensiones del módulo de experimentación virtual (MEV)	48
3.11	Cuadro de propiedades termofísicas del sistema constructivo utilizado en el MEV. (<i>Biblioteca de propiedades de DesignBuilder®</i>).....	49
3.12	Cuadro de características para el edificio de referencia en la NOM-008-ENER. (<i>NOM-008-ENER</i>)	50
3.13	Temperatura operativa (Top) efecto del cambio de orientación del MEV en DTv (A) y DTi (B) para la ciudad de Monterrey.	52
3.14	Temperatura operativa (Top) efecto del cambio de orientación del MEV en DTv (A) y DTi (B) para la ciudad de Toluca.	53
4.1	Comportamiento térmico de la temperatura operativa (Top) por los 7 casos de estudio en un día típico de verano (DTv) en orientación SUR para la ciudad de Monterrey.	57
4.2	Top max (A) y Top min (B) por los 7 casos de estudio y ΔT_n para el DTv en orientación SUR para la ciudad de Monterrey.	58
4.3	Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo (TR) por los 7 casos de estudio para un día típico de verano (DTv) en orientación SUR para la ciudad Monterrey.	60
4.4	Carga térmica de enfriamiento (Qte) mensual en orientación SUR para la ciudad de Monterrey.	62
4.5	Comportamiento térmico de la temperatura operativa (Top) por los 7 casos de estudio en un día típico de invierno (DTi) en la orientación SUR para la ciudad de Monterrey.	64
4.6	Top max (A) y Top min (B) por los 7 casos de estudio y su ΔT_n en un DTi en orientación SUR para la ciudad de Monterrey.	65
4.7	Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo (TR) por los 7 casos de estudio para un día típico de invierno (DTi) en orientación SUR para a ciudad de Monterrey.	67
4.8	Carga térmica de calentamiento (Qtc) mensual en una orientación SUR para la ciudad de Monterrey.	68
4.9	Cargas térmicas de calentamiento (Qtc) y cargas térmicas por enfriamiento (Qte) anuales por los 7 casos de estudio, en una orientación SUR para la ciudad de Monterrey.	70
4.10	Carga térmica TOTAL (QTt) anual por los 7 casos de estudio en una orientación SUR para la ciudad de Monterrey.	71
4.11	Comportamiento térmico de la temperatura operativa (Top) por los 7 casos de estudio en un día típico de verano (DTv) en orientación ESTE para la ciudad de Monterrey.	74
4.12	Top max (A) y Top min (B) por los 7 casos de estudio y su ΔT_n en un DTv en una orientación ESTE para la ciudad de Monterrey.	75
4.13	Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo (TR) por los 7 casos de estudio para un día típico de verano (DTv) en orientación ESTE para la ciudad de Monterrey.	76

4.14	Carga térmica de enfriamiento (Q_{te}) mensual para la orientación ESTE.	77
4.15	Comportamiento térmico de la temperatura operativa (T_{op}) por los 7 casos de estudio, para un día típico de invierno (DT_i) en la orientación ESTE para la ciudad de Monterrey.	79
4.16	Top max (A) y Top min (B) por los 7 casos de estudio y su ΔT_n , en un DT_i en una orientación ESTE para la ciudad de Monterrey.....	80
4.17	Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo (TR) por los 7 casos de estudio para un día típico de invierno (DT_i) en orientación ESTE para la ciudad de Monterrey.	83
4.18	Carga térmica de calentamiento (Q_{tc}) mensual para la orientación ESTE en la ciudad de Monterrey.	84
4.19	Cargas térmicas de calentamiento (Q_{tc}) y cargas térmicas por enfriamiento (Q_{te}) anuales por los 7 casos de estudio, en una orientación ESTE en la ciudad de Monterrey.	86
4.20	Comportamiento térmico de la temperatura operativa (T_{op}) por los 7 casos de estudio, para un día típico de verano (DT_v) en la orientación SUR, para la ciudad de Toluca.	89
4.21	Top max (A) y Top min (B) por los 7 casos de estudio y su ΔT_n , para un DT_v en una orientación SUR para la ciudad de Toluca.	90
4.22	Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo (TR) por los 7 casos de estudio para un día típico de verano (DT_v) en orientación SUR, para la ciudad de Toluca.	91
4.23	Carga térmica de enfriamiento (Q_{te}) mensual para una orientación SUR en la ciudad de Toluca.	93
4.24	Comportamiento térmico de la temperatura operativa (T_{op}) por los 7 casos de estudio para un día típico de invierno (DT_i) en una orientación SUR para la ciudad de Toluca.....	94
4.25	Top max (A) y Top min (B) por los 7 casos de estudio y su ΔT_n para un DT_i , en una orientación SUR para la ciudad de Toluca. ...	95
4.26	Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo (TR) por los 7 casos de estudio para un día típico de invierno (DT_i) en orientación SUR para la ciudad de Toluca.	97
4.27	Carga térmica de calentamiento (Q_{tc}) mensual en una orientación SUR para la ciudad de Toluca.	98
4.28	Carga térmica de calentamiento (Q_{tc}) y cargas térmicas por enfriamiento (Q_{te}) anuales en una orientación SUR para la ciudad de Toluca.	99
4.29	Comportamiento térmico de la temperatura operativa (T_{op}) por los 7 casos de estudio para un día típico de verano (DT_v) en una orientación ESTE para la ciudad de Toluca.	102
4.30	Top max (A) y Top min (B) por los 7 casos de estudio y su ΔT_n en un DT_v en una orientación ESTE para la ciudad de Toluca.....	103
4.31	Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo (TR) por los 7 casos de estudio para un día típico de verano (DT_v) en orientación ESTE para la ciudad de Toluca.	105
4.32	Carga térmica de enfriamiento (Q_{te}) mensual en una orientación ESTE para la ciudad de Toluca.	106

4.33	Comportamiento térmico de la temperatura operativa (Top) por los 7 casos de estudio en un día típico de invierno (DTi) para orientación ESTE en la ciudad de Toluca.	107
4.34	Top max (A) y Top min (B) por los 7 casos de estudio y su ΔT_n en una orientación ESTE para la ciudad de Toluca.	109
4.35	Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo por los 7 casos de estudio para un día típico de invierno (DTi) en orientación ESTE para la ciudad de Toluca.	110
4.36	Carga térmica de calentamiento (Qtc) mensual en una orientación ESTE para la ciudad de Toluca.	111
4.37	Carga térmica de calentamiento (Qtc) y cargas térmicas por enfriamiento (Qte) anuales en una orientación ESTE para la ciudad de Toluca.	112
5.1	Comparativa de la diferencia promedio entre las 7 Top max, entre las 7 Top min, entre los casos de estudio para la ciudad de Monterrey y la ciudad de Toluca en sus respectivos DTv y DTi para las orientaciones SUR y ESTE.	113
5.2	Resumen con de libre desempeño de la temperatura para la ciudad de Monterrey, en su orientación SUR en un DTv.	116
5.3	Resumen libre desempeño de la temperatura para la ciudad de Monterrey, en su orientación SUR en un DTi.	116
5.4	Resumen con libre desempeño de la temperatura para la ciudad de Monterrey, en su orientación ESTE en un DTv	117
5.5	Resumen con libre desempeño de la temperatura para la ciudad de Monterrey, en su orientación ESTE en un DTi	117
5.6	Resumen con libre desempeño de la temperatura para la ciudad de Toluca , en su orientación SUR en un DTv	118
5.7	Resumen para desempeño de la temperatura para la ciudad de Toluca , en su orientación SUR en un DTi	118
5.8	Resumen para desempeño de la temperatura para la ciudad de Toluca , en su orientación ESTE en un DTv	119
5.9	Resumen para desempeño de la temperatura para la ciudad de Toluca , en su orientación ESTE en un DTi	119
5.10	Resumen anual para ambientes con Top fija por el uso de sistemas de acondicionamiento para la ciudad de Monterrey , en su orientación SUR (A) y ESTE (B)	120
5.11	Resumen anual para ambientes con Top fija con uso de sistemas de acondicionamiento para la ciudad de Toluca , en su orientación SUR (A) y ESTE (B)	121
5.12	Tabla de precios de referencia de los 7 casos de estudio. Fuente. Elaboración propia con datos obtenidos de la distribuidora de cristales Arescris S.A. de C.V.	122



Capítulo 1

Planteamiento General

1.1 PLANTEAMIENTO GENERAL Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

A partir de la revolución industrial, el uso de sistemas de acondicionamiento se ha mantenido como una constante dentro de la conceptualización de los ambientes interiores de las edificaciones. Su popularización, y en muchos casos la necesidad de su aplicación, como herramienta para mantener los niveles de confort térmico al interior ha incrementado los consumos energéticos atribuidos a las edificaciones. Dicha problemática ha llevado a la revalorización de la envolvente de los edificios, no solo como concepto de diseño sino como concepto de consumo o ahorro energético.

La envolvente de las edificaciones conformada, de acuerdo a su interacción con la radiación solar, por elementos opacos y translúcidos, determina las relaciones entre el medio exterior e interior. La relación entre los efectos por las propiedades ópticas y termofísicas de esos elementos, con los requerimientos de confort de los ocupantes de los espacios, determina la magnitud del consumo termoenergético de cada edificación.

Los sistemas de acristalamiento están contenidos dentro de las ventanas, y en conjunto conforman los elementos translúcidos de la envolvente. A través de los acristalamientos, el ambiente interior, recibe radiación del exterior. Al mismo tiempo experimenta pérdidas y ganancias de calor dependiendo la dirección del flujo de energía. Como elementos transparentes a la radiación solar, presentan mecanismos de transferencia de calor de mayor complejidad y rapidez que algunos elementos opacos. La literatura establece a los acristalamientos, como los elementos más débiles dentro del balance térmico de las edificaciones (El-Debb, 2013).

Las características principales de los acristalamientos que impactan en el ahorro energético son su poca masa térmica comparada con la de los elementos opacos, su manejo selectivo de la radiación solar y de la radiación proveniente de los objetos y cuerpos a su alrededor.

En función de potencializar los efectos en el ahorro energético, y con base en el manejo de las distintas características antes mencionadas, el sector dedicado a la fabricación e investigación en sistemas de acristalamiento, ha desarrollado una amplia gama de variantes del cristal convencional. A través de la modificación de las propiedades termofísicas como la absorción, reflexión, conducción y emisividad del material, se han realizado adiciones de colorantes en la masa del cristal, recubrimientos de capas metálicas, adiciones de gases encapsulados, entre otros. Con base en lo anterior, en el mercado comercial de acristalamientos se pueden encontrar cristales categorizados como absorbentes, reflectantes, pirolíticos, bajo emisivos, entre otros. Además de sistemas con doble, triple y hasta cuádruple acristalamiento.

Sin embargo muchos de estos sistemas, han sido desarrollados para satisfacer necesidades de climas con baja amplitud en la oscilación diaria de la temperatura exterior y baja radiación solar. Por ello, establecen y registran la magnitud de sus efectos con base en un análisis de transferencia de calor en estado estacionario.

Considerando en su mayoría espacios con uso de sistemas de acondicionamiento, la especificación de acristalamientos ha popularizado el uso de sistemas cuya principal característica es la disminución de los valores de transmitancia térmica, resultando en ambientes con altos niveles de aislamiento. Reglamentos como la NOM-008-ENER y certificaciones comerciales como LEED, otorgan beneficios sobre el uso de sistemas altamente herméticos considerando ambientes con temperatura constante a través de la incorporación de sistemas de acondicionamiento.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La problemática asociada a las ventanas involucra muchos aspectos dentro de las edificaciones. Desde el punto de vista del diseño, las ventanas aportan ligereza y transparencia a las edificaciones. Desde el punto de vista del usuario las ventanas aportan un valor psicológico a las edificaciones, al ser el medio de interacción con el medio exterior. Esta interacción incluye aspectos visuales, acústicos y lumínicos en contacto con las actividades al interior de los espacios. Desde el punto de vista del confort térmico, las ventanas como elementos transparentes de la envolvente, generan un alto porcentaje de ganancias y pérdidas de calor a lo largo del día.

En el balance térmico de las edificaciones, las ventanas aportan la mayor cantidad de ganancias por radiación al interior. La magnitud y rapidez de sus efectos en la temperatura interior, pueden llegar a igualar y amplificar los efectos provenientes de los elementos opacos, afectando cualitativa y cuantitativamente la interacción del ambiente interior. Sin embargo el flujo de calor a través de los elementos transparentes de la envolvente involucra también mecanismos de intercambio de calor por conducción y convección. Dichos efectos, aunque en menor proporción, influyen en la cantidad de pérdidas en condiciones donde el flujo de calor se invierte, del interior al exterior.

La especificación de sistemas de acristalamientos en las edificaciones actuales, por arquitectos y distribuidores comerciales, recurrentemente consideran la variable climática como una constante para todas las ciudades, despreciando los requerimientos térmicos específicos de cada clima. Esto se traduce en un gasto excesivo en sistemas de acristalamiento “sobrados” para las condiciones climáticas prevalecientes, o en uso excesivo de sistemas de climatización para la compensación de pérdidas y ganancias de calor, en los ambientes interiores.

En la relación entre la arquitectura bioclimática y el consumo termoenergético¹, se identifica la necesidad de actualizar cuantitativamente criterios cualitativos de las principales estrategias de climatización pasiva, como ejemplo las referentes a las

¹ Consumo de energía asociado al desempeño térmico de los materiales.

pérdidas y ganancias de calor por efecto de los elementos translúcidos. El contabilizar los efectos de la variedad de tecnologías en sistemas de acristalamiento del mercado actual, en función de su potencial de ahorro energético y de confort térmico, busca actualizar los criterios de aplicación de las estrategias bioclimáticas, aportando con ello nuevo conocimiento, congruente con las nuevas edificaciones y requerimientos del mercado.

Para lo anterior, la aplicación de metodologías de evaluación numérica con base en programas de cómputo para la simulación de las condiciones experimentales, como el programa EnergyPlus™, potencializa al investigador a planteamientos teórico – numéricos, sobre condiciones remotas, como el caso de distintos climas de México, en un tiempo relativamente corto bajo un manejo riguroso de variables, obteniendo resultados con una alta certidumbre. Así, la viabilidad de la evaluación de 7 sistemas de acristalamiento en 2 climas distintos, arroja resultados que se convierten en un potencial de variadas y futuras investigaciones en el campo de la arquitectura bioclimática.

1.3 HIPOTESIS

Las variables de clima y orientación inciden en el desempeño térmico interior. La interacción entre dichas variables y las propiedades termofísicas de los acristalamientos producen efectos complejos y multifactoriales en la temperatura interior de ambientes con libre desempeño y con temperatura constante, pudiéndose determinar el consumo energético por cada sistema.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar los efectos termoenergéticos de 7 sistemas de acristalamiento en la temperatura operativa interior, en un módulo de experimentación virtual (MEV), para dos climas representativos en México.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar dos climas representativos de México como zonas de estudio.

2. Evaluar numéricamente, el desempeño termoenergético de un espacio genérico de experimentación denominado: módulo de experimentación virtual (MEV) a través de simulaciones térmicas de manera teórica.
3. Elegir las orientaciones más significativas en los dos climas para la evaluación de los efectos en el MEV.
4. Caracterizar 7 sistemas de acristalamiento presentes en el mercado actual mexicano. Para fines del estudio, se entiende como *sistema de acristalamiento* a la hoja o hojas de cristal contenidas dentro de una ventana, sin contemplar la estructura que lo contiene.
5. Evaluar el uso de sistemas de acristalamiento bajo condiciones de libre desempeño de la temperatura.
6. Evaluar el uso de sistemas de acristalamiento bajo condiciones de temperatura constante al interior a través del uso de sistemas de acondicionamiento.

1.5 METAS

- Establecer una descripción del comportamiento de 7 sistemas de acristalamiento en dos climas de México accesible para arquitectos interesados en la utilización de dicha información en el campo del diseño.
- Servir como base del conocimiento sobre los efectos teórico-numéricos de los sistemas de acristalamiento y su posible impacto en el consumo termoenergético de las edificaciones en México.
- Establecer un antecedente de la aplicación de una metodología de evaluación numérica con base en simulaciones termoenergéticas para el diseño bioclimático realizado por arquitectos.

1.6 ANTECEDENTES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Para contextualizar el estudio, se presenta una breve descripción de parte de la bibliografía consultada. Los estudios consultados, puntualizan la importancia de las ventanas en la evaluación termoenergética de la envolvente. La mayoría de las investigaciones remarcan la complejidad del análisis de los sistemas de acristalamiento debido a la gran cantidad de variables que inciden en su desempeño al interior. Por lo tanto, los estudios reportados, abordan algunas de

las distintas variables, manteniendo un enfoque en la disminución del impacto termoenergético. A continuación se mencionan algunos de los más relevantes.

Steven Szokolay y Pedrini Aldomar (2003) remarcan la importancia del balance y optimización de las partes acristaladas de las fachadas, como parte de un diseño altamente eficiente. A través de simulaciones térmicas se puede acceder a información suficiente para definir el balance óptimo de cargas térmicas y el mejor diseño de ventana. En términos de desempeño energético, establecen que las ventanas no pueden ser consideradas como una estrategia pasiva aislada sino como partes de un sistema híbrido con demandas de elementos complementarios entre sí.

Steinar, Arild y Berit (2013 v.61, p. 185-192) establecen que la optimización del desempeño térmico a través del área y localización de los elementos transparentes en las fachadas es una de las acciones más efectivas en la reducción de las pérdidas de energía a través de la envolvente de los edificios. En su estudio sobre los efectos de la modificación del coeficiente de transferencia de calor global (valor U) y el coeficiente total de ganancias de solares (SHGC por sus siglas en inglés) concluyen que aún en el clima frío de Noruega, donde se realizó el estudio, considerado primordialmente con requerimientos de calefacción, las contribuciones de calor por las ventanas producen efectos de sobrecalentamiento los cuales no son comúnmente considerados. Con ello, destacan la complejidad de la interacción entre el balance energético de las ventanas y el efecto de las propiedades de los cristales.

En México M. Gijón-Rivera y G. Álvarez (2011, v.46, p.1223-1233) comparan los efectos de cuatro sistemas de acristalamiento, monolíticos y dobles, con y sin la aplicación de una capa de control solar en dos climas distintos, el clima de la ciudad de México y el de la ciudad de Ottawa en Canadá. Los resultados reflejados en la temperatura interior y en los consumos anuales de energía encuentran resultados distintos para ambos climas. Para Ottawa se observa que el uso de una capa de control solar reduce en una pequeña proporción la cantidad de cargas térmicas al interior durante el invierno, pero en el verano no presenta beneficio alguno, algo

relevante como conocimiento general de los acristalamientos. Para el clima de la ciudad de México la aplicación de la capa en un sistema monolítico presentó los peores desempeños, mientras que un sistema: doble claro + claro, sin la aplicación de la capa presentó los mejores resultados.

K. Tsikaloudaki, K. Laskos, Th. Theodosiou, y D. Bikas (v.49, p.192-199), estudiaron el desempeño de las cargas térmicas por enfriamiento debido al intercambio de los sistemas de acristalamiento en un clima cálido de Europa. Las conclusiones muestran que el aumento de cargas térmicas por enfriamiento debido a las contribuciones por el cristal, aumentan si, la transmitancia solar directa aumenta y la transmitancia térmica disminuye. Destacan que aun en climas cálidos europeos, los sistemas de acristalamiento utilizados se enfocan en la evitar las pérdidas de calor a través de los cristales, produciendo un aumento significativo en las cargas térmicas por enfriamiento en la época de mayor sobre calentamiento.

Khaled El-Dee (El-Debb, 2013) analiza la relación entre la proporción de los acristalamientos con la cantidad de aislante en los elementos opacos de la envolvente en 4 climas distintos. Se concluyó, que en ambientes de temperatura moderada el aumento en las propiedades de aislamiento de los sistemas no presenta beneficios útiles y por el contrario en algunos casos, incrementa el consumo de energía.



Capítulo 2 **Marco Teórico**

En el presente capítulo, en el punto 2.1 se describen los mecanismos de intercambio de calor en los sistemas de acristalamiento. En el punto 2.2 se puntualiza sobre el análisis de algunas de las tecnologías en sistemas de acristalamiento más utilizados en México. Finalmente en el punto 2.3, se presenta la descripción de los parámetros de evaluación utilizados en la presente investigación.

La transferencia de calor en las edificaciones, entre el ambiente exterior e interior, dependerá de las dimensiones y propiedades termofísicas de los elementos que conforman la envolvente. Las propiedades de todas las capas de sus elementos, opacos y translúcidos, y la magnitud de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor asociados, determinarán la cantidad de energía transferida hacia adentro y hacia afuera de los espacios. Con referencia a los elementos transparentes de la envolvente, dada su propiedad de transparencia a la radiación solar y su poca masa térmica, involucran procesos térmicos de naturaleza y magnitudes distintas a los presentados por los elementos opacos. Las condiciones térmicas interiores dependerán en un alto porcentaje de las propiedades térmicas de los acristalamientos presentes en las ventanas de las edificaciones, sobre todo cuando la proporción de la parte acristalada es mayor que la opaca.

La posición con respecto al sol, latitud geográfica y la orientación, así como sus propiedades geométricas de forma y proporción, determinarán la cantidad de radiación transferida a través de los acristalamientos. Considerando dentro de la arquitectura a las ventanas por su carácter estético y psicológico en los usuarios, será obligatorio la evaluación del impacto por el uso de ventanas en el confort térmico, el cual repercutirá de manera significativa en el consumo energético de las edificaciones.

En el diseño arquitectónico, la problemática asociada a la radiación por acristalamientos involucra: la orientación de las superficies construidas, la relación de proporción entre elementos opacos y translucidos (*Window to Wall ratio WWR*) y el diseño de elementos de sombreado o de disminución de la radiación solar transmitida, como es el caso con los distintos tipos de sistemas de acristalamiento. (Givoni, 1969)

2.1 MECANISMOS DE INTERCAMBIO DE CALOR EN LOS SISTEMAS DE ACRISTALAMIENTO

La radiación solar representa la fuente de energía más significativa en el desempeño termoenergético de las edificaciones. Su incorporación directa por los acristalamientos e indirecta a través de muros y cubierta, incide en las temperaturas y condiciones de confort al interior.

El paso de energía a través de los acristalamientos depende mayoritariamente de dos aspectos: el manejo selectivo del espectro de la radiación solar y las características del tipo de onda emitida por la fuente. En lo general, un acristalamiento será transparente a la radiación solar o de onda corta, pero se comportará como un elemento opaco frente a la radiación de onda larga re-irradiada por los objetos en la tierra, produciéndose el llamado efecto invernadero.

Sumado al efecto invernadero, el cristal por ser una lámina con poco espesor, alta conductividad y poca masa térmica, intercambia otro porcentaje de calor por efecto de la conducción. Así mismo el contacto de las superficies del cristal, exterior e interior, expuestas al aire del ambiente y con el aire al interior respectivamente, en la llamada *capa límite*, establecerán intercambios convectivos que impactan en el balance total por el acristalamiento. En la [figura 2.1](#) se muestra esquemáticamente el flujo de calor general de un sistema de acristalamiento.

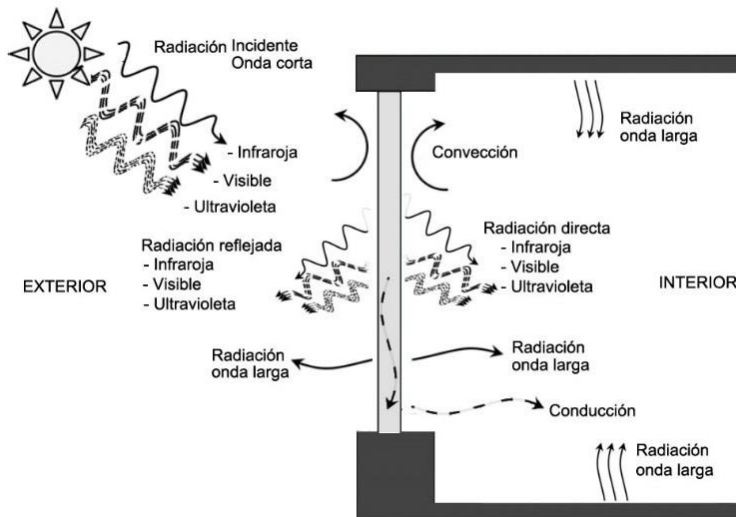


Figura 2.1. Flujo de calor a través de un sistema de acristalamiento. (Elaboración propia).

Los tipos de acristalamiento se diferencian entre sí, por la proporción en la que distribuyen la radiación incidente con base en sus 3 principales propiedades ópticas adimensionales (Szokolay, 2004):

- Reflectancia (ρ): Porcentaje de la radiación solar incidente que es reflejada al exterior por el cristal.
- Transmitancia solar (α): Porcentaje de la radiación solar incidente transmitida directamente a través del cristal.
- Absortancia (ϵ): Porcentaje de la radiación solar incidente que es absorbida por la masa o cuerpo del cristal.

La suma de estas conforma el 100% de la radiación solar, es decir:

$$\rho + \alpha + \epsilon = 1.$$

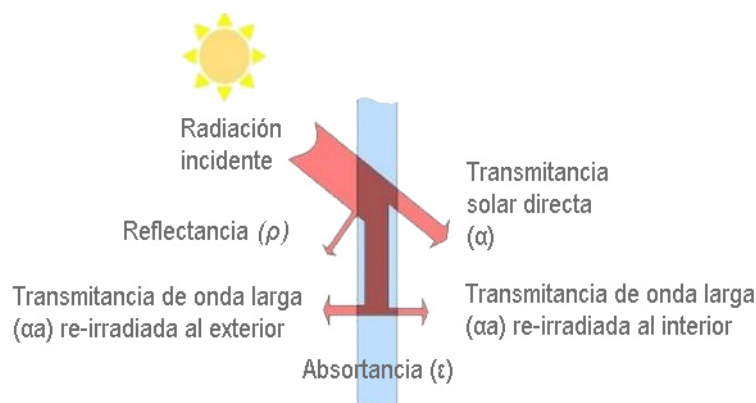


Figura 2.2. Propiedades ópticas de los cristales (M. Sntamouris, 1996).

El total de la transmitancia solar está compuesta por el la radiación solar directa o radiación de onda corta y la parte de la radiación solar absorbida en el cristal y re-irradiada al interior en forma de onda larga.

En la [figura 2.3](#) se muestran 3 ejemplos de las diferencias en la distribución de la radiación solar incidente, dependiendo la tecnología implementada en el cristal. (Tudela, 1982).

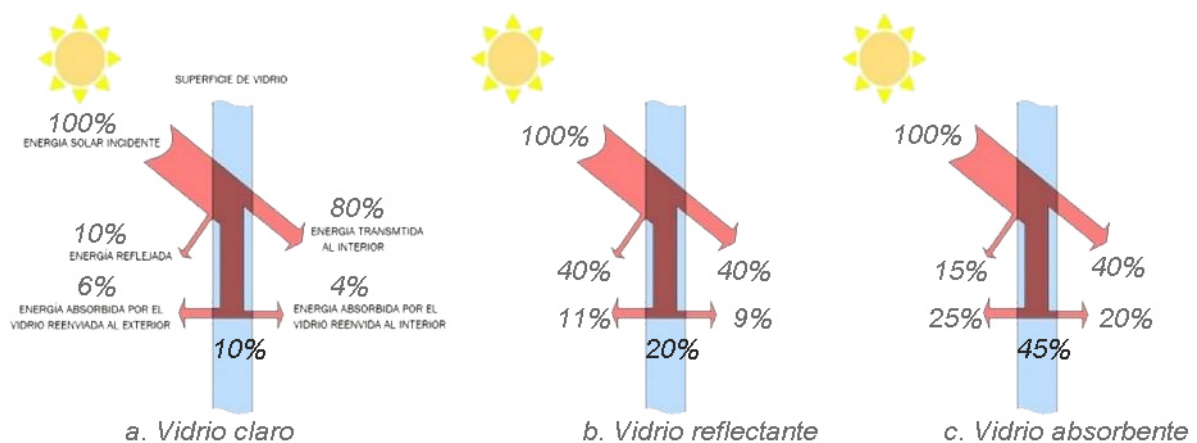


Figura 2.3. Flujo de calor general por tres tipos de acristalamiento. (Tudela, 1982)

La figura “a” presenta un cristal claro sencillo, el cual deja pasar el 80% de la radiación solar incidente, reflejando y absorbiendo un 10% respectivamente. En la figura “b”, un cristal reflectante, aumenta a un 40% el porcentaje de radiación reflejada y duplica la cantidad de radiación absorbida con 20% del total del espectro solar. Es de tomar en cuenta que la incorporación de capas reflectantes a la vez de disminuir el calor transmitido, disminuye a su vez un alto porcentaje la transmisión de luz visible. Finalmente en la figura “c” un cristal absorbente, aumenta a un 45% el porcentaje de calor absorbido, re-irradiándolo hacia el exterior y el interior.

Algunos de los índices que las productoras y distribuidoras de acristalamiento, utilizan para la especificación de la proporción en dichas propiedades son:

- **Coficiente de sombreado (CS)** representa la proporción de ganancias totales con referencia a un cristal de 3mm claro. Fue el primer índice para la caracterización de las propiedades de control solar utilizado. Sin embargo por

ser un valor proporcional al valor de otro, ha demostrado poca exactitud (Szokolay A. P., 2003). En la actualidad ha sido remplazado por el SHGC.

- **Coefficiente total de ganancia solar, o *Solar Heat Gain Coefficient* SHGC** por su nombre en inglés. Es la ganancia total de energía a que atraviesa el acristalamiento con respecto a la incidencia solar de forma directa e indirecta. La ganancia directa se refiere a la transmitancia solar directa y la indirecta se refiere a la fracción de la incidencia solar que es absorbida y reirradiada al interior. Utilizado en mayor medida en los Estados Unidos, está expresado en un índice adimensional del 0 al 1 o de 0 a 1. Corresponde aproximadamente al 0.87 de los valores de CS especificados.
- **Factor de ganancia de solar (FS)** o factor *g*, también conocido o por sus siglas en inglés *solar heat gain factor* (SHGF) análogo al SHGC utilizado en Europa, mide el porcentaje de calor que pasa a través del cristal. A menor factor *g* mayor es la protección solar. (SAINTGOBAIN, 2016)
- **Coefficiente de transmitancia térmica o valor U:** Mide la proporción de calor ganado o perdido a través de un cristal con referencia a la diferencia de temperatura. Es utilizado para establecer que tan aislante es un cristal. A menor valor U más aislante será el sistema (PPG_Industries, 2015). Debido a que la mayoría de los sistemas están hechos para climas con uso de sistemas de acondicionamiento considerando un análisis de transferencia de calor en estado permanente, los proveedores suelen presentar dos valores de U: U para invierno o *winter U-value*, y U de verano o *summer U-value*,

Con respecto a las variables independientes al cristal que impactan en la magnitud de los efectos al interior se encuentran la orientación con respecto a la trayectoria solar, la magnitud de la radiación solar incidente así como el patrón de los factores del clima local. La orientación de los elementos de la envolvente, tanto translucidos como opacos, modifica la magnitud y hora del incremento de la temperatura interior. De igual forma, la cantidad de radiación incidente en los acristalamientos, dependiente de la localización geográfica, determinará una variable determinante en la cuantificación de los efectos en la temperatura interior. (Givoni, 1969)

Para dimensionar la magnitud de los factores por orientación y localización geográfica, en la [figura 2.4 A y B](#) se muestran los resultados de un análisis realizado a través de simulaciones térmicas en EnergyPlus (E+), comparando las ganancias de energía por radiación a través de un cristal de 6mm claro sencillo al interior de un módulo de evaluación virtual *MEV* (ver apartado 3.5.1) para un día típico del mes más caliente en las 4 orientaciones en las ciudades de Monterrey y Toluca con latitudes de N 25°44' y N 19°17' respectivamente.

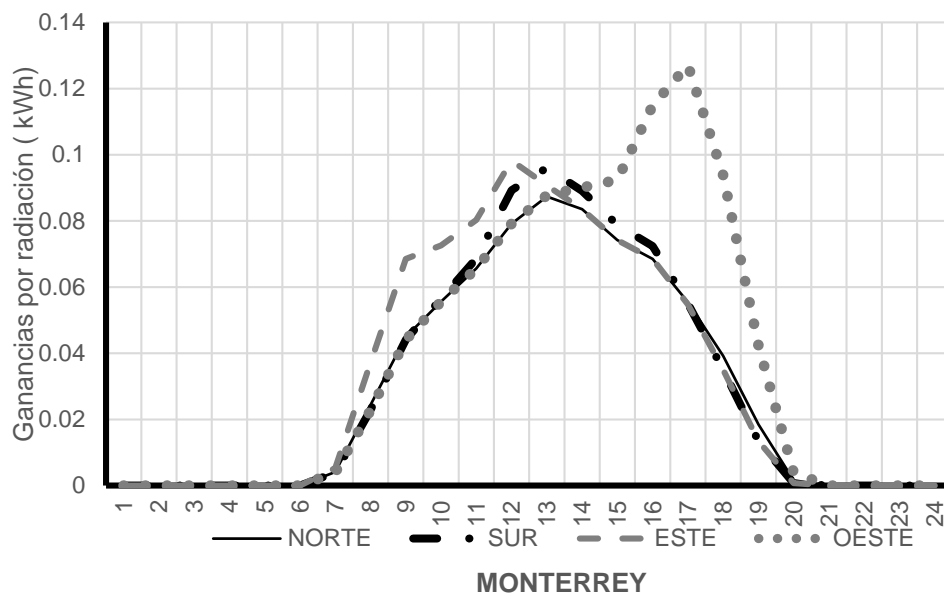


Figura 2.4. A. Ganancias por radiación en la ciudad de Monterrey

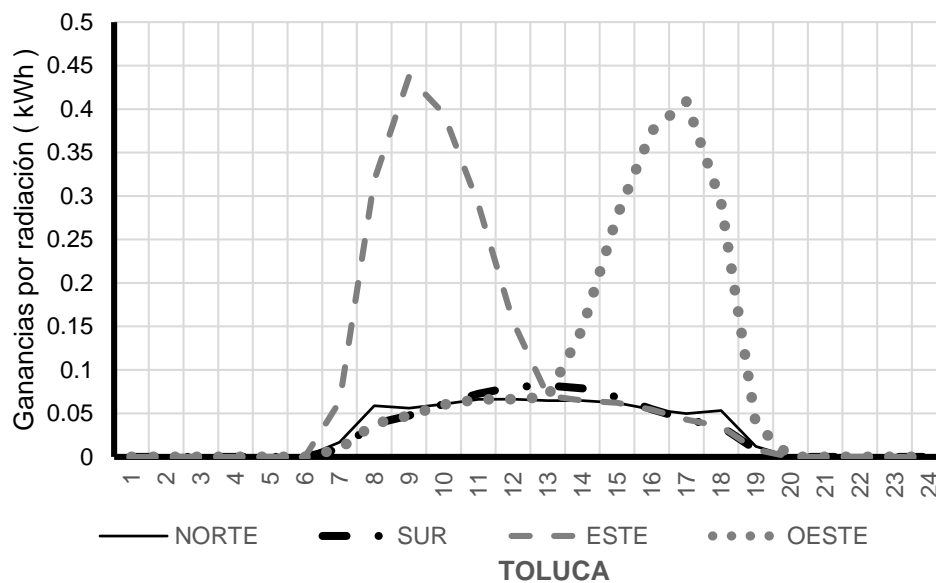


Figura 2.4. B. Ganancias por radiación en la ciudad de Toluca.

Figura 2.4. Ganancias por radiación en la ciudad de Monterrey (A) y Toluca (B), en las cuatro orientaciones a través de un cristal claro de 6mm.

Entre ambas latitudes se observan distinciones en el comportamiento horario y en la magnitud de la radiación a través de un mismo cristal. Con respecto a la magnitud de las ganancias, la ciudad de Toluca (Figura 2.4 B) presenta en promedio más del doble de kWh en las orientaciones este y oeste, comparadas con las presentes en la ciudad de Monterrey (Figura 2.4 A). En las diferencias por el comportamiento entre las orientaciones para la ciudad de Monterrey las ganancias por radiación presentan un comportamiento similar durante la mayor parte de día. En cambio, para la ciudad de Toluca se observan claramente las diferencias tanto horarias como de magnitud entre una orientación este u oeste, que norte o sur.

Por lo tanto aunque se sabe claramente que la orientación es uno de los factores más significativos dentro del diseño arquitectónico, la comprobación del desempeño en las condiciones locales es determinante en la búsqueda del ahorro energético.

2.2 TECNOLOGÍAS EN SISTEMAS DE ACRISTALAMIENTOS

El cristal utilizado dentro de las edificaciones es clasificado como un cristal plano que por su composición química es denominado un cristal sodo-cálcico el cual está compuesto de 71 a 75% en masa de arena (SiO_2), 12-16% de soda (óxido de sodio de la materia prima carbonato de sodio), 10-15% de cal (óxido de calcio de la materia prima carbonato de calcio) y un bajo porcentaje de otros materiales para propiedades específicas tales como el color. (Pearson, 2000)

A los cristales con modificación en sus propiedades ópticas y térmicas por la aplicación de recubrimientos se le denomina cristal de capa. Se define como un sustrato vítreo sobre el que se deposita una capa, normalmente de naturaleza metálica, con objeto de modificar una o varias de sus propiedades ópticas o térmicas. Quedan fuera de esta denominación los espejos, los cristales esmaltados y los cristales sobre los que se adhiere una película plástica.

En años recientes se ha dado una gran importancia al desarrollo de nuevas estrategias aplicadas a los sistemas de acristalamientos en la búsqueda por

mejorar el desempeño energético de las envolventes. De manera general, la mejora energética en sistemas de acristalamiento se ha dado bajo 3 estrategias distintas (PPG_Industries, 2015):

1. Sistemas multicapas: Incrementando de las propiedades aislantes a través de sistemas herméticos de dos, o tres y hasta cuatro capas.
2. Aplicaciones metálicas:
 - Aplicación de óxidos metálicos con color en la masa del cristal
 - Recubrimientos de películas metálicas bajo emisivas y de control solar.
3. Sistemas dinámicos o electrocrómicos reactivos al cambio en la magnitud de la radiación a través del día.

Para la presente investigación se considerarán solo las primeras 2 estrategias, es decir sistemas multicapas con doble cristal hermético y su combinación con aplicaciones de color y recubrimientos de películas metálicas. Dado que la presente investigación se sitúa dentro del mercado mexicano, en donde los sistemas dinámicos o electrocrómicos aún no presentan ventajas significativas reflejadas en el presupuesto energético de la construcción por los elevados costos en su adquisición, no serán considerados.

1. Sistemas Multicapas

La primera estrategia en sistemas de acristalamiento con mayor presencia en el mercado son los sistemas multicapas, o sistemas de cristal hermético. Se refieren a sistemas de dos o más capas de cristal herméticamente selladas formando un canal entre ellas relleno con aire o algún otro gas inerte. Para la especificación de dichos sistemas, las caras de cada cristal se numeran para su reconocimiento y especificación.

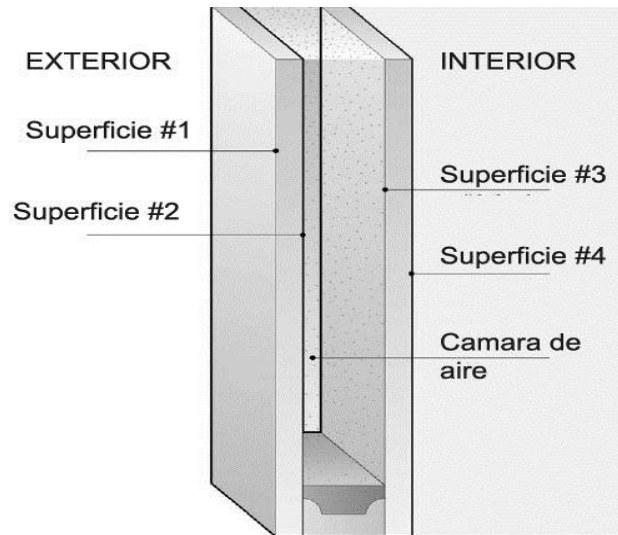


Figura 2.5. Numeración utilizada para la designación de la cara del cristal en donde se aplicaran los recubrimientos o capas. (PPG_Industries, 2015)

Los mecanismos de transferencia de calor en dichos sistemas, multiplican su complejidad. Al intercambio radiativo y conductivo a través de cada cristal se añade el intercambio convectivo al interior del canal hermético entre las capas por el manejo de distintos gases.

N. Mingottia (2013) compara y explica las diferencias en el flujo de calor entre un sistema monolítico y uno doble y sus probables efectos en dos temporadas. En la figura 2.6 se presenta el flujo de calor comparativo entre un sistema monolítico y un sistema doble, adosados a un espacio.

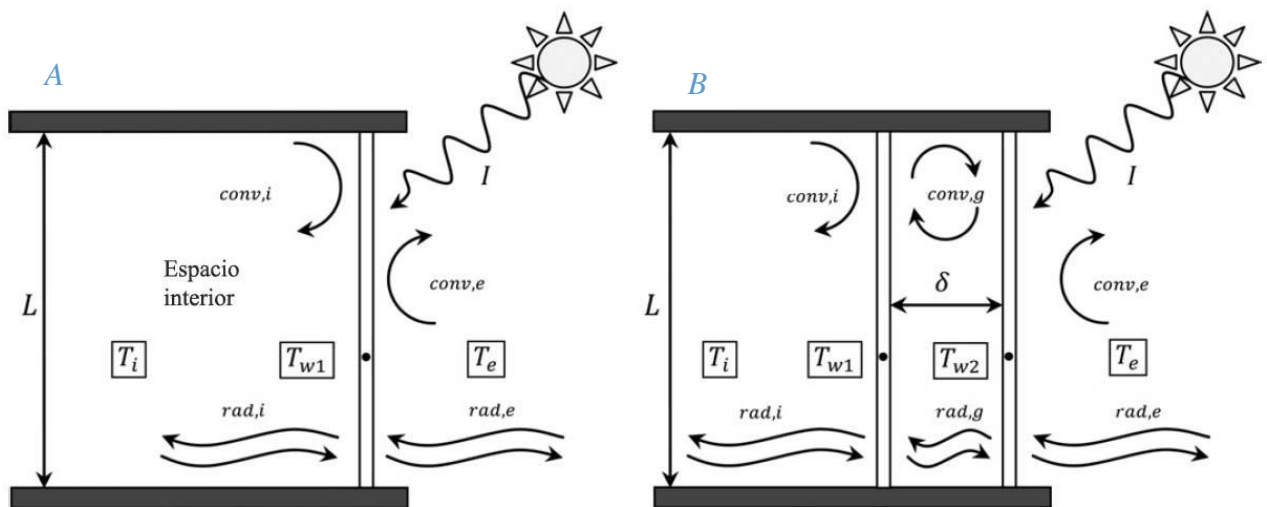


Figura 2.6. Comparación del flujo de calor a través de (A) un sistema monolítico y por (B) un sistema doble (N. Mingottia, 2013).

Ambos espacios (figura 2.6 A y B) presentan una temperatura interior (T_i) distinta a la temperatura exterior (T_e). La fachada acristalada recibe un flujo de radiación directa del exterior (I). El calor se transfiere a cada cara del cristal entre éste y el entorno que lo rodea por radiación y convección, y conducido a través del cuerpo del cristal desde el lado más caliente al más frío. En un sistema doble, la capa más exterior (T_{w2}) presentara flujos de calor por radiación de onda larga y convección entre el ambiente exterior y el espacio del canal lleno de aire (δ). A su vez las ganancias por radiación ($rad.g$) y por convección ($conv.g$) al interior del canal se transmitirán a la capa más interna del sistema (T_{w1}). Ésta a su vez presentará intercambios de calor procedentes de los elementos opacos de la envolvente al interior del espacio por ($rad\ i$) radiación y por convección ($conv\ i$).

Dado que los sistemas de acristalamiento generalmente son elementos estáticos en las fachadas de las edificaciones, los intercambios de calor antes mencionados se verán reflejados en las condiciones de la temperatura al interior durante las distintas estaciones del año. En la figura 2.7 se presenta esquemáticamente las diferencias en el flujo de calor entre un sistema monolítico y un sistema doble para un espacio con uso de sistemas de climatización en una temporada fría y una caliente.

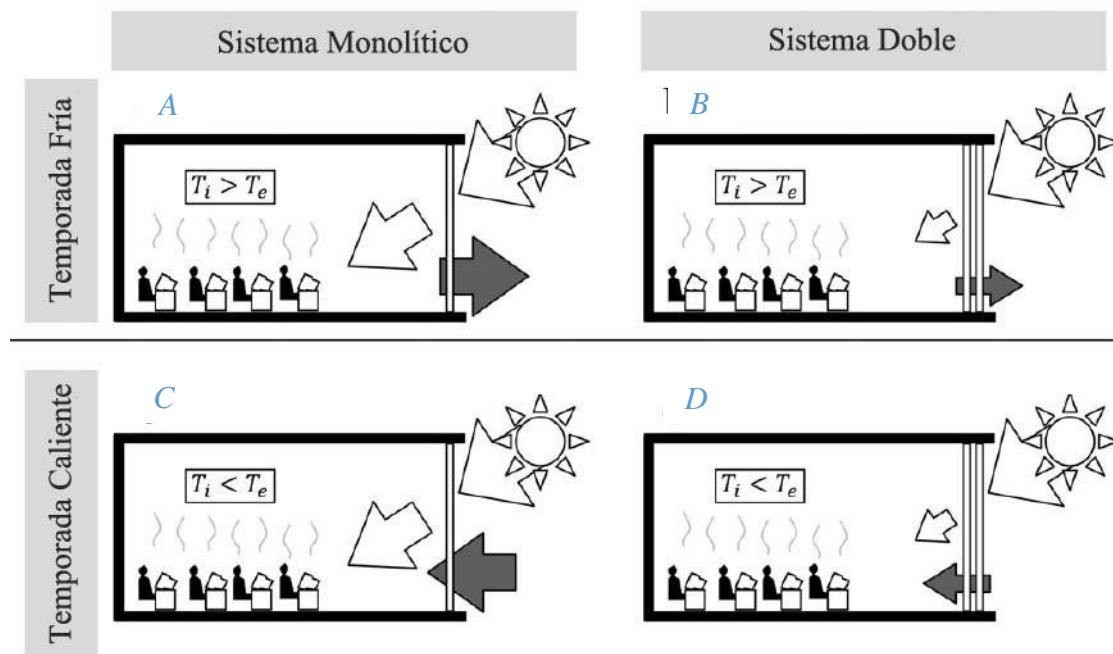


Figura 2.7. Comparación del flujo de calor a través de un sistema monolítico (A, C) y por un sistema doble (B, D) por temporada para un espacio con uso de sistemas de acondicionamiento (N. Mingottia, 2013).

En la [figura 2.7](#) a se muestra como un sistema monolítico en la temporada más fría, permite amplias ganancias por radiación al interior del espacio (flecha blanca), pero al mismo tiempo amplias pérdidas por convección al exterior (flecha gris).

La magnitud del flujo de calor por convección a través del cristal varía como efecto de la oscilación de la temperatura exterior con respecto a la temperatura interior. Un sistema de doble cristal proporciona un mayor amortiguamiento térmico que un sistema monolítico, lo que produce menores pérdidas de calor por convección de la habitación al exterior en la temporada de frío ([fig. 2.7 A y B](#)) y menos ganancias por convección del exterior al interior durante la temporada de calor ([fig. 2.7 C y D](#)).

Una fachada acristalada expuesta a la radiación solar directa, produce un flujo de calor por radiación al interior. Durante la temporada de calor el flujo total del exterior al interior a través de un sistema doble es usualmente más pequeño que a través de un sistema simple. Sin embargo, durante la estación más fría el flujo de calor a través de acristalamiento simple puede ser menor o mayor que el flujo a través de doble dependiendo de la intensidad de la radiación solar y de la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior.

Así para la comprensión de los distintos tipos de acristalamiento presentes en el mercado, será necesario entender los intercambios convectivos, conductivos y radiativos con especial interés en la relación entre el flujo de calor tanto por la radiación de onda corta como de onda larga.

2. Aplicaciones en los cristales

La segunda estrategia en sistemas de acristalamiento con mayor presencia en el mercado son los recubrimientos y/o aplicaciones en la composición de las hojas de cristal ya sea para su aplicación en un sistema monolítico o doble. Entre las tecnologías podemos encontrar:

- ✓ Aplicaciones de metales en la masa:
 - Absorbentes
- ✓ Recubrimientos de películas con capas duras o suaves sobre las caras de los cristales:

- Reflectantes y Pírolíticos
- Bajo emisivos

Las aplicaciones absorbentes o comercialmente llamados “entintados”, se refieren a cristales con la incorporación óxidos metálicos en la masa del cristal¹ obteniendo un efecto de tintura o color uniforme en toda la hoja del cristal. Se les llama absorbentes porque absorben un alto porcentaje de la radiación solar incidente, incluyendo un porcentaje del espectro de luz visible. Sin embargo este calor absorbido eleva la temperatura del cristal y lo emite tanto al interior como al exterior. Es decir que disminuyen la transferencia directa pero no necesariamente los valores de transferencia total. El color específico depende de los óxidos metálicos empleados. Cristales en tonos verdes y azules permiten mucho mayor transmisión de luz visible y menor de calor que tonos grises o bronce.

Los cristales recubiertos se refieren a la incorporación de películas a base de óxidos metálicos en la superficie del cristal, los cuales reflejan parte de la radiación de onda larga proveniente de la radiación solar directa, minimizando la cantidad de calor transferido través del cristal.

Las películas aplicadas, por las propiedades que agrega al cristal se dividen en capas duras o pasivas y capas de suaves o de control solar. (PPG_Industries, 2015)

- Capas duras o pasivas: Comprende los cristales reflectantes y pírolíticos. Se les denomina como capas “duras” debido a su amplia durabilidad y resistencia a los elementos del clima exterior. Su proceso de aplicación *pírolítico*, consta de la aspersion de óxidos metálicos vaporizados sobre la superficie del cristal semi-fundido durante el proceso de flotado

¹ Se denomina “*masa del cristal*” a la mezcla de minerales de silicato (silice o arena) y sodocalcico (soda + cal), que al fundirse a elevadas temperaturas formar un cristal o vidrio plano arquitectónico.

- ² logrando fusionarse con la superficie caliente del cristal. Por ser resistentes pueden instalarse tanto en sistemas monolíticos como dobles en cualquiera de sus caras.
- Capas suaves o de control solar: Comprende los cristales bajo emisivos. Se refiere a la aplicación de partículas de óxidos metálicos por deposición posterior de la línea de flotado a temperatura ambiente, o cuando el cristal se encuentra frío. Por lo anterior no generan una fusión térmica con la superficie del cristal, ocasionando poca resistencia a los factores del clima por lo que siempre se colocan en la superficie 2 o 3 de un sistema doble. Por lo general estas capas presentan una menor emisividad y un mayor control solar que las capas pirolíticas.

Los cristales reflectantes o pirolíticos, son cristales de capa dura por lo que pueden presentarse tanto en sistemas monolíticos como en dobles. Aumentan la cantidad de radiación solar reflejada hacia el exterior y disminuyen la radiación absorbida y transmitida por el mismo cristal. La cantidad de radiación reflejada dependerá del tipo de capa metálica y espesor de la misma. Los llamados cristales “espejo”, presentan valores muy bajos de SHGC y un alto coeficiente de reflectancia disminuyendo al mínimo la transferencia de calor al interior. Al mismo tiempo disminuyen los niveles de luz natural a los espacios. Pueden provocar problemas de reflejo en el entorno exterior por lo que algunos países establecen restricciones para su aplicación. Con menores niveles de reflectancia los comercialmente denominados *cristales pirolíticos*, presentan una mejor relación entre sus coeficientes de reflectancia y su transmisión de luz al interior.

Los cristales bajo emisivos, contienen una capa suave por lo general en la superficie #2 de un cristal claro siempre dentro de un sistema multicapas. Su principal objetivo es reducir el valor U por lo que son indicados principalmente para climas fríos. Reflejan de manera selectiva el espectro infrarrojo de la radiación solar permitiendo niveles

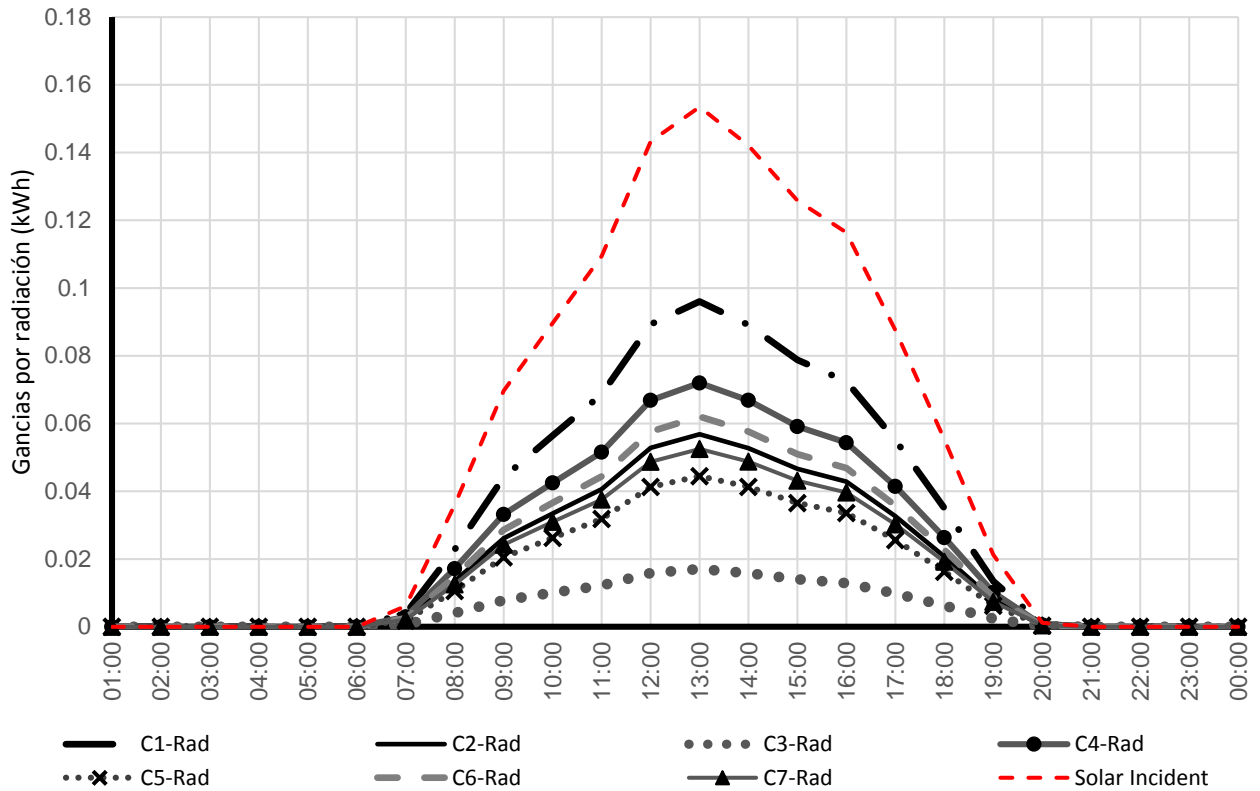
² Proceso de flotado: proceso de generación del cristal, obtenido por el calentando la mezcla de un silicato (silice o arena) y un sodocalcico (soda + cal), hasta alcanzar el punto de fusión (aprox. 1.600°C), para luego ser enfriado y transformado

altos de transparencia en el resto del espectro. Su funcionamiento se basa en un flujo de calor del interior al exterior propio de climas fríos. El cristal interior absorbe el calor radiante de los espacios y lo rreirradia hacia el canal de aire, de ahí al cristal exterior. La capa bajo emisiva en el cristal exterior evita una absorción mayor del 2 al 20% de lo recibido desde el canal, evitando el flujo del calor al exterior.

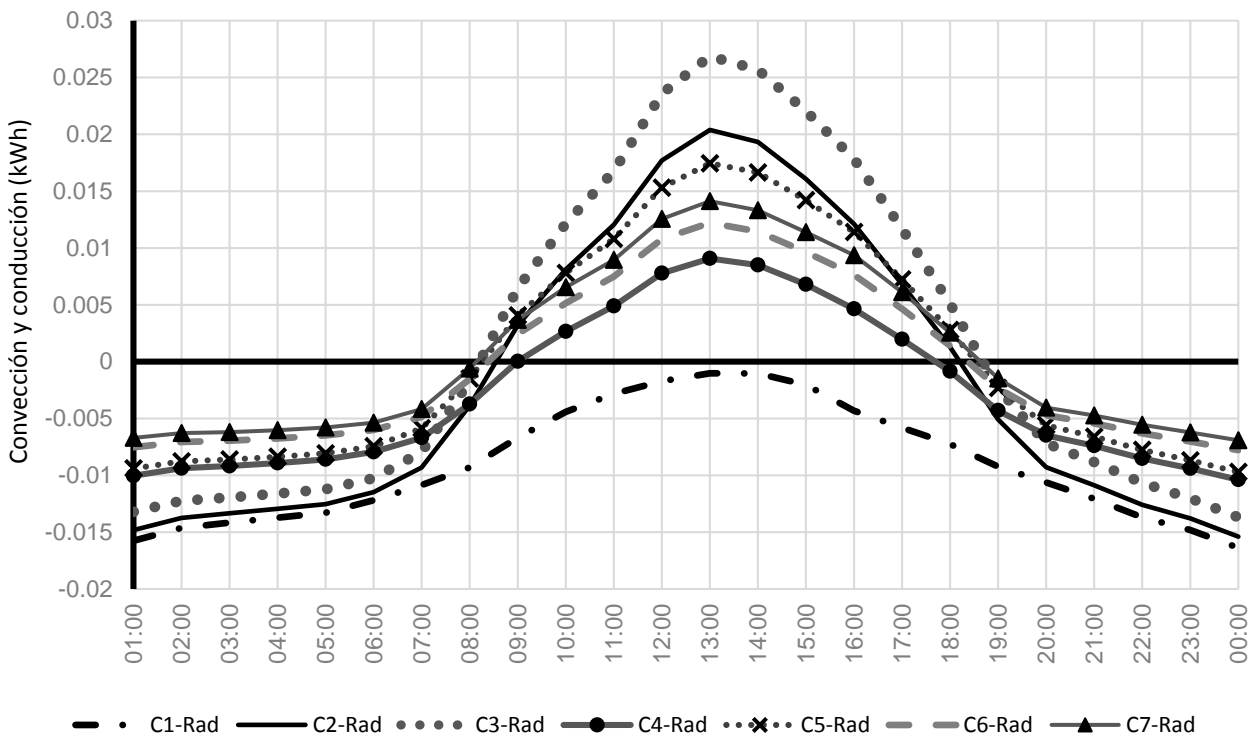
Para cuantificar mejor los efectos de distintos tipos de acristalamiento, de manera gráfica en la [figura 2.9](#) se presenta el análisis realizado durante el proceso de investigación, para comprender el intercambio de calor por radiación de onda larga (A) y por conducción y radiación de onda corta (B) únicamente por cristal, entre los 7 sistemas de acristalamiento a analizar (para descripción de los 7 casos ver cap.3, subtema 3.3). El clima de referencia de la ciudad de Monterrey con una orientación sur en un día típico del mes más caliente, agosto. La descripción de la conformación de los sistemas se presenta en la [figura 2.8](#) con valores de reportados por el fabricante.

CASO	SISTEMA	CONFIGURACIÓN	ESPESOR (mm)	U (W/M2K)	SHGC (adimensional)	TRANSMITANCIA SOLAR DIRECTA (%)
C1	MONOLÍTICO	CLARO	6	5.8	0.82	0.77
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE		5.8	0.61	0.47
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE		5.8	0.3	0.14
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	24 (6+12+6)	2.69	0.7	0.61
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO		2.69	0.49	0.38
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO		1.94	0.63	0.53
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO		1.77	0.57	0.47

Figura 2.8. Tabla de propiedades de casos presentados.



A. Radiación por 7 sistemas distintos de acristalamiento.



B. Conducción por 7 sistemas distintos de acristalamiento.

Figura 2.9. Intercambio de calor por radiación (A) y conducción (B) por 7 sistemas de acristalamiento en la ciudad de Monterrey

Con respecto a la transferencia de radiación solar directa, en la [figura 2.9 A](#) se aprecia que el caso con mayor flujo de calor por radiación es el C1, un cristal monolítico claro de 6 mm de espesor, seguido por el C4 un sistema doble claro + claro. Es decir, ambos los sistemas de mayor transmitancia solar directa con 77% y 61%, y de mayor SHGC con 0.82 y 0.7 respectivamente. Del resto de los casos, se observa que a menor valor en el porcentaje de transmitancia solar directa, menores son los kWh por radiación de onda corta transferidos al interior, siendo el de menor flujo el C3, un sistema monolítico reflectante, con una transmitancia del 14%.

Se aprecia que del total de la radiación total incidente el C1 transmite alrededor de un 70%. En su intercambio de calor por conducción y por radiación de onda larga ([2.9 B](#)) se aprecia que es el único caso que presenta la mayor cantidad de pérdidas durante todo el día. Esto debido a su poca masa térmica y su poco porcentaje de absorción. Por su parte el C3 en su intercambio de calor por conducción y radiación de onda larga ([2.9 B](#)) se observa que, por la noche, cuando el flujo de calor se invierte ante la ausencia de radiación solar, es decir va del interior al exterior, el cristal presenta pérdidas muy cercanas al C1. Sin embargo en cuanto se presentan ganancias de calor por radiación solar las ganancias reportan un mayor porcentaje de ganancias que el resto de los casos.

Por lo tanto se observa que cuando el flujo de calor va del exterior al interior, es decir durante horas con presencia de radiación solar los casos con mayor transmitancia solar directa o con mayor índice de ganancias totales en su SHGC presentan los menores valores de flujo por conducción. Esto debido a que la mayor parte del espectro solar lo transmiten de manera directa, absorbiendo o reflejando solo un pequeño porcentaje. Durante la noche, cuando el flujo de calor se invierte la masa térmica de los sistemas de doble acristalamiento presentan una menor tasa de transferencia de calor por conducción y radiación hacia el exterior.

De la [figura 2.8](#) se observa que los valores de sus coeficientes el SHGC del C3 con respecto al C1 presenta una diferencia de .52. De los casos con sistemas dobles se aprecia que a pesar de que el C7, un sistema doble claro bajo emisivo + claro, reporta

los menores valores de U y valores de SHGC dentro de la media de los casos, valores de menor valor U y el un valor de SHGC dentro de la media de los casos.

2.3 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN

Como se comentó en el punto 2.2, los coeficientes más utilizados en el etiquetado de propiedades térmicas de los acristalamientos, son el coeficiente de transmitancia térmica o valor U acompañado del Coeficiente total de ganancia solar o, por su nombre en inglés, *Solar Heat Gain Coefficient* (SHGC). Sin embargo ambos coeficientes consideran un análisis de transferencia de calor en estado estacionario o independiente del tiempo. Su uso popularizado se debe a que la mayor parte de su desarrollo e investigación, ha sido realizada en países con climas predominantemente fríos con poca oscilación térmica diaria y con bajos niveles de radiación incorporando sistemas de climatización mecánica.

Dado que los climas de nuestro país no responden a dichas condiciones climáticas, sino por el contrario, considerando la importancia de la alta oscilación de la temperatura exterior a través del día y los altos niveles de radiación incidente, en la presente investigación se utiliza un modelo de cálculo dependiente del tiempo, al igual que el que utiliza EnergyPlus. Para ello los parámetros utilizados para edificaciones no climatizadas y con uso de sistemas de climatización fueron:

2.3.1 Temperatura Operativa (t_o): Es el promedio entre a temperatura del aire interior (t_a) y la temperatura media radiante interior (t_r) en °C dado por:

$$t_o = (t_a + t_r)/2$$

2.3.2 Factor de Decremento (FD): índice que mide el amortiguamiento de la amplitud de la oscilación de temperatura al interior (T_i) con respecto a la del exterior (T_{ex}). Se define como la razón de la amplitud de la oscilación interna $T_i \max - T_i \min$ (°C) entre la amplitud de la oscilación de la temperatura exterior $T_{ex} \max - T_{ex} \min$ (°C). Su rango de valores van de 0, donde se ha amortiguado

totalmente la oscilación de la T_i , incrementándose en función de la relación de la T_i con la amplitud de la oscilación exterior T_e .

$$FD = \frac{T_{i_{max}} - T_{i_{min}}}{T_{e_{max}} - T_{e_{min}}}$$

Alternativamente se puede usar el amortiguamiento A que se define como

$$A = 1 - FD$$

2.3.3 El tiempo de retardo (TR): Esta dado por la diferencia del tiempo (t) en horas, en el cual ocurre el máximo de la temperatura exterior, $T_{e_{max}}$, y el tiempo en el cual ocurre el máximo de la temperatura interior $T_{i_{max}}$.

$$TR = t(T_{i_{max}}) - t(T_{e_{max}})$$

Entre menor sea el FD y mayor el TR, el cristal tendrá un mejor desempeño térmico. Cuando $DF \leq 0.1$, TR pierde importancia. (Barrios G., 2010)

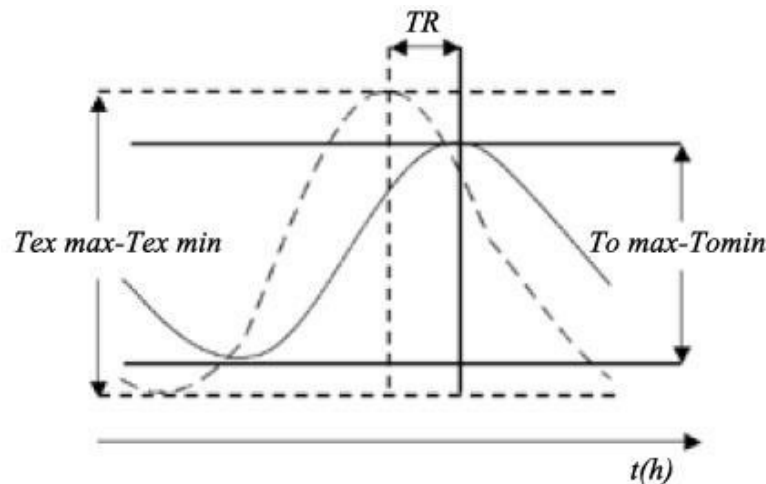


Figura 2.10. Gráfica de la relación entre FD y TR. Fuente: (Guadalupe Huelsz, 2010)

2.3.4 Carga Térmica de enfriamiento o calentamiento (Q_{te} , Q_{tc}): Parámetro para condiciones de uso de sistemas de climatización en unidades de potencia (kWh). Es la energía por metro cuadrado necesaria para enfriar o calentar el

aire al interior a la temperatura establecida por el termostato durante el día (Arredondo, 2014). También puede considerarse como la cantidad de calor que se retira o se añade a un espacio definido. E+ calcula ambos parámetros bajo las variables denominadas: *Zone Sensible Cooling* y *Zone Sensible Heating* respectivamente.

2.3.5 Carga Térmica total (Q_{tt}): Parámetro para condiciones de uso de sistemas de climatización dado en la presente investigación en kWh. Es la suma de la carga térmica de enfriamiento (Q_{te}) y la carga térmica de calentamiento (Q_{tc}).

$$Q_{tt} = Q_{te} + Q_{tc}$$

Para condiciones de uso de sistemas de acondicionamiento, se considera mejor sistema constructivo al que requiera la menor carga térmica total **Q_{tt}** .

3

Capítulo 3

Metodología de investigación

En el presente capítulo se presenta el planteamiento metodológico y la descripción de su implementación. En el punto 3.1 el algoritmo metodológico describe de manera sintética los procesos realizados cronológicamente para la realización de las pruebas. En el punto 3.2, para entender la problemática de cada ciudad, se presenta el análisis de los elementos del clima relevantes para el estudio de las dos ciudades de referencia. Posteriormente en el punto 3.3, se presenta la descripción de los 7 casos de estudio evaluados. En el punto 3.4 se describe de manera breve el modelo de cálculo utilizado por EnergyPlus (E+). Finalmente, en el punto 3.5, se describen las características del módulo de experimentación virtual (MEV) y los parámetros para la elección y delimitación de variables.

3.1 ALGORITMO METODOLÓGICO

Para una comprensión rápida de los procesos realizados durante la evaluación de los casos de estudio, a continuación se presenta el algoritmo metodológico de la investigación. En éste se muestra de manera cronológica el conjunto ordenado de operaciones realizadas en la evaluación de los 7 sistemas de acristalamiento:

- I. Se seleccionaron 2 ciudades de referencia con bioclimas representativos dentro de la clasificación por bioclimas de la CONAVI (CONAVI, 2006). (Ver punto 3.2 de este capítulo)
- II. Se obtuvieron datos climáticos horarios, de un año típico, de la base de datos de Meteonorm 7.0 para cada ciudad de referencia.
- III. Con base en los datos climáticos obtenidos se realizó una caracterización de los principales factores del clima de ambas ciudades. (Ver punto 3.2 de este capítulo)
- IV. De acuerdo a la definición presentada en el modelo de ASHRAE 55 (Szokolay V., 2007) con la fórmula $T_n=17.8+0.30*T_m$ se calcularon las

temperaturas de neutralidad mensuales (T_n) de todo el año típico, para cada ciudad de referencia, siendo (T_m) la temperatura media promedio.

- V. Se consideraron dos orientaciones a evaluar en ambas ciudades de referencia, SUR y NORTE. (ver punto 3.5.3 de este capítulo)
- VI. Por medio de entrevistas a los principales proveedores de acristalamientos (VITRO, Sant Gobain, PPG), se eligieron 7 sistemas de acristalamiento con mayor aplicación en México para su evaluación y caracterización. (Ver punto 3.3 de este capítulo)
- VII. Se definieron 2 periodos de evaluación con distintas condiciones para el manejo del ambiente térmico interior:

- 1. Día típico de verano (DT_v) y Día típico de invierno (DT_i): Con libre desempeño de la temperatura operativa (Top).

Parámetros de evaluación:

- ✓ Temperatura operativa máxima (Top_{max})
- ✓ Temperatura operativa mínima (Top_{min})
- ✓ Diferencia con la T_n , definido por $\Delta T_n = Top - T_n$
- ✓ Factor de decremento (FD) y Tiempo de retardo (TR)

- 2. Año típico : Con la temperatura de aire constante en la T_n mensual

Parámetros de evaluación:

- ✓ Carga Térmica de calentamiento (Q_{tc})
- ✓ Carga térmica de enfriamiento (Q_{te})
- ✓ Carga térmica Total (Q_{Tt})

- VIII. A través de EnergyPlus (E+) en su interfaz en DesignBuilder®: (ver punto 3.5. de este capítulo)

- 1. Se configuró un espacio genérico, denominado Módulo de Evaluación Virtual (MEV) con las características de NO ocupación, NO cargas internas, NO ventilación o infiltración. (ver punto 3.5.1 de este capítulo)

2. Se caracterizó el comportamiento térmico de los elementos, opacos y translucidos que componen el MEV.
3. Se realizaron 196 simulaciones térmicas para cada ciudad de referencia con registro de valores cada 10 minutos:
 - ✓ Una simulación para el día típico de verano (DTv) y día típico de invierno (DTi) para cada uno de los 7 casos de estudio, en las dos orientaciones SUR y ESTE (28 simulaciones térmicas).
 - ✓ Una simulación por cada mes del año para cada uno de los 7 casos de estudio, en las dos orientaciones SUR y ESTE (168 simulaciones térmicas).
- IX. En base a los resultados numéricos se realizó el cálculo de parámetros de evaluación.
- X. Se describieron los efectos de cada caso medidos a través de los parámetros enlistados para cada ciudad de referencia.
- XI. Se compararon los resultados obtenidos de cada parámetro en tablas de resultados.
- XII. Obtención de conclusiones

3.2 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE CIUDADES DE REFERENCIA

En México la mayor parte de los climas presentan condiciones con niveles de confort alcanzables a través de estrategias bioclimáticas. La elección de materiales de la envolvente de acuerdo al clima local, puede mejorar el confort térmico al interior evitando la necesidad de uso de sistemas mecánicos de acondicionamiento. (Barrios G., 2010).

La consideración de las diferencias en los factores del clima a través del año, como la radiación solar y la temperatura exterior por temporadas, determinará las necesidades por el uso de los acristalamientos.

Por lo tanto, la trayectoria solar a través del año, la cantidad de radiación solar tanto directa como difusa, y la diferencias en la temperatura exterior en cada temporada

representan variables determinantes para el análisis del desempeño termoenergético de los sistemas de acristalamiento.

En la presente investigación la elección de los climas de referencia tomó como base la clasificación por bioclima elaborada por la CONAFOVI (hoy CONAVI) en el documento “*Uso eficiente de la energía en la vivienda*” (CONAVI, 2006). Dicha clasificación, identifica 3 tipos generales de bioclimas en México: semifrío, templado y cálido; con su posterior derivación en función de la cantidad de humedad presente en el ambiente en: Seco, Semihúmedo y Húmedo (figura 3.1)

De dicha clasificación se eligieron bioclimas con una mayor complejidad en los requerimientos en su temperatura interior y que en alguna época del año presentaran condiciones de uso de sistemas de acondicionamiento. Como se muestra en la figura 3.1 la ciudad de Monterrey con clima cálido seco y la ciudad de Toluca con bioclima semifrío se presentan en los extremos de la tabla.

Temperatura Semifrío Templado Cálido	+	Humedad Seco	1. Bioclima cálido seco	Monterrey		
			2. Bioclima cálido semihúmedo			
			3. Bioclima cálido húmedo			
				Semihúmedo	4. Bioclima templado húmedo	
				Húmedo	5. Bioclima templado	
					6. Bioclima templado seco	
					7. Bioclima semifrío seco	
					8. Bioclima semifrío	Toluca
					9. Bioclima semifrío húmedo	

Figura 3.1. Clasificación por Bioclimas, Elaboración propia con base en “Uso eficiente de la energía en la vivienda” (CONAVI, 2006).

A continuación se describen de manera general los elementos del clima relevantes en el análisis para la elección de sistemas de condicionamiento. Para ambas ciudades se obtuvieron datos climatológicos de la base de datos de Meteonorm 7.0. Los datos horarios referentes a la temperatura del aire corresponden a un período de 2000 a 2009, y para radiación de 1986 al 2005 con una incertidumbre anual de 0.3°C en la temperatura del aire.

3.2.1 MONTERREY

La ciudad de Monterrey, se localiza en la latitud 25°40'N, longitud 100°18' O con una altura de 534msnm. Se encuentra agrupada dentro del bicolima CÁLIDO SECO, en la clasificación por bioclimas de la CONAVI. De acuerdo con la clasificación de Koopen modificada por Enriqueta García, se considera un clima BS (e) seco estepario cálido y extremo, siendo la variabilidad en la precipitación una de características relevantes de esta zona.

En la figura 3.2 se presenta las temperaturas promedio mensuales, máxima (Tex max), media (Tex med) y mínima (Tex min), de la ciudad de Monterrey. Se muestra el cálculo de la temperatura de neutralidad (Tn) según el modelo de confort de ASHRAE 55 y sus límites superior (LSC) e inferior de confort (LIC).

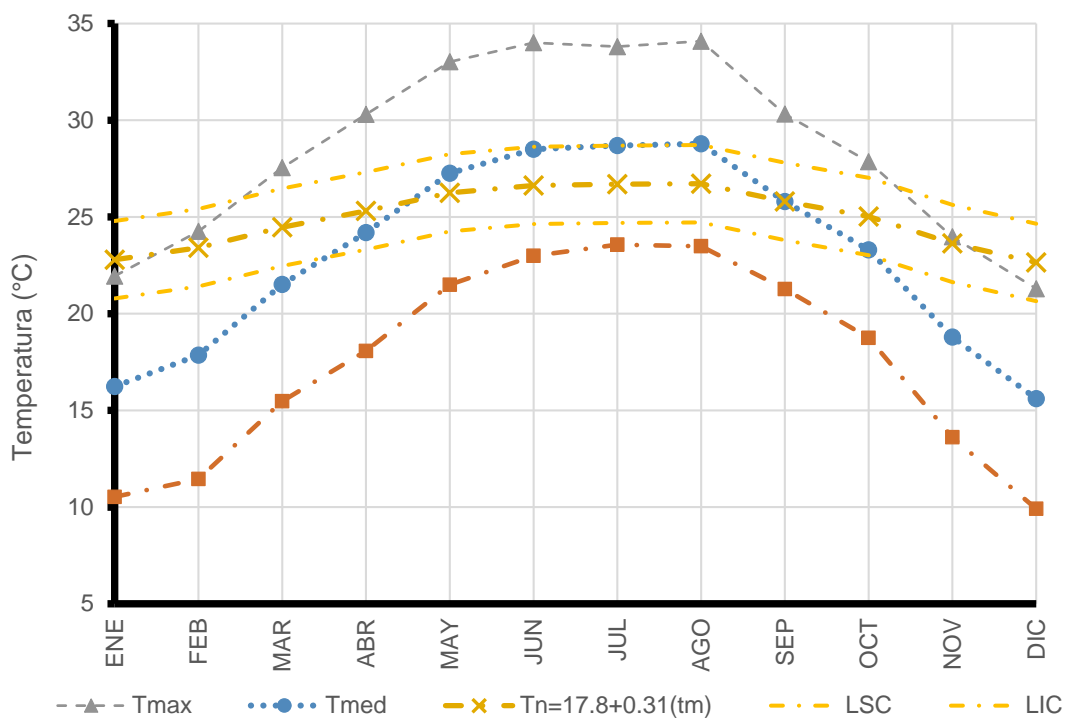


Figura 3.2. Temperaturas promedio, máxima (Tex max), media (Tex med) y mínima (Tex min), Temperatura de neutralidad (Tn) para la ciudad de Monterrey.

Las Tn se presentan en el rango de los 22.6°C en diciembre, a los 26.7°C en agosto. Se observa que el 60% del año las Tmax superan el LSC, alcanzando y manteniendo temperaturas hasta de 34°C durante el verano, hasta los 21°C en invierno. Las Tmin

se presentan por debajo del LIC todo el año en el rango de los 23°C a los 10°C respectivamente.

Se reconocen 3 estaciones, de mayo a agosto se presenta la temporada cálida, noviembre a febrero la temporada más fría. La temporada de transición se observa en los meses de marzo, abril, septiembre y octubre.

El mes más caliente es agosto con una Tmax 34°C y una Tex min de 23.5°C, es decir una oscilación de 10.5°C. La Tex med se presenta justo en el LSC con 28.7°C. El mes más frío es diciembre con una Tex max apenas 5°C por arriba del LIC con 21°C y una Tex min de 10°C. Es decir una oscilación promedio de 11°C.

Con respecto a los niveles de radiación en la [figura 3.3](#) se presentan los valores de radiación mensual, difusa y global, para la ciudad de Monterrey expresada en kWh/m².

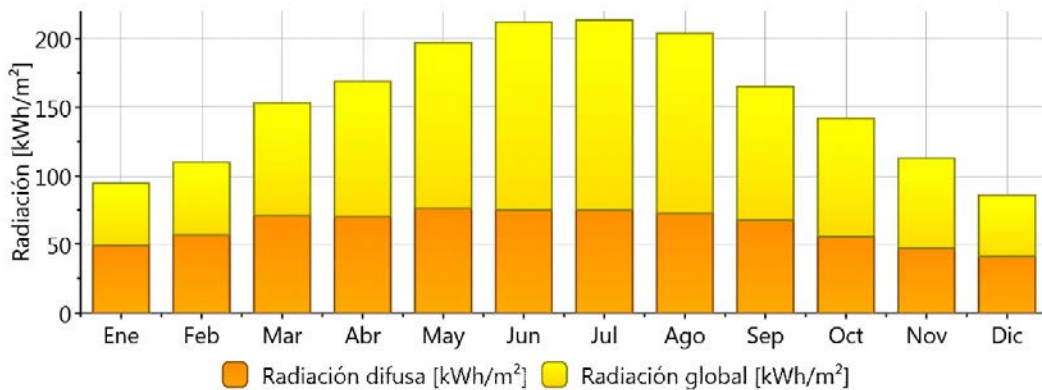


Figura 3.3: Radiación global horizontal y difusa horizontal, mensual para la ciudad de Monterrey. Fuente. Meteonorm 7.0.

La radiación global anual suma 1,856 kWh/m², mientras que la radiación difusa anual es de 758 kWh/m². El mes con mayor radiación global y difusa es julio con 213 kWh/m² y 75 kWh/m² respectivamente. El mes con menores valores es diciembre con 86 kWh/m² y 41 kWh/m² en su radiación global y difusa respectivamente. Agosto, el mes más caliente, presenta una radiación global de 204 kWh/m² y una radiación difusa de 73 kWh/m². En diciembre, el mes más frío, la radiación global disminuye casi a la mitad, con 86 kWh/m² y una radiación difusa de 41 kWh/m².

En la **Figura 3.4** se presenta la carta psicrométrica de Givoni con el porcentaje de horas al año en confort por efecto del uso de estrategias pasivas de diseño, obtenida del software Climate Consultant 5.5 para la ciudad de Monterrey. En el recuadro de la izquierda se muestran las estrategias de diseño consideradas y el porcentaje de horas de confort al año aportado por cada una.

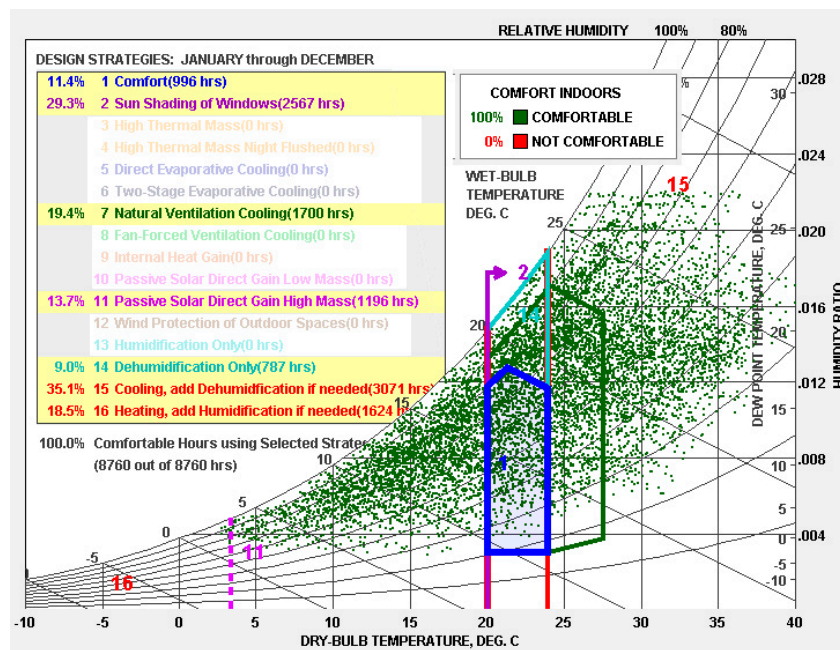


Figura 3.4: Carta psicrométrica anual con horas de confort para la ciudad de Monterrey. (Climate Consultant 5.5)

Se observa que al año solo un 11% de las horas se presentan en confort de manera natural, es decir sin ningún tipo de requerimiento térmico en el ambiente interior. El resto del año para alcanzar el 100% de las horas en confort presenta requerimientos asociados a estrategias de calentamiento, enfriamiento, ventilación natural y deshumidificación. En las horas con temperaturas entre los 5°C y los 20°C, se recomiendan ganancias solares directas a través de estrategias con alta masa térmica en un 13% así como calefacción y humidificación en un 18% del año. En horas con temperaturas entre los 20°C y los 24°C, se requiere deshumidificación en un 9% y ventilación natural cuando el porcentaje de humedad supere el 70% de humedad relativa (HR). Finalmente en horas con temperaturas por arriba de los 24°C y con HR por arriba del 60%, se recomienda enfriamiento y deshumidificación en un

35% de las horas así como ventilación natural mientras la temperatura exterior no exceda la temperatura de los límites de confort.

En las horas con temperaturas interiores a partir de 20°C, se recomienda el sombreado en ventanas en un 29% de las horas al año. Su objetivo se enfoca en la disminución de ganancias solares directas a través de las ventanas. En este caso, los sistemas de acristalamiento jugarán un papel relevante en el potencial térmico y lumínico de las ventanas, al incrementar o disminuir las cargas térmicas al interior de las edificaciones.

Por lo tanto, se observa que el clima de la ciudad de Monterrey presenta un clima con temporadas de frío y calor muy marcadas atravesando completamente la zona de confort durante los meses de transición. El ambiente interior deberá de responder a condiciones mixtas a través del año. Para las consideraciones de los requerimientos al interior se observa que las mañanas de todo el año presentan condiciones en el LIC o muy por debajo. Es decir que las ganancias durante las primeras horas serán determinantes para acercar las temperaturas a la zona de confort. Las horas siguientes, dependiendo de la época del año será necesario almacenar o desprender las ganancias de calor. El análisis de los requerimientos por el tipo de acristalamiento, deberá de considerar evitar las ganancias excesivas de calor en el verano pero no comprometer los aportes necesarios en la época de invierno.

De lo observado en el análisis, anterior el presente trabajo confirma que debido a su alto impacto en las condiciones termoenergéticas interiores, **los acristalamientos, pueden ser considerados como sistemas pasivos de control ambiental.** Esta consideración no se aprecia en las recomendaciones de metodologías de diseño bioclimático ni en los resultados ofrecidos por el software Climate Consultant, los cuales no contemplan el potencial total de sistemas de acristalamiento actuales.

3.2.2 TOLUCA

La ciudad de Toluca se localiza en una latitud 19° 17'28"N, longitud 99°42'W y una altitud de 2,720 msnm. Dentro de la clasificación por bioclimas de la CONAVI se encuentra enlistada en las ciudades correspondientes a un bioclima SEMIFRÍO. Según la clasificación de Koppen-García es un clima clasificación C(w²)(w) correspondiente a un clima templado subhúmedo con poca oscilación térmica.

En la [Figura 3.5](#) se presenta las temperaturas promedio mensuales, máxima (Tmax), media (Tmed) y mínima (Tmin), de la ciudad de Toluca. Se muestra el cálculo de la temperatura de neutralidad (Tn) según el modelo de confort de ASHRAE 55 y sus límites superior (LSC) e inferior de confort (LIC).

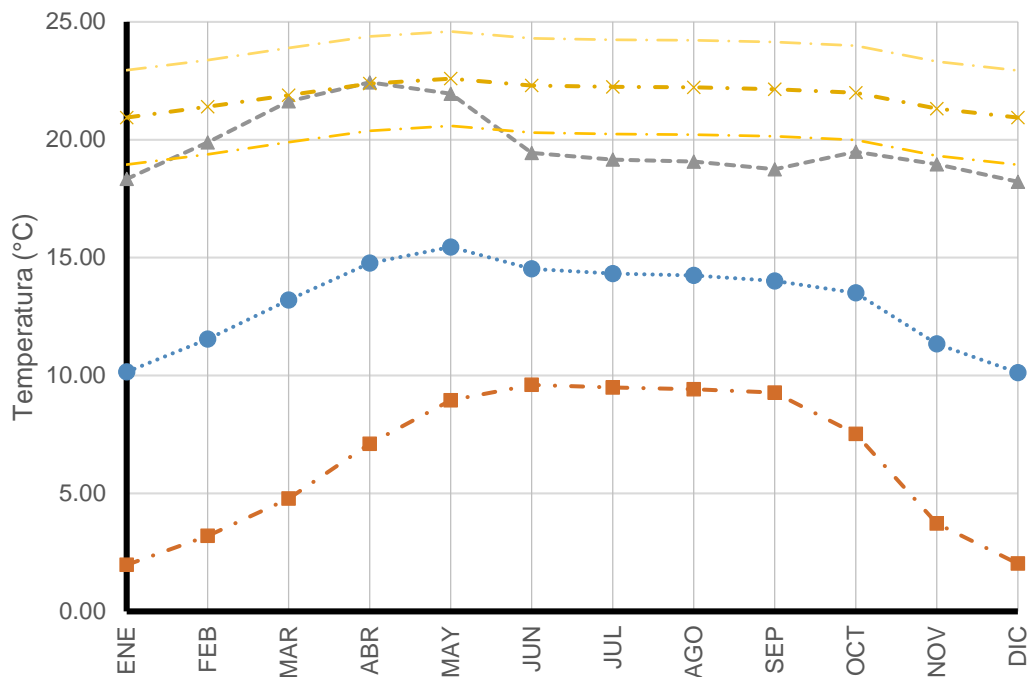


Figura 3.5: Temperaturas promedio, máxima (Tex max), media (Tex med) y mínima (Tex min), Temperatura de neutralidad (Tn) y Humedad relativa.

La Tn calculada se presenta de los 22°C en abril a 21°C en enero. Se observa claramente un clima predominantemente frío con respecto a la zona de confort calculada. Todo el año tanto las Tex min como las Tex med se presentan muy por debajo del LIC. Las Tex max presentan valores dentro de la zona de confort solo de febrero a mayo. El promedio anual de Tex máximas es de 20°C y las Tex mínimas

un promedio de 5°C. El mes más caliente es abril con una oscilación promedio de 15.5°C , Tex max de 22.4°C y Tex min de 7°C. El mes más frío es enero con una Tex max de 18°C y una Tex min de 1.9°C, es decir una oscilación promedio de 16°C. Marzo, abril y octubre se presentan como meses de transición.

Lo anterior muestra un clima con mañanas y noches muy frías durante todo el año y solo algunas horas en confort alrededor del mediodía en los meses más calientes. Por lo tanto los requerimientos predominantes serán ganancias de calor al interior y almacenamiento de dicho calor al interior.

Con respecto a los niveles de radiación en la [Figura 3.6](#) se presentan los valores de radiación mensual, difusa y global, para la ciudad de Toluca expresada en kWh/m².

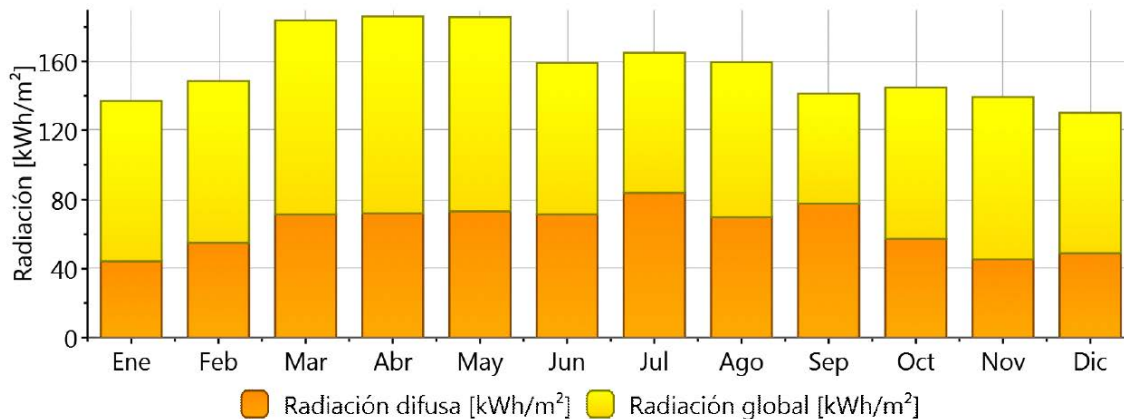


Figura 3.6: Radiación global horizontal y difusa horizontal, mensual para la ciudad de Toluca. (Meteonorm 7.0)

Los meses con mayor radiación global son los meses de marzo a mayo. Se observa poca diferencia anual en los valores de ambas radiaciones. En los meses de mayor radiación se alcanzan niveles de más de 160 kWh/m² y en los meses con menor cantidad de radiación valores promedio de 120 kWh/m². Abril el mes más caliente presenta una radiación global de 186 kWh/m² y difusa de 72 kWh/m². Enero el mes más frío 137 kWh/m² y 44 kWh/m² respectivamente.

En la [Figura 3.7](#) se presenta la carta psicrométrica de Givoni con el porcentaje de horas al año en confort por efecto del uso de estrategias pasivas de diseño, obtenida

del software Climate Consultant 5.5 para la ciudad de Toluca. En el recuadro de la izquierda se muestran las estrategias de diseño consideradas y el porcentaje de horas de confort al año aportado por cada una.

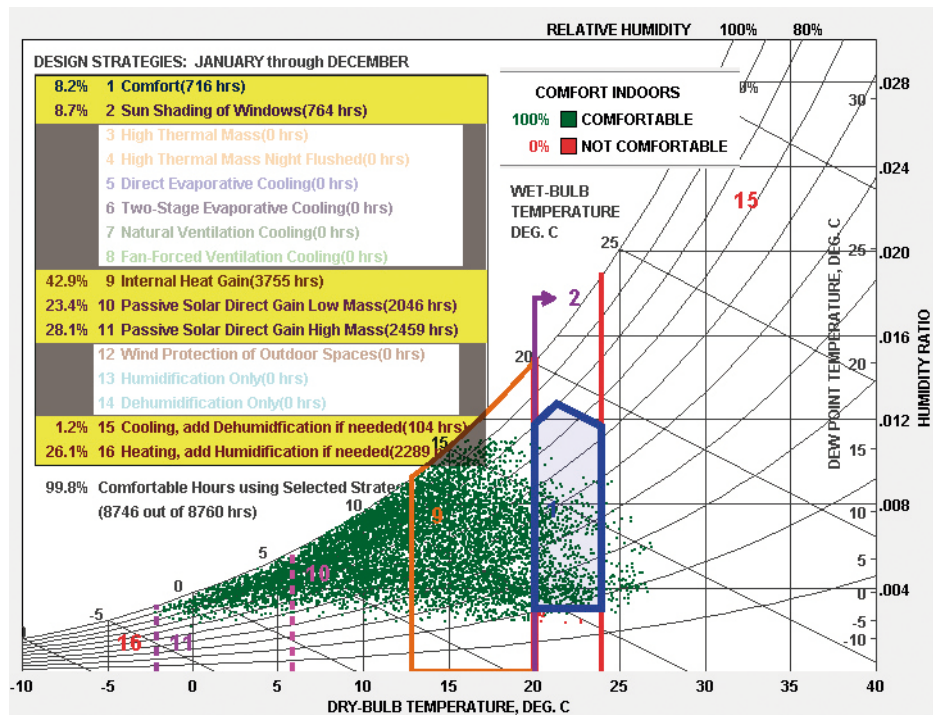


Figura 3.7: Carta psicrométrica anual con horas de confort para la ciudad de Toluca. (Climate Consultant 5.5)

Se observa que solo el 8% de las horas del año se mantiene en confort sin necesidad de ninguna estrategia pasiva con temperaturas entre los 20°C y los 25°C. Del resto de las horas, se aprecia claramente un clima frío con temperaturas de los 20°C hasta los -3°C, el 43% se recomiendan estrategias referentes a ganancias internas de calor, otro 50% referente a ganancias de calor a través de almacenamiento en masa térmica. Solamente un 1% de las horas requiere de enfriamiento, superando los 25°C. El potencial de la ventana como medio para la aplicación de estrategias pasivas en el clima de Toluca puede considerarse dentro del 43% de las horas del año con recomendaciones de ganancias de calor. Esto sin considerar la capacidad almacenamiento de calor de los materiales interiores por la radiación recibida a través de la ventana.

Por lo tanto dadas las claras condiciones de bajo calentamiento todo el año, las ganancias de calor directas desde las primeras horas de la mañana serán determinantes para la acumulación de calor al interior. De igual se deben evitar pérdidas de calor durante todas las horas del año.

3.3 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Como se mencionó en los antecedentes, a nivel internacional existe una inmensa variedad, tanto de tecnologías como de combinaciones posibles para la elección de sistemas de acristalamiento. Sin embargo un alto porcentaje de dicha variedad de tecnologías, presenta características térmicas indicadas para climas principalmente fríos con uso constante de sistemas de climatización por calentamiento.

Para fines de la presente investigación se realizó un análisis de mercado, con el objetivo de conocer los sistemas de acristalamiento predominantes en las edificaciones nuevas del país. Con base en entrevistas con el personal y catálogos de las marcas Vitro, Saint Gobain y PPG se establecieron los sistemas más comercializados por dichas empresas en México. Con base en dicho análisis se delimito el universo de estudio a 7 sistemas de acristalamiento o casos de estudio, cuyas características termofísicas resultan pertinentes para su aplicación como estrategia de ahorro energético en climas de México. De manera general las tipologías se dividen en monolíticos y sistemas dobles

- 1 MONOLITICO Claro: Cristal claro sencillo de 6mm
- 2 MONÓLITICO ABSORBENTE: con entintado en su masa. Cristal monolítico en el que se le incorporan óxidos metálicos en la materia prima durante el proceso de flotado. El color del cristal produce una disminución de la radiación transmitida al interior sin embargo por su característica de color, absorbe y emite más calor que un cristal claro.

- 3 MONOLITICO REFLECTANTE: Cristal monolítico al que posterior al flotado por medio de un baño iónico se le añade una capa reflectante NO selectiva con diferentes tonalidades. Por tanto su funcionamiento en general es reflejar, un alto porcentaje de la radiación incidente y de la luz visible, pero por otro lado absorbe un alto porcentaje de calor en su masa, emitiéndolo un alto porcentaje al interior y otro al exterior.
- 4 DOBLE CLARO + CLARO: (claro 6mm + 12mm de aire+ claro de 6mm): Sistema doble a base de 2 cristales claros sencillos de 6mm separados por una cámara de aire de 12 mm.
- 5 DOBLE ABSORBENTE + CLARO: Cristal absorbente verde 6mm + 12mm de aire + Claro de 6 mm.
- 6 DOBLE PIROLÍTICO + CLARO: (claro de 6mm + 12mm de aire + claro de 6mm). El cristal pirolítico es un cristal monolítico a cual se le aplica una capa dura de vapores químicos en su superficie número 2 (al interior de la cámara de aire). Es de baja emisividad, absorbe y emite menos calor al interior, y selectivo, presenta una capa reflectante y transparente.
- 7 DOBLE CLARO BAJO EMISIVO + CLARO (6mm +12mm de aire+ claro de 6mm): El cristal comercialmente llamado Low E presenta una capa suave sobre un cristal claro en su superficie número 2 (al interior de la cámara de aire) con baja emisión de calor al interior y transparente a la luz visible.

En la [Figura 3.8](#) se presentan de manera figura los 7 casos de estudio a evaluar. En la primera parte (A) se muestran los tres casos monolíticos, y en la segunda (B) los casos con sistemas dobles.

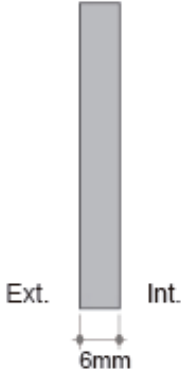
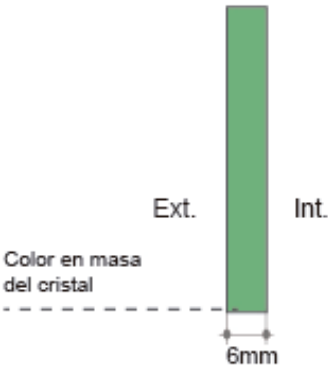

CASO	DESCRIPCIÓN	CONFIGURACIÓN	COEFICIENTES								
C1	Sistema: MONOLÍTICO CRISTAL: CLARO SENCILLO ESPESOR: 6 mm		<table border="1"> <tr> <td>U (W/M2K)</td> <td>5.8</td> </tr> <tr> <td>SHGC</td> <td>0.82</td> </tr> <tr> <td>Transmitancia solar directa</td> <td>0.77</td> </tr> <tr> <td>Transmitancia de luz directa</td> <td>0.87</td> </tr> </table>	U (W/M2K)	5.8	SHGC	0.82	Transmitancia solar directa	0.77	Transmitancia de luz directa	0.87
			U (W/M2K)	5.8							
			SHGC	0.82							
			Transmitancia solar directa	0.77							
Transmitancia de luz directa	0.87										
C2	Sistema: MONOLÍTICO CRISTAL: ABSORBENTE (Tinte VERDE) ESPESOR: 6 mm		<table border="1"> <tr> <td>U (W/M2K)</td> <td>5.8</td> </tr> <tr> <td>SHGC</td> <td>0.61</td> </tr> <tr> <td>Transmitancia solar directa</td> <td>0.47</td> </tr> <tr> <td>Transmitancia de luz directa</td> <td>0.75</td> </tr> </table>	U (W/M2K)	5.8	SHGC	0.61	Transmitancia solar directa	0.47	Transmitancia de luz directa	0.75
			U (W/M2K)	5.8							
			SHGC	0.61							
Transmitancia solar directa	0.47										
Transmitancia de luz directa	0.75										
C3	Sistema: MONOLÍTICO CRISTAL: REFLECTANTE (Capa tipo ESPEJO) ESPESOR: 6 mm		<table border="1"> <tr> <td>U (W/M2K)</td> <td>5.8</td> </tr> <tr> <td>SHGC</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>Transmitancia solar directa</td> <td>0.14</td> </tr> <tr> <td>Transmitancia de luz directa</td> <td>0.26</td> </tr> </table>	U (W/M2K)	5.8	SHGC	0.3	Transmitancia solar directa	0.14	Transmitancia de luz directa	0.26
			U (W/M2K)	5.8							
SHGC	0.3										
Transmitancia solar directa	0.14										
Transmitancia de luz directa	0.26										

Figura 3.8. A. Descripción de estudio monolítico.

CASO	DESCRIPCIÓN	CONFIGURACIÓN	COEFICIENTES
C4	Sistema: DOBLE		U (W/M2K) 2.69
	Cristal: CLARO SENCILLO + AIRE + CLARO SENCILLO		SHGC 0.7
	Espesor 6 + 12 + 6 = 24mm		Transmitancia solar directa 0.62
			Transmitancia de luz directa 0.77
C5	Sistema: DOBLE		U (W/M2K) 2.69
	Cristal: ABSORBENTE Tinte verde + AIRE + CLARO SENCILLO		SHGC 0.49
	Espesor 6 + 12 + 6 = 24mm		Transmitancia solar directa 0.38
			Transmitancia de luz directa 0.66
C6	Sistema: DOBLE		U (W/M2K) 1.94
	Cristal: PIROLÍTICO + AIRE + CLARO SENCILLO		SHGC 0.63
	Espesor 6 + 12 + 6 = 24mm		Transmitancia solar directa 0.53
			Transmitancia de luz directa 0.71
C7	Sistema: DOBLE		U (W/M2K) 1.77
	Cristal: CLARO BAJO EMISIVO + AIRE + CLARO SENCILLO		SHGC 0.57
	Espesor 6 + 12 + 6 = 24mm		Transmitancia solar directa 0.47
			Transmitancia de luz directa 0.74

Tabla 3.8. B. Descripción de los casos de estudio dobles.

3.4 SIMULACIONES TÉRMICAS

Los paradigmas sobre la investigación en arquitectura bioclimática actual exigen a los arquitectos, desde etapas tempranas de diseño, certidumbre sobre los efectos de las estrategias aplicadas en busca de la eficiencia energética en las edificaciones.

La elaboración de predicciones con un alto grado de certidumbre a través de modelos de cómputo, sobre el comportamiento de los edificios, actualmente es considerado como un proceso inherente en las metodologías de diseño. (J.L. Hensen, 2002).

La importancia de simulaciones los efectos por las propiedades térmicas, acústicas, lumínicas, etc, de los elementos que conforman las edificaciones, por medio de métodos de simulación puede generar impactos en todas las etapas de vida de las construcciones. (Obanye, 2006).

Con todo ello, la presente investigación se realiza mediante una metodología de simulación numérica en el programa EnergyPlus® (E+) en su interfaz DesignBuilder®. Además, en distintas etapas del desarrollo de la investigación se recurrió al uso de otro tipo de softwares, como herramientas auxiliares en la toma de decisiones.

- **Meteonorm 7.0:** Base de datos de clima obtenidos de la interpolación de estaciones climáticas y satelitales (Meteonorm_7.0, 2016). Se requirió para la obtención de un archivo EPW (*Energy Plus Weather Data*) con los datos climáticos de las ciudades de referencia.
- **Climate Consultant 5.5:** Programa gráfico para el análisis del clima local, desarrollado por la Universidad de California (Universidad de California, 2016). Se utilizó para la caracterización climática de las ciudades de referencia.
- **Solar Tool:** Software de visualización de la trayectoria solar sobre superficies exteriores. Se utilizó en la representación de la trayectoria solar en las ciudades de referencia. (Autodesk, 2016)
- **Ener-Habitat v2.2.0:** Herramienta de simulación numérica para comparar el desempeño térmico de sistemas constructivos de losas y muros de la

envolvente de una edificación con las condiciones climáticas de las principales ciudades de la República Mexicana. (Ener-Habitat_v2.2.0, 2016).

3.4.1 ENERGYPLUS® (E+) y DESIGN BUILDER®

EnergyPlus es un programa de simulación energética desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (U.S. DOE) utilizado por ingenieros, arquitectos e investigadores para calcular el comportamiento térmico y lumínico de una edificación debido a la interacción de todos sus elementos y el medio exterior. Calcula y predice el consumo energético por calefacción, enfriamiento, ventilación, iluminación y otros flujos de energía, dentro de todo un edificio.

Ofrece resultados simulados con pasos de tiempo menores a una hora, por zona o por edificio integrando un balance de calor por zonas, con flujo de ventilación entre zonas, por confort térmico y de sistemas fotovoltaicos. Entre muchas de sus características, posee un modelo avanzado de cálculo para ventanas y aberturas que incorpora la interacción por el uso, entre muchas cosas, de persianas controlables, cristales electrocrómicos y un balance térmico capa por capa que calcula la energía solar absorbida por el cada panel de cristal. (EERE, 2016) Sin embargo E+ presenta una interfaz con un ambiente poco amigable al usuario.

DesignBuilder® integra a E+ como su motor de cálculo, interactuando con el usuario como interfaz de éste. Esto permite la elaboración de simulaciones de manera menos compleja, definiendo y modelando los elementos y características de una edificación. (DesignBuilder, 2016).

DesignBuilder® es una interface especialmente diseñada para el motor de cálculo de E+ con que provee de una serie avanzada de herramientas para el modelado y simulación del comportamiento de una edificación. (DesignBuilder, 2016)

3.4.2 MODELO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EN E+

La metodología de cálculo de la radiación solar por E+ considera (DesignBuilder, 2016):

1. Un modelo de radiación por cielo: El cálculo de la radiación solar difusa del cielo incidente en una superficie exterior considera una distribución anisotrópica¹ de la radiación del cielo. La irradiancia difusa del cielo sobre una superficie está dada por $AnisoSkyMult * DifSolarRad$: donde:

$DifSolarRad$ es la irradiancia solar difusa del cielo y el suelo; y $AnisoSkyMult$ es determinada por la orientación de la superficie y por la distribución de la radiación por el cielo. No incluye la radiación difusa proveniente de superficies sobre el suelo hacia el cielo.

La distribución de la radiación del cielo se basa en un modelo empírico con bases en la medición de la radiación de cielos reales descrito en Pérez et al., 1990. En dicho modelo la radiación del cielo está determinada por 3 distribuciones sobrepuestas (Figura 3.9):

- Un domo con distribución Isotrópica²
- Un brillo circumsolar centrado en la posición del sol
- El brillo procedente del horizonte.

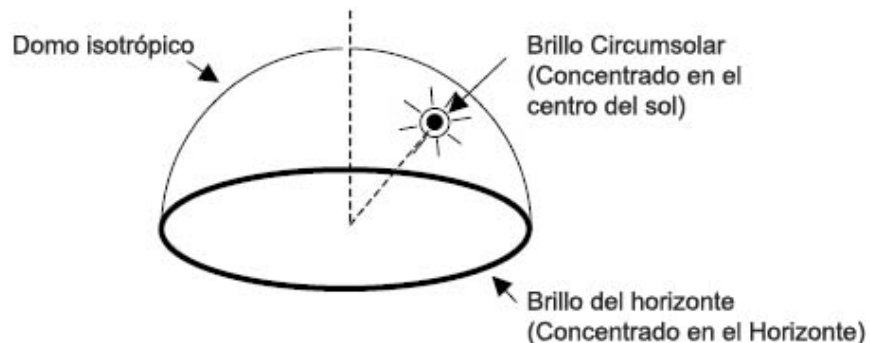


Figura 3.9. Distribución de la radiación solar proveniente del cielo.
(<http://www.designbuilder.co.uk/helpv4.2>)

¹ Anisotrópica: No uniforme; Que varía según la dirección.

² Isotrópico: Que presenta un mismo comportamiento independientemente de la dirección que proceda.

La proporción de estas tres distribuciones depende de dos condiciones: factor de claridad y factor de brillo. Ambas determinadas por la posición del sol y por cantidades solares contenidas en el archivo de clima.

2. Radiación de onda larga por cielo. Es la radiación incidente en las superficies exteriores asumiendo una distribución isotrópica de la radiación de onda larga proveniente del cielo.
3. Ganancias solares: Las ganancias solares totales por cualquier superficie exterior son la combinación de la absorción de la radiación solar difusa y directa calculada con:

$$Q_{so} = \alpha \cdot \left(I_b \cdot \cos \theta \cdot \frac{S_s}{S} + I_s \cdot F_{ss} + I_g \cdot F_{sg} \right)$$

Donde:

a= Absortancia solar de la superficie

θ = Angulo de incidencia de los rayos solares

S= Área de la superficie

Ss= Área de la luz del sol

Ib= Intensidad del haz de radiación directa

Is=.Intensidad de la radiación difusa del cielo

Ig= Intensidad de la radiación reflejada por el suelo

Fss= Factor de ángulo entre el suelo y el cielo

Fsg= Factor de ángulo entre el suelo y el cielo

Para el cálculo de la radiación de onda corta al interior de cada zona E+ considera la radiación solar incidente, la radiación solar difusa, y la radiación de onda corta de luces eléctricas. El programa determina la cantidad en la que esta radiación es:

- Absorbida en la cara interior de las superficies opacas
- Absorbida en los cristales y en los dispositivos de sombreado de las ventanas exteriores e interiores.
- Transmitida a través de las ventanas interiores³ y zonas adyacentes

³; Ventanas interiores: cualquier cristal al interior de una zona de cálculo; Ventanas exteriores: Toda ventana con contacto con el medio exterior.

- Transmitida hacia el exterior de las ventanas exteriores.

La distribución de la radiación solar difusa (del cielo y de fuentes en el suelo) transmitida a través de las ventanas exteriores y posteriormente por las ventanas interiores considera:

- Una primera distribución de la radiación solar difusa es transmitida a las superficies con intercambio de calor, contenidas en la zona con las ventanas exteriores.
- La cantidad de esta primera distribución de radiación solar difusa que se absorbe por cada superficie interior y cada hoja de los sistemas de acristalamiento, es calculada y después añadida a la radiación de onda corta.
- La cantidad de esta distribución de la radiación solar difusa reflejada, es acumulada para cada zona y redistribuida uniforme, entre a las otras superficies.
- La cantidad de esta primera distribución de la radiación solar difusa que es transmitida al interior a través de las ventanas interiores a las zonas adyacentes, es inicialmente distribuida a las superficies interiores en la zona adyacente de la misma manera.

3.4.3 MODELADO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN VENTANAS

EnergyPlus® (E+) utiliza dos modelos de cálculo de transferencia de calor por ventanas en función de las propiedades de los componentes del sistema de acristalamiento.

- **Modelado simple de ventana:** Recomendado únicamente para el cálculo de sistemas de acristalamiento simples o monolíticos. Las propiedades de los componentes del sistema de acristalamiento se definen utilizando los valores de transmitancia térmica o valor U, el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC)

y la transmitancia de luz visible (VT). Este método se recomienda cuando solo se dispone de los coeficientes provenientes de los fabricantes. E+ utiliza los valores contenidos en la biblioteca precargada de WindowMaterial: SingleGlazing (DesignBuilder, Glazing Components, 2016)

Sin embargo dicho modelo reporta inexactitudes, debido a que los valores de U y SHGC describen las propiedades de ventanas especulares principalmente y bajo ángulos normales de incidencia. Dicha condición no es tan frecuente en la realidad donde la mayor parte del tiempo los sistemas de acristalamiento están sometidos a amplios y variados ángulos de incidencia solar. (Dariush Arasteh, 2009)

- **Modelado de ventana por CAPAS:** Donde las propiedades de los componentes del sistema de acristalamiento, son definidas con mayor detalle a través de la elección específica de cada capa separada por una capa intermedia de gas. (DesignBuilder, Glazing Components, 2016). En la presente investigación este modelo fue el utilizado.

Para la obtención de datos sobre las propiedades de cada componente de los sistemas de acristalamiento se tomaron primero se realizó un estudio de mercado sobre las propiedades reportadas por 3 de las principales compañías distribuidoras de cristal en México: Vitro, Saint Gobain, PPG. Con base en las propiedades reportadas por dichas compañías en los sistemas aplicados en México se tomaron de la base de datos de DesignBuilder los casos con propiedades coincidentes. Con ello se conformó cada capa de cristal de los sistemas de acristalamiento utilizados como casos de estudio.

3.5 DISEÑO EXPERIMENTAL

3.5.1 MÓDULO DE EXPERIMENTACIÓN VIRTUAL (MEV)

Para las simulaciones de los 7 casos de estudio se modeló un espacio genérico de geometría cuadrangular, al cual se denominó *Módulo Experimental Virtual* (MEV). Las dimensiones utilizadas fueron de 3.60m x 3.60m x 2.80m (figura 3.10). Para determinar las dimensiones del MEV, se retomaron las dimensiones de la fachada principal utilizadas por K. Tsikaloudaki (Energy and Buildings 49, 2012,192-199) que toman como base la unidad utilizada en la ISO 13790 *Eficiencia energética en edificios: Cálculo del consumo de energía para calefacción y refrigeración*. Para obtener la misma cantidad de radiación por las caras sin ventana de la envolvente, se mantuvieron las mismas dimensiones en el resto de las fachadas.

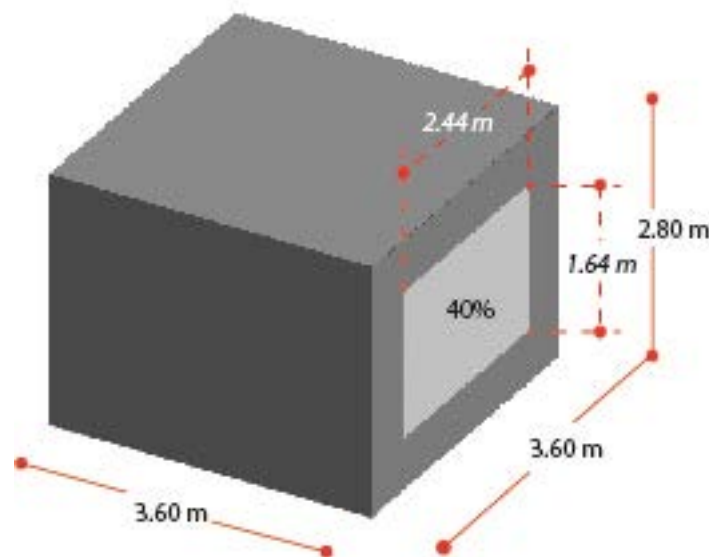


Figura 3.10. Geometría y dimensiones del módulo de experimentación virtual (MEV).

Para la elección del sistema constructivo de los elementos opacos, se realizó un estudio específico del MEV, donde se caracterizaron los efectos provenientes de los elementos opacos de la envolvente (Ver anexo 1). Dado que la temperatura es el efecto total por la interacción de las propiedades termofísicas de todos los elementos que conforman un espacio, el objetivo fue evidenciar, limitar y controlar las variables ajenas a los sistemas de acristalamiento, que pudieran incidir en la temperatura operativa al interior. Dicha caracterización incluyó la contabilización de los aportes

térmicos por elemento de la envolvente (muros, cubierta y suelo) dentro del balance total de energía, demostrando que la mayor cantidad de aportes provienen de la cubierta. Además, se evaluaron los efectos en la temperatura operativa con distintas conformaciones para los sistemas constructivos opacos, eligiendo el sistema cuyos aportes en el balance térmico total del MEV, no superaban los aportes presentados por el sistema de acristalamiento de la ventana, un cristal claro sencillo, para todas las pruebas.

Los objetivos de la investigación buscan únicamente la realización de un estudio teórico comparativo. Por lo tanto la comprobación del porcentaje de sesgo con un modelo in situ no se consideró necesario. Es decir, se asume que una metodología de simulación numérica computacional no representa al 100% la realidad. Sin embargo con las condiciones del MEV presentadas a continuación como constantes para todas las pruebas y todos los casos de estudio, se logra obtener resultado teórico comparativos útiles como parámetro de diseño en la arquitectura.

La configuración final del MEV se modeló con muros y cubierta con un solo sistema constructivo. Se consideró un material aislante, poliestireno expandido (EPS), de 0.02m de al exterior, sobre 0.08m de un material de mediana masa térmica al interior como el concreto de mediana densidad (CMD). Para todas las superficies exteriores se consideró un valor de absorción solar de $a=0.4$. (Figura 3.11).

MATERIAL	ESPESOR m	DENSIDAD kg/m ³	CALOR ESPECÍFICO J/kg°C	CONDUCTIVIDAD W/m°C
EPS	0.02	15	1400	0.04
CMD	0.08	1800	1000	1.35

Figura 3.11. Cuadro de propiedades termofísicas del sistema constructivo utilizado en el MEV. (Biblioteca de propiedades de DesignBuilder®).

El piso del MEV, se consideró bajo una condición de frontera adiabática y sin emisividad ni absorción al interior. En las edificaciones, el piso es el único elemento que no refleja efectos al interior referentes a la incidencia directa de los elementos del clima, pero que si refleja pérdidas y ganancias de calor derivadas de intercambios

con el suelo exterior o por cargas internas y condiciones ambientales provenientes de espacios contiguos. Estos intercambios no asociados de manera directa a los elementos del clima pero si con impacto en la temperatura operativa interior, pueden llegar a dificultar la lectura de los efectos provenientes de los acristalamientos.

Con respecto a las condiciones al interior se consideraron:

- Sin cargas internas por ocupación, equipos o iluminación.
- Sin intercambio de aire ni infiltraciones.
- En el caso de análisis con uso de sistemas de climatización, temperatura operativa fija al interior las 24 horas en el valor de la T_n mensual.

Con respecto a la ventana, se modeló un área acristalada constante de un 40% del área total de la fachada con referencia a las especificaciones presentadas en la NOM-008-ENER *Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales* en su apartado referente a las características del edificio de referencia.

(Figura 3.12)

Pared			
Parte	Porcentaje del área total %	Coefficiente global de transferencia de calor K ($W/m^2 K$)	Coefficiente de Sombreado CS
Fachada opaca	60	Tabla 1, Apéndice A	-----
Fachada transparente	40	5,319	1
Colindancia opaca	100	Tabla 1, Apéndice A	-----

Figura 3.12. Cuadro de características para el edificio de referencia en la NOM-008-ENER. Fuente: NOM-008-ENER.

Una ventana dentro de la envolvente de las edificaciones, se conforma por el sistema de acristalamiento y un sistema de sujeción o marco. Entre el sistema de acristalamiento, el marco y los elementos opacos que lo contienen, se generan intercambios de calor dependiendo de las propiedades termofísicas de los materiales. Dado que este intercambio entre todos los elementos de la ventana, exponencia el número de variables y afecta la lectura de los efectos exclusivos por

el cristal, para efectos del estudio se consideró un marco de aluminio de manera constante para todas las evaluaciones.

3.5.2 PERÍODOS DE EVALUACIÓN

El análisis se desarrolló para dos periodos de evaluación en ambos climas de referencia:

- Día Típico de verano (DTv) y Día Típico de invierno (DTi) con condiciones de libre desempeño de la temperatura.

Para el presente trabajo se considera como **libre desempeño de la temperatura** a la libre evolución de la temperatura interior como función del tiempo, como efecto de la interacción de las propiedades térmicas de los materiales sin la presencia de ningún sistema mecánico de climatización que modifiquen el desempeño del MEV.

- Anual con temperatura fija al interior las 24 horas, a través del uso de sistemas de acondicionamiento para calentamiento y enfriamiento. Cada mes el termostato se ajustó a la Temperatura de confort o de neutralidad (T_n) calculada según el modelo de ASHRAE 55. (Szokolay, 2004) dada por:

$$T_n = 17.8^{\circ}C + 0.30 (Tex\ med)$$

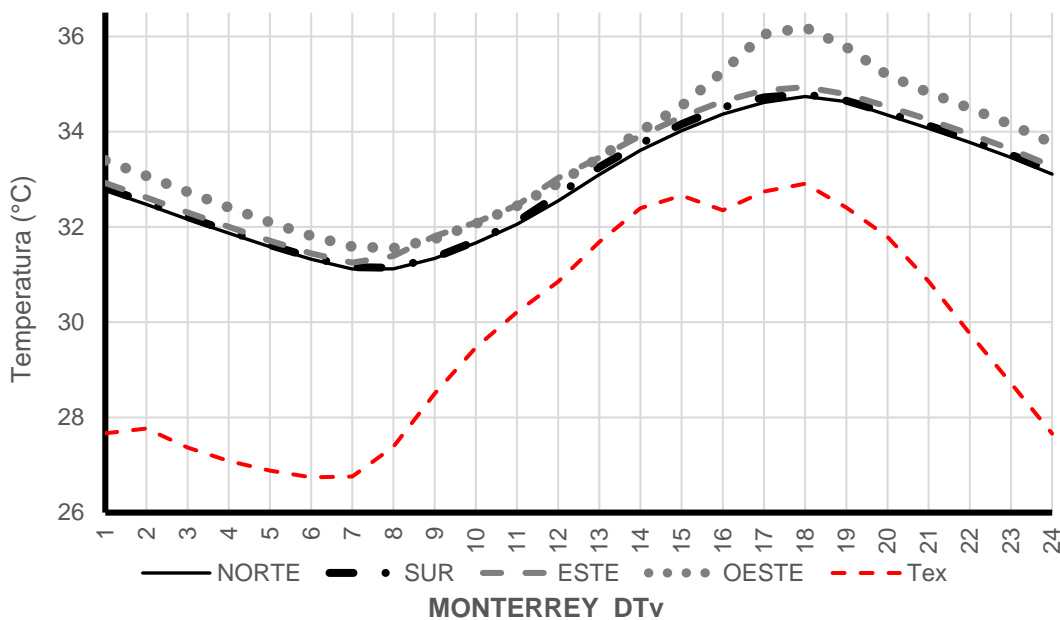
Donde la $Tex\ med$ = la temperatura exterior media.

3.5.3 ANÁLISIS DE ORIENTACIONES

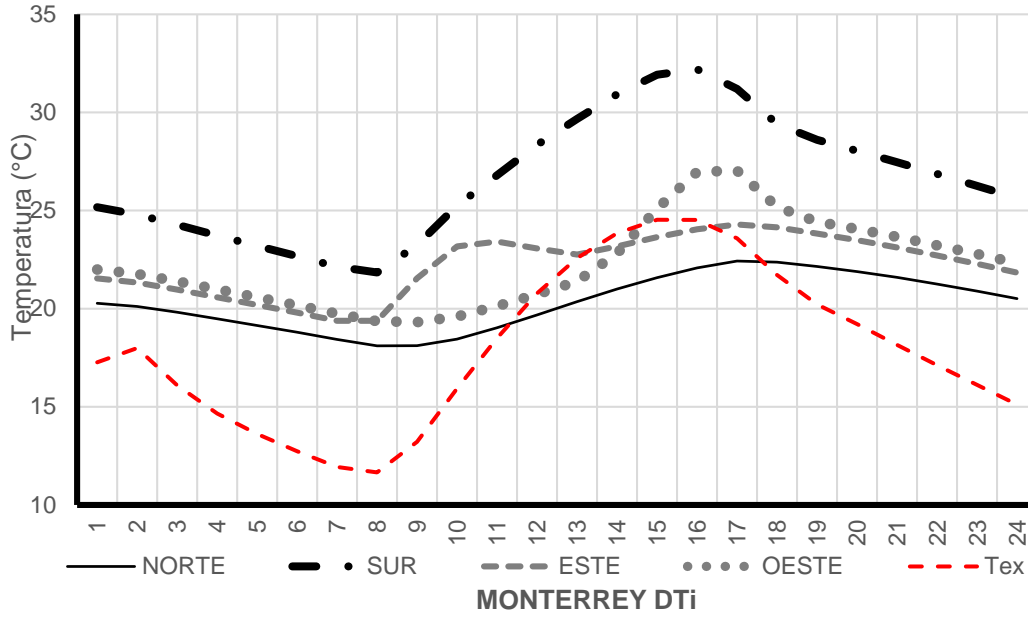
La orientación a la cual se coloque cada fachada de la envolvente, impacta en la cantidad de energía que fluye a través de cada elemento que la compone, así como en el desempeño horario de la temperatura al interior. Para cada latitud se presenta un patrón distinto de pérdidas y ganancias con respecto a la orientación de sus elementos. Esto, de acuerdo a su posición geográfica específica y a las condiciones del clima local.

Para la presente investigación se consideraron las orientaciones, SUR y ESTE, para ambas ciudades de referencia. Los criterios para la elección de dichas orientaciones fueron la magnitud y claridad de los efectos exclusivos por los acristalamientos en cada orientación. La caracterización climática de las ciudades de referencia donde se estableciera un estimado del impacto por el intercambio de los sistemas de acristalamientos para cada orientación. Finalmente se consideraron las recomendaciones de estrategias pasivas para ventanas mencionadas en la descripción por bioclimas de la CONAVI.

Con respecto a la claridad de los efectos por los acristalamientos en interacción con los efectos por el resto de los elementos opacos de la envolvente, en las figuras 3.13 y 3.14 (A y B), se presentan las temperaturas operativas al interior del MEV, por efecto del cambio de orientación de la ventana con sistema de acristalamiento monolítico claro sencillo de 6mm, a los 4 principales puntos cardinales, en un día típico de verano (DTV) y en un día típico de invierno (DTi), para la ciudad de Monterrey (Fig. 3.13 A y B) y para la ciudad de Toluca (Fig. 3.14 A y B) respectivamente.

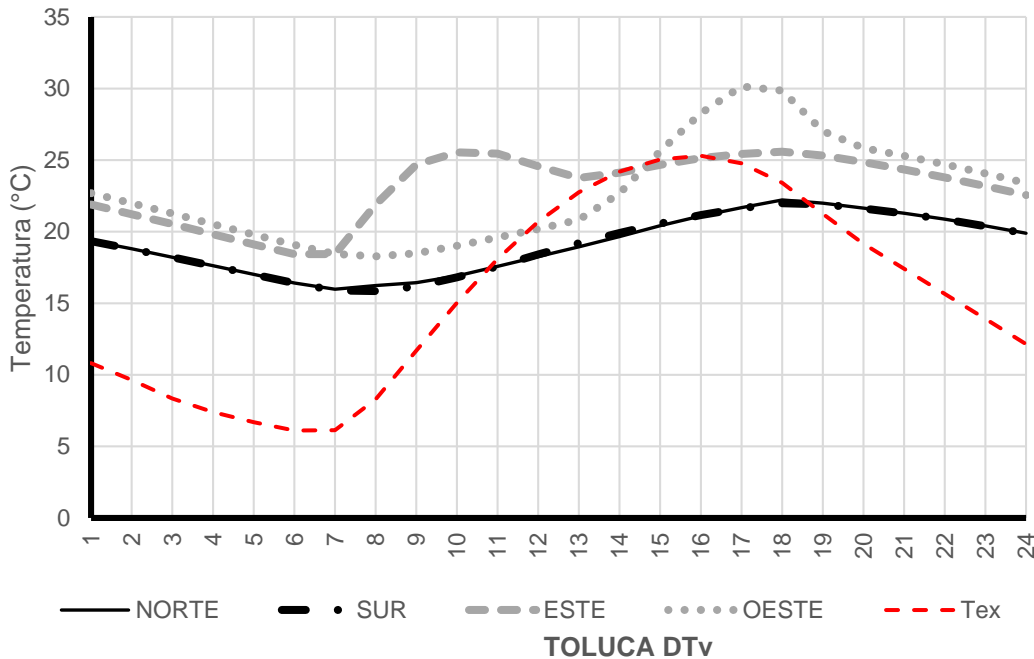


A. Temperatura operativa (Top) para el día típico de verano (DTV), en cuatro orientaciones, en la ciudad de Monterrey.

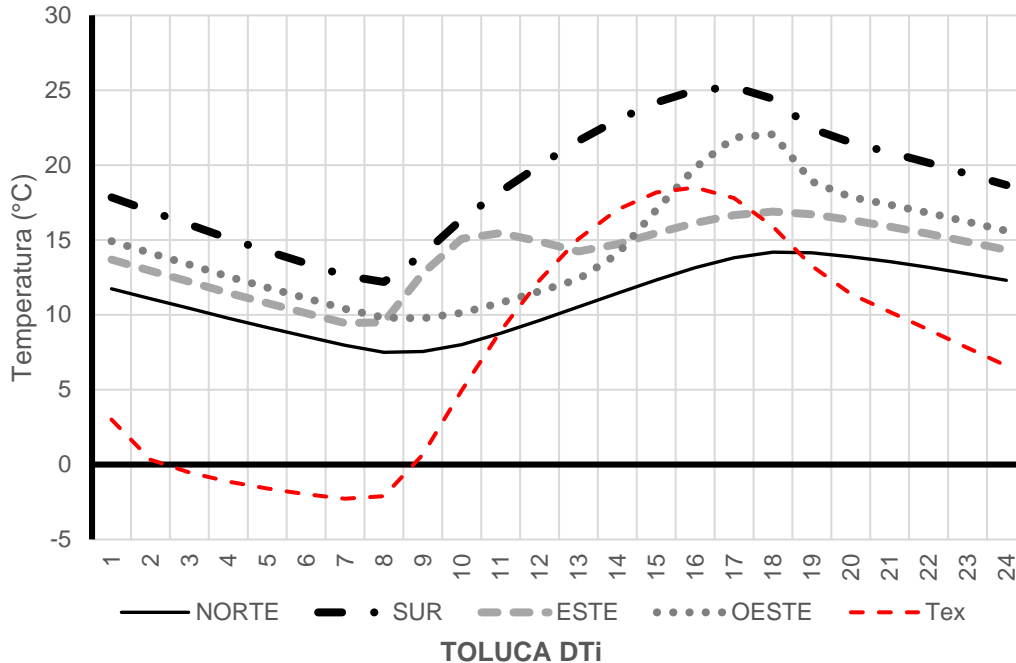


B. Temperatura operativa (Top) para el día típico de invierno (DTi) en cuatro orientaciones en la ciudad de Monterrey.

Figura 3.13. Temperatura operativa (Top) efecto del cambio de orientación del MEV en DTv (A) y DTi (B) para la ciudad de Monterrey.



A. Temperatura operativa (Top) para el día típico de verano (DTv), en cuatro orientaciones, en la ciudad de Toluca.



B. Temperatura operativa (Top) para el día típico de invierno (DTi) en cuatro orientaciones en la ciudad de Toluca.

Figura 3.14. Temperatura operativa (Top) efecto del cambio de orientación del MEV en DTv (A) y DTi (B) para la ciudad de Toluca.

Para la ciudad de Monterrey se observa que en el DTv [figura 3.13 A](#), todas las temperaturas se mantienen por arriba de la temperatura exterior (Tex) todo el día. La única orientación que presenta cambios representativos en su desempeño es la orientación OESTE. Del resto de las orientaciones, la ventana al ESTE presenta Top ligeramente mayor a las orientadas al SUR y ESTE.

Debido a la trayectoria solar durante el invierno, con mayor inclinación hacia la fachada sur, en el DTi ([figura 3.13 B](#)), la ventana al SUR presenta las temperaturas más altas todo el día, justo en la misma hora de la Tex max. Del resto de las orientaciones, con la ventana al ESTE se observa claramente el efecto de la radiación solar por la ventana. Se aprecia que la Top se eleva con los primeros rayos solares que inciden en la ventana. Es decir que predominan los efectos por radiación sobre los de la temperatura del aire exterior. Posteriormente se presenta un punto de inflexión donde al bajar el efecto por radiación solar y comienza a predominar el efecto de la temperatura del aire exterior. La orientación OESTE vuelve a presentar un aumento de la Top con un corrimiento de 1h aproximadamente.

En ambos días la orientación al NORTE presenta las menores Top debido a la falta de incidencia de radiación directa sobre la ventana, principal factor de impacto en el desempeño térmico de los acristalamientos. En la orientación SUR, con una alta cantidad de radiación solar incidente debido a la inclinación solar durante el invierno, las propiedades de los sistemas de acristalamiento impactarán de mayor forma en las condiciones térmicas y lumínicas del ambiente interior. Entre la orientación SUR y OESTE, dado a que está comprobado que la interacción entre componentes de la envolvente, impacta en el flujo de energía a través del espacio (Arredondo, 2014) se consideró que, aunque al OESTE en ambos días presenta un aumento observable en Top, resulta difícil saber qué proporción de la energía presente al interior del espacio al momento de la Top max, es producto de los aportes acumulados por los elementos opacos a través del día y cuales los relativos únicamente al acristalamiento. En cambio en la orientación ESTE, con la presencia de una primera Top max al momento de la salida del sol, hace evidente los efectos aportados por el acristalamiento.

Para la ciudad de Toluca (Figura 3.14), se observa que en orientaciones hacia el NORTE y SUR, las Top max se mantienen por debajo de la Tex max en el DTv. En el DTi con una orientación SUR la Top se eleva por arriba de la Tex max y de todas las demás Top por el resto de las orientaciones. Para el ESTE y OESTE, se presenta un patrón similar al analizado para Monterrey tanto en el DTv como en el DTi. Es decir que en los aportes por la radiación directa a primeras horas de la mañana en la orientación ESTE logra elevar la Top al interior desde las primeras horas de la mañana, logrando en este caso ofrecer una Top a través del día con mucha menos oscilación al interior. Igualmente en ambos DT, con una orientación OESTE, aunque si se observa un efecto en el aumento de la Top y en el retardo térmico al interior, los aportes por la interacción de los elementos opacos al interior dificultan la lectura del desempeño único por los acristalamientos.

Con respecto a las consideraciones por el análisis climático, en el punto 3.2 del presente capítulo, se observa que ambas ciudades presentan todo el año, requerimientos de calentamiento en las primeras horas de la mañana. En el caso de Monterrey más del 40% del año la Tex min se presenta por debajo del LIC. En el caso de Toluca los requerimientos de calentamiento durante todo el día hacen necesaria la acumulación de calor desde primeras horas.

Por su parte la CONAVI en sus recomendaciones para la vivienda bioclimática, con atención en las ventanas (CONAVI, 2006) , para el bioclima cálido seco de Monterrey sugiere uso de ventanas en orientaciones S-SE para ganancia solares directas durante el invierno. Para el resto de las orientaciones sugiere las mínimas necesarias en todas direcciones. En el caso del clima semifrío de Toluca, se establece un máximo de área de ventana de 80% de la superficie del muro con presencia en el eje S-SE para ganancia solar directa y mínimas en fachadas N y O. Para cualquier orientación evitar pérdidas de calor. Por lo tanto el conjunto de recomendaciones por bioclima para ambos climas da prioridad a las recomendaciones en ventanas hacia orientaciones SUR y ESTE.

Capítulo 4 Resultados

A continuación se presentan los resultados de la evaluación de los 7 casos de estudio en los climas de Monterrey y Toluca. De manera cronológica se presentan en los siguientes puntos:

4.1 MONTERREY	
4.1.1 SUR	4.1.2 ESTE
4.1.1 a Día típico de verano (DTv)	4.1.2 a Día típico de verano (DTv)
4.1.1 b Día típico de invierno (DTi)	4.1.2 b Día típico de invierno (DTi)
4.1.1 c Resumen anual	4.1.2 c Resumen anual

4.2 TOLUCA	
4.2.1 SUR	4.2.2 ESTE
4.2.1 a Día típico de verano (DTv)	4.2.2 a Día típico de verano (DTv)
4.2.1 b Día típico de invierno (DTi)	4.2.2 b Día típico de invierno (DTi)
4.2.1 c Resumen anual	4.2.2 c Resumen anual

4.1 MONTERREY

4.1.1 ORIENTACIÓN SUR

Para la orientación SUR lo más destacable en las dos temporadas de evaluación es: En el DTv los casos mejor evaluados son el C3 y el C5. Ambos presentan las Top max y min más cercanas a la Tn, así como la mejor relación en su FD y TR con valores promedio de 0.49 de FD y 30min en su TR. El caso peor evaluado es el C1 y el C4 por su alto porcentaje de transparencia a la radiación incidente. Destaca la poca diferencia en las Top por el intercambio de los sistemas con un promedio de 0.2°C en promedio. En el parámetro de Qte, todos los casos presentan requerimientos de Qte todo el año. Los mismos C3 y C5, presentan las menores Qte anualmente.

En el DTi, igualmente los C3 y C5 presentan las mejores condiciones al interior en Top y FD. Destaca que ninguno de los casos de estudio presenta diferencias en su

SUR DTv

TR de 30min. En la evaluación de Qtc, anualmente el 33.3% del año presenta Qtc representativas siendo los C3, C5 y C7 los que reflejan menores valores anuales.

4.1.1.a DÍA TÍPICO DE VERANO (DTv)

La Figura 4.1 presenta la temperatura operativa (Top) de un día típico de verano (DTv), por los 7 casos de estudio, colocados en una orientación SUR, para el clima CÁLIDO SECO de la ciudad de Monterrey. Como parámetro de referencia se incluye la temperatura de neutralidad (Tn) para un día típico de VERANO con un valor calculado de 26.7°C y la Top sin presencia de ventana o sistema de acristalamiento (SIN-V).

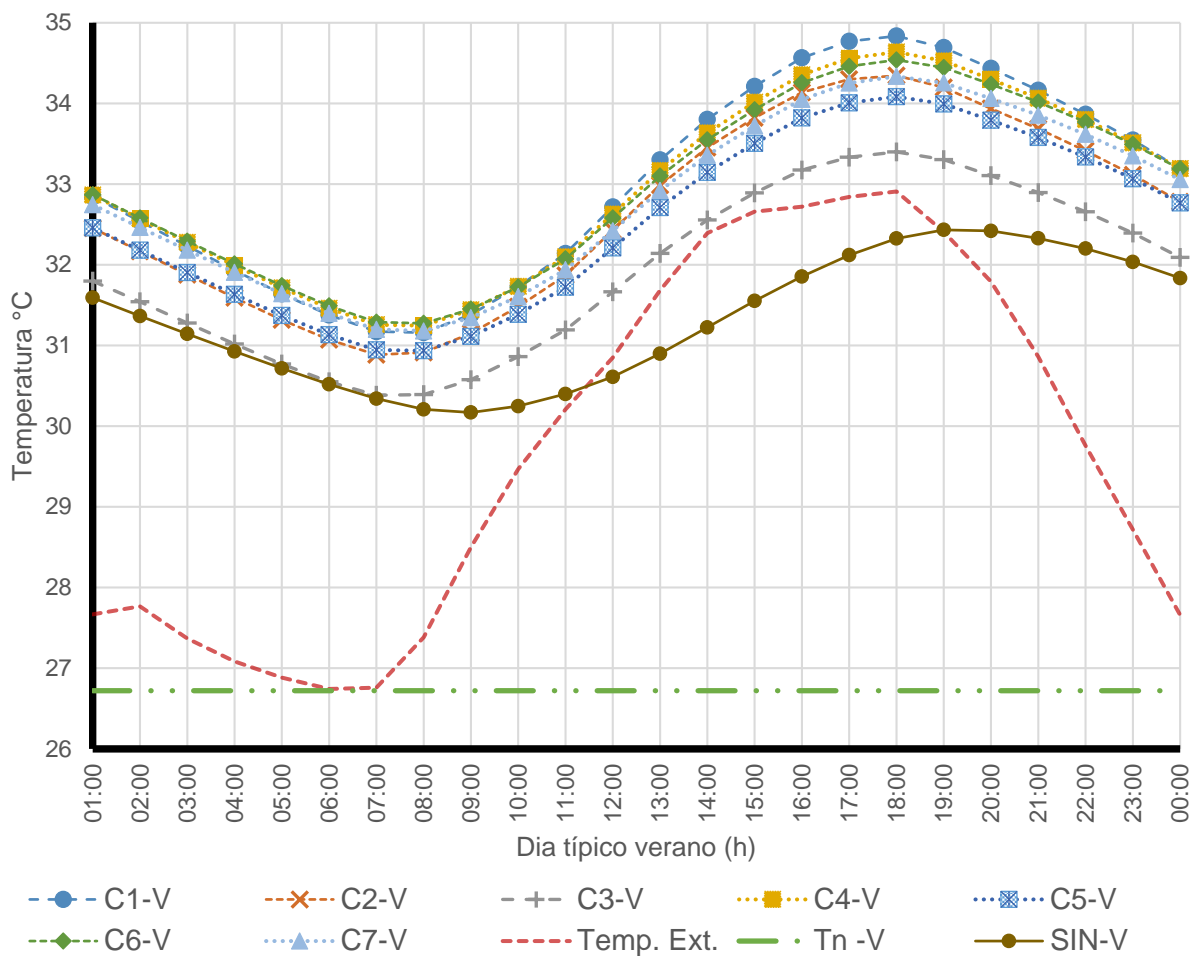


Figura 4.1. Comportamiento térmico de la temperatura operativa (Top) por los 7 casos de estudio en un día típico de verano (DTv) para orientación SUR para la ciudad de Monterrey.

Con una oscilación promedio de la Top de 3.3°C, los 7 casos de estudio aportan un amortiguamiento promedio de 3.2°C con respecto a la oscilación de la Tex de 6.5°C. El comportamiento de la Top, todo el día por arriba de la Tex, se presentan en el

rango de los 33.4°C a los 34.8°C en las Top max, y de los 30.3°C a los 31.3°C en las Top min. Es decir que la diferencia máxima en el comportamiento entre los 7 sistemas será de máximo 1.4°C. Con respecto a la Tn, tanto la Tex como todas las Top, superan las 24h la Tn. Las Top max y las Top min promedio por los 7 casos se presentan 7.4°C y 4°C por arriba de la Tn, respectivamente. Por lo tanto, ninguno ofrece beneficios significativos por sus efectos en la Top sobre la Tn.

Con respecto a las diferencias en la magnitud de la Top, en la Figura 4.2 se muestran las Top máximas (A) y las Top mínimas (B) ordenadas de mayor a menor en el caso de la Top máxima, y de menor a mayor en el caso de las Top mínimas haciendo referencia a su comportamiento en la Figura 4.1. Para cada Top se muestra el caso de estudio y la descripción del sistema de acristalamiento al cual corresponde. Finalmente se muestra $\Delta Tn \text{ máx} = Top \text{ max} - Tn$, y, $\Delta Tn \text{ min} = Top \text{ min} - Tn$.

CASO	SISTEMA	CONFIGURACIÓN	Top max (°C)	$\Delta Tn \text{ max}$ (°C)
C1	MONOLÍTICO	CLARO	34.8	8.1
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	34.6	7.9
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO	34.5	7.8
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE	34.4	7.6
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO	34.3	7.6
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO	34.1	7.4
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE	33.4	6.7

A. Top máximas de los 7 casos de estudio en orden de mayor a menor y $\Delta Tn \text{ max}$.

CASO	SISTEMA	CONFIGURACIÓN	Top min (°C)	$\Delta Tn \text{ min}$ (°C)
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE	30.4	3.6
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE	30.9	4.1
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO	30.9	4.2
C1	MONOLÍTICO	CLARO	31.1	4.4
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO	31.2	4.4
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	31.2	4.5
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO	31.2	4.5

B. Top mínimas de los 7 casos de estudio en orden de menor a mayor y $\Delta Tn \text{ min}$.

Figura 4.2. Top max (A) y Top min (B) por los 7 casos de estudio y ΔTn para el DTv en orientación SUR para la ciudad de Monterrey.

En las Top max (Figura 4.2 A) el C1 se observa como el peor evaluado, al presentar las Top max más alta de 34.8°C y la ΔT_n max de 8.1°C. El mejor evaluado, es decir, con la menor Top max de 33.4°C y una ΔT_n max de 6.7°C es el C3. Esto es una diferencia máxima de 1.4°C en la Top max entre el sistema peor y mejor evaluado. Ambos sistemas monolíticos de acristalamiento. Esto indica que ninguno de los sistemas dobles evaluados logra ofrecer mejores efectos que un cristal monolítico reflectante como es el C3.

Cabe mencionar que la alta reflectancia del C3, impactará no solo al espectro infrarrojo la radiación solar, sino que a la vez reflejará un alto porcentaje del espectro de luz visible hacia el exterior, produciendo bajos niveles de luz visible al interior. Como consecuencia se producirá un aumento en el consumo de energía por uso de iluminación artificial al interior de los espacios, disminuyendo significativamente la eficiencia energética total del C3. Este efecto en el consumo energético por la disminución de los niveles de luz natural asociado a sistemas altamente reflectantes como el C3, es mencionado ampliamente en la literatura (El-Deeb, PLEA-2013) como una consideración importante en la elección de este tipo de sistemas. Por tanto, en el caso de la evaluación por Top max, el C5 un sistema doble absorbente + claro, con una diferencia de 0.7°C en su Top max con el C3 y una ΔT_n max de 4.2°C, podría ser considerado a la par del C3 como el mejor evaluado entre los 7 estudiados tomando en cuenta esta ponderación.

Entre todos los casos se aprecia poca diferencia en su Top max con una diferencia promedio de apenas 0.1°C. La mayor diferencia se presenta entre el C5 al C3 con 0.7°C. Esto indica que para una orientación SUR en un DTv para el clima de Monterrey, el uso de un sistema de acristalamiento doble no ofrece beneficios significativos sobre un sistema monolítico como por ejemplo en C2.

El efecto en la Top mínima por los 7 casos, presenta una diferencia máxima de 0.8°C entre el de mayor y la menor Top min. Igual que en la Top max, el C3 se presenta como el mejor evaluado con la menor Top min de 30.4°C y una ΔT_n min de 3.6°C. Los peores evaluados o con la Top min más alta, son el C6, C4 y C7, con prácticamente el mismo comportamiento con una Top min de 31.2 y una ΔT_n min de 4.5°C. Con solo 0.1°C menos que los casos anteriores, se presenta el C1 con una

Top min de 31.1°C y una ΔT_n min de 4.4°C. En la media de todos los valores de Top min, el C2 y C5, presentan el mismo valor de 30.9°C.

Por tanto se observa que, el caso con mejor desempeño tanto en Top max como en Top min es el C5. Esto tomando en cuenta que aunque el C3 presenta los valores más óptimos, la literatura reporta poca eficiencia en su transición de luz visible.

Todo lo anterior muestra que, aunque el cambio en el sistema de acristalamiento SI presenta efectos en el comportamiento de la Top máx diaria, el potencial máximo por el uso de cualquiera de los sistemas evaluados es de 1.4°C en las Top max y de 0.8°C en las Top min de un DTv, en un clima cálido seco como el de la ciudad de Monterrey. También se observa que bajo condiciones interiores de libre desempeño de la temperatura, sistemas de acristalamiento monolíticos pueden ofrecer efectos iguales o mejores que sistemas dobles en la Top.

La **Figura 4.3** presenta los parámetros de Factor de Decremento (FD) y el tiempo de retardo (TR) por efecto de los 7 casos de estudio en un DTv para la orientación SUR.

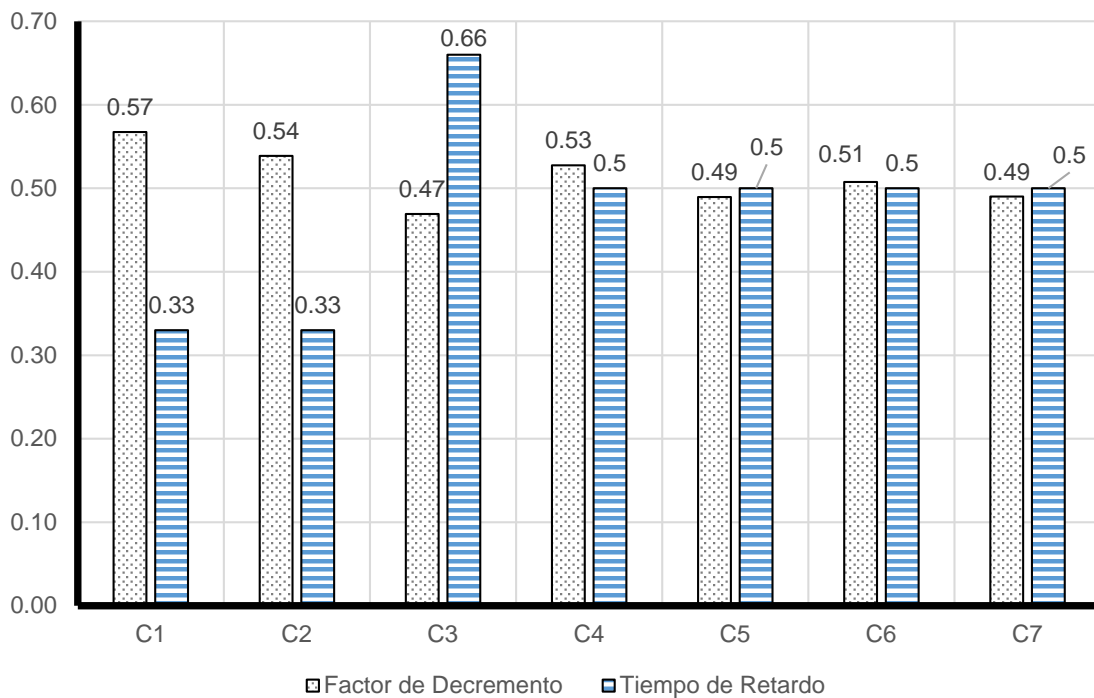


Figura 4.3. Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo (TR) por los 7 casos de estudio para un día típico de verano (DTv) en orientación SUR para la ciudad de Monterrey.

Se observa poca diferencia en el FD entre todos los casos de estudio, siendo el C1 el de mayor amplitud con 0.57 y el C3 el de menor amplitud con 0.47. Entre el resto de los 7, el C7, un sistema doble claro bajo emisor + claro, y el C5, un sistema doble absorbente + claro, presentan la misma amplitud con 0.49, 0.2 más alto que el C3. De manera ascendente con una diferencia de 0.1 en promedio entre ellos, le siguen el C6 con 0.51, C4 con 0.53 y el C2 con 0.54 de FD.

Con respecto al tiempo de retardo (TR), ninguno de los casos de estudio alcanza a completar 1h de retardo siendo el valor más alto 0.66h (40min) con el C3 y el más bajo 0.33h (20 min) igual para el C1 y el C2. Del resto, del C4 al C7 presentan el mismo valor de 0.5h (30 min).

Con base en los parámetros de menor FD y mayor TR, el C3 presenta como el mejor evaluado y el C1 y el C2 como los peor evaluados. Se aprecia que los resultados en el TR, se presentan iguales entre los sistemas monolíticos y entre los dobles, es decir con respecto a su masa térmica más que por sus propiedades termofísicas individuales de los casos de estudio. Es decir, sistemas monolíticos de acristalamiento como el C1 y el C2 presentaran el mismo TR, así como todos los sistemas dobles evaluados con 0.3. Esto con excepción del C3 que logra elevar el TR por el alto porcentaje de reflectancia de la radiación.

Para caracterizar los efectos a través del año por el uso de los sistemas evaluados, en la [Figura 4.4](#) se presenta la carga térmica de enfriamiento (Qte) mensual en kWh, necesaria para mantener la temperatura del aire interior constante en la Tn las 24h en un DTV para la orientación SUR dentro del módulo de evaluación virtual (MEV).

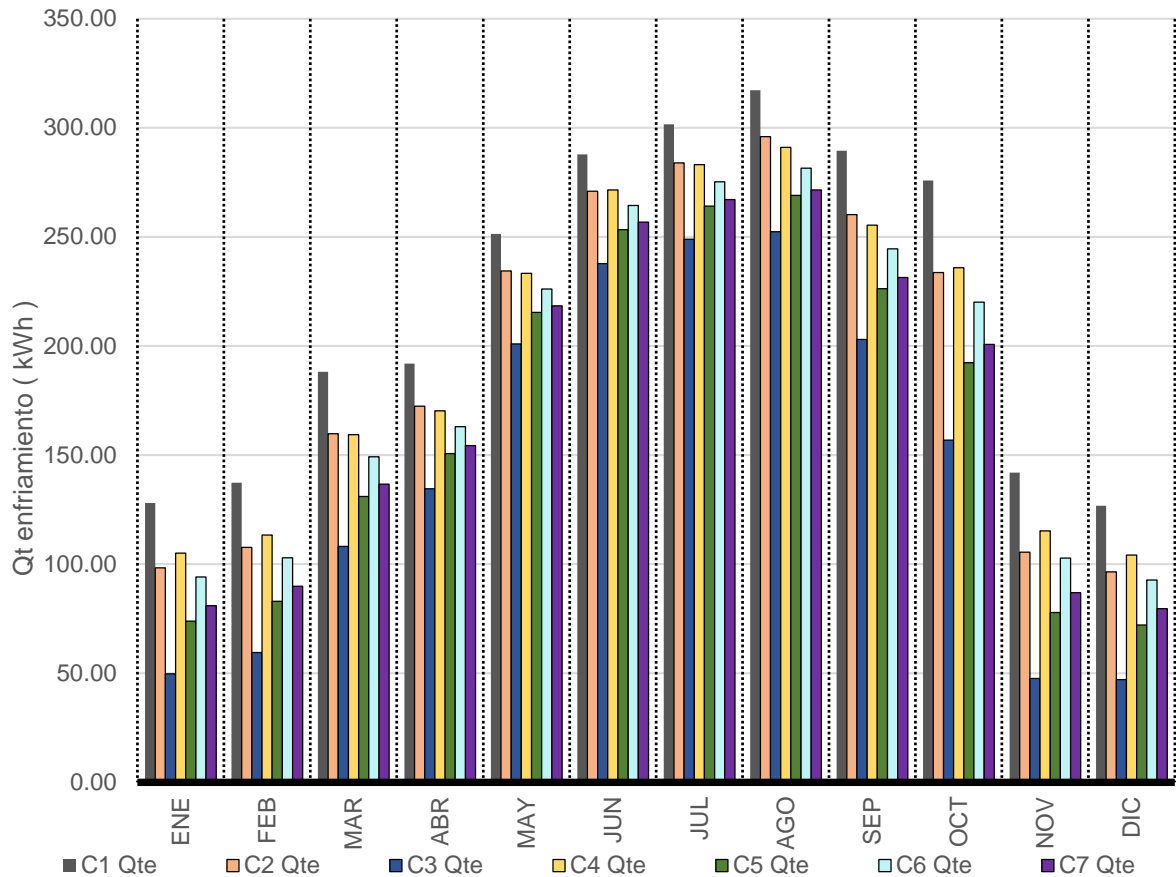


Figura 4.4 .Carga térmica de enfriamiento (Qte) mensual con una orientación SUR para la ciudad de Monterrey.

Se observa que todos los meses presentan Qte arriba de los 50Kwh para todos los casos de estudio. Durante 50% del año, de mayo a octubre, se presentan las mayores Qte, con valores dentro del rango aproximado de los 200kWh a los 317kWh. Otro 33% del año, de los meses de noviembre a febrero, se presentan las menores Qte en el rango promedio de los 50kWh a los 130kWh. Finalmente en los meses de marzo y abril se presentan Qte de 130kWh a 200kWh en promedio.

Se aprecia que aunque agosto y diciembre son los meses con mayores y menores Qte respectivamente, los meses contiguos a éstos presentan valores muy similares. Es decir los mayores y menores requerimientos de QTe se dan más por temporada que en un mes en específico.

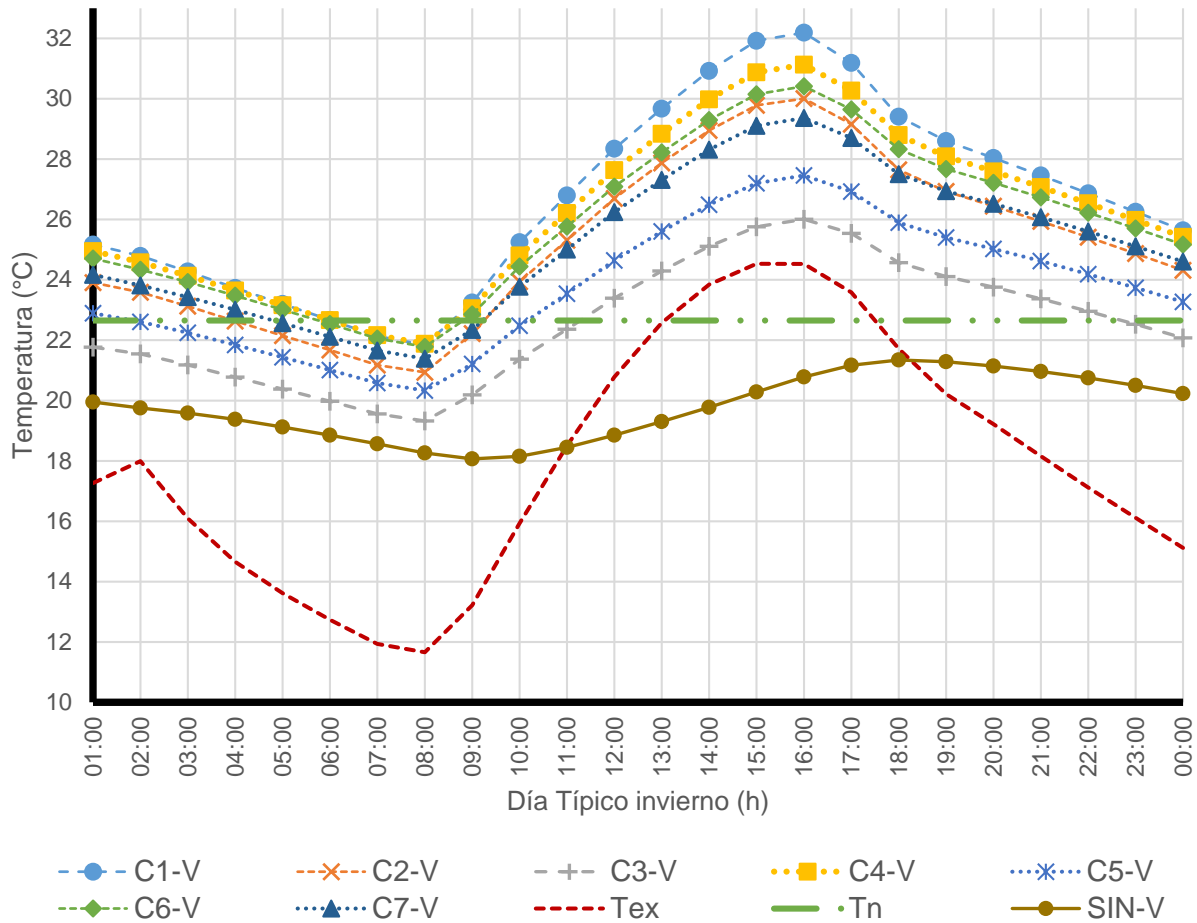
Con respecto a los efectos por los 7 casos, durante todo el año la Qte por efecto del C1 presenta los valores más altos y el C3 los más bajos. Esto quiere decir que en

este caso es más importante disminuir las ganancias por radiación solar directa que una estrategia de aislamiento. En los 6 meses de mayor sobre-calentamiento y con mayores requerimientos de Qte, el C1 presenta un promedio mensual de 286kWh y el C3 215kWh. El C2 y el C4, presentan comportamientos prácticamente similares con un promedio de Qte mensual de 261kWh. Lo mismo sucede con el C5 y el C7 con un promedio mensual de 238kWh. El C6 en la media promedio de los 7 casos presenta un promedio mensual durante los 6 meses de sobre calentamiento de 251kWh. En los 4 meses de bajo calentamiento y con menores requerimientos de QTe, el C1 y el C3 presenta un promedio mensual de 133kWh y 51kWh respectivamente. Entre los demás el C2 ahora presenta valores similares al C6 con un promedio de 100kWh mensuales. El C5 y el C7 con un promedio de 80kWh. Finalmente el C4 por debajo del C1 con un promedio de 109kWh.

Por lo tanto anualmente se observa que las menores Qte después del C3, las presentan el C5, un sistema doble absorbente + claro, y el C7, un sistema doble claro bajo emisivo + claro, ambos prácticamente con el mismo comportamiento. El C2, C4 y C6, el primero un sistema monolítico y los dos últimos sistemas dobles, presentan comportamientos anuales similares a pesar de sus diferencias en la conformación de los sistemas y a sus propiedades termofísicas asociadas.

4.1.1. b DÍA TÍPICO DE INVIERNO (DTi)

En la [Figura 4.5](#) se presenta la temperatura operativa (Top) de un día típico de invierno (DTi) como efecto de la interacción entre la temperatura exterior (Tex) y las características termofísicas de los 7 casos de estudio, colocados en una orientación **SUR**, para el clima **CÁLIDO SECO** de la ciudad de **Monterrey**. Como parámetro de referencia se incluye la temperatura de neutralidad (Tn) para un día típico de **INVIERNO** con un valor calculado de 22.7°C y la Top sin presencia de ventana o sistema de acristalamiento (SIN-V).



SUR DTi

Figura 4.5. Comportamiento térmico de la temperatura operativa (Top) por los 7 casos de estudio en un día típico de invierno (DTi) en la orientación SUR para la ciudad de Monterrey.

Para un DTi se observa, una oscilación promedio de la Top por los 7 casos de 8.5°C. Esto representa un amortiguamiento de 4.4°C con respecto a la oscilación de la Tex de 12.9°C. Las 7 Top mantienen un desempeño térmico, por arriba de la Tex todo el día. Misma condición que en el DTv para esta misma orientación. La Tex se presenta de los 24.5°C en la Tex max a los 11.6°C en la Tex min. Todas las Top se presentan dentro del rango de los 26°C a los 32°C en la Top max y de los 19°C a los 22°C en las Top min. Por lo tanto el promedio de las Top max se presentan 4.5°C arriba de la Tex max y 9°C arriba de la Tex min. Finalmente, del rango de Top, se aprecia una diferencia máxima de 6.3°C entre el caso de mayor y menor Top a través del día.

Con respecto a la Tn, la oscilación de todas las Top, cruza la Tn. Esto es que, más del 50% del día, las Top por todos los casos, se mantienen por arriba de la Tn. Las Top max se presentan, en promedio, 8°C por arriba de la Tn, y 9°C por debajo de la

Tn en las Top mínimas. Por su parte la Tex supera solo por 5 horas, e las 13:00h a las 18:00h, la Tn con 2°C arriba al momento de la Tex max y 11°C por debajo de la Tn al momento de la Tex min. Esto indica que el efecto de cualquiera de los sistemas evaluados, logra acercar las Top a la Tn sobre todo al momento de las Top min. Sin embargo al momento de las Top max algunos casos pueden llegar a elevar la Top por hasta 9°C.

Para analizar a detalle estas diferencias en magnitud entre los 7 casos en la [Figura 4.6](#) se presentan las Top max (A) y la Top min (B) ordenadas, de mayor a menor en el caso de la Top máxima, y de menor a mayor en el caso de las Top mínimas. Para cada Top se muestra el caso de estudio y la descripción del sistema de acristalamiento al cual corresponde. Finalmente se muestra $\Delta Tn \text{ máx} = Top \text{ max} - Tn$, y, $\Delta Tn \text{ min} = Top \text{ min} - Tn$.

CASO	SISTEMA	CONFIGURACIÓN	Top max (°C)	$\Delta Tn \text{ max (°C)}$
C1	MONOLÍTICO	CLARO	32.3	9.7
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	31.2	8.6
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO	30.5	7.9
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE	30.1	7.5
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO	29.5	6.8
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO	27.5	4.9
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE	26.1	3.4



A. Top máximas de los 7 casos de estudio en orden de mayor a menor y $\Delta Tn \text{ max}$.

CASO	SISTEMA	CONFIGURACIÓN	Top min (°C)	$\Delta Tn \text{ min(°C)}$
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE	19.2	-3.5
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO	20.2	-2.5
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE	20.7	-1.9
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO	21.2	-1.4
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO	21.6	-1.0
C1	MONOLÍTICO	CLARO	21.7	-1.0
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	21.7	-0.9



B. Top mínimas de los 7 casos de estudio en orden de menor a mayor y $\Delta Tn \text{ min}$.

Figura 4.6. Top max (A) y Top min (B) por los 7 casos de estudio y su ΔTn en un DTi en orientación SUR para la ciudad de Monterrey.

Con respecto a las Top max, en la [Figura 4.6 A](#), se observa que el C1, presenta el efecto más amplio en la Top max con 32.3°C y una ΔT_n max de 9.7°C, por lo que resulta en el peor evaluado. El C3 con la Top max más baja con 26.1°C y una ΔT_n max de 3.4°C es el mejor evaluado. Por lo tanto, entre el caso de mayor y menor Top max se presenta una diferencia de 6.2°C. Del resto el C4, con 1.1°C menos que el C1, presenta una Top max de 31.2°C y 8.6°C de ΔT_n max. El C6 y el C2 muestran una diferencia poco significativa de 0.3°C entre ellos con 30.5°C y 30.1°C respectivamente. En la media de los valores, el C7 presenta una Top max de 29.5°C y 6.8°C de ΔT_n max. Por debajo de este último se presenta el C5 con 27.5°C y con una ΔT_n max 4.9°C.

En la Top min de la [Figura 4.6 B](#), el C4, C1 y C6 presentan las Top min más altas con valores prácticamente iguales de 21.7°C y 21.6°C respectivamente, y unas ΔT_n min de -1°C en promedio. El C3 presenta la Top min más baja con 19.2°C y una ΔT_n min de -3.5°C. Es decir una diferencia de 2.5°C entre el de mayor y la menor Top min. Del resto, el C7 presenta 21.2°C y una ΔT_n min de -1.4°C. Le siguen el C2 y el C5 con 0.5°C de diferencia entre ellos y valores de 20.7°C y 20.2°C.

Entre los 7 casos, el C1 (monolítico claro sencillo), C4 (doble claro + claro) y C6 (doble pirolítico + claro), mantienen comportamientos muy cercanos, tanto en las Top max como en las Top min. Por su parte el C2 (monolítico absorbente) y el C7 (doble claro bajo emisivo + claro), presentan comportamientos con una diferencia de 0.5°C y son los únicos casos cuyas oscilaciones se cruzan durante la mañana invirtiendo la posición entre ellos.

En la [Figura 4.7](#) se presentan los parámetros de factor de decremento (FD) y el tiempo de retardo (TR) por efecto de los 7 casos de estudio.

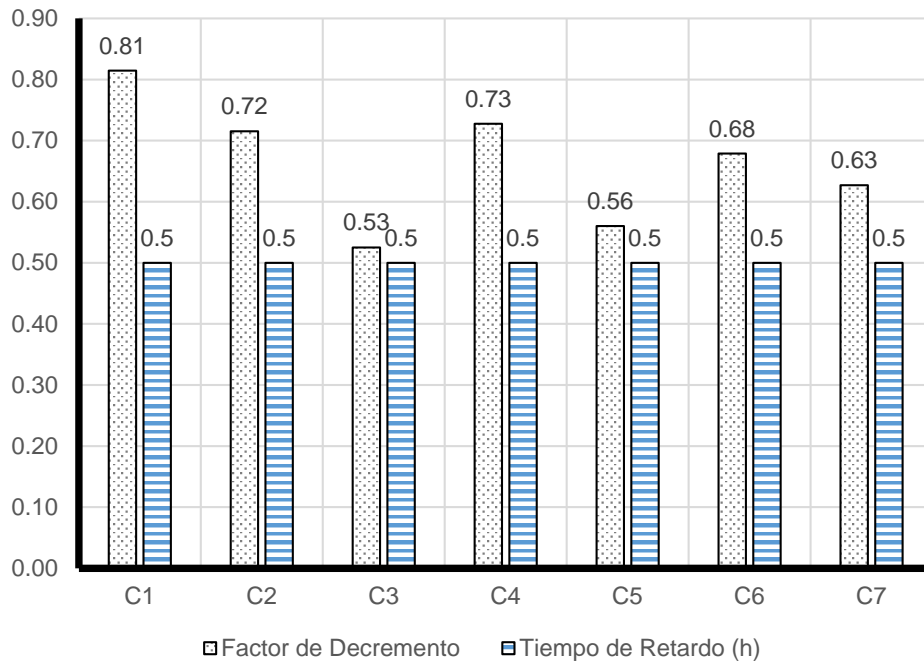


Figura 4.7. Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo (TR) por los 7 casos de estudio para un día típico de invierno (DTi) en orientación SUR para la ciudad de Monterrey.

Se observa que el C1 presenta la mayor amplitud con 0.81 de FD. Con una diferencia de 0.28, el C3 presenta la menor amplitud entre los 7, con 0.53 de FD. Prácticamente con el mismo comportamiento que el C3, se presenta el C5, con 0.56 de FD. Es decir una diferencia de 0.03. Esta similitud en el comportamiento del FD entre algunos casos, se repite. El C2 y el C4 presentan valores con una diferencia despreciable de 0.01 con 0.72 y 0.73 de FD respectivamente. Por su parte el C6 y C7 con 0.68 y 0.63 de FD, aunque amplían su diferencia entre ellos, está no supera los 0.5.

En relación al TR, todos los sistemas presentan el mismo valor de 0.50h (30min). Esto indica que para una orientación SUR, durante el invierno, la mejor relación entre FD y TR por algunos de los sistemas de acristalamiento evaluados, refleja efectos, únicamente sobre la magnitud del amortiguamiento de la Tex, mas no en el desfase de ésta al interior.

Con base en los valores de FD obtenidos, se aprecia que un sistema monolítico reflectante como el C3, o un sistema doble absorbente + claro como el C5, ofrecen una mejor relación entre el FD y el TR, que un sistema como el C6, doble pirolítico + claro, o incluso un doble claro bajo emisivo + claro como el C7. También se aprecia que un sistema monolítico absorbente presentará efectos prácticamente iguales a los de un sistema doble claro + claro.

En la **Figura 4.8** se presentan las cargas térmicas por calentamiento (Qt_c) mensual en kWh por los 7 casos de estudio, necesarias para mantener una temperatura de bulbo seco constante al interior del MEV durante las 24h en la T_n mensual.

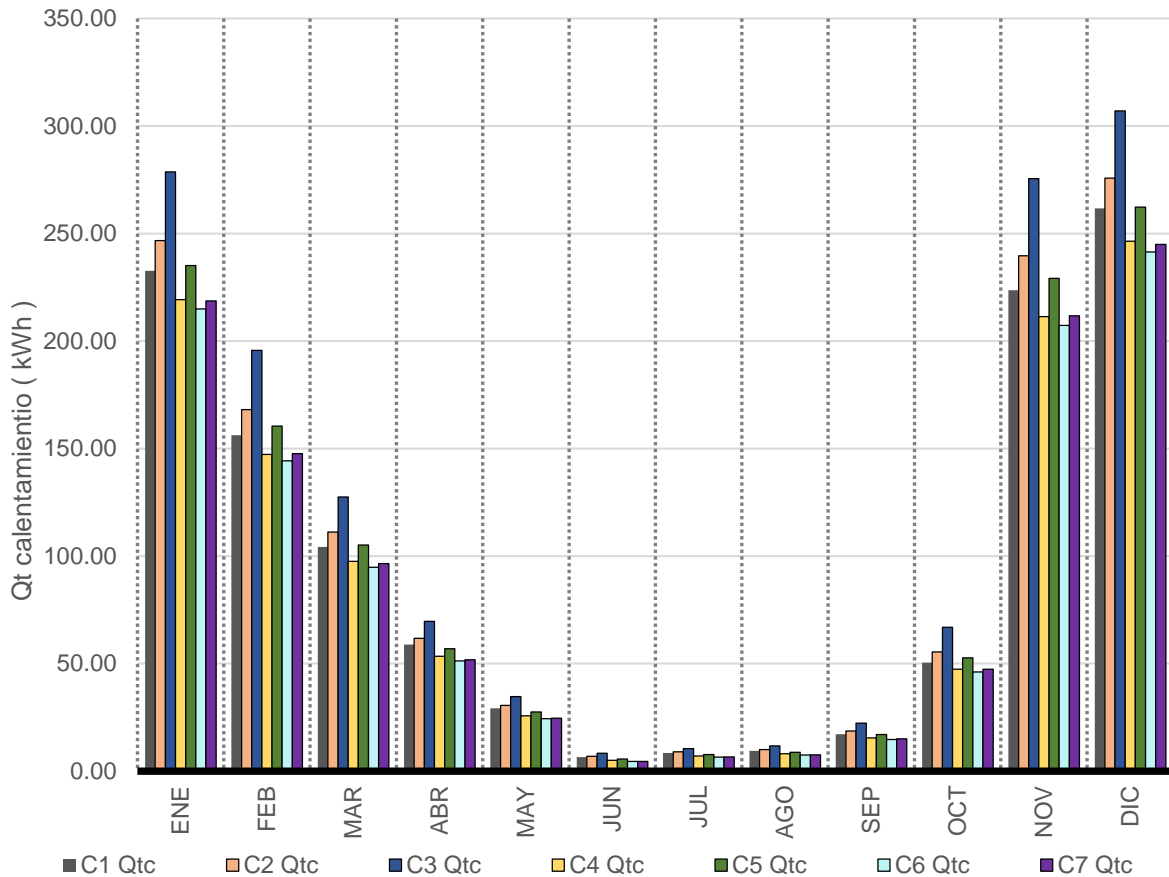


Figura 4.8. Carga térmica de calentamiento (Qt_c) mensual en una orientación SUR para la ciudad de Monterrey.

Se aprecia que el 41.6% del año, de mayo a septiembre, se presentan las menores Qt_c por todos los casos de estudio. Durante estos meses todos presentan valores de alrededor de 7 kWh. Otro 25% del año, en los meses de marzo, abril y octubre, se presenta un ligero aumento en las Qt_c, con valores alrededor de los 50 kWh. Finalmente el 33.3% del año, en los meses de noviembre a febrero, se presentan requerimientos por arriba de los 100 kWh. Anualmente el mes con mayores requerimientos de Qt_c es diciembre con los 7 casos en el rango de los 240 kWh a los 299 kWh. Por lo tanto se observa que el problema de calentamiento se presenta prácticamente solo en los meses de invierno.

Aunque durante la época de calor las diferencias en las Q_{tc} entre los 7 son poco significativas, anualmente el C3, un sistema monolítico reflectante, presenta las mayores Q_{tc} con un total anual de 1,403.42 kWh. Las menores Q_{tc} las presenta el C6, un sistema doble pirolítico + claro con 1,054.07 kWh. Es decir una diferencia anual entre el de mayor y menor Q_{tc} anuales de 349.35 kWh.

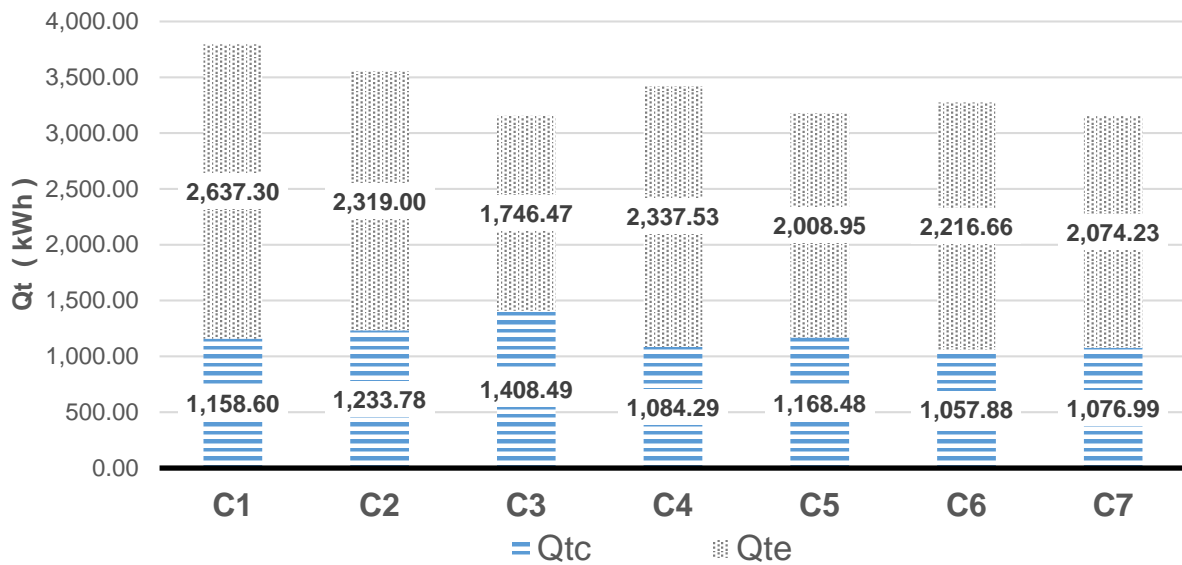
En diciembre, mes con los mayores requerimientos de Q_{tc} , el caso mejor evaluado es el C6, con Q_{tc} de 241 kWh y el peor evaluado el C3 con 307.06 kWh. Es decir una diferencia entre el de mayor y menor Q_{tc} de 66 kWh para el mes de diciembre. Del resto, los de mayores Q_{tc} promedio, las presenta el C2, sistema monolítico absorbente, con 274.81 kWh, y el C1 y C5, un sistema monolítico claro y un sistema doble absorbente + claro respectivamente, con valores similares en el promedio de 260.95 kWh. Finalmente con las Q_{tc} más bajas y cercanas al mejor evaluado, el C4 y el C7, ambos sistemas dobles uno claro + claro y el otro bajo emisor + claro, presentan en promedio 243.36 kWh.

En agosto, mes con las menores Q_{tc} , el C3 presenta 11.70 kWh y el C6 7.47 kWh. Los casos C1, C2 y C5, presentan un promedio de 9.35 kWh y con 4 kWh más que el C3, los C4, C6 y C7 presentan un promedio de 7.7 kWh. Esto es una diferencia promedio entre el de mayor y menor Q_{tc} de 4 kWh para el mes más caliente.

Anualmente se aprecia que solo el 58% del año se presentan requerimientos significativos de Q_{tc} por efecto de cualquiera de los 7 casos. Entre los 7, el C3, de nuevo por su alto porcentaje de reflectancia solar y bajo aislamiento térmico, al evitar las ganancias solares al interior presenta los mayores requerimientos de Q_{tc} . En diciembre se aprecia en primer lugar que los casos con mayor porcentaje de transferencia de radiación directa presentan los mejores desempeños. En segundo lugar se aprecia que los sistemas dobles logran mantener un mejor desempeño sobre los sistemas monolíticos por sus propiedades aislantes. Así aunque el C1 presenta una alta transparencia a la radiación solar directa por su poco nivel de aislamiento no mantiene el calor al interior.

4.1.1.c RESUMEN ANUAL

En la **Figura 4.9** se presenta las cargas térmicas de calentamiento (Q_{tc}) y las cargas térmicas por enfriamiento (Q_{te}) anuales para cada uno de los 7 casos de estudio para una orientación **SUR** en el clima de la ciudad de **Monterrey**.



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
QTt (kWh)	3,795.90	3,552.79	3,154.96	3,421.82	3,177.43	3,274.54	3,151.22

Figura 4.9. Cargas térmicas de calentamiento (Q_{tc}) y cargas térmicas por enfriamiento (Q_{te}) anuales por los 7 casos de estudio, en una orientación SUR para la ciudad de Monterrey.

En general se observan mayores efectos, por todos los casos, en las Q_{te} que en las Q_{tc} . En promedio los 7 sistemas presentan Q_{te} de casi el doble del valor de sus Q_{tc} . Esto muestra que el clima de referencia de la ciudad de Monterrey, anualmente, presenta un mayor potencial en ahorro energético por sistemas que ayuden a disminuir las Q_{te} , es decir, en la época y en las horas del año de mayor sobrecalentamiento.

Con Respecto a las Q_{tc} , el C3, un sistema monolítico reflectante, presenta los valores más altos con 1,408.49 kWh. Con 174.71 kWh menos que el C3, el C2, un sistema monolítico absorbente, presenta 1,233.78 kWh. Con 248.50 kWh menos que el C3, el C1, sistema monolítico claro y el C5, un sistema doble absorbente + claro, presentan valores muy similares entre ellos, con un promedio de 1,160 kWh de Q_{tc} anuales. Por último el C4, sistema doble claro + claro, C6, doble pirolítico + claro y C7, doble claro

bajo emisor + claro, presentan una Qtc promedio de 1000 kWh, con una diferencia promedio entre ellos de alrededor de 20 kWh. Esto es una diferencia de alrededor de 400 kWh con respecto al caso con mayores Qtc, es decir el C3.

En las Qte, entre el caso con mayor y menor requerimiento, se observa una diferencia de 890 kWh. El C1, presenta los mayores requerimientos con 2,637.30 kWh de Qte. Le siguen con un promedio de 337 kWh menos, el C2 y el C4, con un a Qte promedio de 2,300 kWh. Con 421 kWh menos que el C1, el C6, presenta 2,216.66 kWh. Por debajo de este el C5 y C7, con una diferencia entre ellos de 65 kWh, presentan un promedio de 2,000 kWh. Finalmente el C3, con los menores requerimientos presenta 1,746.47 kWh.

Se observa que comparativamente, entre los efectos por Qtc y Qte por los 7 casos, ninguno ofrece los menores valores a la vez en ambos requerimientos. El C3 presenta las menores Qte, sin embargo presenta los requerimientos más altos por Qtc. El C1 presenta un desempeño en Qtc dentro de la media de los casos, pero es el caso con mayores requerimientos en Qte. Por tanto, en una evaluación anual, tomando en cuenta que un alto porcentaje de las Qt totales son aportadas por las Qte y no por las Qtc por todos los sistemas, en la [Figura 4.10](#) se presentan las cargas térmicas totales (QTt) efecto de los 7 casos de estudio para el clima de la ciudad de Monterrey.

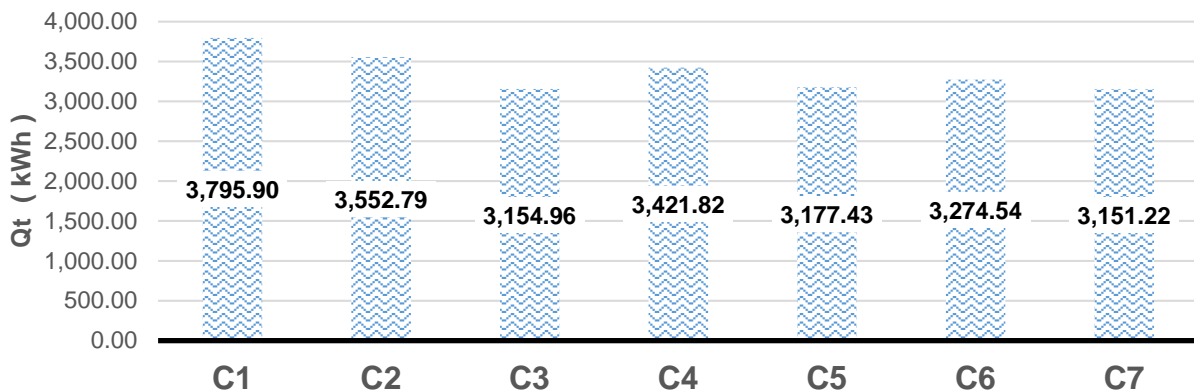


Figura 4.10. Carga térmica TOTAL (QTt) anual por los 7 casos de estudio en una orientación SUR para la ciudad de Monterrey.

Se observa que el C3, C5 y C7, presentan resultados muy similares en sus QTt anuales. Entre el C3 y el C7 se presenta una diferencia de 3.74 kWh, y entre éstos y el C5 alrededor de 22kWh. En promedio los tres con 3,160 kWh anuales, presentan las menores QTt con respecto al resto de los casos de estudio. Del resto, el C1

presenta las mayores QTt anuales con 3,795.90 kWh. En la media, el C2, C4 y C6 presentan valores intermedios con 3,552.79 kWh, 3,421.82 kWh y 3,274.57kWh respectivamente.

Sin embargo si regresamos a observar la [Figura 4.9](#), podremos observar que entre los tres mejor evaluados anualmente, se presentan diferencias en su comportamiento por temporada. El C3 aunque anualmente presenta las Qt más bajas, en la Qtc presenta el valor más elevado comparado con el C5 y C7.

Resulta relevante que de los tres casos mejor evaluados en el criterio de QTt anuales, el C3, un sistema monolítico reflectante, y el C7, un sistema doble claro bajo emisivo + claro, presentan prácticamente los mismos resultados. Es decir que el C3 aun con solo una hoja de cristal, logra reflejar la misma cantidad de calor que el C7 a través de una capa bajo emisiva y del amortiguamiento a través de su capa de aire entre ambos cristales. De igual forma el C5, un sistema doble absorbente + claro, logra con su capa absorbente y su canal de aire hermético, disminuir las QTt un poco más que los C3 y C7.

4.1.2 ORIENTACIÓN ESTE

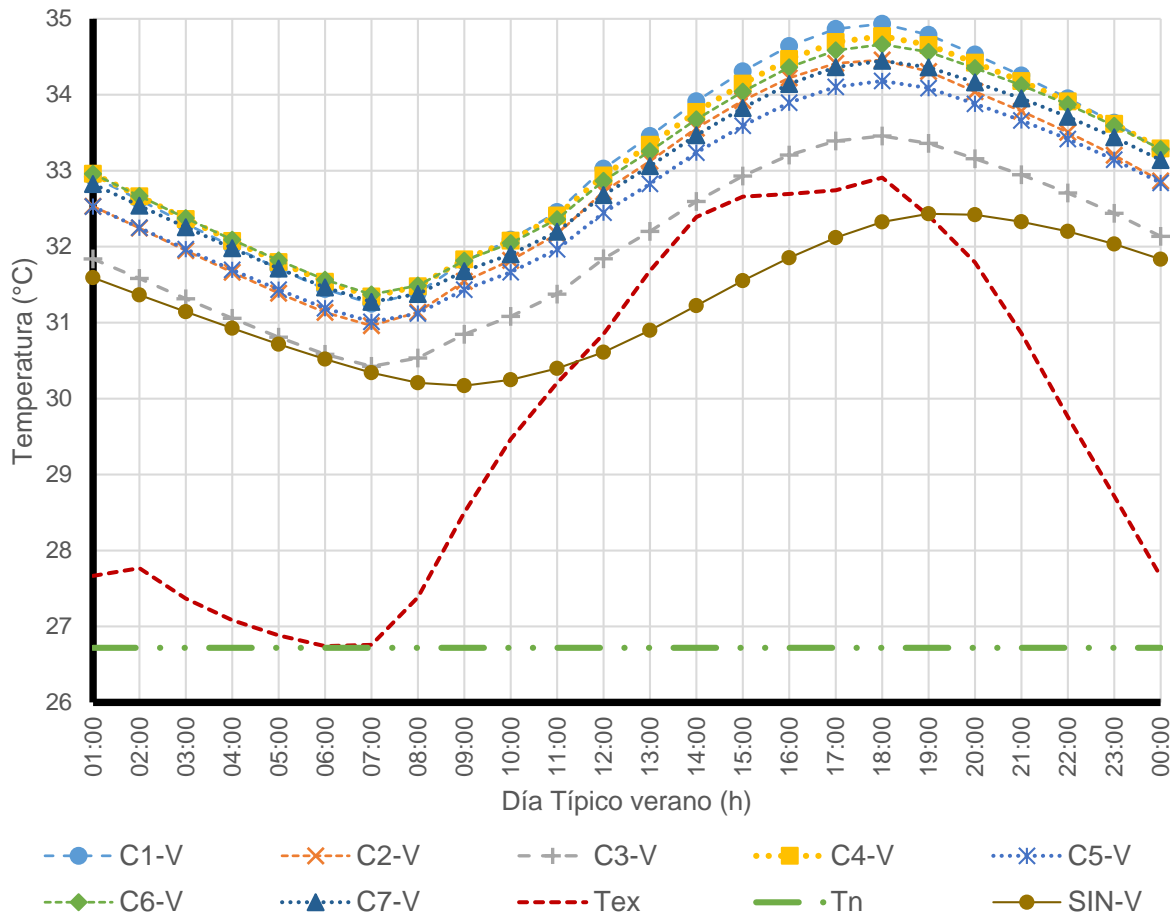
Del análisis presentado a continuación para una orientación ESTE destaca:

Para el DTV se observa poca diferencia en la Top por el intercambio de los sistemas de acristalamiento con tan solo 0.2°C en promedio. El caso mejor evaluado es el C3. Le siguen el C5, C7 y el C2. El C5 y el C2, un sistema doble y uno monolítico respectivamente, ambos con cristales absorbentes integrados. Destaca la similitud de resultados entre en C2 y el C7, el último un doble bajo emisivo. El FD y el TR presentan diferencias por los tipos de sistema, monolíticos o dobles y no por el tratamiento selectivo de la radiación de los distintos casos. Con respecto a las Qte se observa que el 66% del año se presentan Qte de mayor magnitud que el restante 34% del año, siendo el sobrecalentamiento al interior la principal problemática de la ciudad de Monterrey. El C3, C5 y C7 presentan las mejores evaluaciones.

En el DTi se destaca la claridad del efecto por radiación sobre el efecto de la Tex en los acristalamientos al presentarse dos Top max. Los casos mejor evaluados el C2, C7 y C6, ahora por su cercanía con la Tn o ΔTn . De nuevo destaca la similitud de desempeños entre el C2 y el C7 en las Top max y entre el C2 y el C5 en las Top min. El FD presenta diferencias de apenas 0.02 en promedio y el TR de 10min por el tipo de sistema igual que en el DTV. En las Qtc, solo el 33% del año presenta requerimientos de calentamiento considerablemente más altos que el restante 67%. Ahora el C3 presenta la peor evaluación al evitar las ganancias de calor al interior. El mejor evaluado por Qtc es el C6 seguido por el C7.

4.1.2.a DÍA TÍPICO DE VERANO (DTV)

La [Figura 4.11](#) se presenta la temperatura operativa (Top) de un **día típico de verano (DTV)**, como efecto de la interacción entre la temperatura exterior (Tex) y las características termo-físicas de los 7 casos de estudio, colocados en una orientación **ESTE**, para el clima **CÁLIDO SECO** de la ciudad de **Monterrey**. Como parámetro de referencia se incluye la temperatura de neutralidad (Tn) para un día típico de **VERANO** con un valor calculado de 26.7°C y la Top sin presencia de ventana o sistema de acristalamiento (SIN-V).



ESTE DTv

Figura 4.11. Comportamiento térmico de la temperatura operativa (Top) por los 7 casos de estudio en un día típico de verano (DTv) en orientación ESTE para la ciudad de Monterrey.

Con un promedio de 3.4°C en la amplitud de la oscilación de la Top por los 7 casos, se observa un amortiguamiento promedio 3.14°C con respecto a la oscilación de la Tex de 6.5°C. Las Top reflejan un comportamiento por arriba de la Tex todo el día. Las Top max se presentan en el rango de los 33.5°C a los 34.9°C, y las Top min de los 30.4°C a los 31.3°C. Es decir que la diferencia máxima entre el comportamiento de todos los sistemas es de 1.5°C.

Entre la orientación ESTE y SUR, para el mismo DTv, se observa poca diferencia en el comportamiento de las Top por los 7 casos. Con una amplitud de la oscilación promedio de la Top de 3.3°C en la orientación SUR, la diferencia entre ambas orientaciones es de tan solo 0.1°C.

La Figura 4.12 se muestran las Top máximas (A) y las Top mínimas (B) ordenadas de mayor a menor en el caso de la Top máxima, y de menor a mayor en el caso de las Top mínimas. Para cada Top se muestra el caso de estudio y la descripción del

sistema de acristalamiento al cual corresponde. Finalmente se muestra $\Delta Tn \text{ máx} = Top \text{ max} - Tn$, y, $\Delta Tn \text{ min} = Top \text{ min} - Tn$.

CASO	SISTEMA	CONFIGURACIÓN	Top max (°C)	$\Delta Tn \text{ max}$ (°C)
C1	MONOLÍTICO	CLARO	34.9	8.2
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	34.8	8.1
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO	34.7	8.0
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE	34.5	7.8
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO	34.5	7.7
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO	34.2	7.5
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE	33.5	6.7

A. Top máximas de los 7 casos de estudio en orden de mayor a menor y $\Delta Tn \text{ max}$.

CASO	SISTEMA	CONFIGURÓN	Top min (°C)	$\Delta Tn \text{ min}$ (°C)
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE	30.4	3.7
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE	30.9	4.2
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO	31.0	4.3
C1	MONOLÍTICO	CLARO	31.2	4.5
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO	31.2	4.5
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	31.3	4.6
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO	31.3	4.6

B. Top mínimas de los 7 casos de estudio en orden de menor a mayor y $\Delta Tn \text{ min}$.

Figura 4.12. Top max (A) y Top min (B) por los 7 casos de estudio y su ΔTn en un DTv en una orientación ESTE para la ciudad de Monterrey.

Nuevamente se observa que para la ciudad de Monterrey, las diferencias en los efectos por la variable de la orientación, entre el SUR y el ESTE, en el DTv, presenta diferencias constantes de 0.1°C en la Top por todos los casos de estudio. Al igual que en la orientación SUR, el C1 resulta con la peor evaluación al presentar la Top max más alta. El C3 resulta con la mejor evaluación, al presentar la menor Top max, con 1.4°C menos que el peor evaluado el C6 y con una diferencia de 0.7°C del siguiente caso mejor evaluado el C5.

Con respecto a las Top min (Figura 4.12 B), como se observó en la Figura 4.11, al presentarse todas las Top por arriba de la Tn todo el día, el mejor caso evaluado será aquel con la menor Top min y con la menor $\Delta Tn \text{ min}$. Al igual que en la orientación SUR, en la orientación ESTE, el caso mejor evaluado es el C3, seguido a 0.5°C por

ESTE DTv

el C2. Del resto de los casos se observa poca diferencia entre sus Top min con un máximo de 0.4°C entre el C2 y el C6.

La **Figura 4.13**, se presentan los parámetros de Factor de Decremento (FD) y el tiempo de retardo (TR) por efecto de los 7 casos de estudio en un DTV para la orientación ESTE.

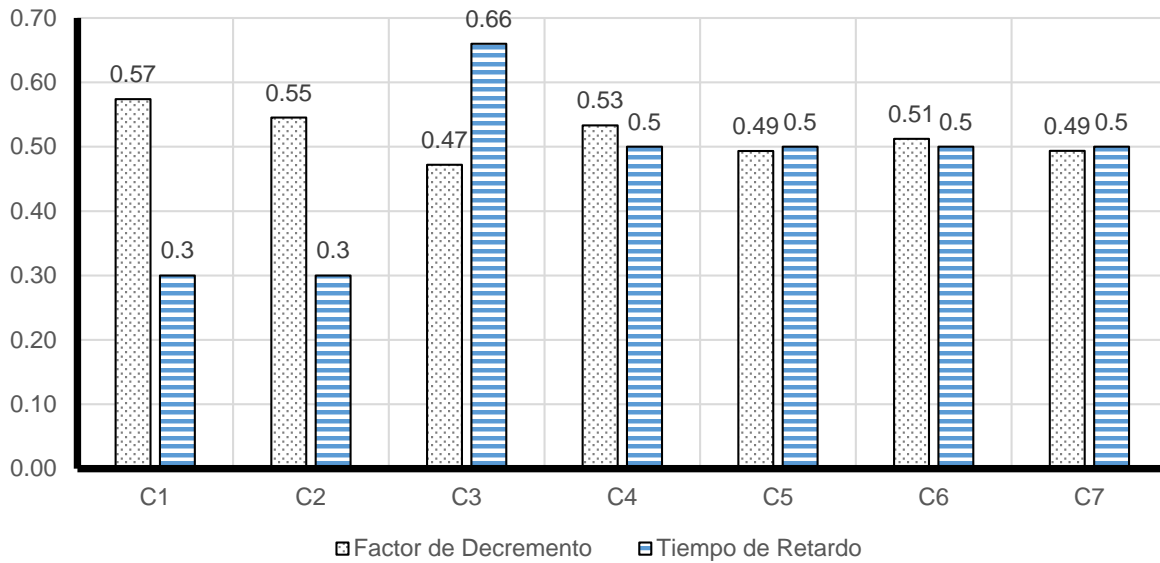


Figura 4.13. Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo (TR) por los 7 casos de estudio para un día típico de verano (DTV) en orientación ESTE para la ciudad de Monterrey.

En los parámetros de FD y TR de la **Figura 4.13**, se comprueba la similitud con los resultados en la orientación SUR. La mejor relación por ambos parámetros la presentan los C3, C5 y C7, la peor el C1.

Para caracterizar los efectos a través del año, en la **Figura 4.14** se presenta la carga térmica de enfriamiento (Qte) mensual en kWh, por efecto de los 7 casos de estudio, necesaria para mantener la temperatura de bulbo seco constante en la Tn al interior del MEV, durante las 24h en un DTV para la orientación ESTE.

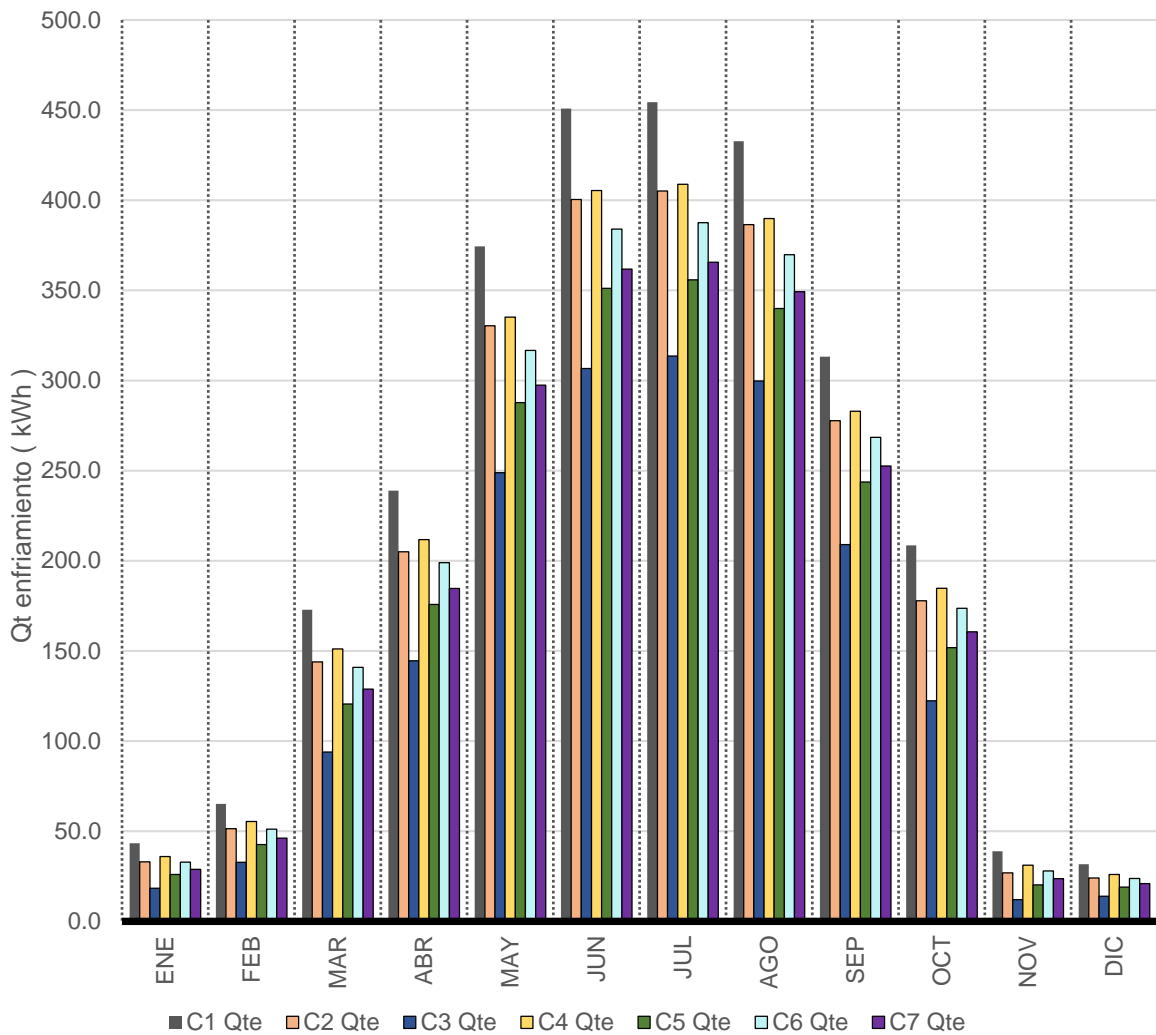


Figura 4.14. Carga térmica de enfriamiento (Qte) mensual para la orientación ESTE en la ciudad de Monterrey.

Se observa que durante el 41.6% del año, de mayo a septiembre, se presentan las mayores Qte por todos los casos, con valores dentro del rango aproximado de los 200 kWh a los 450 kWh. Esto es, 132 kWh más que en la orientación SUR. Otro 25% del año, marzo, abril y octubre, se presentan menores Qte en el rango promedio de los 97 kWh a los 240 kWh. Finalmente un 33% del año, en los meses de noviembre a febrero, se presentan las menores Qte anuales de los 26 kWh a 65 kWh en promedio. Por lo tanto, más del 67% del año se presentan altos requerimientos de Qte, y 33% restante requerimientos muy bajos, alcanzables a través de otras estrategias bioclimáticas.

Con respecto los siete casos de estudio, se observa que en todos los meses el C1 presenta las mayores QTe, y el C3 las menores. En julio el mes con mayores Qte, el C1 presenta 454.5 kWh y el C3 313 kWh, es decir una diferencia de 141 kWh entre el caso con mayores y menores Qte. Del resto de los casos el C2, monolítico absorbente, y el C4, doble claro + claro, presentan valores similares con alrededor de 400 kWh. Lo mismo sucede entre el C5, doble absorbente + claro, y C7, doble claro bajo emisivo + claro. Ambos presentan Qt de 360 kWh durante el mes de julio. En diciembre, mes con las menores Qte, el C1 presenta 31.7 kWh y el C3, 13.9 kWh. De nuevo el C2 y el C4 presentan desempeños similares con Qte promedio de 25 kWh. En general con las pocas Qte por el resto de los casos de estudio todos presentan un promedio de 20 kWh.

Entonces, al igual que en la orientación SUR, las menores Qte las presentan el C3, C5 y C7 durante todo el año. También, el C4 y C6 presentan resultados semejantes siendo siempre el C2 el de mayores valores. De nuevo se aprecia que para condiciones con temperatura de bulbo seco constante y requerimientos de enfriamiento, los casos dobles con propiedades o reflectantes o bajo emisivas ofrecen un mejor desempeño que los casos monolíticos. La excepción como en todas las evaluaciones previas que buscan la disminución de la Top al interior es el C3.

4.1.2.b DÍA TÍPICO DE INVIERNO (DTi)

En la **Figura 4.15** se presenta la Top de un **día típico de invierno (DTi)**, como efecto de la interacción entre la Tex y las características termo-físicas de los 7 casos de estudio, orientados hacia el **ESTE** y el clima **CÁLIDO SECO** de la ciudad de Monterrey. Se incluye como parámetro de referencia, la Tn para un día típico de **INVIERNO**, con valor calculado de 22.7°C y la Top sin presencia de ventana o sistema de acristalamiento (SIN-V).

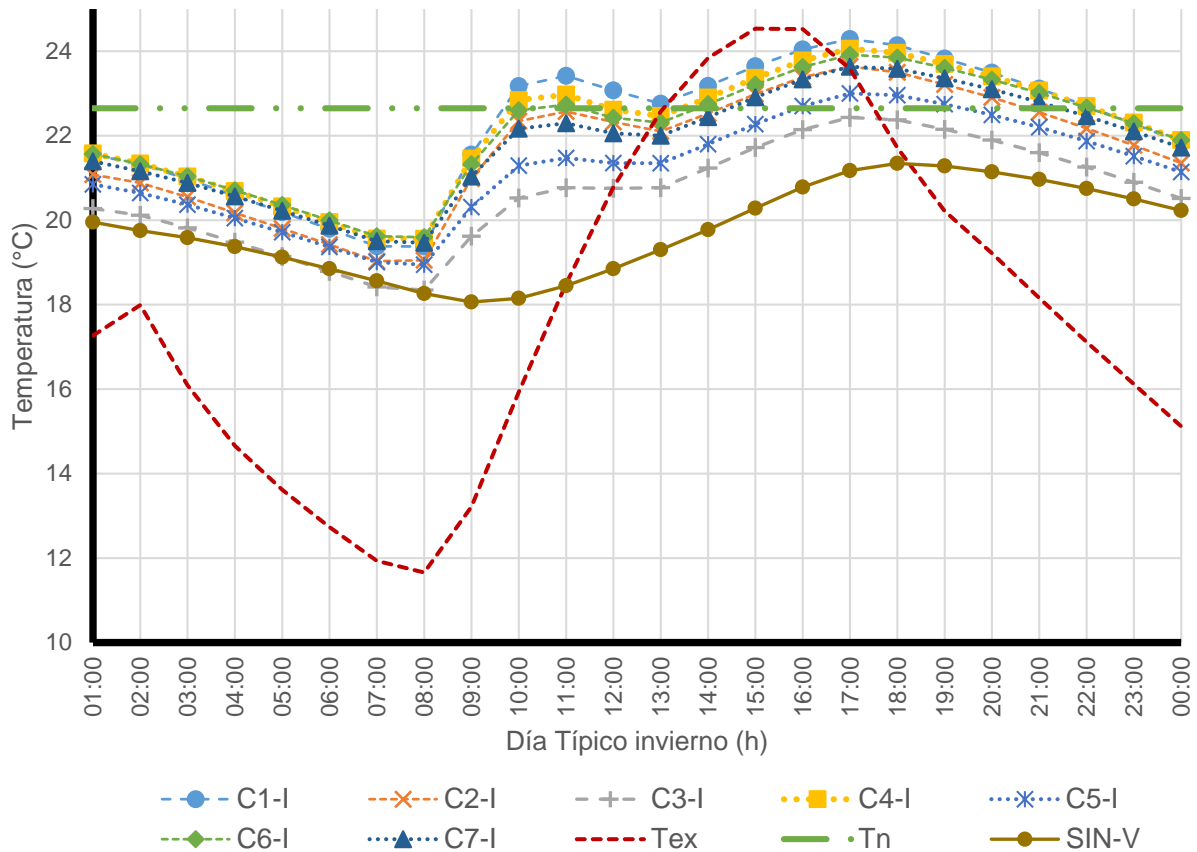


Figura 4.15. Comportamiento térmico de la temperatura operativa (Top) por los 7 casos de estudio, para un día típico de invierno (DTi) en la orientación ESTE para la ciudad de Monterrey.

Se observa una amplitud de la oscilación promedio de la Top por los siete casos de 4.4°C. Esto es un amortiguamiento de 8.4°C con respecto a la oscilación de la Tex de 12.8°C. A diferencia del DTi para una orientación SUR, donde todos presentan Top max por arriba de la Tex, en el DTi para una orientación ESTE, todas los Top se presentan por debajo de la Tex max, en un promedio 1.2°C. Por su parte, el promedio de todas las Top min se presenta 7.3°C por arriba de la Tex min.

Claramente se observa el efecto por radiación directa a través de la ventana sobre la Top interior durante las primeras horas de la mañana. Al momento de la salida del sol, alrededor de las 8:00h, se aprecia un aumento significativo en la Top hasta las 11:00h en todas las Top. Este efecto por radiación directa a través de la ventana pierde magnitud a las 13:00h donde el efecto convectivo por la Tex cobra preponderancia produciendo un nuevo aumento en la Top.

En cuanto a la Tn, se observa que la Tex cruza la línea de Tn, presentándose 11°C por debajo de la Tn al momento de las Tex min y sobrepasándola por 2°C al momento de la Tex max. Por su parte, se observa que las Top, a partir de las 10:00 am, mantienen un desempeño oscilante muy cercano a la Tn. Es al momento de las Top min, 8:00 am, que se presenta la mayor diferencia con la Tn. Esto indica que para un DTi en orientación ESTE, el evitar pérdidas de calor a través de los sistemas de acristalamientos en las horas de menor bajo calentamiento será un requerimiento importante dado que, en las horas de mayor sobrecalentamiento todos los casos evaluados consiguen mantener una diferencia máxima de 2°C con la Tn.

Para complementar el análisis a detalle de estas diferencias en magnitud entre los 7 casos en la Figura 4.16 se presentan las Top máximas (A) y las Top mínimas (B) ordenadas, de mayor a menor en el caso de la Top máxima, y de menor a mayor en el caso de las Top mínimas. Para cada Top se muestra el caso de estudio y la descripción del sistema de acristalamiento al cual corresponde. Finalmente se muestra $\Delta Tn\ máx = Top\ max - Tn$, y, $\Delta Tn\ min = Top\ min - Tn$.

CASO	SISTEMA	CONFIGURACIÓN	Top max (°C)	$\Delta Tn\ max$ (°C)
C1	MONOLÍTICO	CLARO	24.3	1.7
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	24.1	1.4
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO	24.0	1.3
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO	23.7	1.0
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE	23.7	1.0
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO	23.0	0.4
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE	22.5	-0.2



A. Top máximas de los 7 casos de estudio en orden de mayor a menor y $\Delta Tn\ max$.

CASO	SISTEMA	CONFIGURACIÓN	Top min (°C)	ΔT_n min (°C)
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE	18.1	-4.6
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO	18.7	-4.0
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE	18.7	-4.0
C1	MONOLÍTICO	CLARO	19.0	-3.6
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO	19.2	-3.5
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	19.2	-3.4
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO	19.3	-3.4



ESTE DTi

B. Top min de los 7 casos de estudio en orden de menor a mayor, y ΔT_n min.

Tabla 4.16. Top max (A) y Top min (B) por los 7 casos de estudio y su ΔT_n , en un DTi en una orientación ESTE para la ciudad de Monterrey.

De la [Figura 4.16 A](#) se observa que en la Top max, la diferencia entre el caso con mayor y menor Top max, es de 1.8°C. El C3, con 22.5°C en su Top max y -0.2°C de ΔT_n max se presenta como el caso mejor evaluado. Le sigue, con 0.5°C más el C5 con 23°C en la Top max. El caso peor evaluado es el C1, con la mayor Top max de 24.3°C y una ΔT_n max de 1.7°C. Los casos C4 y C6 presentan poca diferencia entre ellos con solo 0.1°C. Esto a pesar del mayor porcentaje de reflectancia del C6 contra el C4. El C2 y C7, presentan valores iguales en su Top máx. De nuevo, a pesar de la doble hoja de cristal y la capa bajo emisiva del C7, contra el sistema monolítico absorbente del C2.

Se observa que, entre las dos orientaciones evaluadas, aunque las Top max en la orientación ESTE es en promedio 5.8°C menor que la de la orientación SUR, los 7 casos de estudio mantienen la misma posición en la Figura de Top max con respecto a los demás casos. Para el DTi en una orientación SUR, el promedio en la Top max por los 7 casos es de 29.6°C y para el mismo DTi, pero en la orientación ESTE, el promedio en las Top max es de 23.8°C. Con respecto a la relación entre los 7 caso, el C1 y el C3 se mantienen, en las dos orientaciones, como los casos con la mayor y menor Top max, de 24.3°C y 22.5°C y una ΔT_n de 1.7°C y -0.2°C respectivamente. Así mismo, el C5, el segundo caso mejor evaluado presenta una Top. max de 23°C y una ΔT_n max por arriba de la Tn con 0.4°C.

Para el caso de las Top min ([Figura 4.16 B](#)), dada la posición de las Top min por los 7 casos de estudio, con respecto a la Tn, el mejor evaluado será aquel que presente

la menor ΔT_n o la Top min más alta. En la orientación ESTE, el C6 presenta la mayor Top max con 19.3°C y la menor ΔT_n min con -3.4°C . Esto es 1.2°C más en la Top min que el caso con la mayor ΔT_n min por el C3.

Con respecto a la diferencia entre orientaciones, la orientación ESTE presenta un promedio de Top min 2°C menor que el promedio de Top min para la orientación SUR. Se observa que la posición de los casos de estudio dentro de la tabla de Top min, entre ambas orientaciones, varía para los casos con mayor Top min. Esto es que los casos C3, C5 y C2, se mantienen, en ese orden, como los de mayor Top min. El resto con Top min por debajo de esos tres, modifican su orden con respecto al resto de los casos.

De la [Figura 4.15](#) y [4.16](#), se observa que para un DTi, orientación ESTE, el C6 presenta las mejores condiciones con respecto a la Tn. Esto es puesto que presenta las menores pérdidas en la Top min, y aunque en las Top max, no presenta los valores más bajos, si presenta una alta cantidad de horas sobre o muy cerca de la Tn como se observa en la [Figura 4.15](#).

Entre los 7 sistemas, destacan el C2 y C5, ambos con cristal absorbente, por su comportamiento similar tanto en las Top max y como en las Top min. Es decir que el uso de un cristal absorbente, puede presentar los mismos efectos ya sea en un sistema monolítico o uno doble.

En la [Figura 4.17](#) se presentan los parámetros de factor de decremento (FD) y tiempo de retardo (TR) en horas por efecto de los 7 casos de estudio.

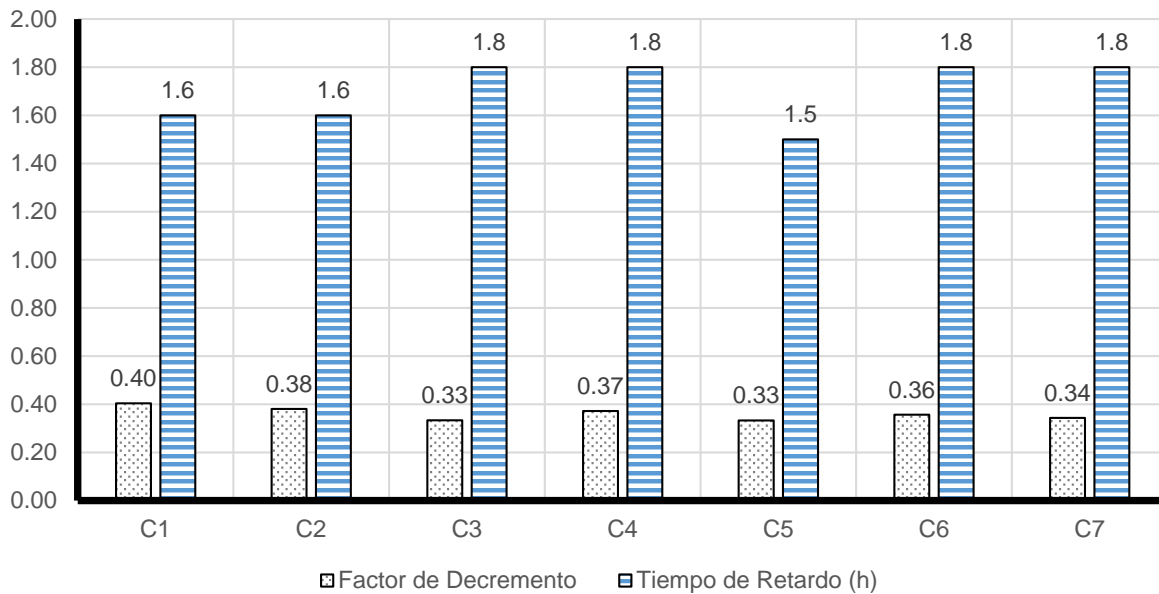


Figura 4.17. Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo (TR) por los 7 casos de estudio para un día típico de invierno (DTi) en orientación ESTE para la ciudad de Monterrey.

En la **Figura 4.17** se observa poca diferencia tanto en el FD como en el TR entre todos los casos de estudio. En el FD, el C3, un sistema monolítico y el C5, un doble presentan la misma amplitud con 0.33 siendo la menor de todos los sistemas. Le siguen el C7 y el C6 con 0.34 y 0.36 respectivamente. Finalmente las mayores amplitudes las presentan los C4, C2 y el C1, con 0.37, 0.38 y 0.40 de FD. Esto indica que, los sistemas dobles de acristalamiento ofrecen mejores TR y menores amplitudes en sus valores de FD, comparados con los casos con sistemas monolíticos. Destaca que el C3 un cristal monolítico iguala su comportamiento en el TR a los sistemas dobles con 1.8h (1h 50min).

Entre las dos orientaciones evaluadas, el promedio de los valores calculados de FD por todos los casos para la orientación ESTE, presenta una diferencia 50% menor, que los valores calculados para la orientación SUR. Con respecto al TR, todos los casos presentan valores arriba de 1h. Esto es un aumento del 80% en el TR comparados con los valores calculados para la orientación SUR, donde no se presenta diferencia en el TR entre los 7 casos de estudio con 0.3h.

Para la orientación ESTE, todos los casos del C3 al C7 presentan el mismo valor de 1h 50m de TR. El C1 y el C2 presentan 0.1 h menos que el resto con 1h 40m de TR. Es decir que todos los sistemas dobles de acristalamiento, ofrecen mayor retraso a la transferencia de calor, al presentar un aumento de 0.1h en su TR a diferencia de los sistemas monolíticos evaluados, excepto el C3. En el caso del C3, la poca transferencia directa de calor por parte del C3 logra retardar la hora de la Top max equiparando este parámetro a los presentados por sistemas dobles. Así, con base en la relación entre FD y TR, el C3 y el C5, presentan el mejor desempeño, ambos, con 0.33 de FD y 1.5h en su TR. La peor relación la presenta el C1 con el menor TR y un FD 0.07 menor que el C3 y C5.

En la [Figura 4.18](#) se presentan las cargas térmicas por calentamiento (Q_{tc}) mensual en kWh, necesarias para mantener la temperatura de bulbo seco constante al interior del MEV por los 7 casos de estudio en una orientación ESTE durante las 24h en la T_n mensual.

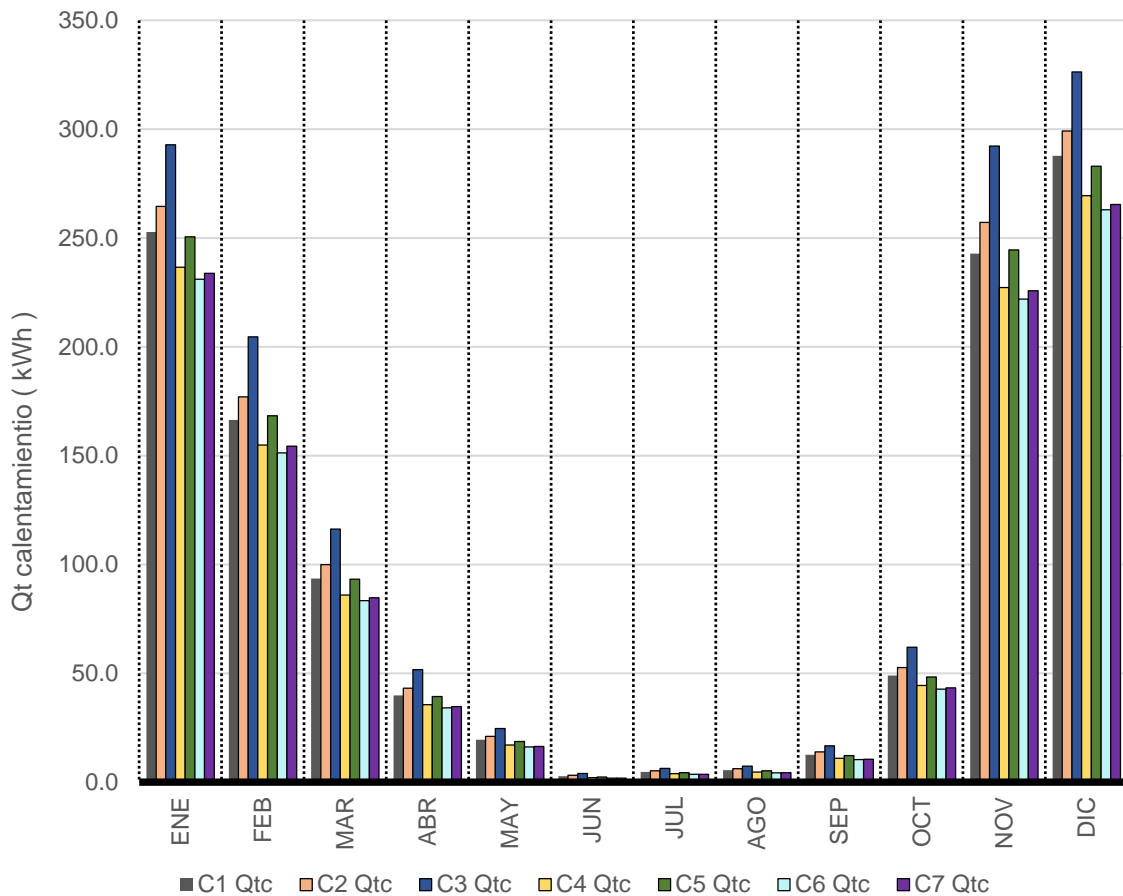


Figura 4.18. Carga térmica de calentamiento (Q_{tc}) mensual para la orientación ESTE en la ciudad de Monterrey.

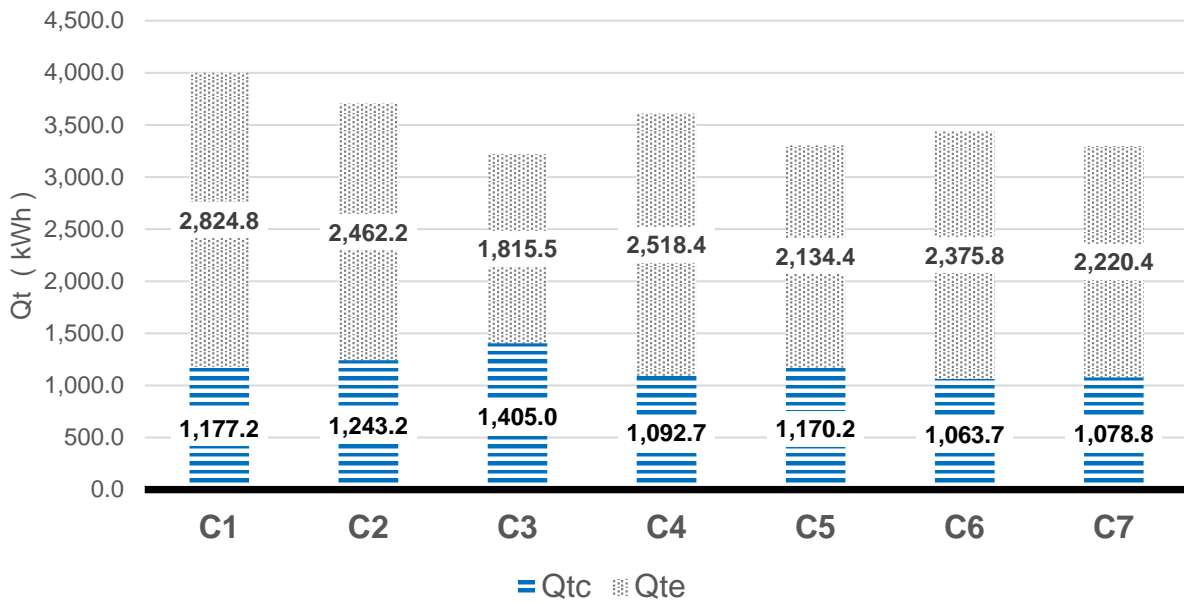
Para la orientación ESTE, en lo general, se aprecia el mismo comportamiento anual por todos los casos de estudio, que en la orientación SUR. Es decir, de junio a agosto se presentan las menores Q_{Tc} ; abril, mayo y octubre presentan Q_{Tc} en ascenso, y las mayores Q_{Tc} se presentan durante los meses de enero a marzo y de noviembre a diciembre. Particularmente, en la orientación ESTE, todos los casos de estudio presentan alrededor de 6% más Q_{Tc} en los meses con mayores Q_{Tc} , y un 30% menos, en el resto de los meses, que en la orientación SUR.

En todos los meses, el C3 presenta las mayores Q_{Tc} , mientras que el C6 presenta las menores Q_{Tc} . Junto con el C3, el C2, C1 y C5 presentan los mayores valores de Q_{Tc} . El C4, C6 y C7 presentan las menores Q_{Tc} . Los dos últimos con muy poca diferencia entre sus valores por Q_{Tc} . Esto indica que, en condiciones de temperatura interior constante con requerimientos de calentamiento, los sistemas monolíticos no presentan el mejor desempeño medido a partir de sus Q_{Tc} a diferencia de los sistemas dobles los cuales ofrecen mayor resistencia a las pérdidas del calor del interior.

Por lo tanto, aun en climas cálidos, como el de la ciudad de Monterrey, con requerimientos de calentamiento en invierno, el C3, un sistema monolítico reflectante, y los asociados a sistemas con cristales absorbentes como en C2 y el C5, pueden no presentar los mejores efectos anuales, al disminuir las posibles ganancias de calor requeridas al interior en las épocas de bajo calentamiento.

4.1.2.c RESUMEN ANUAL

Habiendo caracterizado los efectos de los sistemas evaluados bajo los criterios por temporada, en la [Figura 4.19](#) se presenta las cargas térmicas de calentamiento (Qtc) y las cargas térmicas por enfriamiento (Qte) anuales para cada uno de los 7 casos de estudio para una orientación ESTE en el clima de la ciudad de Monterrey.



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
QTt (kWh)	4,002.04	3,705.36	3,220.53	3,611.08	3,304.56	3,439.50	3,299.19

Figura 4.19. Cargas térmicas de calentamiento (Qtc) y cargas térmicas por enfriamiento (Qte) anuales por los 7 casos de estudio, en una orientación ESTE en la ciudad de Monterrey.

Se observa que en promedio, en todos los casos de estudio, las Qtc representan alrededor de un 34% y las Qte un 66% del total de Qt. En una evaluación anual, el sistema mejor evaluado, será aquel que presente las menores Qt totales (QTt). Sin embargo, el potencial térmico de los sistemas de acristalamiento para la orientación ESTE en el clima de la ciudad de Monterrey, será mayor, con un sistema de acristalamiento que disminuya las Qt con mayor influencia en el porcentaje total de Qt, es decir en las Qte.

En la relación entre los casos de estudio, se comprueba que la mayor problemática de la ciudad de Monterrey es en la época de calor, puesto que el C3 a pesar de presentar las mayores Qtc, presenta las menores QTt con 3,220.53 kWh. Con apenas una diferencia de 81 kWh le siguen al C3, el C5 un sistema doble absorbente + claro, y el C7, un sistema doble claro bajo emisivo + claro. Esos últimos presentan QTt con

una diferencia de apenas 5.37 kWh entre ellos. El caso con mayores QTt es el C1 con 4,002 kWh, el cual presenta las mayores Qte y Qtc en la media de todos los sistemas. **Dado que los acristalamientos no se intercambian entre temporadas, será necesario identificar los requerimientos térmicos mayor impacto a través del año en función de obtener un ahorro energético en el balance energético anual.**

Comparativamente entre la orientación ESTE y la orientación SUR, los 7 casos de estudio presentan el mismo comportamiento en la relación entre ellos. La única diferencia entre ambas orientaciones es la dimensión de sus Qt. Así la orientación ESTE presenta en promedio 6% mas Qte y 0.5% más de Qtc que en la orientación SUR en todos los sistemas.

4.2 TOLUCA

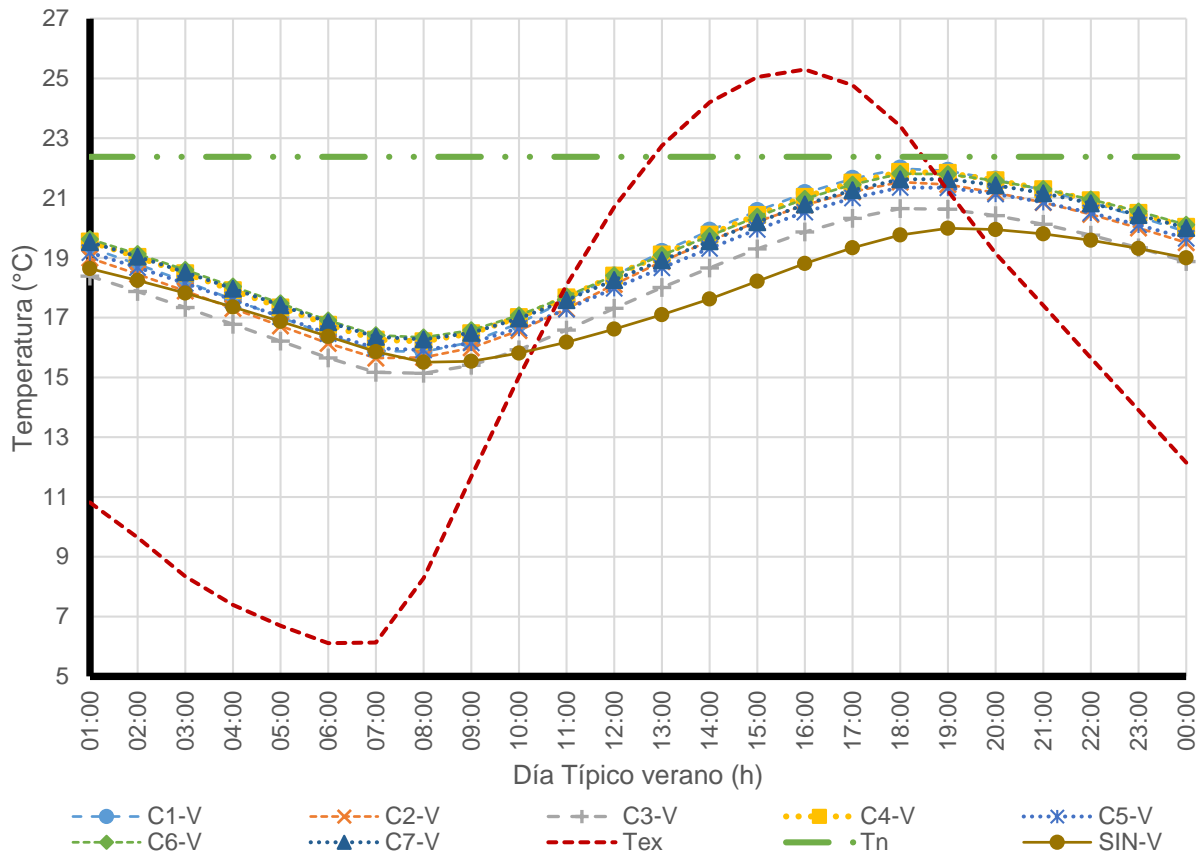
4.2.1 ORIENTACIÓN SUR

En la ciudad de Toluca en las evaluaciones para las distintas temporadas destaca: En el DTv todas las Top se mantienen por debajo de la Tn con requerimientos de calentamiento todo el día. Los mejores casos evaluados son los que permiten la mayor cantidad de transferencia de radiación directa, es decir C1, C4 y C6. Destaca la similitud en la Top max por el C4 y C6. La capa dura reflectante del C6 refleja parte del espectro pero a la vez calienta la superficie del cristal absorbiendo más calor y reirradiándolo al interior. En el FD y TR prácticamente no se presentan diferencias entre ninguno de los casos con un promedio en el FD de 0.29 y un TR de 2.5h. En las Qte destaca de nuevo la preponderancia de la radiación sobre la temperatura, al presentarse los mayores requerimientos de enfriamiento en los meses de invierno. Los mejores casos evaluados fueron el C3 y C5.

En DTi la diferencia en la Top max entre los casos aumenta considerablemente a 1.2°C en promedio. El mejor evaluado es el C4, en promedio presenta una Top cercana a la Tn por mayor tiempo a través el día. El peor evaluado es el C3 con propiedades opuestas a los requerimientos al interior. En FD de nuevo las diferencias son minimas y destaca que ningún caso presenta diferencias en el TR con valor constante de 1.3h. En Qtc todos los meses presentan Qtc, el caso mejor evaluado es el C5 y el peor con amplia diferencia al resto es el C3.

4.2.1.a DÍA TÍPICO DE VERANO (DTv)

La [Figura 4.20](#) presenta la temperatura operativa (Top) de un **día típico de verano (DTv)**, como efecto de la interacción entre la temperatura exterior (Tex) y las características termo-físicas de los 7 casos de estudio, colocados en una orientación **SUR**, para el clima **SEMIFRÍO** de la ciudad de Toluca. Como parámetro de referencia se incluye la temperatura de neutralidad (Tn) de un día típico de **VERANO** con un valor calculado de 22.4°C y la Top sin presencia de ventana o sistema de acristalamiento (SIN-V).



SUR DTv

Figura 4.20. Comportamiento térmico de la temperatura operativa (Top) por los 7 casos de estudio, para un día típico de verano (DTv) en la orientación SUR, para la ciudad de Toluca.

Se observa que todas las Top se presentan durante el día por debajo de la Tex y durante la noche por arriba de la Tex. Con una oscilación promedio de 5.8°C en la Top, los 7 casos ofrecen un amortiguamiento promedio de 13.6°C con respecto a la oscilación de la Tex. El rango en el cual se presentan las Top va de los 20°C a los 22°C en las Top max y de los 16°C a los 15°C en la Top min. Es decir que aun en los momentos de mayor Top, la diferencia en el comportamiento de los 7 casos de estudio no supera los 2°C.

Con respecto a la Tn, todas las Top se presentan las 24h por debajo de la Tn. La menor diferencia entre éstas se presenta al momento de las Top max con un promedio por todos los casos de 0.8°C por debajo de la Tn. Con un comportamiento similar, la Tex se presenta la mayor parte del día por debajo de la Tn con hasta 16.5°C menos al momento de la Tex min y con hasta 3°C más al momento de la Tex max. Esto indica que el intercambio de cualquiera de los 7 sistemas de estudio, en una

orientación SUR en la ciudad de Toluca no ofrece mayores beneficios que el resto en la Top con base en la Tn en un DTv.

Con respecto a la relación entre los 7 casos de estudio la [Figura 4.21](#) presenta las Top máximas (A) y las Top mínimas (B) ordenadas, de mayor a menor en el caso de la Top máxima, y de menor a mayor en el caso de las Top mínimas. Para cada Top se muestra el caso de estudio y la descripción del sistema de acristalamiento al cual corresponde. Finalmente se muestra $\Delta Tn \text{ máx} = Top \text{ max} - Tn$, y, $\Delta Tn \text{ min} = Top \text{ min} - Tn$.

CASO	SISTEM	CONFIGURACIÓN	Top max (°C)	ΔTn max (°C)
C1	MONOLÍTICO	CLARO	22.0	-0.3
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	21.9	-0.4
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO	21.9	-0.4
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO	21.7	-0.7
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE	21.6	-0.8
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO	21.4	-1.0
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE	20.7	-1.7



A. Top máximas de los 7 casos de estudio en orden de mayor a menor y ΔTn max

CASO	SISTEMA	CONFIGURACIÓN	Top min (°C)	ΔTn min (°C)
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE	15.1	-7.3
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE	15.6	-6.8
C1	MONOLÍTICO	CLARO	15.8	-6.6
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO	15.9	-6.5
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	16.2	-6.2
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO	16.2	-6.1
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO	16.3	-6.1



B. Top min de los 7 casos de estudio en orden de menor a mayor, y ΔTn min.

Figura 4.21. Top max (A) y Top min (B) por los 7 casos de estudio y su ΔTn, para un DTv en una orientación SUR para la ciudad de Toluca.

Con la Top por los 7 casos por debajo de la Tn durante las 24h, el mejor evaluado será aquel que presente la menor diferencia entre la Tn y la Top max y Top min, es decir la menor ΔTn max y la menor ΔTn min. Con base en lo anterior en la [Figura 4.21](#), el caso peor evaluado es el C3, al presentar la ΔTn max más amplia de 1.7°C. Los mejor evaluados son el C1, C4 y C6, con una ΔTn max de 0.3 y 0.4 para los dos últimos. **Es decir que en este caso, con requerimientos de ganancias internas de**

calor son más relevantes las propiedades de transmitancia solar en los sistemas de acristalamiento. Por lo tanto las tecnologías más transparentes a la radiación solar directa, como el C1, C4 y C6 serán las mejor evaluadas. Los de mayores porcentajes de reflectancia a la radiación como el C3 y el C5 serán los peor evaluados.

En las Top min, el caso mejor evaluado es el C6 con una ΔT_n min de 6.1, 1.2°C menos que el caso peor evaluado C3 con una ΔT_n min de 7.3°C. Dada la ausencia de radiación solar en la horas de las Top min, se observa que el efecto aislante de los sistemas dobles aporta mayores ventajas que los sistemas monolíticos al disminuir la magnitud de las pérdidas de calor por la noche. Se observa claramente que todos los casos mejor evaluados son los C6, C7, C4, C5, todos, sistemas dobles y los peores los sistemas monolíticos C3, C2 y C1. La mayor diferencia la presenta el C3 con 0.5°C con el C2. Dada su alta reflectancia, el C3 presenta las menores ganancias de calor durante el día. Este efecto acumulativo se traduce en una Top min más baja por la noche.

La Figura 4.22, se presentan los parámetros de Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo (TR) de los 7 casos de estudio en un DTV para la orientación SUR en el clima de la ciudad de Toluca.

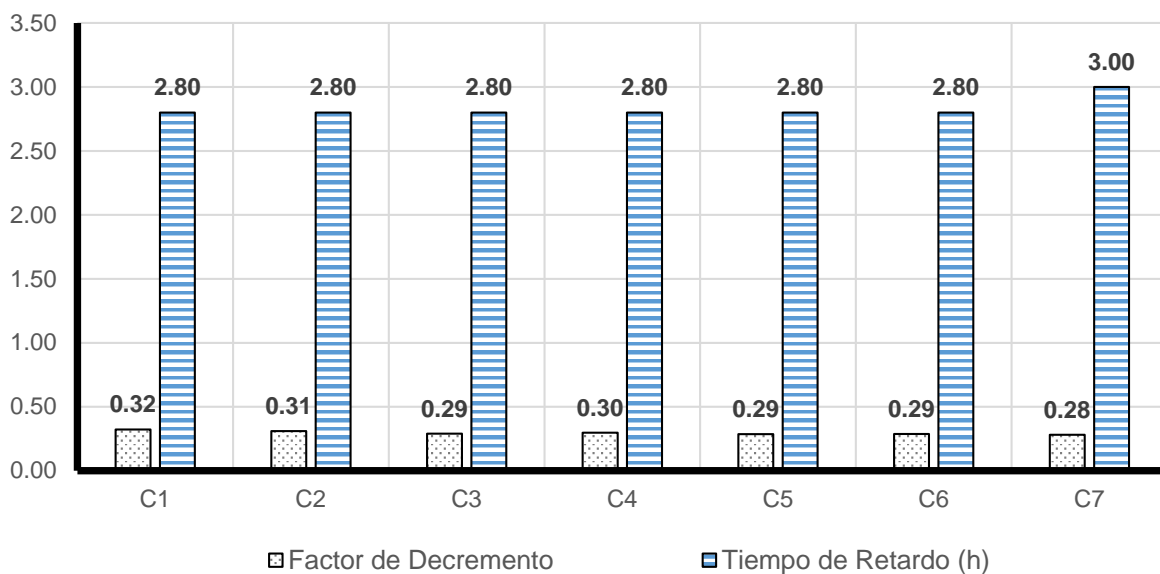


Figura 4.22. Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo (TR) por los 7 casos de estudio para un día típico de verano (DTV) en orientación SUR, para la ciudad de Toluca.

Con respecto al FD se observan diferencias poco significativas entre los 7 casos de estudio con apenas 0.01 de FD entre ellos y un valor promedio de 0.3. El C1 presenta la amplitud más alta con 0.32 y el C7 la más baja con 0.28 de FD. C3, C5 y C6 presentan el mismo valor de 0.29, y los casos C2 y C4 con 0.31 y 0.30 respectivamente. En cuanto al TR del C1 al C6, todos presentan 2.8h (2h con 50min) excepto el C7 con un aumento de 0.2h (10min) en su TR. Por lo tanto el C7 es el único que presenta una ventaja en su TR sobre el resto de los casos de estudio. Del resto de los sistemas ninguno presenta un comportamiento distinto sobre los otros de manera significativa ni en su FD o su TR.

Para caracterizar los efectos a través del año por el uso de los casos de estudio, en la [Figura 4.23](#) se presenta la carga térmica de enfriamiento (Qte) mensual en kWh, por los 7 casos de estudio, necesaria para mantener la temperatura del aire constante al interior del MEV durante las 24h en la Tn mensual.

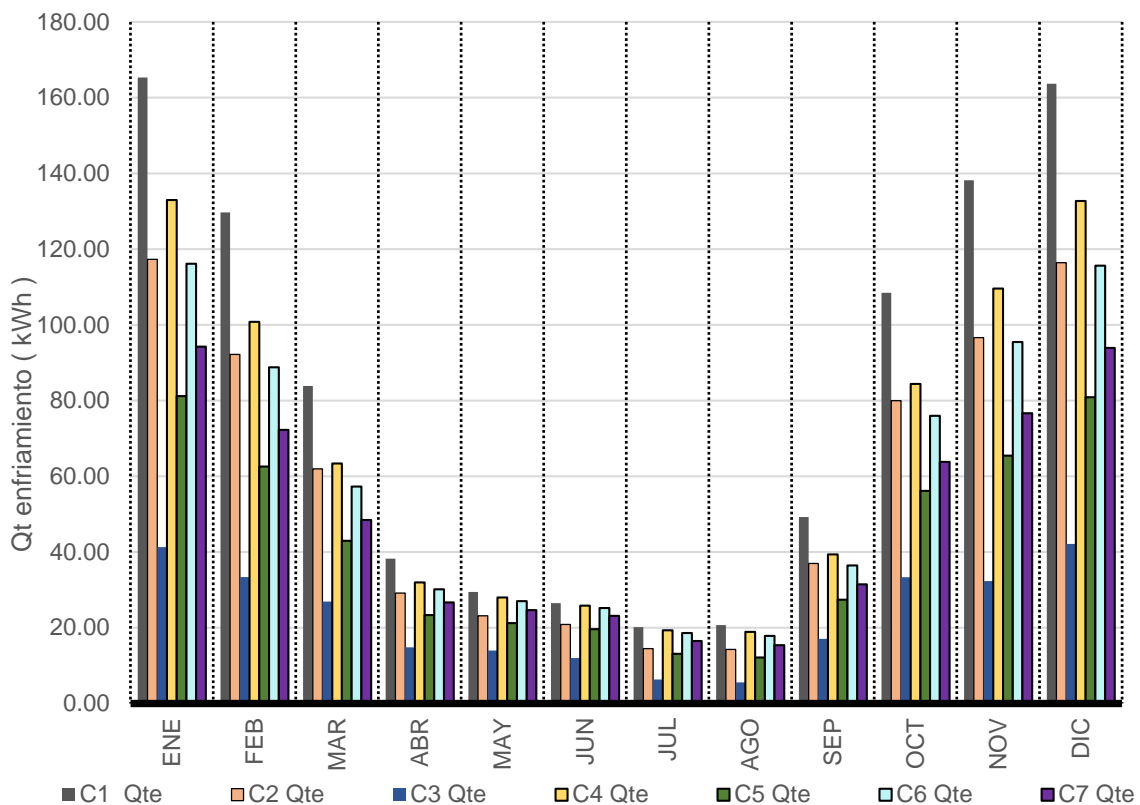


Figura 4.23. Carga térmica de enfriamiento (Qte) mensual para una orientación SUR en la ciudad de Toluca.

Se observa que las Qte por todos los casos, todo el año, se encuentran por debajo de los 166 kWh. Durante el 33.3% del año, de noviembre a febrero, se presentan las mayores Qte por todos los casos, de los 41 kWh por el C3 a los 165 kWh por el C1, ambos en enero. El 16% del año, en marzo y octubre, las Qte disminuyen dentro del rango de los 27 kWh por el C3, a los 108 kWh por el C1 en octubre. El resto del año el 58% el año, de abril a septiembre, se presentan las menores Qte en el rango de los 5 kWh por el C3 en agosto hasta los 49 kWh en septiembre por el C1.

Agosto y enero son los meses con menores y mayores Qte respectivamente. Se aprecia que los meses con la menor Tex media son los que presentan las mayores Qte. Esto indica la magnitud del efecto radiativo por los acristalamientos en la orientación SUR, para la latitud de la ciudad de Toluca.

En la relación entre los 7 casos, el C3 es el mejor evaluado al presentar todo el año las menores Qte con una amplia diferencia con el resto sobre todo en la época de frío. Los peor evaluados, son los de niveles de transmitancia solar más altos como son el C1 y C4 presentando las mayores Qte todo el año. Le siguen los casos C2 y C6, un sistema monolítico absorbente y un doble pirolítico. Debajo de éstos, el C7, que aunque por su capa baja emisiva, disminuye la cantidad de calor absorbido y emitido al interior, de igual forma produce un efecto invernadero de mayor magnitud al interior elevando la Top. Finalmente el C5 un sistema doble absorbente + claro, presenta valores en la media entre el C3 y el resto de los casos, considerándose el caso mejor evaluado.

4.2.1.2 DÍA TÍPICO DE INVIERNO (DTi)

La [Figura 4.24](#) presenta la temperatura operativa (Top) de un **DÍA TÍPICO DE INVIERNO (DTi)**, como efecto de la interacción entre la temperatura exterior (Tex) y las características termo-físicas de los 7 casos de estudio, colocados en una orientación **SUR**, para el clima **SEMIFRÍO** de la ciudad de **TOLUCA**. Como parámetro de referencia se incluye la temperatura de neutralidad (Tn) para un día típico de **INVIERNO** con un valor calculado de 21°C y la Top sin presencia de ventana o sistema de acristalamiento (SIN-V).

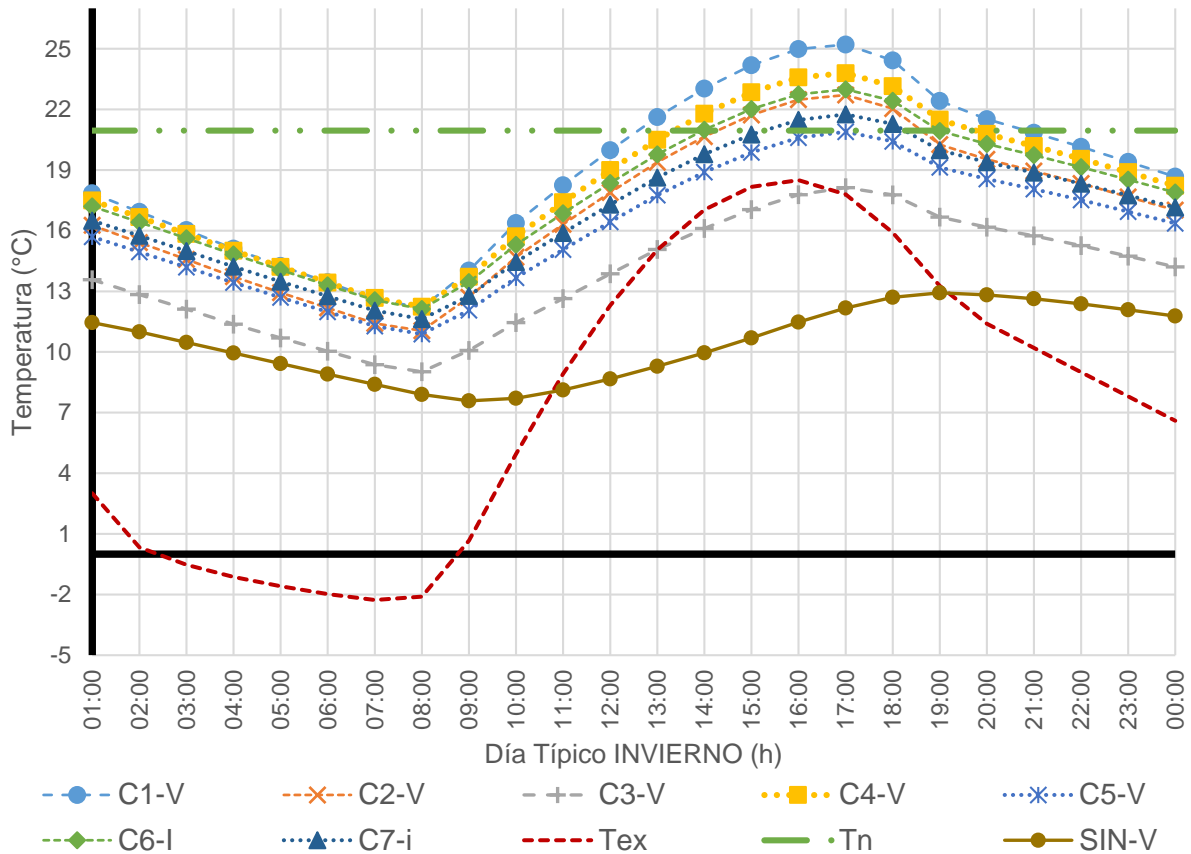


Figura 4.24 Comportamiento térmico de la temperatura operativa (Top) por los 7 casos de estudio para un día típico de invierno (DTi) en una orientación SUR para la ciudad de Toluca.

Se aprecia que la oscilación promedio de la Top por los 7 casos es de 11°C, esto es un amortiguamiento promedio de 9.7°C con respecto a la oscilación de la Tex de 20.9°C. Las Top max se presentan en el límite o por arriba de la Tex todo el día. El rango en el cual se presentan las Top max va de los 18.2°C a los 25.3°C y de los 8°C a los 12°C en la Top min. Es decir que la diferencia entre la Top max más alta y más baja es de 7.1°C al momento de las Top max y de 3.2 en las Top min.

Con respecto a la Tn, la mayor parte de los casos de estudio cruza la Tn al momento de Top max, presentando valores sobre la Tn o dentro del promedio de los 1.3°C por arriba. Únicamente el C3 presenta un comportamiento las 24h por debajo de la Tn. La Tex se mantiene las 24h por debajo de la Tn con un desempeño de los -2.4°C a la 18.5°C. Se observa que el uso de sistemas de acristalamiento con una orientación SUR, en la ciudad de Toluca en un DTi, si presenta beneficios en la Top tomando como referencia la Tn. El uso de cualquiera de los 7 sistemas de acristalamiento

aporta un potencial promedio de 9.5°C con respecto a un caso sin presencia de ventana.

En la figura 4.25 se presentan las Top máximas (A) y las Top mínimas (B) ordenadas, de mayor a menor en el caso de la Top máxima, y de menor a mayor en el caso de las Top mínimas. Para cada Top se muestra el caso de estudio y la descripción del sistema de acristalamiento al cual corresponde. Finalmente se muestra $\Delta Tn \text{ máx} = Top \text{ max} - Tn$, y, $\Delta Tn \text{ min} = Top \text{ min} - Tn$.

CASO	SISTEMA	CONFIGURACIÓN	Top max (°C)	$\Delta Tn \text{ max}$ (°C)
C1	MONOLÍTICO	CLARO	25.3	4.3
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	23.9	2.9
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO	23.0	2.1
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE	22.8	1.8
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO	21.8	0.9
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO	20.9	0.0
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE	18.2	-2.8



A. Top máximas de los 7 casos de estudio en orden de mayor a menor y $\Delta Tn \text{ max}$.

CASO	SISTEMA	CONFIGURÓN	Top min (°C)	$\Delta Tn \text{ min}$ (°C)
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE	8.8	-12.1
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO	10.7	-10.2
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE	10.8	-10.1
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO	11.4	-9.5
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO	11.9	-9.0
C1	MONOLÍTICO	CLARO	12.0	-9.0
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	12.0	-8.9



B. Top min de los 7 casos de estudio en orden de menor a mayor, y $\Delta Tn \text{ min}$.

Figura 4.25 Top max (A) y Top min (B) por los 7 casos de estudio y su ΔTn para un DTi, en una orientación SUR para la ciudad de Toluca.

De la figura 4.25 se observa que en las Top max, el C5 presenta una Top max justo sobre la línea de la Tn, es decir una $\Delta Tn \text{ max}$ de 0.0°C. Por su parte el C1 con una Top max de 25.3°C con una $\Delta Tn \text{ max}$ de 4.3°C presenta la diferencia más amplia. Sin embargo en la Figura 4.24 se observa que el C1 mantiene durante más horas su

cercanía con la T_n , antes y después de las hora de Top max. El C5 mantiene su posición con respecto a los demás casos presentando una mayor diferencia con la T_n durante el resto del día que el C1. Para el resto de los casos, se presenta el mismo criterio. Por lo tanto el mejor evaluado será el que presente la menor ΔT_n min o la Top min más cercana a la T_n .

Se observa que el C1 y el C4, los sistemas con mayor transparencia la radiación directa son los mejor evaluados con 9°C en su ΔT_n min. El peor evaluado es el C3, que por su amplia reflectancia presenta, todo el día, las menores Top y la mayor diferencia con la T_n con una ΔT_n min de 12.1°C . En el resto de los casos se observa el mismo fenómeno, los sistemas de acristalamiento de mayor transparencia presentan las mejores evaluaciones, independientemente de si el sistema es monolítico o doble. Los sistemas con base en la disminución de paso de radiación solar directa, presentan los peores desempeños por su diferencia con la T_n .

Por tanto se observa que los requerimientos con mayor magnitud en un DTi en la orientación SUR, son de ganancias de calor al interior la mayor parte del día, por lo que los sistemas más recomendados serán sistemas de acristalamiento que, al contrario de priorizar el comportamiento aislante del sistema, promueva el mayor número de ganancias por radiación al interior. Esto bajo un libre desempeño de la temperatura.

La [Figura 4.26](#), se presentan los parámetros de Factor de Decremento (FD) y el tiempo de retardo (TR) por efecto de los 7 casos de estudio en un DTi para la orientación SUR.

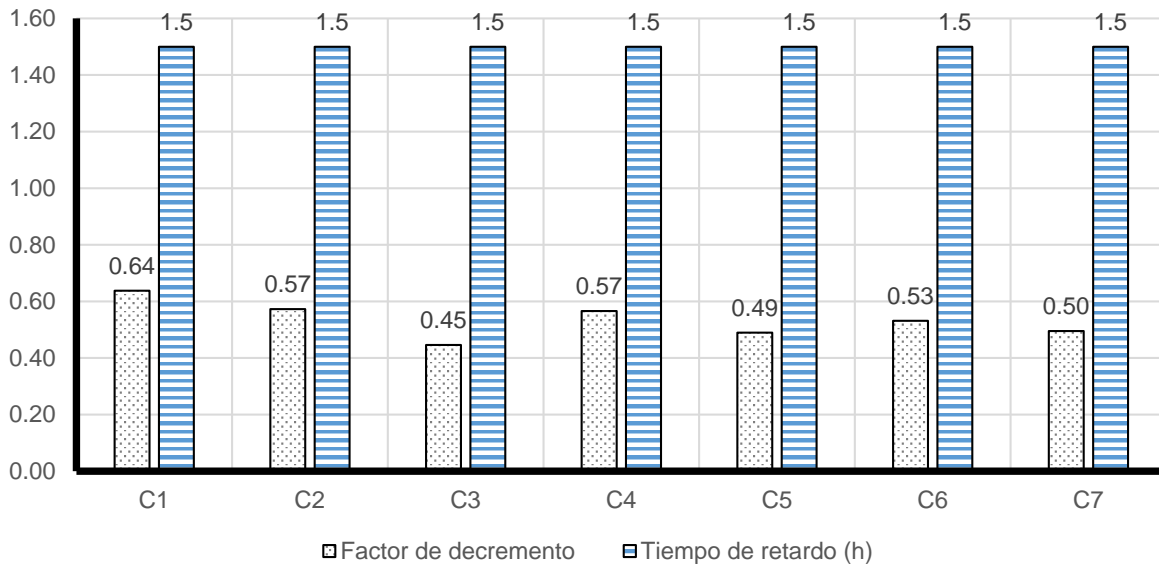
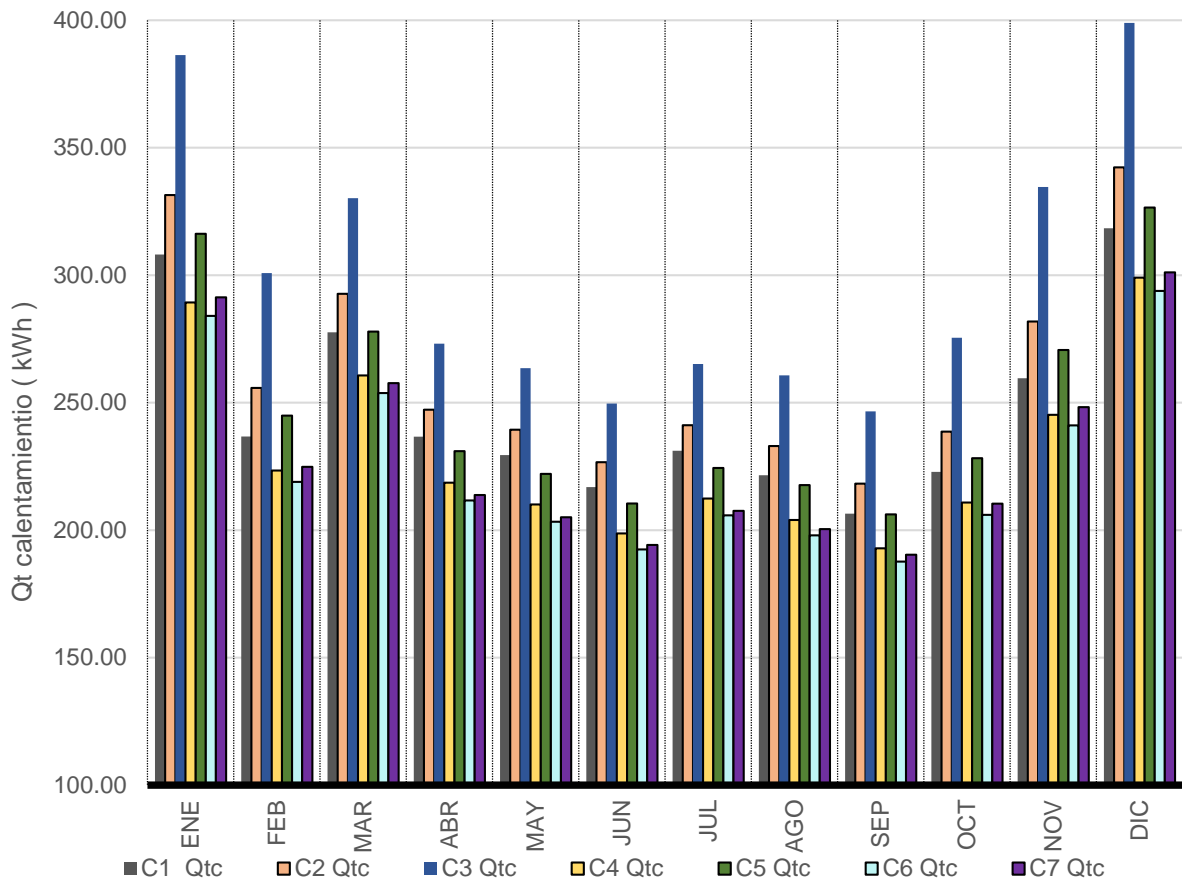


Figura 4.26. Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo (TR) por los 7 casos de estudio para un día típico de invierno (DTi) en orientación SUR para la ciudad de Toluca.

Se observa que entre todos los casos no se presenta diferencia en el TR con 1.5h (1h 30min) para los 7 sistemas. Como se observa en la Figura 4.24, el caso sin ventanas presenta un retraso en su Top max de alrededor de 2h, es decir que el uso de cualquier acristalamiento de un 40% del área de fachada orientado al SUR afectará el efecto de TR por el resto de los elementos opacos de la envolvente disminuyendo su eficiencia. Con respecto al FD el C3 presenta el mejor desempeño con 0.45 de FD. El caso con la mayor amplitud es el C1 con 0.64 de FD. Del resto, el C5 con 0.49 se presenta como el segundo mejor evaluado. El C7 presenta poca diferencia con el C5, es decir que con respecto a la amplitud en su Top, un sistema doble bajo emisor no ofrece mayores ventajas que un sistema doble absorbente + claro. El C2 y el C4 presentan el mismo desempeño con 0.57 de FD. Por lo tanto, teniendo todos los casos el mismo TR, el mejor evaluado por su mejor relación entre ambos parámetros será el C3 y el C5 con los menores valores en su FD. Dado que el parámetro de FD no considera la Tn o el confort al interior, en este caso, el sistema mejor evaluado no coincide con el mejor evaluado en la evaluación de Top max y Top min contra la Tn de la Figura 2.25.

Para caracterizar los efectos a través del año por el uso de los sistemas de estudio, en la Figura 2.27 se presenta la carga térmica de calentamiento (Qtc) mensual en kWh, por los 7 casos de estudio, necesarias para mantener la temperatura interior

constante en la Tn las 24h en un DTi para la orientación SUR dentro del módulo de evaluación virtual (MEV) en la ciudad de Toluca.



SUR DTi

Figura 2.27. Carga térmica de calentamiento (Qt) mensual en una orientación SUR para la ciudad de Toluca.

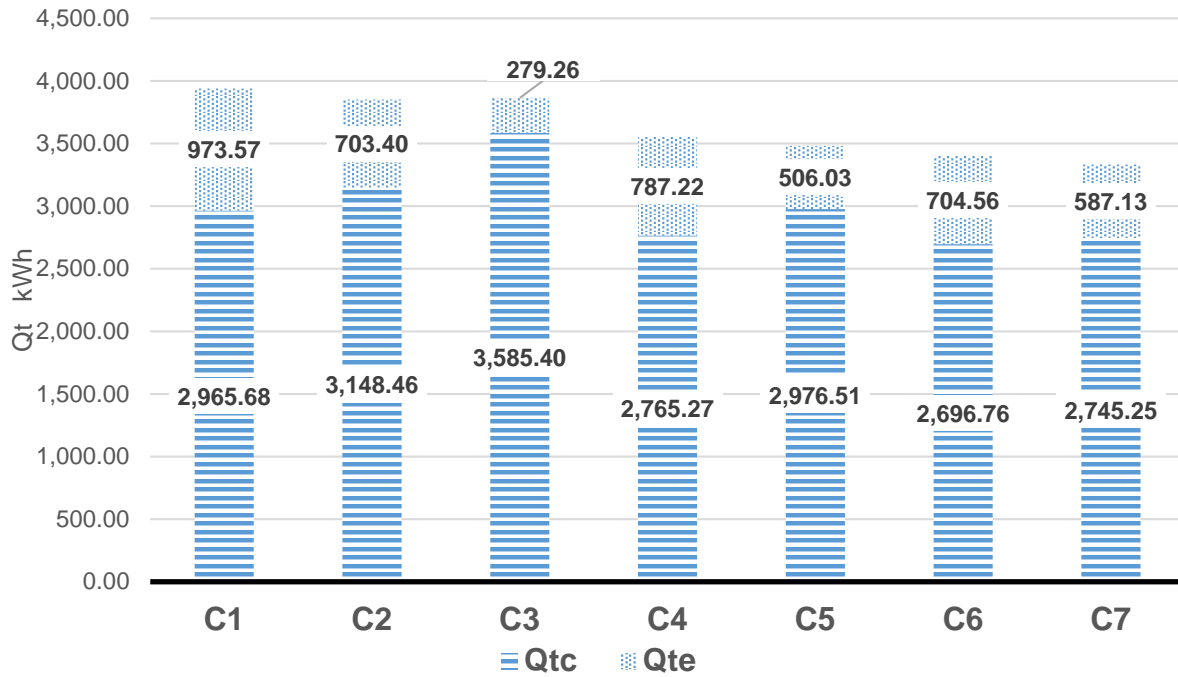
Se observa que todos los meses presentan altas Qtc superando los 100 kWh y alcanzando comportamientos hasta de más de los 400 kWh en los meses de menor Tex media. El 58% del año, de abril a octubre, las Qtc presentan máximas alrededor de los 250 kWh. Febrero, marzo y noviembre, el 25% del año, se presentan Qtc en el rango promedio de los 200 kWh a los 290 kW. Finalmente el 17% del año, diciembre y enero, presentan las mayores Qtc en el rango promedio de 315 kWh a los 398 kWh. El mes con menores Qtc es septiembre en el rango de los 200 kWh a los 245 kWh.

Con respecto a los casos de estudio, se observa que el C3 presenta las mayores Qtc todo el año con hasta 398 kWh en diciembre y 1480 en septiembre. El C5 con valores muy cercanos al C7, presenta las menores Qtc con 245 kWh en diciembre y 187 kWh

en septiembre. Del resto los de mayores Qtc son el C1, C2, y C5, y los de menores los C4, C6 y C7.

4.2.1.c RESUMEN ANUAL

En la **Figura 4.28** se presenta las cargas térmicas de calentamiento (Qtc) y las cargas térmicas por enfriamiento (Qte) anuales para cada uno de los 7 casos de estudio en una orientación **SUR** para la ciudad de **Toluca**.



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
QTt (kWh)	3,939.25	3,851.85	3,864.66	3,552.49	3,482.54	3,401.32	3,332.38

Figura 4.28 Carga térmica de calentamiento (Qtc) y cargas térmicas por enfriamiento (Qte) anuales en una orientación SUR para la ciudad de Toluca.

Se observa que proporcionalmente, todos los casos presentan efectos casi 4 veces más altos que los efectos por Qte. Por lo tanto, en el clima semifrío de la ciudad de Toluca, anualmente, se presenta un mayor potencial de ahorro energético, por sistemas que ayuden a disminuir las Qtc. Se observa que los tres sistemas monolíticos, C1, C2 y C3, presentan en promedio 10% más Qt totales que los sistemas dobles, C4, C5, C6, C7. Es decir que el efecto en Qt por el uso de un sistema doble sobre un sistema monolítico, de entre los casos evaluados, es solamente 10% más eficiente que el uso de un sistema monolítico.

Con respecto a los 7 casos de estudio el C1 presenta la mayor cantidad de Q_t totales por la suma de Q_{tc} y Q_{te} con un total de 3,939.25 kWh. Aunque no presenta la peor evaluación por Q_{tc} , si presenta el peor desempeño en Q_{te} con lo cual su balance anual con respecto a los otros casos finaliza como el más alto de los 7 casos. Con 75 kWh menos el C3 se presenta como el segundo caso con mayores Q_{Tt} . El C3 con las mayores Q_{tc} comprueba ser el peor sistema de acristalamiento para un clima con requerimientos de calentamiento. Al reflejar un alto porcentaje de la radiación solar incidente, evita las ganancias de calor al interior. El mejor caso evaluado en el balance total, es el C7 con un total de 3,332.38 kWh al año, esto es 607 kWh menos que el caso peor evaluado.

4.2.1 ORIENTACIÓN ESTE

En la orientación ESTE destaca para las dos temporadas de evaluación:

En el DTv se destaca el efecto de radiación sobre la temperatura, al acercar las Top por efecto de todos los casos a la Tn desde las primeras horas de radiación solar y baja Tex. El mejor caso evaluado por su Top max es el C5. Destaca la similitud de valores por efecto del C7 con el C2 en las Top mx y con el C1 en las Top min. El FD presenta diferencias promedio de 0.03 y el TR presenta diferencia de 10min entre los casos monolíticos y dobles. En la Qte el 66% del año se presentan valores por arriba de los 200kW. El C3 presenta los menores valores con amplia diferencia con el resto de los sistemas.

En el DTi todas las Top se presentan más de 4°C por debajo de la Tn. Por lo tanto los casos mejor evaluados privilegian en mayor porcentaje la transmisión de la radiación solar directa. El mejor evaluado es el C4, que presenta buenos comportamientos tanto en Top max como Top min. En el FD las diferencias entre sistemas son de 0.02 con valores de 0.35 en promedio. El TR de nuevo presenta diferencias por el tipo de sistema (monolítico o doble) con excepción del C3. En las Qtc, el C6 registra los menores resultados sin embargo presenta poca diferencia con el C7 y C4.

4.2.2.a DÍA TÍPICO DE VERANO (DTv)

La [Figura 4.29](#) presenta la temperatura operativa (Top) de un **día típico de verano (DTv)**, de los 7 casos de estudio, colocados en una orientación **ESTE**, para el clima **SEMIFRÍO** de la ciudad de Toluca. Como parámetro de referencia se incluye la temperatura de neutralidad (Tn) de un día típico de **VERANO** con un valor calculado de 22.4°C y la Top sin presencia de ventana o sistema de acristalamiento (SIN-V).

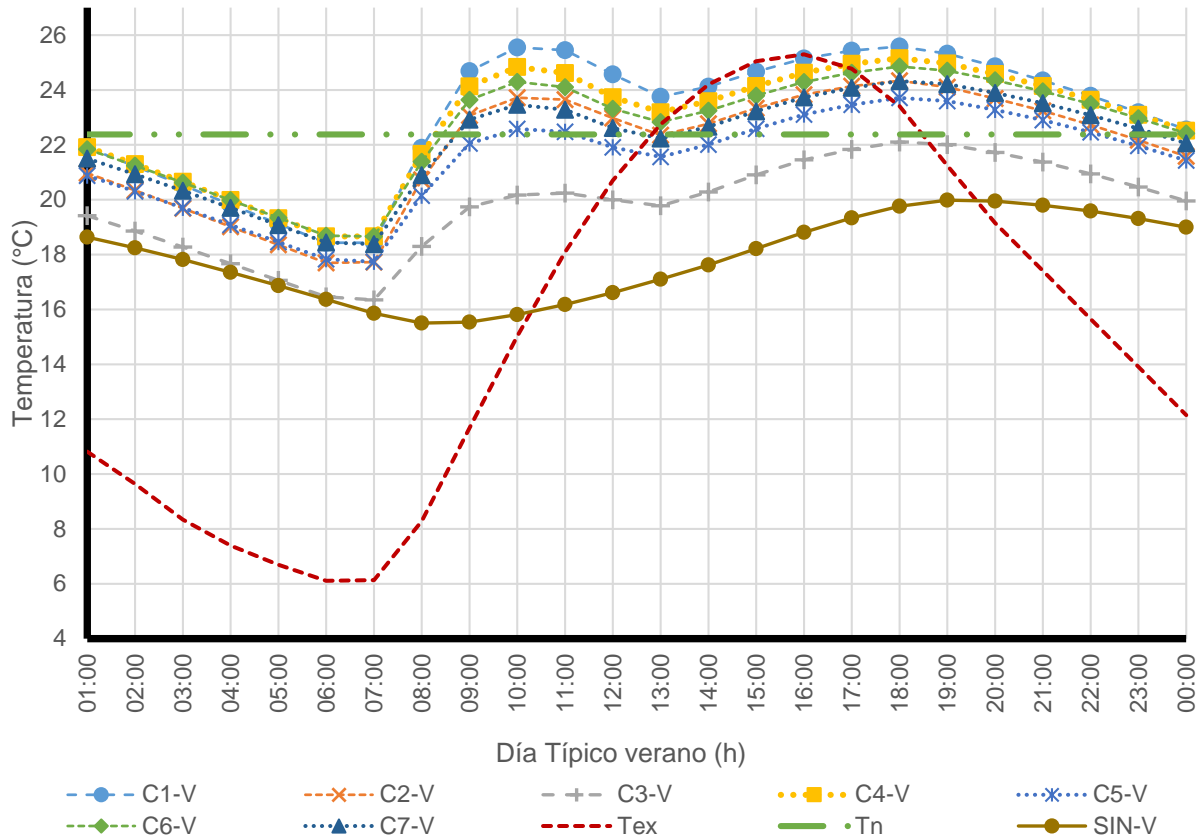


Figura 4.29. Comportamiento térmico de la temperatura operativa (Top) por los 7 casos de estudio para un día típico de verano (DTV) en una orientación ESTE para la ciudad de Toluca.

En el comportamiento térmico de la Top por los 7 casos de estudio, se observa claramente el efecto por radiación directa proveniente de la ventana orientada hacia el ESTE. De las 7:00 h a las 13:00 h se observa una curva en la Top por todos los casos, consecuencia de la entrada de radiación directa a través de la ventana al amanecer. Así a las 10:00h se presenta un pico en la Top por efecto por la radiación directa a través de la ventana. Al ir disminuyendo el efecto por radiación directa sobre la ventana, la Top registra un descenso marcado hasta las 13:00h. Posteriormente la Top registra un segundo pico, ahora de mayor magnitud, por el efecto combinado del calor acumulado al interior durante el primer pico de la Top, y por el incremento de la temperatura del aire exterior.

Se observa que durante todo el día, todas las Top se presentan en el límite o ligeramente por debajo de la Tex max y por arriba de la Tex min. El promedio de la oscilación de las Top es de 6.8°C, lo cual representa un amortiguamiento de 12.6°C con respecto a la oscilación diaria de la Tex de 19.4°C. El rango de Top se presenta de los 22.1°C a los 25.6°C en la Top max a las 18:00 h.

Con respecto a la T_n , la mayor parte del día la T_{ex} se presenta por debajo de la T_n con hasta 16.5°C menos al momento de las $T_{ex\ min}$ y con solo 3°C por arriba al momento de la $T_{ex\ max}$. Esto indica una mayor cantidad de requerimientos de calentamiento a través del día. Por su parte, el efecto por el uso de cualquiera de los 7 casos de estudio mantiene la T_{op} oscilando cercana a la T_n gran parte del día, presentando la mayor diferencia al momento de la $T_{ex\ min}$. Esto indica que el uso de alguno de los 7 sistemas de acristalamiento, en una orientación ESTE en la ciudad de Toluca, si aporta beneficios en la T_{op} con base en la T_n en un DTv.

Con respecto a la relación entre los 7 casos de estudio, la [Figura 4.30](#) presenta las $T_{op\ máximas}$ (A) y las $T_{op\ mínimas}$ (B) ordenadas, de mayor a menor en el caso de la $T_{op\ máxima}$, y de menor a mayor en el caso de las $T_{op\ mínimas}$. Para cada T_{op} se muestra el caso de estudio y la descripción del sistema de acristalamiento al cual corresponde. Finalmente se muestra $\Delta T_n\ máx = T_{op\ max} - T_n$, y, $\Delta T_n\ min = T_{op\ min} - T_n$.

CASO	SISTEMA	CONFIGURACIÓN	Top max (°C)	$\Delta T_n\ max$ (°C)
C1	MONOLÍTICO	CLARO	25.6	3.2
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	25.2	2.8
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO	24.9	2.5
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO	24.4	2.0
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE	24.4	2.0
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO	23.7	1.4
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE	22.1	-0.3



A. $T_{op\ máximas}$ de los 7 casos de estudio en orden de mayor a menor y $\Delta T_n\ max$

CASO	SISTEMA	CONFIGURÓN	Top min (°C)	$\Delta T_n\ min$ (°C)
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE	16.0	-6.4
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE	17.1	-5.2
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO	17.3	-5.1
C1	MONOLÍTICO	CLARO	17.8	-4.5
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO	17.9	-4.5
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	18.1	-4.3
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO	18.1	-4.2



B. $T_{op\ min}$ de los 7 casos de estudio en orden de menor a mayor, y $\Delta T_n\ min$.

[Figura 4.30](#). $T_{op\ max}$ (A) y $T_{op\ min}$ (B) por los 7 casos de estudio y su ΔT_n en un DTv en una orientación ESTE para la ciudad de Toluca

Se observa que en las Top max (Figura 4.30 A) el mejor caso evaluado es el C3 con una ΔT_n max de 0.3°C . Sin embargo en la Figura 4.29 se puede observar que el resto de las horas del día, sobre todo en las horas del amanecer con radiación solar directa, presenta un desempeño muy por debajo de la T_n separándose del comportamiento promedio del resto de los casos. Por lo tanto el C5, con la segunda mejor evaluación en las Top máximas con una ΔT_n max 1.4°C y un desempeño durante el resto de las horas del día sobre o por debajo de la T_n se presenta como el mejor caso evaluado. Se observa que los casos con mejor evaluaciones presentan tecnologías predominantemente absorbentes o de control solar.

Con referencia a las diferencias en los efectos por las orientaciones de la ventana, se observa que para el mismo DTV la magnitud de la radiación solar directa recibida en la orientación ESTE y su efecto en las ganancias internas de calor desde tempranas horas de la mañana, aporta beneficios en la Top, al mantener desempeños en todos los sistemas, muy cercanos a la T_n durante la mayor parte del día, comparado con los comportamientos en la orientación SUR.

En las Top min, Figura 4.30 B, el caso mejor evaluado, es decir el de menor ΔT_n min es el C6 y C4 con mismos valores registrados en su Top min. Le siguen el C7 y C1 igual, con comportamientos similares en su Top min. En los casos ΔT_n min más altas se presentan los sistemas con cristales absorbentes, C2 y C5, y el C3 reflectante. Entre la orientación ESTE y SUR, en la primera se presentan valores en las Top min más altos que en la orientación SUR. Esto debido al efecto de calor acumulado durante el día al interior. Con respecto al mejor y peor evaluado, al igual que en la orientación SUR, la mayor parte de los sistemas dobles, presentan mejor desempeño que los sistemas monolíticos. De nuevo al invertirse el flujo de calor hacia el exterior, las propiedades aislantes de un sistema doble ofrecen mejores beneficios en la Top min que un sistema monolítico.

La Figura 4.31, se presentan los parámetros de Factor de Decremento (FD) y Tiempo de retardo (TR) por efecto de los 7 casos de estudio en un DTV para la orientación ESTE en el clima de la ciudad de Toluca.

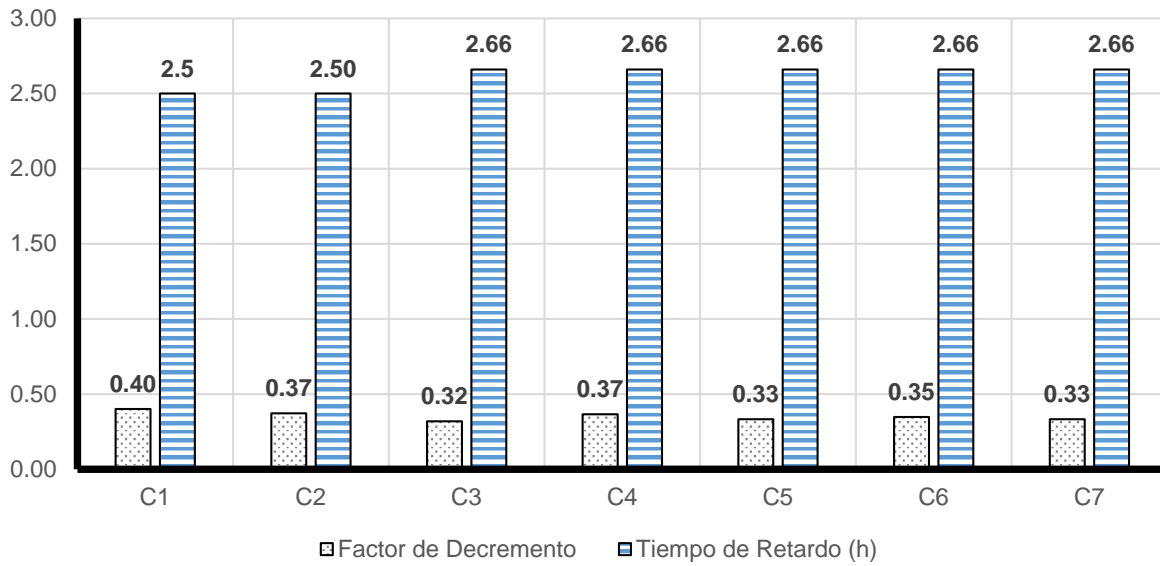


Figura 4.31. Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo (TR) por los 7 casos de estudio para un día típico de verano (DTv) en orientación ESTE para la ciudad de Toluca.

Se observa que para un DTv con orientación de la ventana hacia el ESTE, el FD presenta poca diferencia entre todos los casos de estudio. El C1, al igual que en la orientación ESTE, presenta la amplitud más alta con 0.40. El caso con la menor amplitud es el C3 con un valor de 0.32 en su FD. Del resto el C5 y C7 presentan 0.33 de FD, y C2 y C4 0.37. Con respecto al TR el efecto aislante de los casos con sistemas dobles y la alta reflectancia del C3 hacen que del C3 al C7 todos presenten un TR de 2h 40min (2.66h). El C1 y el C2 con tan solo con 10min menos presentan un retraso en su Top de 2h 30min. Por lo tanto aunque con muy poca diferencia en los valores de FD, en C3, C5 Y C7 presentan la mejor relación entre ambos parámetros.

Para caracterizar los efectos a través del año, en la Figura 4.32 se presenta la carga térmica de enfriamiento (Qte) mensual en kWh por los 7 casos de estudio, necesaria para mantener la temperatura interior del MEV constante las 24h en la Tn mensual.

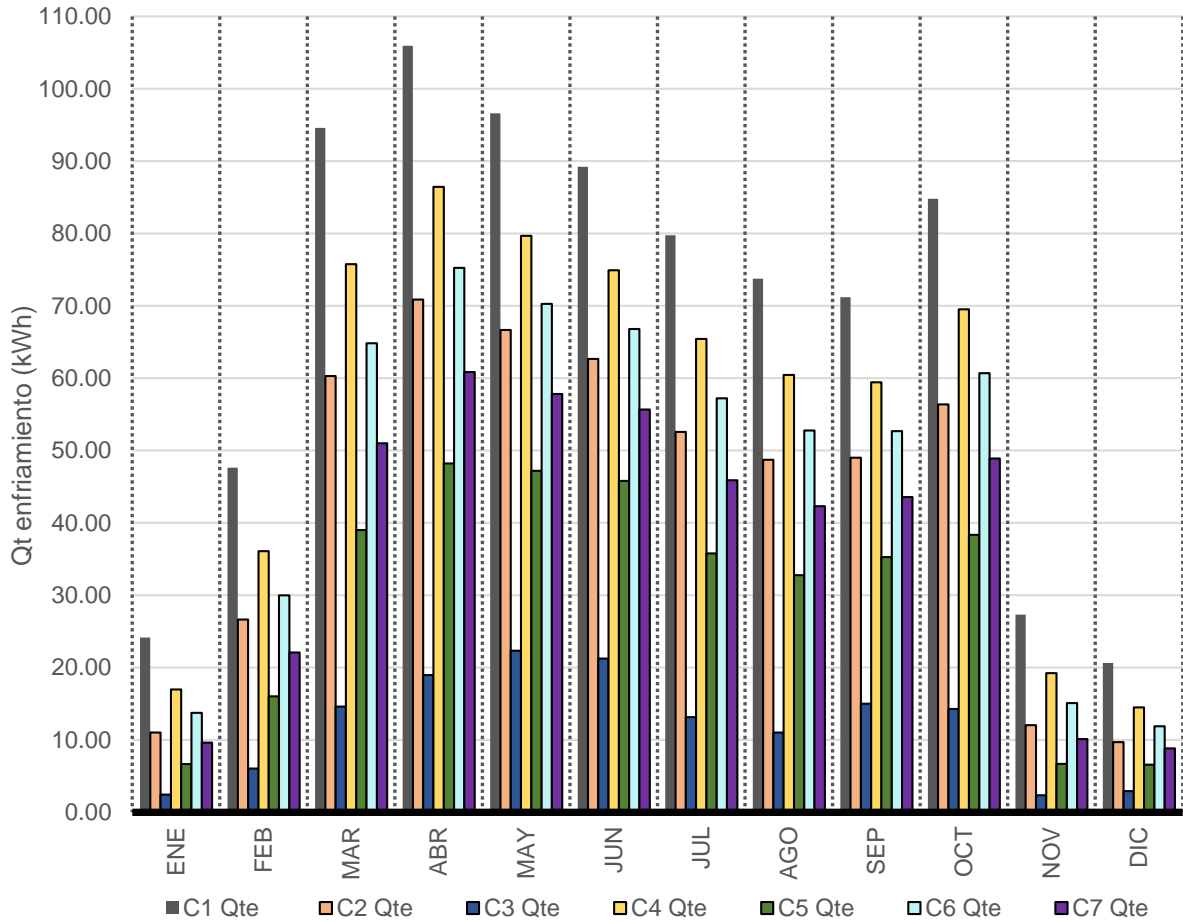


Figura 4.32. Carga térmica de enfriamiento (Qte) mensual, en una orientación ESTE, para la ciudad de Toluca.

Se observa que el valor máximo de Qte anuales con una orientación ESTE, es de alrededor de 106 kWh por el C1 en el mes de abril. Es decir casi 66 kWh menos que la orientación SUR donde se presentaban Qte de hasta 164 kWh en el mes de mayores requerimientos de enfriamiento. Como se observa en la Figura 4.32 con la orientación ESTE, las mayores Qte se presentan de marzo a octubre, es decir en el 66% del año. El otro 34% del año, de noviembre a febrero se presentan las menores Qte. Abril y enero son los meses con mayores y menores Qte al año. Al presentarse menos cantidad de radiación directa sobre la orientación ESTE con respecto a la orientación SUR, los meses con menor Tex media ya no presentan mayores requerimientos de enfriamiento que los meses con la Tex media más alta.

Con respecto a los casos de estudio, los 7 casos presentan resultados en sus Qte, en el mismo orden para el caso mejor y peor evaluado, en la orientación ESTE que SUR. Es decir que el C3 y el C1 siguen presentándose como el mejor y el peor

evaluado con la Qte mayores y menores todo el año. El C4 por su alta transparencia se presenta como el segundo caso Qte más altas. Le siguen el C7, C6 y finalmente el C5 considerado como el mejor evaluado.

4.2.2.b DÍA TÍPICO DE INVIERNO (DTi)

La Figura 4.33 presenta la temperatura operativa (Top) de un día típico de invierno (DTi), por los 7 casos de estudio, colocados en una orientación ESTE, para el clima SEMIFRÍO de la ciudad de Toluca. Como parámetro de referencia se incluye la temperatura de neutralidad (Tn) de un día típico de INVIERNO con un valor calculado de 21°C y la Top sin presencia de ventana o sistema de acristalamiento (SIN-V).

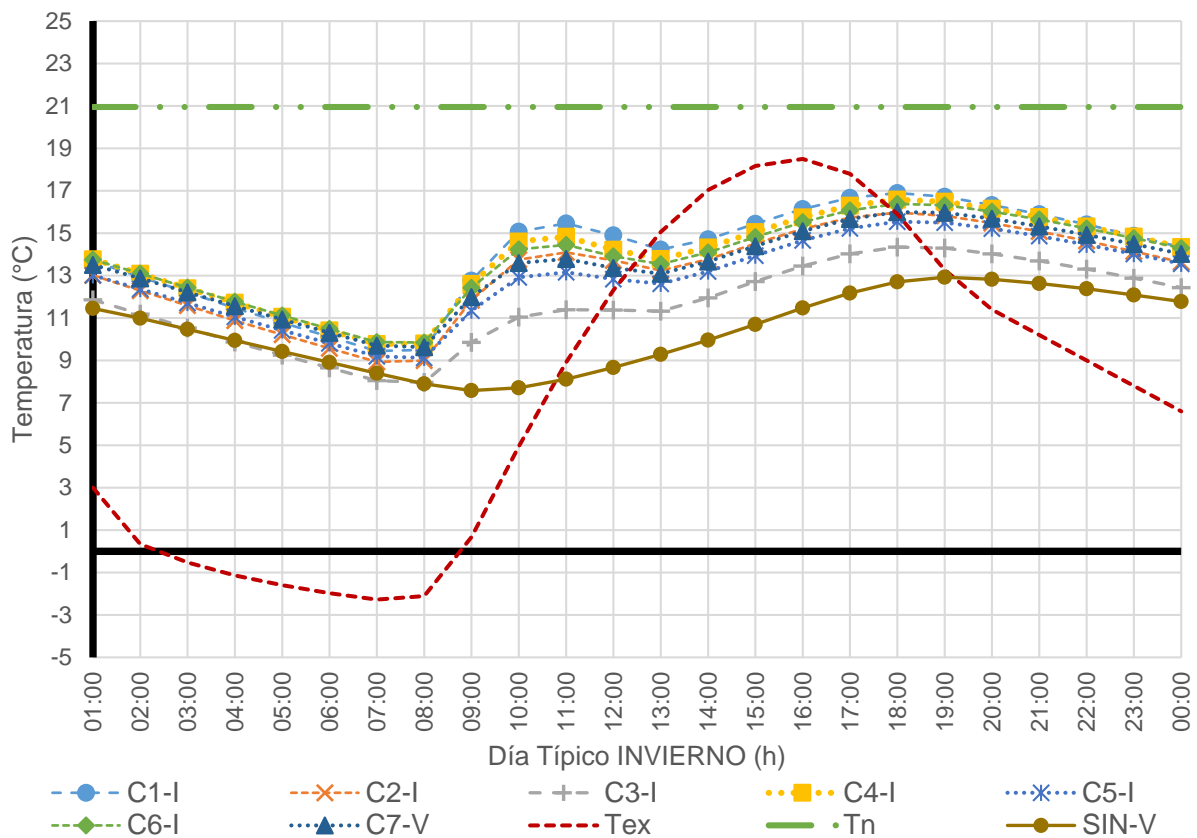


Figura 4.33. Comportamiento térmico de la temperatura operativa (Top) por los 7 casos de estudio en un día típico de invierno (DTi) para orientación ESTE en la ciudad de Toluca.

Al igual que en el DTv, se observa el efecto por el cambio en la orientación en el comportamiento de la Top por los 7 casos. Es decir que de las 8:00 h a las 13:00 h se observa una curva en la Top por todos los casos, consecuencia de la entrada de radiación directa a través de la ventana durante la mañana. A las 11:00h se presenta

una elevación máxima en la Top por efecto de la entrada de radiación directa a través de la ventana. Al ir disminuyendo la radiación directa sobre la ventana, la Top registra un descenso marcado hasta las 13:00h.

Todas las Top, con una oscilación promedio de 7.2°C, representan un amortiguamiento promedio de 13.7°C con respecto a la Tex con 20.9°C de oscilación. Todas, se presenta por debajo de la Tex max y por arriba de la Tex min. El rango de las Top max va de los 14.4°C a los 16.9°C, y en las Top min de los 7.6°C a los 9.4°C. Es decir una amplitud máxima entre el caso con Top más alta y más baja de 2.5°C en las Top máx y de 1.8°C en las Top min. Por su parte la Tex se presenta de los -2.1°C en las Top min a los 18.5°C en las Tex max.

Con respecto a la Tn, el desempeño de la Top por todos los casos se presenta las 24h por debajo de la Tn, con un promedio de 5°C por debajo al momento de las Top max y 12.2°C en las Top min. De igual forma la Tex se mantiene las 24h por debajo de la Tn con un desempeño de los -2.4°C en las Tex min a los 18.5°C en las Tex max. Se observa que, aunque el uso de cualquiera de los 7 sistemas de acristalamiento, si ofrece beneficios en la Top, la magnitud de estos beneficios no es suficiente para acercarlas a la Tn como en el caso del mismo DTi en la orientación SUR. El uso de cualquiera de los sistemas de acristalamiento evaluados logra un potencial de alrededor de 3°C en las Top max con respecto a un caso sin presencia de ventana.

En la [Figura 4.34](#) se presentan las Top máximas (A) y las Top mínimas (B) ordenadas, de mayor a menor en el caso de la Top máxima, y de menor a mayor en el caso de las Top mínimas. Para cada Top se muestra el caso de estudio y la descripción del sistema de acristalamiento al cual corresponde. Finalmente se muestra $\Delta Tn \text{ máx} = Top \text{ max} - Tn$, y, $\Delta Tn \text{ min} = Top \text{ min} - Tn$

CASO	SISTEMA	CONFIGURACIÓN	Top max (°C)	ΔTn max (°C)
C1	MONOLÍTICO	CLARO	16.9	-4.0
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	16.6	-4.3
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO	16.4	-4.5
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO	16.0	-4.9
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE	16.0	-5.0
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO	15.6	-5.4
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE	14.4	-6.6



ESTE DTi

A. Top máximas de los 7 casos de estudio en orden de mayor a menor y ΔTn max.

CASO	SISTEMA	CONFIGURACIÓN	Top min (°C)	ΔTn min (°C)
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE	7.6	-13.4
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE	8.4	-12.5
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO	8.7	-12.2
C1	MONOLÍTICO	CLARO	8.9	-12.0
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO	9.2	-11.8
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	9.3	-11.7
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO	9.4	-11.6



B. Top min de los 7 casos de estudio en orden de menor a mayor, y ΔTn min.

Figura 4.34. Top max (A) y Top min (B) por los 7 casos de estudio y su ΔTn en una orientación ESTE para la ciudad de Toluca.

Dado que el desempeño de la Top por todos los casos las 24h se mantiene por debajo de la Tn, el caso mejor evaluado será aquel que presente los menores valores tanto ΔTn max como las menor ΔTn max, es decir el que presente la mayor Top la mayor parte de día. Con base en ello en la Figura 4.33 se observa que el caso mejor evaluado es el C1 con una Top max de 16.9°C y la menor diferencia con la Tn con una ΔTn max 4°C. El peor evaluado es el C3 con una Top max de 14.4°C y una ΔTn max de 6.6°C. Del resto, se observa, que al igual que en una orientación SUR en el mismo DTi, los casos mejor evaluados serán los que promuevan las ganancias de calor al interior permitiendo el paso de la mayor cantidad de radiación directa al interior y no priorizando sistemas con altos valores en sus propiedades aislantes. El C2 y C5 que absorben o reflejan mayores porcentajes de la radiación así como el C7 que evita que el cristal absorba y transmita calor al interior son los peor evaluados contra los casos C1, C4 y C6.

Para las Top min, el mejor evaluado es el C6 con la mayor Top min de 9.4°C y la menor ΔTn min de 11.6°C. Prácticamente con el mismo efecto el C4 y el C7, con una

diferencia entre ellos de 0.1°C, le siguen con las mejores evaluaciones, ambos sistemas dobles. Los casos que en las Top max presentaron los menores efectos, de igual forma presentan los menores efectos en la Top min. Al haber minimizado el efecto de ganancias por radiación durante el día, minimizan el calor acumulado por los elementos opacos al interior y su posterior efecto nocturno por radiación de onda larga.

La Figura 4.35, presenta el Factor de Decremento (FD) y el tiempo de retardo (TR) por efecto de los 7 casos de estudio en un DTi para la orientación ESTE.

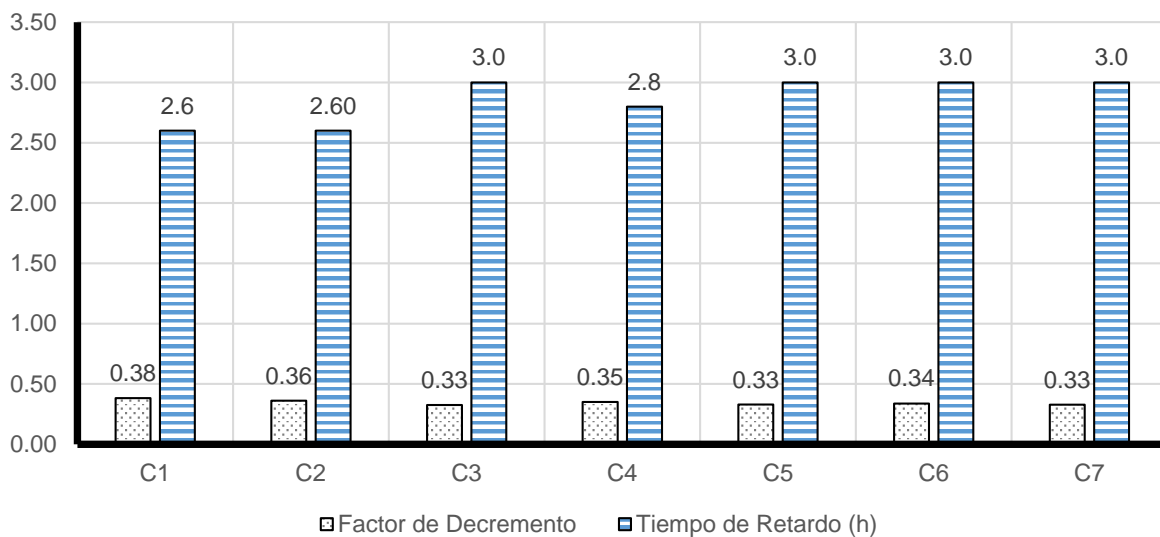
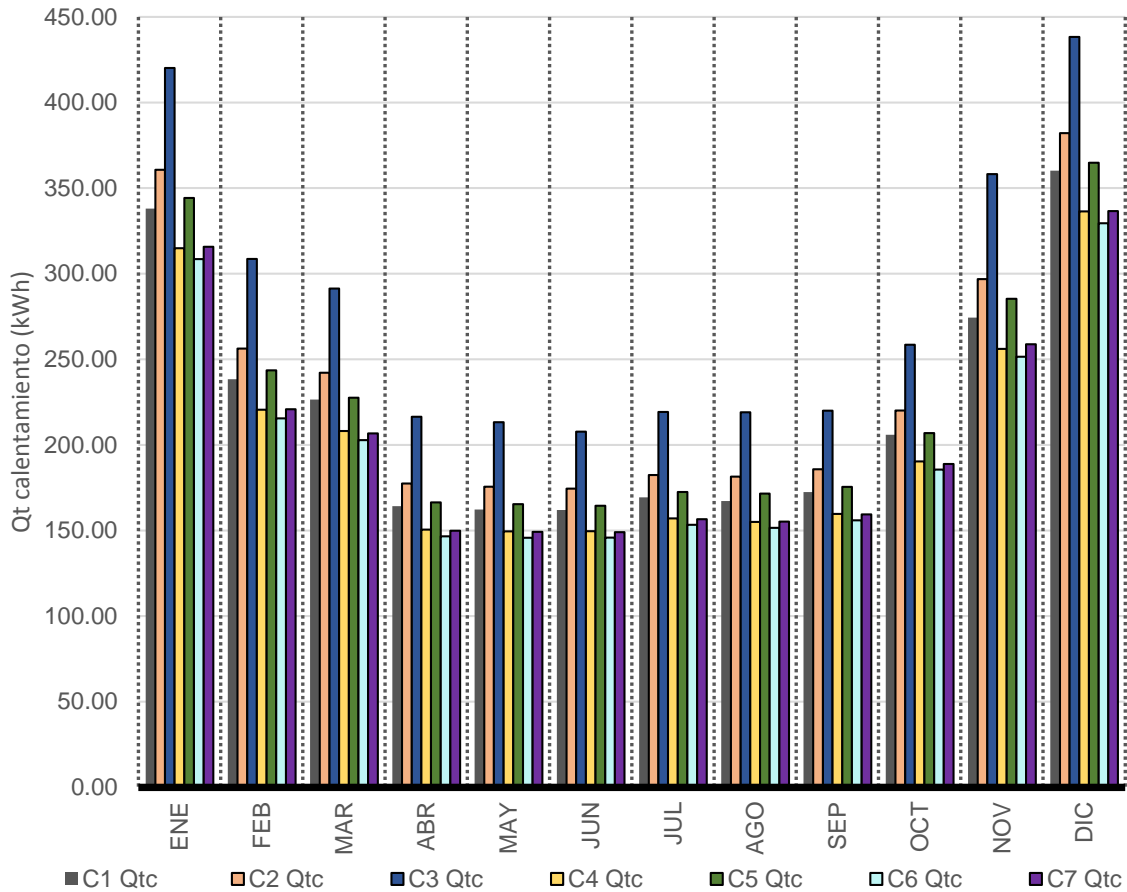


Figura 4.35. Factor de Decremento (FD) y Tiempo de Retardo por los 7 casos de estudio para un día típico de invierno (DTi) en orientación ESTE para la ciudad de Toluca.

Se observa que en los valores calculados de FD se presenta poca diferencia entre los 7 casos. El C3 presenta la menor amplitud con 0.33 de FD al igual que el C5 y el C7. El C1 con 0.38 de FD presenta la mayor amplitud. Les siguen con tan solo 0.01 de diferencia entre el resto de los casos, el C6, el C4 y C2 con 0.34, 0.35 y 0.36 respectivamente. Con respecto al TR el C3, C5, C6 y C7 el mayor tiempo de RT con el mismo valor para los 4 de 3h. Le sigue en C4 con 2.8h (2h 50min) y con los menores valores el C1 y el C2 con 2.6h (2h 40 min) en su tiempo de retardo.

Para caracterizar los efectos a través del año por el uso de los casos de estudio, en la Figura 4.36 se presenta la carga térmica de calentamiento (Qtc) mensual en kWh por los 7 casos necesaria para mantener la temperatura del aire interior constante en la Tn mensual las 24h.



ESTE DTI

Figura 4.36. Carga térmica de calentamiento (Qt) mensual en una orientación ESTE para la ciudad de Toluca.

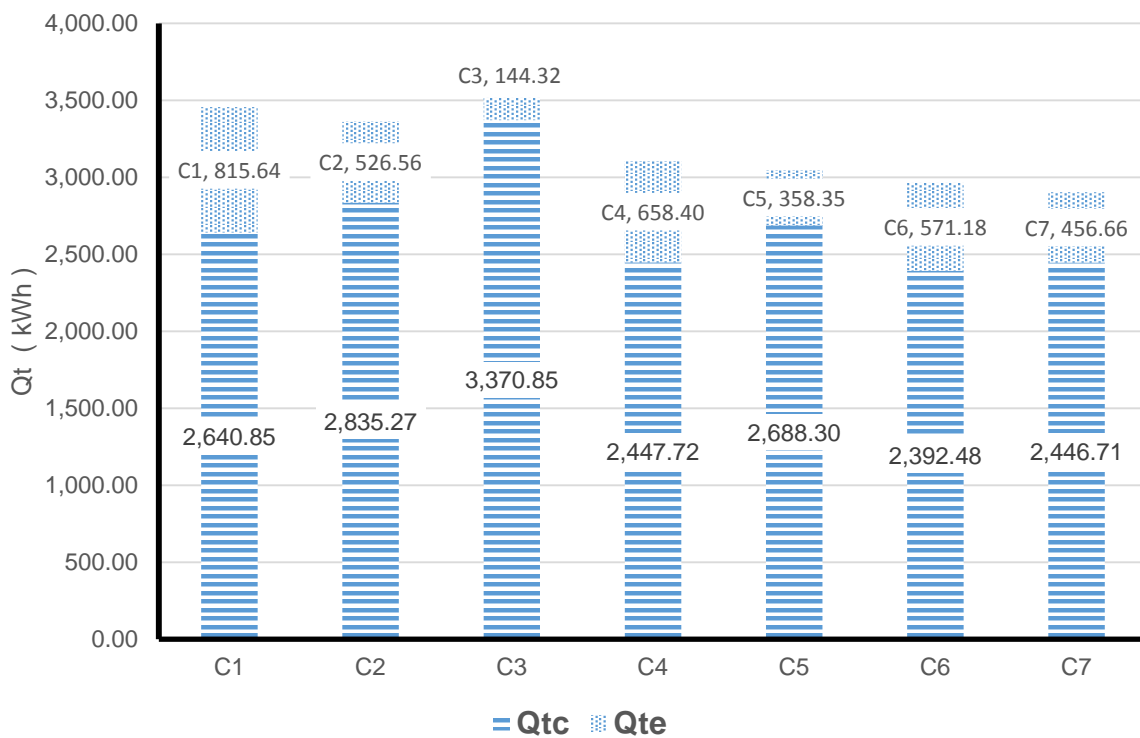
Se observa que el 17% del año, durante los meses de enero y diciembre, se presentan las mayores Qtc en el rango de los 315 kWh a los 438 kWh. Otro 25%, febrero, marzo y noviembre de los 215 kWh a los 350 kWh. El 28% restante, referente a los meses con mayor Tex media, de abril a octubre, se presentan las menores Qtc en el rango promedio de los 145 kWh a los 219 kWh. El mes de mayor Qtc es diciembre dentro del rango promedio de los 330 kWh por el C6 a los 440 kWh por el C3. El mes con menores Qtc es junio en el rango de promedio de los 146 kWh a los 207 kWh.

Con respecto a los casos de estudio, el caso mejor evaluado es el C6 al presentar las menores Qtc en todos los meses. Se observa que presenta poca diferencia con C7 y C4 sobre todo en la época de menores requerimientos es decir con mayor Tex. Así mismo éstos últimos presentan comportamientos prácticamente iguales. Entre los 7 sistemas se aprecia el mismo comportamiento, en las dos orientaciones evaluadas, SUR y ESTE, únicamente con diferencias en la magnitud de sus Qtc. Así al ESTE se

observa que el C3 presenta las mayores Qtc todo el año con hasta 438 kWh en diciembre. El C5 con valores muy cercanos al C7, presenta las menores Qtc con 364 kWh en diciembre. Del resto, los de mayores Qtc son el C1, C2, y C5, y los de menores los C4, C6 y C7.

4.2.2.c RESUMEN ANUAL

En la [Figura 4.37](#) se presenta las cargas térmicas de calentamiento (Qtc) y las cargas térmicas por enfriamiento (Qte) anuales para cada uno de los 7 casos de estudio en kWh en una orientación **ESTE** para la ciudad de **Toluca**.



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
QTt (kWh)	3,456.49	3,361.83	3,515.17	3,106.12	3,046.65	2,963.65	2,903.37

Figura 4.37. Carga térmica de calentamiento (Qtc) y cargas térmicas por enfriamiento (Qte) anuales en una orientación ESTE para la ciudad de Toluca.

Se observa que proporcionalmente, todos los casos presentan efectos más de 4 veces más altos que los efectos por Qte. Por lo tanto, en el clima semifrío de la ciudad de Toluca, anualmente, se presenta un mayor potencial de ahorro energético, por sistemas que ayuden a disminuir las Qtc. Se observa que los 3 casos con sistemas monolíticos, C1, C2 y C3, presentan en promedio 12.8% más Qt totales que los casos

con sistemas dobles, C4, C5, C6, C7. Es decir que el efecto en Q_t por el uso de un sistema doble sobre un sistema monolítico, de entre los casos evaluados, es solamente 12.8% más eficiente que el uso de un sistema monolítico.

Con respecto a los 7 casos de estudio el C3 presenta la peor evaluación entre todos con la mayor cantidad de Q_t totales en la suma de Q_{tc} y Q_{te} con un total de 3,515.147 kWh. Aunque presenta la mejor evaluación por Q_{te} , dados los requerimientos de calentamiento al interior, no permite la captación de ganancias internas produciendo la peor evaluación en Q_{tc} y en el balance total entre todos los casos. Con 59 kWh menos el C3, el C1 se presenta como el segundo caso con mayores Q_t totales. El mejor evaluado en el balance total, es el C7 con un total de 2,903.37 kWh al año, esto es 611.8 kWh menos, que el C3.

5

Capítulo 5 CONCLUSIONES

Para la hipótesis presentada: *“Las variables de clima y orientación inciden en el desempeño térmico interior. La interacción entre dichas variables y las propiedades termofísicas de los acristalamientos producen efectos complejos y multifactoriales en la temperatura interior de ambientes con libre desempeño como con temperatura constante”* se concluye lo siguiente.

Los acristalamientos si intervienen en el desempeño de la Top interior. La variedad de sistemas y tecnologías en el mercado ofrecen una variedad infinita de posibilidades con alta gama de tecnologías, no todas con efectos significativos en los climas de México. Sin embargo este potencial por el intercambio de los acristalamientos no es considerado como una estrategia pasiva de control solar en metodologías bioclimáticas, teniendo que inferirse su aportación dentro de las estrategias de control solar.

De las evaluaciones realizadas, dada la complejidad de la interacción de las variables climáticas con las propiedades termofísicas de los cristales, **no se encontró un solo cristal considerado como el mejor y/o peor evaluado**. El resultado del análisis presenta la **ponderación** de los 7 casos de estudio a través de los parámetros de Top, FD, TR y QT.

Para poder contrastar las ventajas y desventajas de cada sistema de acristalamiento, y hacer claras las ponderaciones consideradas para lectores no especializados, la síntesis de resultados se presenta en forma de Figuras como sigue a continuación.

En la [Figura 5.1](#) se muestra la comparativa de las diferencias promedio entre las 7 Top max presentadas entre los casos de estudio, así como las diferencias promedio

entre las 7 Top min, para las dos ciudades de referencia en sus dos orientaciones y períodos de estudio.

		MONTERREY		TOLUCA		
		Top max (°C)	Top min (°C)	Top max (°C)	Top min (°C)	
ESTE	SUR	DTv	0.2	0.1	0.2	0.2
	SUR	DTi	1.0	0.4	1.2	0.5
ESTE	SUR	DTv	0.2	0.2	0.6	0.4
	SUR	DTi	0.3	0.2	0.4	0.3

Figura 5.1. Comparativa de la diferencia promedio entre las 7 Top max, entre las 7 Top min, para el DTv y DTi en orientaciones SUR y ESTE para la ciudad de Monterrey y la ciudad de Toluca.

En condiciones de libre desempeño de la temperatura, para el clima cálido seco de la ciudad de Monterrey, la diferencia promedio más amplia en las Top max entre los 7 sistemas, se presenta en el DTi con 1°C entre los valores reportados en una orientación SUR. Este valor supera en 0.7°C a los presentados en la orientación ESTE para el mismo DTi con tan solo 0.3°C. Para el clima semifrío de la ciudad de Toluca se observa la misma condición al presentarse la mayor diferencia entre las Top max por los 7 casos en la orientación SUR en el DTi con 1.2°C y una diferencia de 0.8°C con la presentada en la orientación ESTE de 0.4°C

Se observa que en ambas ciudades y en ambas orientaciones, las condiciones de DTi presentan las mayores diferencias en la orientación SUR. El aumento en la radiación incidente en la época de invierno debido a la trayectoria solar, logra evidenciar en mayor magnitud el potencial de los distintos sistemas con un máximo de 1°C en Monterrey y 1.2°C en Toluca. **Por lo tanto se comprueba que la radiación incidente como el principal elemento de impacto en los sistemas de acristalamiento.**

Con respecto a los efectos por tipo de tecnología y su potencial en la mejoría de las condiciones de confort al interior, con base en la Tn y la Top, se observó que entre los dos climas de referencia los casos mejor evaluados bajo condiciones de libre desempeño de la temperatura cambian, pero con uso de sistemas de climatización algunos casos coinciden entre ambos climas. Sin embargo, en este último caso, los sistemas que coinciden entre ambos climas como los mejor

evaluados anualmente, no son los que en la temporada de mayores requerimientos específica de cada clima, presentan las mejores condiciones al interior. El caso mejor evaluado bajo condiciones de uso de sistemas de acondicionamiento en ambos climas se refiere a, un sistema doble hermético con capa bajo emisiva y con las propiedades más aislantes entre todos los sistemas. **Por lo tanto se concluye que los sistemas altamente aislantes, aunque si pueden presentar menores cargas térmicas totales anualmente, no siempre presentan las mejores condiciones por temporada pudiendo no ser la mejor opción en ambientes con sistemas de climatización intermitente o con la coexistencia con criterios bioclimáticos** en las épocas de menores requerimientos.

Por su parte los sistemas de acristalamiento mejor evaluados bajo libre desempeño con la temperatura reflejan una mayor concordancia con los requerimientos bioclimáticos y con la caracterización climática local. En la ciudad de Monterrey, con un clima cálido seco, los mejores casos evaluados son los que presentan propiedades de control solar y evitan el paso de la radiación solar. En el clima semifrío de la ciudad de Toluca, los acristalamientos mejor evaluados son los que presentan mayores propiedades de transparencia a la radiación solar en busca de ganancias térmicas al interior.

Con respecto a los parámetros de factor de decremento (FD) y tiempo de retardo (TR) **se aprecia poca o nula diferencia en los valores reportados entre los 7 casos de estudio para cada ciudad.** En el FD los valores reportados en la mayoría de las evaluaciones presentan diferencias máximas de 0.04 a 0.1 en promedio entre los 7 sistemas. Este comportamiento se repite en los resultados por TR los cuales, no presentan diferencia alguna o apenas alcanzan valores con en el mínimo de 10min entre ellos.

Sin embargo se observó que si existe una diferencia con y sin la presencia de una ventana dentro del MEV, independientemente al tipo de acristalamiento. Bajo las condiciones del estudio, la presencia de una ventana aumento la amplitud de la Top diaria o FD y disminuyo el TR comparado con el MEV sin presencia de ventana. Sin embargo el intercambio entre los distintos sistemas de acristalamiento en la ventana

no reflejó diferencias significativas ni en el FD ni en el TR. Por lo tanto se concluye que dichos parámetros no son óptimos en la evaluación entre sistemas de acristalamiento.

Para la elaboración de conclusiones particulares, en las Figuras siguientes se resumió de manera comparativa, las evaluaciones a los 7 casos descritos a detalle en el capítulo 4. En la primera parte se presentan los resultados por los parámetros para libre desempeño de la temperatura y en la segunda los resultados sobre ambientes con temperatura constante. Cada columna presenta un *índice por parámetro*. Este se refiere a la posición de cada caso de estudio, con respecto al resto de los 7 casos, en los resultados de las evaluaciones por parámetro, reportados en el capítulo 4. Es decir el caso mejor evaluado tendrá el IPP de 1, el segundo caso mejor evaluado tendrá un IPP de 2 y así sucesivamente. En las evaluaciones donde dos o más casos presentaron el mismo comportamiento, ambos recibieron el mismo IPP con el objetivo de no afectar el IPP del resto de los casos. Por lo tanto el *índice por parámetro* presenta la escala igual al número de casos, es decir del 1 al 7, siendo el 1 el caso mejor evaluado y el 7 el peor.

En la última columna a la derecha, se presenta el *Índice Total por Caso (ITC)*. Éste, índice propuesto, engloba los resultados de los IPP de todos los parámetros para cada caso. Con base en el ITC, en las tablas de resultados, se ordenaron los casos de estudio de mejor al peor evaluado. Es decir el de menor ITC y el mayor ITC respectivamente.

Dado que no todos los parámetros presentaron la misma relevancia en las evaluaciones, para el cálculo del ITC se asignó un valor ponderado a cada uno de los IPP. Este valor ponderado se definió a través en una estimación empírica conclusión del análisis total de resultados. De tal forma que la fórmula para el cálculo del ITC fue:

$$ITC = \frac{(60\% * Top\ max) + (20\% * Top\ min) + (10\% * FD) + (10\% * TR)}{4}$$

Donde:

ITC = Índice Total por Caso

Top max = IPP de la Temperatura operativa máxima

Top min = IPP de la Temperatura operativa mínima

FD = IPP del Factor de Decremento

TR = IPP del tiempo de Retardo

Con base en lo anterior en la [Figura 5.2 y 5.3](#) se presentan el DTv y el DTi en una orientación SUR para la ciudad de Monterrey. En la [Figura 5.4 y 5.5](#) el DTv y el DTi en la orientación ESTE. Posteriormente se presenta con el mismo orden el resumen para la ciudad de Toluca con el DTv y DTi para la orientación SUR en la [Figura 5.6 y 5.7](#) respectivamente y para la orientación ESTE en el mismo DTv y DTi en la [Figura 5.8 y 5.9](#).

		MONTERREY				
		SUR				
	CASO	Top max	Top min	FD	TR	ITC
DTV	C3	1	1	1	1	0.3
	C5	2	2	2	2	0.5
	C7	3	3	2	2	0.7
	C2	3	2	5	3	0.8
	C6	4	4	3	2	0.9
	C4	5	4	4	2	1.1
	C1	6	3	6	3	1.3

Figura 5.2 Resumen con libre desempeño de la temperatura para la ciudad de Monterrey, en su orientación SUR en un DTv.

		MONTERREY				
		SUR				
	CASO	Top max	Top min	FD	TR	ITC
DTi	C3	1	6	1	1	0.5
	C5	2	5	2	1	0.6
	C7	3	3	3	1	0.7
	C2	4	4	5	1	1.0
	C6	5	2	4	1	1.0
	C4	6	1	6	1	1.1
	C1	7	1	7	1	1.3

Figura 5.3 Resumen con libre desempeño de la temperatura para la ciudad de Monterrey, en su orientación SUR en un DTi.

Se aprecia que para la orientación SUR el resumen de las evaluaciones coloca a los C3, C5 y C7 como los mejor evaluados. En el DTv los tres casos presentan las mejores evaluaciones por todos los parámetros de manera contundente. Para el DTi los tres casos presentan malos desempeños en las Top min. Esto se debe a que las propiedades de los 3 casos se refieren a sistemas de acristalamiento con propiedades selectivas en el manejo de la radiación solar, reflejando o absorbiendo un alto porcentaje. En el DTi la orientación SUR recibe una mayor cantidad de radiación elevando las Top max muy por arriba de la Tn durante el día. Los 3 casos mencionados, al disminuir considerablemente el paso de radiación solar por la

mañana, disminuyen la cantidad d calor almacenado al interior útil durante la noche, provocando que las Top min más bajas que por el resto de los sistemas. Este mismo comportamiento afecta el TR que en invierno no presenta diferencias entre ninguno de los casos, y en verano ofrece diferencias con respecto a la masa térmica de los sistemas, es decir entre monolíticos y dobles con el mínimo de 10min entre ellos.

MONTERREY						
ESTE						
	CASO	Top max	Top min	FD	TR	ITC
DTV	C3	1	1	1	1	0.3
	C5	2	3	2	2	0.6
	C7	3	4	2	2	0.8
	C2	3	2	5	3	0.8
	C6	4	5	3	2	1.0
	C4	5	5	4	2	1.2
	C1	6	4	6	3	1.3

Gráfica 5.4 Resumen con libre desempeño de la temperatura para la ciudad de Monterrey, en su orientación ESTE en un DTv.

MONTERREY						
ESTE						
	CASO	Top max	Top min	FD	TR	ITC
DTi	C7	2	1	2	1	0.4
	C2	1	3	5	2	0.5
	C6	3	1	3	1	0.6
	C4	4	1	4	1	0.8
	C1	5	2	6	2	1.1
	C5	6	3	1	1	1.1
	C3	7	4	1	1	1.3

Figura 5.5 Resumen con libre desempeño de la temperatura para la ciudad de Monterrey, en su orientación ESTE en un DTi.

Para la orientación ESTE en el DTv se presenta el mismo desempeño de todos los casos que en la orientación SUR. Entre ambas temporadas los casos mejor evaluados se invierten. Es decir el C3 y C5 en el DTv presentan el índice más bajo pero en DTi el más alto. El C7 y C2, que presentan la mejor evaluación en invierno, en verano presentan el mismo comportamiento en Top max con diferencias en su DF y TR asociado al tipo de sistema y no a sus distintos tipos de tratamiento de la radiación. El C2 supera al C7 en Top, y aunque el C7 ofrece mejor desempeño en el FD y en el TR, la diferencia presentada en dichos valores es de apenas 0.06 y 10min

respectivamente. Por lo tanto con base en un balance costo / beneficio, el C7 no ofrece el mejor balance.

En el DTi con requerimientos de calentamiento desde tempranas horas de la mañana, los casos mejor evaluados disminuyen el paso de la radiación pero en menor dimensión que el caso peor evaluado como es el C3. El C2, monolítico absorbente, bloquea un porcentaje de la radiación pero a la vez almacena y reirradia al interior el calor de onda larga absorbido en su masa, lo que benéfica a las condiciones en las Top min. El C6, un doble pirolítico + claro, por su película exterior refleja un porcentaje de la radiación pero a la vez, debido a su transmitancia solar directa, permite una mayor cantidad de ganancias de calor al interior. El C7, un doble claro bajo emisivo + claro, en las Top max presenta efectos por debajo del C2, pero su mayor aislamiento logra mantener Top min más cercanas a la Tn presentando un comportamiento igual al C6.

		TOLUCA				
		SUR				
	CASO	Top max	Top min	FD	TR	ITC
DTV	C6	2	1	2	2	0.5
	C4	2	3	3	2	0.6
	C1	1	5	5	2	0.6
	C7	3	2	1	1	0.6
	C5	5	4	2	2	1.1
	C2	4	6	4	2	1.1
	C3	6	7	2	2	1.4

Figura 5.6 Resumen con libre desempeño de la temperatura para la ciudad de Toluca, en su orientación SUR en un DTV.

		TOLUCA				
		SUR				
	CASO	Top max	Top min	FD	TR	ITC
DTI	C4	1	1	5	1	0.4
	C1	2	1	6	1	0.5
	C6	3	2	4	1	0.7
	C2	4	4	5	1	1.0
	C7	5	3	3	1	1.0
	C5	6	5	2	1	1.2
	C3	7	6	1	1	1.4

Figura 5.7 Resumen para desempeño de la temperatura para la ciudad de Toluca, en su orientación SUR en un DTi.

Para el caso de Toluca con un clima semifrío y requerimientos al interior opuestos a los presentados para la ciudad de Monterrey, los casos mejor evaluados resultan igualmente opuestos. Dados los requerimientos de ganancias de calor al interior tanto el Dtv como el DTi presentan casos con prioridad en las ganancias de calor al interior en sus propiedades termofísicas. Así el C1 Y el C4, un sistema monolítico claro sencillo y un sistema doble a base de dos cristales claros sencillos logran incidir en las Top al interior acercando por mayor número de horas las condiciones al interior a la Tn.

		TOLUCA				
		ESTE				
	CASO	Top max	Top min	FD	TR	ITC
DTv	C5	1	3	2	1	0.4
	C7	2	2	2	1	0.5
	C6	3	1	3	1	0.6
	C2	2	4	4	2	0.7
	C4	5	1	4	1	0.9
	C3	4	5	1	1	0.9
	C1	6	2	5	2	1.2

Figura 5.8 Resumen para desempeño de la temperatura para la ciudad de Toluca, en su orientación ESTE en un DTv.

		TOLUCA				
		ESTE				
	CASO	Top max	Top min	FD	TR	ITC
DTi	C4	2	2	3	2	0.5
	C1	1	4	5	3	0.6
	C6	3	1	2	1	0.6
	C7	4	3	1	1	0.8
	C5	6	5	1	1	1.2
	C2	5	6	4	3	1.2
	C3	7	7	1	1	1.5

Figura 5.9 Resumen para desempeño de la temperatura para la ciudad de Toluca, en su orientación ESTE en un DTi.

En su orientación ESTE, en el DTv si presentan diferencias en los casos de estudio evaluados tanto en la orientación SUR como con los mejores para DTi. Esto se debe, a las diferencias en la cantidad de radiación global por temporada. En verano la radiación incidente eleva las Top y los casos mejor evaluados presentan comportamientos de control de la radiación solar y ya no de paso directo como en los

casos evaluados en la orientación SUR. En el DTi prevalecen las condiciones de bajo calentamiento al interior por lo que los casos mejor evaluados privilegian sistemas con altos niveles de transferencia de radiación como son el C1 y el C4.

De la Figura 5.1 se observa que la diferencia promedio de las Top max es de apenas 0.4°C. Por lo tanto entre el C1 y C4, un monolítico claro y un doble claro + claro las diferencias en su desempeño se presentan en las Top min por la capacidad de masa térmica del C4. Sin embargo será necesario ponderar en base al potencial de ahorro energético de cada temporada el sistema que mejor convenga.

En cuanto a las evaluaciones anuales con Top fija al interior con la incorporación de sistemas de acondicionamiento en las siguientes Figuras se presenta el resumen anual bajo los parámetros de cargas térmicas por enfriamiento (Qte), cargas térmicas por calentamiento (Qtc) y cargas térmicas totales (QTt) para las dos ciudades de referencia. Los mejores casos evaluados se encuentran ordenados de acuerdo a la menor cantidad de cargas térmicas totales. En las Figuras 5.10 A y B se presenta la orientación SUR y ESTE para la ciudad de Monterrey. De igual forma en las Figuras 5.11 A y B las orientaciones SUR y ESTE para la ciudad de Toluca.

		MONTERREY		
		SUR		
ANUAL	CASO	Qte	Qtc	QTt
	C7	3	2	1
	C3	1	7	2
	C5	2	4	3
	C6	4	1	4
	C4	6	3	5
	C2	5	5	6
	C1	7	6	7

		MONTERREY		
		ESTE		
ANUAL	CASO	Qte	Qtc	QTt
	C3	1	7	1
	C7	3	2	2
	C5	2	4	3
	C6	4	1	4
	C4	6	3	5
	C2	5	6	6
	C1	7	5	7

Figura 5.10 Resumen anual para ambientes con Top fija por el uso de sistemas de acondicionamiento para la ciudad de **Monterrey**, en su orientación **SUR (A)** y **ESTE (B)**.

		TOLUCA		
		SUR		
ANUAL	SUR	Qte	Qtc	QTt
	C7	3	2	1
	C6	4	1	2
	C5	2	5	3
	C4	5	3	4
	C2	4	6	5
	C3	1	7	6
	C1	6	4	7

		TOLUCA		
		ESTE		
ANUAL	ESTE	Qte	Qtc	QTt
	C7	3	2	1
	C6	5	1	2
	C5	2	5	3
	C4	6	3	4
	C2	4	6	5
	C1	7	4	6
	C3	1	7	7

Figura 5.11 Resumen anual para ambientes con Top fija con uso de sistemas de acondicionamiento para la ciudad de Toluca, en su orientación SUR (A) y ESTE (B).

Se observa que, en general, las condiciones con uso de sistemas de climatización privilegian, en ambas ciudades, el uso de sistemas dobles por su capacidad aislante. Sin embargo en Monterrey orientación tanto SUR como ESTE, se presentan muy pequeñas diferencia con el C3. Es decir que un sistema monolítico altamente reflectante equipara su desempeño a un sistema doble con baja emisividad.

Con uso de sistemas de acondicionamiento los casos mejor evaluados se invierten con respecto a los mejores en ambientes con libre desempeño de la temperatura. Ahora los casos mejor evaluados en verano requieren evitar el sobre calentamiento al interior y mantenerlo por sistemas dobles que eleven las Qte al interior.

En ambas ciudades se aprecia que los casos con menores QTt no reflejan los menores resultados para ambas condiciones de QTe y QTc. En función de obtener un mayor ahorro termoenergético en ambientes con sistemas de climatización intermitente o en combinación con otras estrategias bioclimáticas se deberá de prestar atención al parámetro de QT con mayor potencial por las condiciones anuales de cada clima.

Todo lo anterior comprueba que algunos sistemas monolíticos pueden presentar efectos térmicos al interior, de la misma magnitud o muy cercanos, a los de sistemas dobles en ambientes de libre desempeño de la temperatura en climas cálido secos y semifríos como los de la ciudad de Monterrey y Toluca. Por lo tanto, para las condiciones de ambas ciudades, la aplicación de sistemas dobles puede encarecer

el costo asociado a las ventanas en la etapa de ocupación a través del impacto termoenergético, como en etapa de construcción por la adquisición de sistemas con una eficiencia innecesaria.

Para poder establecer un parámetro de referencia sobre el costo económico asociado a la compra de los sistemas de acristalamiento, se consultó a la empresa distribuidora de cristales *Arescris S.A. de C.V.* En la [Figura 5.12](#) se muestra la lista de precios aproximados de los 7 casos de estudio. En la columna de *precio unitario* se presenta el costo en pesos por m² de cada sistema considerando dimensiones preestablecidas en fábrica de 1.20m x 1.30m. En la columna *MEV 4m²* se presenta el cálculo general para las dimensiones de la ventana modelada en el MEV con un área de 4m². Todos los precios incluyen suministro y colocación. Es de remarcar que los montos presentados son aproximados y únicamente de referencia.

CASOS	SISTEMA	CONFIGURACIÓN	ESPESOR (mm)	PRECIO UNITARIO (pesos/m ²)	MEV 4m ²
C1	MONOLÍTICO	CLARO	6	621.44	2,485.76
C2	MONOLÍTICO	ABSORBENTE		735.48	2,941.92
C3	MONOLÍTICO	REFLECTANTE		1,005.43	4,021.72
C4	DOBLE	CLARO + CLARO	24 (6+12+6)	1,491.48	5,965.92
C5	DOBLE	ABSORBENTE + CLARO		1,637.62	6,550.49
C6	DOBLE	PIROLITICO + CLARO		1,680.68	6,722.72
C7	DOBLE	CLARO BAJO EMISIVO + CLARO		2,718.40	10,873.59

Figura 5.12 Tabla de precios de referencia de los 7 casos de estudio. Fuente. Elaboración propia con datos obtenidos de la distribuidora de cristales *Arescris S.A. de C.V.*

Del C1 al C7 se presenta un costo ascendente entre los distintos sistemas sobre todo de los sistemas monolíticos a los sistemas dobles. De manera general, en promedio los sistemas monolíticos son 71% más económicos que los sistemas dobles. Entre los distintos casos de estudio, tomando como referencia base al C1, se observa que el C2 es 18% más caro, el C3 62%, el C4 140%, el C5 163%, el C6 170% y finalmente el C7, el sistema con precio unitario más alto entre todos los sistemas estudiados, es 437% más caro que el C1 caso base.

Por todo lo anterior se concluye que, los impactos económico y ambiental, asociados a tecnologías bien evaluadas pero con muy poca diferencia con otras de menor impacto, pueden verse reducidos con su combinación con estrategias bioclimáticas complementarias. De esta manera los acristalamientos pueden ser considerados como una estrategia pasiva dentro del sistema híbrido y complejo de la transferencia de calor por la envolvente.

Finalmente se concluye que todas estas complejas interrelaciones hacen necesario el desarrollar discusiones a futuro con base en investigaciones teórico - numéricas sobre los efectos de los acristalamientos en el consumo termoenergético de las edificaciones en México. El desarrollo y accesibilidad de este tipo de investigaciones por y hacia arquitectos, establece un vínculo entre áreas poco interconectadas en la práctica, como es el comportamiento térmico de edificios y su aplicación en el campo del diseño.



ANEXO

VALIDACION DE LA METODOLOGIA DE SIMULACION PARA LA EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS POR ACRISTALAMIENTOS DENTRO DE UNA CELDA DE REFERENCIA PARA CLIMA CALIDO SECO

Moreyra G.L.E, Elías L.P.

* Posgrado en Arquitectura Bioclimática, Departamento de Medio Ambiente, División de Ciencias y Artes para el Diseño, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo No. 180, Col. Reynosa Tamaulipas, C.P. 02200, Delegación Azcapotzalco, Distrito Federal, México, Tel:(52 55) 5318-9000, *luzemoreyra@gmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo se presenta la metodología de evaluación térmica de una celda de simulación dentro del programa Design Builder. La celda representa las condiciones de un espacio sin uso específico, bajo un clima de referencia, en el cual se busca medir de manera clara y evidente los efectos al interior por el uso de distintos tipos de acristalamientos. Se analizaron los resultados de 3 metodologías bajo distintos parámetros para establecer el sistema constructivo que, en el balance energético de la celda, reflejara de manera clara y contundente las cargas térmicas asociadas a cada elemento de la envolvente. Al caracterizar los efectos relativos a los elementos opacos que inciden en la temperatura interior se podrán controlar y limitar las variables que incidan sobre el experimento, validando el modelo de referencia para distintos climas y acristalamientos.

ABSTRACT

Assessment methodology thermal simulation of a cell within the Design Builder program is presented in this paper. The cell represents the conditions of living space in a climate of reference, which seeks clear and obvious measure of the effects into the use of different types of glazing. 3 test results under different parameters were analyzed to establish the constructive system, the energy balance of the cell, reflected in clear and forceful heat loads associated with each element of the envelope. Characterization of the effects related to the opaque elements affecting the interior temperature can control and limit the variables that impact on the experiment, validating the reference model for different climates and glazing.

INTRODUCCIÓN

Los efectos térmicos al interior de las edificaciones, reflejo de la interacción de los elementos que conforman la envolvente de las construcciones con el ambiente exterior, son determinados por los distintos mecanismos de transferencia de calor que inciden de manera específica en cada uno de ellos. Las características termofísicas y ópticas de los materiales que conforman cada elemento, y, su posición y orientación con respecto al ambiente exterior determinará la magnitud de dichos efectos al interior de los espacios. Dentro de los elementos opacos, la cubierta, debido a una exposición mayor y más prolongada a la radiación solar directa, es el elemento que presenta mayores aportaciones

térmicas al interior de los espacios habitables. Así mismo la cantidad de masa térmica contenida tanto en muros como en cubierta afectará la oscilación y el retardo de la temperatura del exterior al interior. Por su parte los acristalamientos presentan la característica de ser transparentes a la radiación de onda corta, por lo que tienen la propiedad de transmitir la radiación de manera directa involucrando una mayor número de mecanismos de intercambio de calor, que los elementos opacos como cubierta y muros.

En el presente trabajo se realizaron simulaciones en Energy Plus a través de su interface en Design Builder bajo 3 metodologías distintas para entender la interacción térmica entre los elementos constructivos de una celda. Con esto se busca validar el uso de dicha celda de simulación para la investigación de los efectos de los efectos del uso de los acristalamientos al interior de los espacios habitables con resultados certeros y confiables.

METODOLOGÍA

Descripción del modelo experimental

Para el análisis de los efectos al interior de las edificaciones se utilizó una celda de referencia con la geometría utilizada por (K. Tsikaloudaki, 49 (2012)) con base en la ISO 15265 e ISO 13790 de 3.60x5.50x2.80 de altura. Fig.1. Las dimensiones definidas son 3.60x5.50x2.80 de altura con un vano de 1.64 x 2.44 con un cristal sencillo claro de 6mm lo cual representa el 40% del área de la fachada principal. Al interior se asumieron condiciones sin infiltraciones, ni cargas internas por equipos u ocupación. El piso, en todos los casos, se consideró bajo condiciones adiabáticas, considerando interacción solo entre muros y cubierta. Con dichas condiciones se busca que las propiedades térmicas de los elementos opacos de la envolvente, reflejen los efectos por la aplicación de distintos tipos de acristalamientos de manera clara y evidente, dentro del balance térmico de la celda.

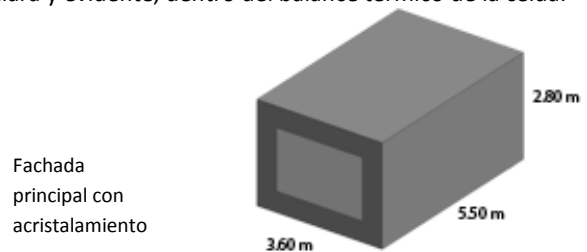


Figura 1: Perspectiva de la celda de referencia. Elaboración propia con base en (K. Tsikaloudaki, 49 (2012))

Clima de referencia

Para la aplicación de variables climáticas que simulen el comportamiento de los materiales al interior de los espacios, se utilizó como referencia la ciudad de Monterrey Nuevo León, con un bioclima cálido seco, según la clasificación de CONAVI, (CONAFOVI, 2006). Por ser un clima con mayor número de días de sobrecalentamiento al año se realizaron simulaciones para un día típico del mes más caliente en verano. Se presentan oscilaciones de hasta 11.2K con máximas de 32.8°C a las 4pm y mínimas de 21.6°C a las 6am. Los datos climatológicos fueron obtenidos de la base de datos de Meteororm 7.

Metodología experimental

Los efectos que producen los acristalamientos al interior de las edificaciones están regulados por la capacidad de los cristales de reflejar, transmitir y absorber los distintos espectros contenidos en la radiación solar. Como consecuencia se producirán efectos asociados tanto a las propiedades térmicas de la masa del cristal como por la acción de la radiación directa transmitida, ahora en forma de radiación de onda larga y UV, sobre los materiales y objetos al interior de los espacios. Estos efectos sobre la envolvente interna de los espacios asociados a las propiedades específicas de cada tipo de acristalamiento, reflejara un impacto el balance térmico total.

Para poder diferenciar y evaluar de manera correcta dichos efectos relativos a la envolvente y caracterizar de manera puntual los efectos atribuidos al uso de los acristalamientos dentro de la celda de simulación, se realizaron 3 grupos de simulaciones con distintas metodologías de evaluación para entender la interacción de los elementos opacos de la envolvente dentro de la celda. Tanto la dimensión de la celda de referencia como del tamaño del vano se mantuvieron constantes, al igual que el sistema de acristalamiento compuesto por un cristal claro de 6mm de espesor.

En la **metodología 1**, con el objetivo de entender la magnitud de las aportaciones por elemento de la celda en el balance total, se compararon los resultados de 3 simulaciones aplicando la condición de flujo adiabático para cada elemento por separado dentro de la celda. Para poder cuantificar de manera comparativa los efectos de cada elemento, se consideró un mismo sistema constructivo para toda la envolvente a base de concreto de mediana densidad (CMD) de 0.10m y una absorptancia de 0.4.

Las gráficas de la **Fig. 2 (A, B y C)** se presenta el balance térmico total dentro de la celda. En la gráfica **A** todos los elementos del módulo presentan intercambios con el medio exterior; en la gráfica **B** la cubierta fue considerada como adiabática y en la gráfica **C** únicamente el muro sur se mantuvo con intercambio térmicos con el exterior. Se observa que la cubierta es la que presenta mayores aportes de ganancias térmicas al interior seguido por las aportaciones de radiación directa por los acristalamientos y

en una menor proporción por muros. Al volver la cubierta adiabática se incrementan las ganancias por muros sobrepasando las ganancias directas por los acristalamientos las cuales permanecen constantes. Finalmente en la gráfica 3 al considerar todos los elementos opacos como adiabáticos se observa que las cargas por muro y techos interiores presentan prácticamente el mismo desempeño sobresaliendo las cargas por radiación directa por acristalamientos.

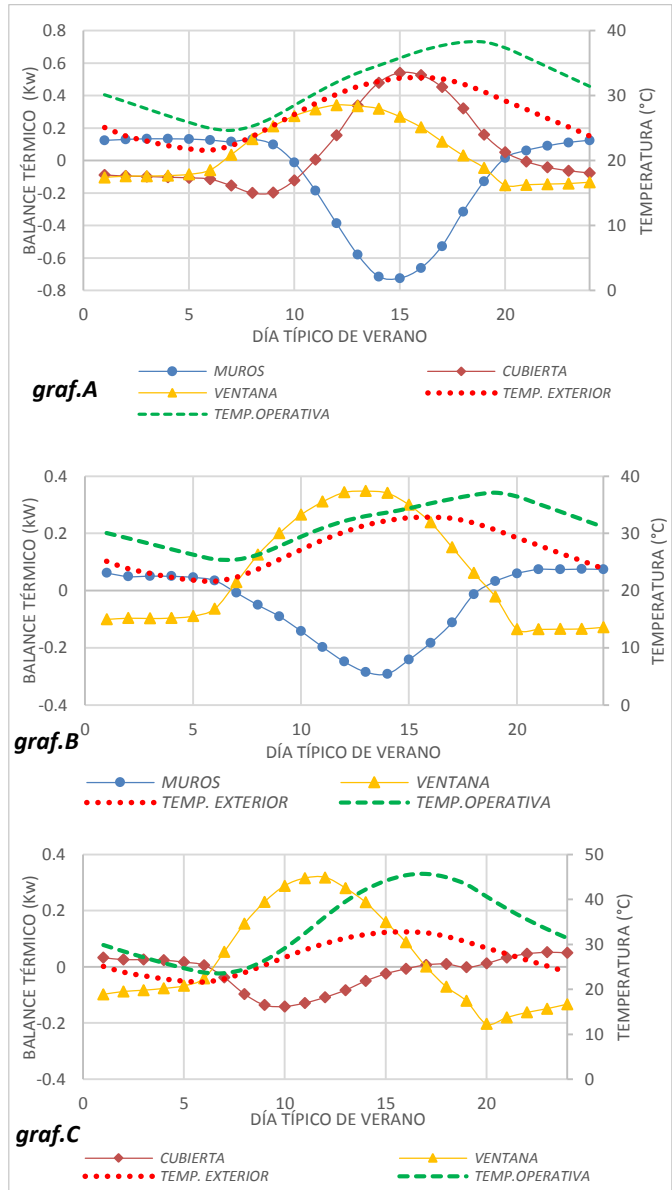


Figura 2: Comparación de los aportes térmicos por elemento

En la **metodología 2** se simularon 4 configuraciones distintas para el sistema constructivo de la celda. El Sistema constructivo 1 (S.C.1) de 0.19m de espesor, se conformó por muros de tabique (TAB) DE 0.14m con recubrimiento de mortero de 0.025m (M) en ambas caras y cubierta de concreto de mediana densidad (CMD) de 0.10m. El sistema constructivo 2 (S.C.2) conformada de 0.10m de concreto de mediana densidad (CMD) para todos los elementos de la

envolvente. De igual forma el sistema constructivo 3 (S.C.3) con toda la envolvente de un sistema EPS CONCRETO de 0.10m de espesor, conformado por 0.02m de Poliéstileno de alta densidad (EPS) en su capa exterior, sobre 0.08m de CMD. Finalmente en sistema constructivo 4 (S.C.4) similar al S.C.2 conforma todos los elementos de la celda con el mismo

parámetro del Factor de decremento sol-aire (DF sa), seguido por el S.C.4 con un espesor de 0.22m con un desempeño muy similar al S.C.1 de 0.19m. El mejor desempeño lo presenta el S.C.3 con un espesor de 0.10m.

S.C.	COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
S.C.1	Muros	.025m M + .14m TAB+.025m M
	cubierta y firme	0.10m CMD
S.C.2	muro, cubierta y firme	0.10m CMD
S.C.3	muros, cubierta y firme	.02m EPS + .08m CMD
S.C.4	muro, cubierta y firme	0.22 CMD

sistema solo que ahora con un espesor de 0.22m. [Tabla 1.](#)

Tabla 1: Descripción de los sistemas constructivos utilizados

S.C.	MATERIAL	DENSIDAD kg/m3	CALOR ESPECIFICO J/kgK	CONDUCTIVIDAD W/mK	U W/m2K
S.C.1	MORTERO	1800	1000	1	2.54
	TABIQUE	1700	800	0.84	
S.C.2	CMD .10	1800	1000	1.35	4.09
S.C.3	EPS	15	1400	0.04	1.37
	CMD .08	1800	1000	1.35	
S.C.4	CMD 0.22	1800	1000	1.35	3.00

Tabla 2: Coeficiente U y propiedades térmicas de los sistemas constructivos.

Como parámetro de referencia para la evaluación de las propiedades térmicas de los materiales utilizados ([Tabla 2](#)), se evaluó el desempeño térmico de los 4 sistemas para un muro de cada sistema constructivo orientado al sur, en la herramienta de simulación numérica Ener-Habitat ([2](#)) en un día típico de verano. [Figura 3](#)

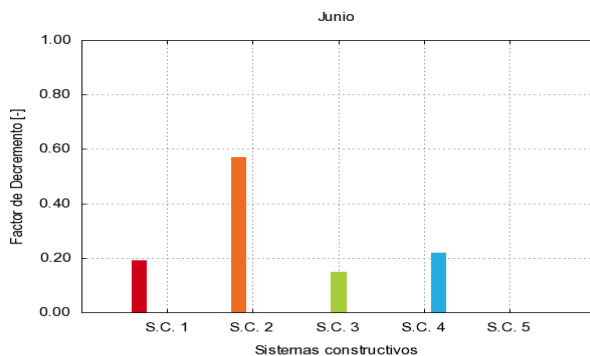


Figura 3: Factor de decremento sol-aire para los 3 sistemas constructivos

El la figura 3 se observa que el S.C.2, con un espesor de 0.10m, presenta el peor desempeño térmico, medido bajo el

Posteriormente se compararon los efectos en la temperatura operativa por los distintos sistemas constructivos, ahora para toda la envolvente en la celda de referencia igualmente durante un día típico del mes más cálido ([figura 4](#)). Se observa que el sistema constructivo que refleja una mayor amplitud en su oscilación es nuevamente el S.C.2 con 13.66K y con un tiempo de retardo de 3h en la temperatura máxima. El S.C.1 le sigue con una oscilación de 8.89K y 2h de retardo térmico. El S.C.3 y S.C.4 presentan las menores oscilaciones con 4.97K de amplitud y 3h de retardo, y 4.66K con 4h respectivamente.

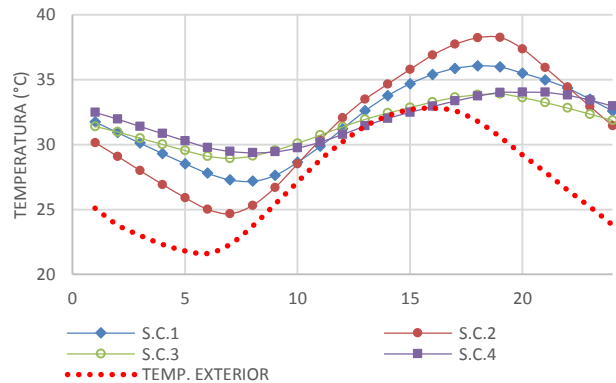


Figura 4: Amplitud de oscilación y retardo térmico por sistema constructivo, día típico de verano.

El concreto, con un mayor valor de conductividad refleja el menor amortiguamiento al interior en el S.C.2 con un coeficiente de transferencia de calor de 4.09 para un muro de 0.10m de espesor. Sin embargo se puede observar que los efectos al interior mejoran prácticamente en la misma proporción al aplicar una capa aislante de 0.02m al exterior sobre 0.08m de concreto en el S.C.3 o al aumentar el espesor del concreto en casi el doble de su espesor original en el S.C.4 con 0.22m de espesor a pesar de sus valores de conductividad térmica de 1.37 W/m2K y 3 W/m2K respectivamente.

Debido a que el objetivo de la celda de simulación es el reflejar de manera clara y evidente los efectos por los sistemas de acristalamientos, el S.C.3 y el S.C.4 con menores aportes por radiación al interior, presentan las mejores condiciones. Para evaluar de manera cuantitativa dichos aportes dentro del balance térmico y observar su respuesta ante de radiación directa por el sistema de acristalamiento se simularon bajo el clima de referencia los 4 sistemas constructivos [figura 5](#).

En las gráficas de la [figura 5](#) se muestra el balance térmico para cada sistema constructivo. En todos los sistemas las ganancias por ventanas se mantienen constantes con 0.36Kw a la 1pm y pérdidas de 0.15Kw a las 12am. En el S.C.1 la

cubierta de concreto establece los mayores aportes en un amplio rango con 0.65Kw a las 4pm, duplicando los aportes por ventanas, 0.35Kw a las 4pm, y muros con 0.36Kw a las 5am. En el S.C.2 las ganancias por cubierta disminuyen ligeramente a un 0.54Kw a las 3pm, al igual que, de manera más significativa, las ganancias por muros hasta 0.13Kw a las 8 am. En el S.C.3 la magnitud de ganancias y pérdidas por cubierta disminuye considerablemente hasta un 0.09Kw a las 5pm y -0.09Kw a las 10am cobrando mayor relevancia las ganancias por ventanas. Finalmente en el S.C.4 aumenta las ganancias por cubierta cerca del doble del S.C.3 con 0.20Kw a las 7pm y aunque disminuye las aportaciones por muros a -0.09Kw a las 10am no supera las condiciones de contendencia del S.C.3.

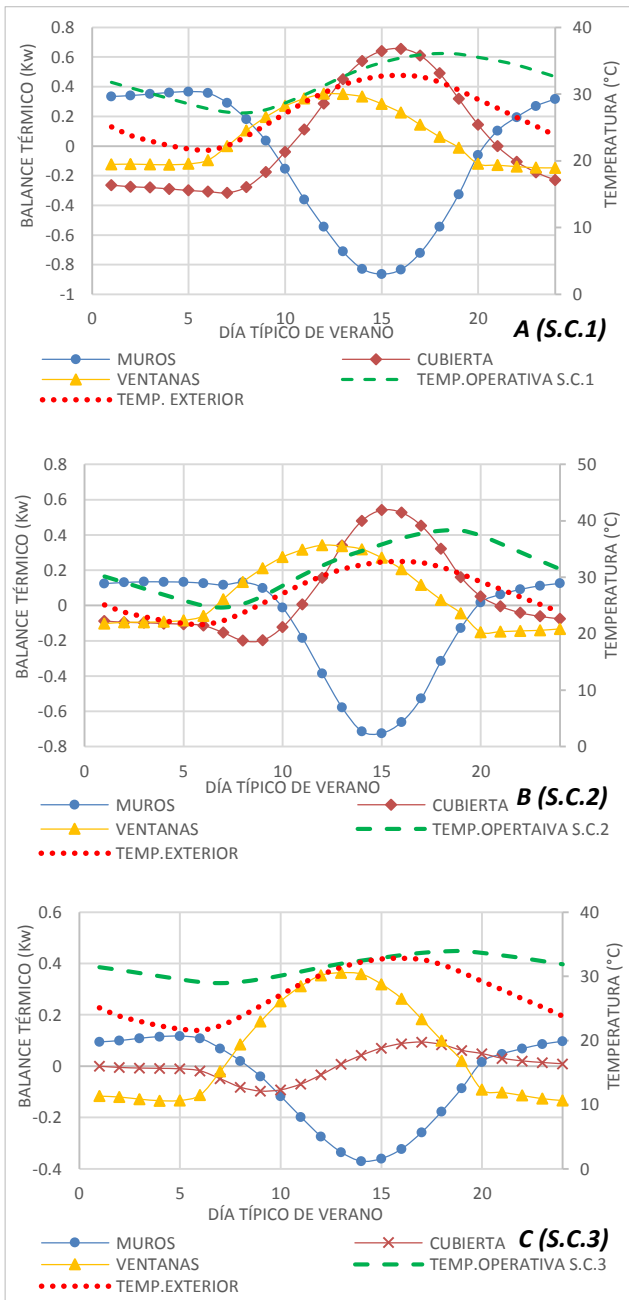


Figura 5: Balance térmico por Sistema Constructivo

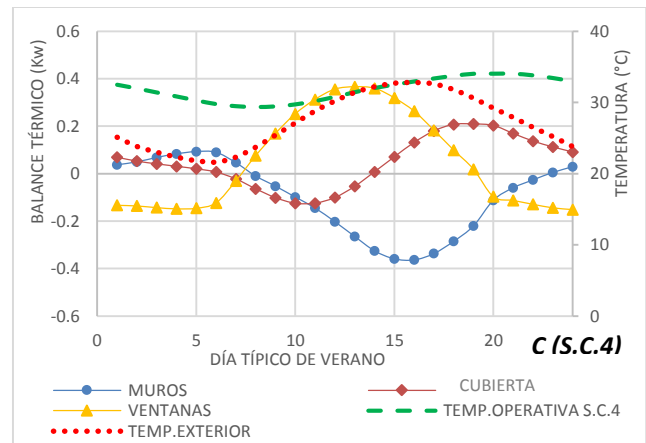


Figura 5: Balance térmico por Sistema Constructivo

Para limitar las variables evaluar, y dado que la característica principal de los cristales radica en ser transparentes a la radiación directa, en la metodología 3 se buscó determinar las orientaciones con mayores aportes por efecto de los acristalamientos tomando como caso base un cristal claro de 6mm orientado hacia los 4 puntos cardinales. Las figuras 6 y 7 muestran la transmisión de radiación directa al interior de la celda únicamente por el acristalamiento para la ciudad de Monterrey. Cabe destacar que los datos presentados en esta tercera metodología son específicos para el clima de la ciudad de Monterrey, teniendo que replicar la metodología para cualquier otro clima a evaluar por depender de la radiación directa y global presente en cada latitud.

Para el caso de Monterrey, en un día típico del mes más frío con una temperatura media mensual exterior de 15.1°C, los mayores aportes se presentan sobre la fachada sur. Para el día típico del mes más caliente, con temperaturas medias mensuales de 28.6°C, los mayores aportes totales netos se dan para la fachada este con una ligera diferencia con la fachada oeste, variando de acuerdo al recorrido solar diario la hora en la que se presenta el aporte máximo.

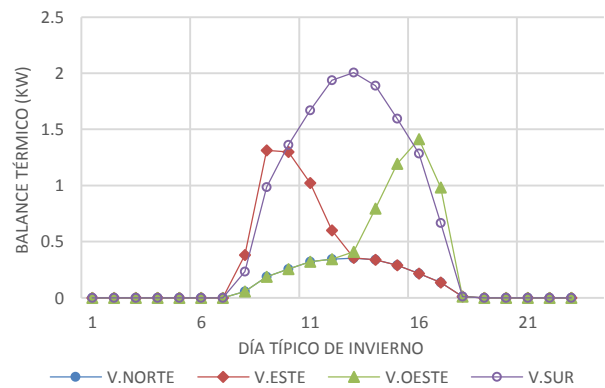


Figura 6: Aportaciones de radiación directa para día típico de mes más frío

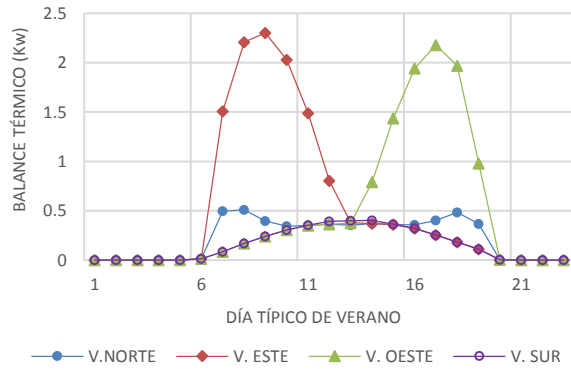


Figura 7: Aportaciones de radiación directa para día típico de mes más caliente

Dado que el clima de la ciudad de Monterrey presenta mayor número de horas al año en disconfort por sobrecalentamiento y puesto que los acristalamientos a evaluar no responden a estrategias mixtas para distintas estaciones a través del año, el estudio se enfocara en las orientaciones Este y Oeste para las posteriores evaluaciones sobre acristalamientos.

Discusión de resultados

Con el objetivo de contar con valores certeros sobre las aportaciones térmicas al interior de un espacio, por efecto del uso de los acristalamientos, se realizó una metodología de validación cronológica, para la evaluación de las características térmicas de la envolvente de una celda de referencia en un modelo de simulación con Energy Plus a través de su interface en Design Builder.

El estudio demuestra la necesidad de reconocer la magnitud y la cantidad de variables que inciden en un modelo de simulación dada la complejidad de los protocolos numéricos contenidos en los motores de cálculo de programas como Energy Plus. La confiabilidad en los resultados obtenidos de dichas simulaciones dependerá no solo de la capacidad de interpretación de los mismos sino de la comprensión de la incidencia de los datos que alimentan los cálculos y que inciden como variables en el caso de estudio necesarios para el desarrollo del experimento.

El desarrollo de las 3 metodologías elaboradas de lo general a lo particular, cuantifican parámetros básicos sobre el desempeño de una celda con dimensiones específicas de 3.60x5.50x2.80. En la prueba 1 se comprobó que las mayores aportaciones al interior de los espacios son debido a la cubierta alrededor de 7 veces más que por muros. Las ganancias por radiación directa por acristalamientos se mantienen constantes por ser una variable independiente de los elementos de la envolvente. Al retirar los aportes por cubierta los efectos al interior por muros se intensifican a un triple de su proporción original por lo que el efecto en la temperatura interior por la radiación proveniente de los acristalamientos incide de manera directa el desempeño interior de estos elementos.

A falta de los aportes por cubierta la temperatura operativa máxima al interior disminuye y la mínima aumenta, ambas en 1°C comparado con el caso base en el que todos los elementos interactúan. Al invertir la condición y permitir los aportes por cubierta y volver los muros adiabáticos la temperatura operativa máxima aumenta 7°C comparada con el caso base. Como sabemos la cubierta presenta más horas de insolación así como una mayor eficiencia por exponer una mayor área perpendicular a los rayos solares aportando calor de manera ascendente durante el día. La celda al presentar una geometría rectangular y orientar los muros con mayor área al oriente presentan aportes constantes durante la mañana y tarde. Así al evitar la interacción por muros de igual manera impedimos las pérdidas en la hora de mayores aportes por cubierta elevándose la temperatura al interior.

Por ello dentro del balance térmico de la celda el análisis y la correcta elección de las propiedades térmicas de los materiales de la envolvente, tanto para muros como cubiertas, evitando la menor cantidad de pérdidas y ganancias, establecerá resultados claros y predominantes por las ganancias debido a los acristalamientos siendo esto el objetivo principal de la celda de simulación.

Con ello como base se compararon 4 sistemas constructivos. El S.C.1, el más común en las construcciones en México, conformado por muro de tabique y losa de concreto, reflejo un alto porcentaje de ganancias a través de la cubierta minimizando las aportaciones directas por el acristalamiento y por muros. El S.C.2 y el S.C.4, conformado por muros y losa de concreto de mediana densidad (CMD) de 0.10m y de 0.20m de espesor respectivamente, disminuyo a la mitad las ganancias por cubierta. Sin embargo, con dicho efecto se semeja proporcionalmente a las ganancias producidas por los acristalamientos. En S.C.3. con EPS de 0.20 + CAD de 0.08 por sus propiedades aislantes, logro disminuir las ganancias por los elementos opacos por debajo de las ganancias por el acristalamiento. Por lo tanto se concluye que el S.C.3 es el que mejor representará los aportes por acristalamientos en el balance térmico total, al disminuir los efectos por el flujo de calor entre el ambiente exterior y el interior referente a los elementos opacos de la envolvente.

REFERENCIAS

- Barrios del Valle, et.al. , 2014. *herramienta de simulación numérica Ener-Habitat v2.2.0*. [En línea] Available at: <http://www.enerhabitat.unam.mx/Cie2/> [Último acceso: 24 Marzo 2014].
- CONAFOVI, 2006. *Uso eficiente de la energía en la vivienda*. Mexico D.F.: s.n.
- K. Tsikaloudaki, K. L. T. T. D., 49 (2012). Assessing cooling energy performance of windows for office buildings in the Mediterranean zone. *Energy and Buildings*, pp. 192-199.



Bibliografía

1. American Society of Heating, R. a.-C. (2005). *ASHRAE. Handbook of fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc.
2. Arredondo, J. M. (2014). Simulación Térmica de edificaciones con EnergyPlus y Ener-Habitat: análisis de la interacción entre los componentes de la envolvente. México D.F.: Tesis de Maestría. IER UNAM
3. Autodesk. (2016, 03 01). Software informes. Recuperado de <http://solartool.software.informer.com/>
4. Berkeley, L. N. (2016, 03 01). EnergyPlus engineering reference. Recuperado de [EnergyPlus:https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf](https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf)
5. Barrios G., Huelsz G (2011). Evaluación de sistemas constructivos de la envolvente en edificaciones con aire acondicionado intermitente. *Memorias de la XXXV Semana Nacional de Energía Solar*, ANES, Chihuahua, (págs. ABC-9).
6. Barrios G., Elías P., Huelsz G, Rojas J. (2010). Análisis de indicadores del desempeño térmico de la envolvente de una edificación no climatizada. *Memorias de la XXXIV Semana Nacional de Energía Solar*, ANES, Guanajuato, Gto (págs. ABC-065).
7. Barrios G., P. Elías, Huelsz G, Rojas J (2010). Selección de los materiales de muros y techos para mejorar el confort térmico en edificaciones no climatizadas. Estudios sobre arquitectura y urbanismo del desierto, VOL.III, número 3, 69-84.
8. Bojorguez G., Luna A., Gallegos R. (2005). Efecto en la carga térmica por tipo de vidrio en vivienda de construcción en serie. *Memorias de XXIX Semana Nacional de Energía Solar*, ANES, Tuxtla Gutiérrez Chiapas

9. CONAVI. (2006). Guía para el uso eficiente de la energía en la vivienda. México, D.F.: CONAFOVI. <http://www.conavi.gob.mx/publicaciones>
10. Correa A., Morillon D. (2005). Modelo para análisis térmico de la ventana para determinar el impacto de las variables de la misma en el confort en oficinas: caso ciudad de México. *Memorias de XXIX Semana Nacional de Energía Solar*, ANES, Tuxtla Gutiérrez Chiapas (pág. ERE 23).
11. DesignBuilder®. (2016, 03 01). Recuperado de: EnergyPlus: <http://www.designbuilder.co.uk/content/view/29/44/>
12. DesignBuilder®. (2016, 03 01). Glazing Components. Recuperado de: [http://www.designbuilder.co.uk/helpv4.2/#Glazing_Components.htm?High light=Glazing and window gas layers](http://www.designbuilder.co.uk/helpv4.2/#Glazing_Components.htm?High%20light=Glazing%20and%20window%20gas%20layers).
13. DOE. (2004). Energy.gov. Recuperado de <http://www.energy.gov/>
14. EERE, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. (2016, 03 01). EnergyPlus Energy Simulation Software. Recuperado de: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>
15. El-Deeb K. (2013). Combined effect of window-to-wall ratio and wall composition on energy consumption. Munich Germany. *Proceedings PLEA-29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future*, Munich, Germany.
16. Ener-Habitat_v2.2.0. (2016, 03 01). enerhabitat. Recuperado de: <http://www.enerhabitat.unam.mx/Cie2/>
17. F. Noh-Pat, J. Xamán, G. Álvarez, Y. Chávez, J. Arce. Thermal analysis for a double glazing unit with and without a solar control film (SnS-CuxS) for using in hot climates. *Energy and Buildings*, 43(2):704-712.
18. Gijón Rivera M., Álvarez G., Beausoleil-Morrison, Xamán J (2011). Appraisal of thermal performance of a glazed office with solar control coating: Cases in México and Canada. *Building and Environment*, 46(5)1223-1233.
19. Gijón Rivera M., Álvarez G., Beausoleil-Morrison, Xamán J. (2011). Appraisal of thermal performance of a glazed office with a solar control coating. *Building and Environment*(46), 1223-1233.
20. Givoni B., *Man, Climate and Architecture*. Londres: Applied Science Publishers, (pp. 174-224). U.K.: ELSEVIER (1969).

21. Givoni B., *Climate Considerations in Building and Urban Design*. New York, USA: Van Nostrand Reinhold, 1998.
22. Gobierno del Distrito Federal. *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. (2004).
23. Huelsz G., Barrios G., Rechtman R., Rojas J.. (2009). Importancia del análisis de transferencia de calor dependiente del tiempo en la evaluación del desempeño térmico de la envolvente de una edificación. En UAM-A, *Anuario de Arquitectura 2009, Universidad Autonoma Metropolitana*. Limusa.
24. J.L. Hensen, R. Lamberts, C.O.R. Negrao (2002). A view of energy and building performance simulation at the start of the 3rd millennium. *Energy and Buildings*, 34(9) 853-855.
25. K. Ismail, J. R. Henríquez. (2005). Two-dimensional model for the double glass naturally ventilated window. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 461-302.
26. K. Tsikaloudaki, K Laskos, Th. Theodosiou, D. Bikas (2012). Assessing cooling energy performance of windows for office buildings in the Mediterranean zone. *Energy and Buildings*, 49:192-199.
27. Maohui Lui, B. Cao, J. Damiens, B. Lin, Y. Zhu. (2014). Evaluating thermal comfort in mixed-mode buildings: A field study in subtropical climate. *Building and Environment*, 45-54.
28. Méndez-Pérez Irving, Gomez-Azpeitia G. (2015). Prontuario Solar de México. En G.-A. G. Tejeda Adalberto, *Prontuario Solar de México* (pág. 14). México: Universidad de Colima y Univerisdad Veracruzana.
29. Meteonorm_7.0. Sitio web (2016, 03 01). Recuperado de: <http://www.meteonorm.com/>
30. N. Mingottia, T. Chenvidyakarn, A.W. Woods (2013). Combined impacts of climate and wall insulation on the energy benefit of an extra layer of glazing in the facade. *Energy and Buildings*, 58, 237–249.
31. Obanye, I. (2006). Integrating Building Energy Simulation into the architectural design process. *Proceedings Built Enviromentment Education Annual Conference CARDIFF University*.

32. OECD. (Julio 2003). *Environmentally Sustainable Buildings: Challenges and Policies*. Obtenido de OECD Work on Sustainable Buildings: www.oecd
33. Pearson, C. (2000). *Manual del vidrio plano*. Argentina: Cámara del Vidrio Plano y sus Manufacturas.
34. PPG_Industries. (15 de 05 de 2015). *Glass: Aesthetic, Performance, and safety considerations*. Obtenido de PPG Education Center: http://educationcenter.ppg.com/glassttopics/top_design_considerations.aspx
35. Rubin, M. (1982) Solar optical properties of windows. *International Journal of Energy Research*, 6(2), 123–133.
36. Santamouris M., Asimakopoulos D.(1996). *Passive cooling of buildings*. UK: James and James Science Publishers.
37. Secretaria de Energía, SENER. Norma Oficial Mexicana. NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales. *Diario Oficial de la Federación*, México, 2012.
38. Secretaria de Energía, SENER, (2001). *Balance Nacional de Energía*. Recuperado de: http://www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2012/BNE_2011.pdf
39. Steinar G., Arild G. (2013). Windows in the buildings of tomorrow: Energy losers or energy gainers. *Energy and Buildings*, 61,185-192.
40. Szokolay S., Auliciems A. (2007). Thermal Comfort. *PLEA NOTES*, 45.
41. Szokolay, S.(2008). *Introduction to architectural science*. Londres: Aechitercural Press.
42. Szokolay S.,(2003). Estimation of SHGC for glass with exterior shading device through simulation. *20th PLEA conference*. Santiago, Chile.
43. SAINT-GOBAIN. (2016, 01 20). Recuperado de: Frequently Asked Questions: <http://uk.saint-gobain-glass.com/content/what-solar-factor>.
44. Todorovic, M. (12 (2012)). In research of holistic, sustainable and replicable model for complete energy refurbishment in historic buildings. *Conservation Science in Cultural Heritage: Historical Technical Journal*, 28-53.

45. Tudela F., (1982). Radiación solar y edificación. En F. Tudela, *Ecodiseño* (págs. 185-191). Mexico D.F.: UAM Xochimilco
46. Vitro. (2016.5, 05 15). Vitro vidrio arquitectónico. Recuperado de: <http://www.vitro.com/es/productos/vidrio-flotado/vidrio-arquitect%C3%B3nico-y-para-el-hogar>