



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE VIVIENDAS POR EFECTO INVERNADERO DEL VIDRIO EN VERANO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JOAQUÍN RODRIGO DÍAZ ANGUITA

PROFESOR GUÍA:
MIGUEL BUSTAMANTE SEPÚLVEDA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MATÍAS YACHAN VERA
DAVID CAMPUSANO BROWN

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR

AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil

POR: Joaquín Rodrigo Díaz Anguita

FECHA: 02/08/2017

PROFESOR GUÍA: Miguel Bustamante Sepúlveda

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE VIVIENDAS POR EFECTO INVERNADERO DEL VIDRIO EN VERANO

En la Región Metropolitana es común encontrar hogares y edificios de uso público que sufren de elevadas temperaturas interiores en verano, causando malestar en las personas que los habitan. Este fenómeno, denominado sobrecalentamiento, es originado principalmente por el uso desmedido del vidrio, mala ventilación, despreocupación por la orientación de las fachadas y en general, por diseños arquitectónicos deficientes respecto al confort térmico.

El objetivo de este trabajo es generar recomendaciones y buscar alternativas que logren disminuir o evitar el sobrecalentamiento en los hogares de la Región Metropolitana. Para ello, se estudió la reglamentación térmica nacional y se modeló el comportamiento térmico de un dormitorio en un departamento ubicado en la ciudad de Santiago. Además, se verificó el nivel de satisfacción actual de los usuarios con sus hogares mediante una encuesta realizada a 180 personas.

Para la modelación, se desarrollaron distintos casos modificando la transmitancia térmica del muro y del vidrio, la orientación del dormitorio y el tamaño de la ventana, obteniéndose la temperatura interior del recinto con el fin de encontrar la superficie óptima de ventana para mantener el confort. Además, se comparan los modelos incorporando dos técnicas de acondicionamiento pasivo: ventilación nocturna y protecciones solares.

Con los estudios y modelos se pudo concluir que la reglamentación térmica nacional es deficiente para las condiciones existentes en verano. Esto porque permite grandes extensiones de vidrio en las fachadas cuando se usa doble vidriado hermético (DVH), elevando las ganancias producto de la radiación solar y disminuyendo las pérdidas por la superficie vidriada. Por este motivo, se produce un incremento del efecto invernadero del vidrio, lo que genera un aumento excesivo de la temperatura al interior de los recintos en verano.

Además, se pudo concluir que la aplicación conjunta de la ventilación nocturna con protección solar es necesaria para alcanzar el confort térmico al interior de los hogares, manteniendo una superficie adecuada de vidrio en las fachadas, cercanas al 25% por orientación, lo que no requiere de una gran inversión. Si no son consideradas estas técnicas, la superficie vidriada no debería superar el 20%, en el mejor de los casos, para mantener condiciones de confort mínimas al interior del hogar, lo que lo hace impracticable arquitectónicamente.

Tabla de contenido

1	Introducción	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo General	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Confort térmico	3
1.3.1	Temperatura del aire	3
1.3.2	Temperatura de radiación de los elementos circundantes	3
1.3.3	Velocidad del aire.....	4
1.3.4	Humedad.....	4
1.3.5	Factores secundarios: Vestimenta, Actividad y Metabolismo	5
1.4	Confort térmico adaptativo.....	6
1.4.1	Teoría adaptativa	7
2	Marco Teórico.....	11
2.1	Transferencia de calor	11
2.2	Conductividad térmica de los materiales (λ).....	12
2.3	Resistencia térmica (R)	12
2.4	Transmitancia térmica	13
2.5	Efecto invernadero del vidrio	13
2.6	Inercia térmica.....	15
3	Comportamiento térmico de la vivienda	17
3.1	Clima	18
3.2	Flujo térmico a través de la envolvente.....	18
3.3	Intercambio de aire entre interior y exterior	19
3.4	Ganancias por soleamiento a través de las ventanas	20
3.5	Ganancias internas.....	24
4	El Sobrecalentamiento	25
4.1	Reglamentación térmica	26
4.1.1	Nacional.....	26
4.1.2	Extranjera.....	29
4.1.3	Discusión.....	32
4.2	Encuesta	33
5	Modelamiento Térmico	35

5.1	Descripción del modelo	35
5.2	Descripción de las cargas	36
5.3	Presentación y Análisis de Resultados	37
6	Aplicación de técnicas de acondicionamiento pasivo	45
6.1	Ventilación Nocturna (VN)	46
6.1.1	Modelación.....	48
6.2	Protección Solar (PS).....	55
6.2.1	Estandarización de la protección solar	56
6.2.2	Ejemplo en la Región Metropolitana	58
6.2.3	Modelación.....	59
6.3	Ventilación Nocturna y Protección Solar	64
6.3.1	Modelación.....	64
7	Conclusiones	69
	Bibliografía.....	73
	Anexo A.....	76
	Anexo B.....	85
	Anexo C.....	103
	Anexo D	133
	Anexo E.....	137

Índice de Gráficos

Gráfico 4-1: Porcentaje máximo de vidrio para Zona Térmica D. Fuente: NTM 01 1/2.	29
Gráfico 5-1: Temperatura exterior para un día típico de enero.	36
Gráfico 5-2: Temperatura interior del dormitorio, orientación norte, $U_{muro}=1,9$; $U_{vent}=5,8$	37
Gráfico 5-3: Caso 15% de superficie vidriada.	39
Gráfico 5-4: Caso 25% de superficie vidriada.	39
Gráfico 5-5: Caso 60% de superficie vidriada.	39
Gráfico 5-6: Área máxima de ventana por orientación para tener temperatura de confort, con $U_{muro}=1,9$	40
Gráfico 5-7: Área máxima de ventana por orientación para tener temperatura de confort, con $U_{muro}=0,8$	40
Gráfico 5-8: Área máxima de ventana por orientación para tener temperatura de confort, con $U_{muro}=0,0$	41
Gráfico 5-9: Horas de Disconfort en el dormitorio.	43
Gráfico 6-1: Horario Ventilación Nocturna.	49
Gráfico 6-2: Temperatura interior del dormitorio con $U_{muro}=1,9$; con o sin ventilación nocturna.	49
Gráfico 6-3: Temperatura interior del dormitorio con $U_{muro}=0,8$; con o sin ventilación nocturna.	50
Gráfico 6-4: Temperatura interior del dormitorio con $U_{muro}=0,0$; con o sin ventilación nocturna.	50
Gráfico 6-5: Área máxima de ventana por orientación para tener temperatura de confort, con $U_{muro}=1,9$ con VN.	51
Gráfico 6-6: Área máxima de ventana por orientación para tener temperatura de confort, con $U_{muro}=0,8$ con VN.	51
Gráfico 6-7: Área máxima de ventana por orientación para tener temperatura de confort, con $U_{muro}=0,0$ con VN.	52
Gráfico 6-8: Comparación de Ventilación Nocturna para $U_{muro}=1,9$	53
Gráfico 6-9: Comparación de Ventilación Nocturna para $U_{muro}=0,8$	53
Gráfico 6-10: Comparación de Ventilación Nocturna para $U_{muro}=0,0$	53
Gráfico 6-11: Temperatura interior del dormitorio con $U_{vent}=5,8$ para distintas PS.	60
Gráfico 6-12: Temperatura interior del dormitorio con $U_{vent}=3,6$ para distintas PS.	61
Gráfico 6-13: Área máxima de ventana para orientación oriente-poniente para tener temperatura de confort, con $U_{muro}=0,8$ con PS.	62
Gráfico 6-14: Comparación de protección solar para orientación oriente-poniente y $U_{muro}=0,8$	63
Gráfico 6-15: Temperatura interior del dormitorio para el caso base, con ventilación nocturna, protección solar y ambas juntas.	65
Gráfico 6-16: Área máxima de ventana oriente-poniente para tener temperatura de confort, con $U_{muro}=0,8$ y VN+PS.	66
Gráfico 6-17: Comparación del caso base con VN, PS y VN+PS, para $U_{muro}=0,8$ y orientación oriente-poniente.	67

Índice de Ilustraciones

<i>Ilustración 1-1: Zona de confort para edificios ventilados mecánicamente. Fuente: ASHRAE Standard 2010</i>	6
<i>Ilustración 1-2: Esquema de funcionamiento del proceso adaptativo, Fuente: Godoy (2012)</i>	8
<i>Ilustración 1-3: Regresión lineal que relaciona temperatura de confort y temperatura media exterior según PMV (modelo de balance térmico de Fanger) y adaptativo. A la izquierda, edificios con climatización centralizada. A la derecha, edificios con ventilación natural. Fuente: Godoy, 2012</i>	9
<i>Ilustración 2-1: Mecanismos de Transferencia de Calor. Fuente: Manual de (Re) acondicionamiento térmico (CChC).</i>	11
<i>Ilustración 2-2: Espectro electromagnético que relaciona la temperatura y la longitud de onda. Fuente: Córdova, 2011.</i>	14
<i>Ilustración 2-3: Efecto invernadero del vidrio. Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social.</i>	14
<i>Ilustración 2-4: Efecto de la inercia térmica considerando un retardo ideal y un amortiguamiento severo de la onda. Fuente: Burgos, 2008.</i>	16
<i>Ilustración 3-1: Desempeño relativo de la producción de un oficinista versus la desviación a la temperatura de confort. Fuente: ASHRAE Standard 55.</i>	17
<i>Ilustración 3-2: Carta de trayectoria solar para Santiago. Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética de la Vivienda Social.</i>	21
<i>Ilustración 3-3: Gráfica de distribución solar. Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética de la Vivienda Social.</i>	22
<i>Ilustración 3-4: Niveles promedio de radiación solar en diferentes horas y épocas del año. Fuente: Sistema de calificación energética de vivienda.</i>	22
<i>Ilustración 3-5: Dimensionamiento de alero fijo en orientación norte. Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética de la Vivienda Social.</i>	23
<i>Ilustración 4-1: Rangos de temperatura operativa para edificios ventilados naturalmente. Fuente: ASHRAE Standard 55.</i>	31
<i>Ilustración 4-2: Desempeño general del hogar en verano.</i>	34
<i>Ilustración 6-1: Tipos de ventilación natural. Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética de la Vivienda Social.</i>	46
<i>Ilustración 6-2: Curva de temperatura interior con o sin ventilación nocturna. Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética de la Vivienda Social.</i>	47
<i>Ilustración 6-3: Elementos de protección solar. A la izquierda, un alero; a la derecha, una celosía vertical. Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética de la Vivienda Social.</i>	55
<i>Ilustración 6-4: Alero de 50 [cm] en madera y celosía de aluminio.</i>	56
<i>Ilustración 6-5: Factor solar de diferentes vidrios. Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética de la Vivienda Social.</i>	57
<i>Ilustración 6-6: Factor Solar Modificado, Factor Solar y Factor de Sombra. Fuente: Jara, 2013.</i>	58
<i>Ilustración 6-7: Edificio Consorcio, Santiago, en el año 1993 (izq) y 2007 (der), en distintas estaciones. Fuente: www.arqa.com</i>	59

Índice de Tablas

<i>Tabla 3-1: Transmitancia térmica calculados mediante NCh853</i>	19
<i>Tabla 3-2: Renovaciones de aire por hora para diferentes lugares. Fuente: Manual de Aislación térmica exterior (CChC)</i>	20
<i>Tabla 3-3: Tasa metabólica para actividades del hogar. Fuente: ASHRAE Standard 55</i>	24
<i>Tabla 4-1: Transmitancia térmica máxima y resistencia térmica mínima para complejos de techumbre, muros perimetrales y pisos inferiores ventilados, según zona térmica. Fuente: OGUC 2016.</i>	27
<i>Tabla 4-2: Porcentaje máximo de superficie vidriada respecto a superficie de paramentos verticales de la envolvente. Fuente: OGUC 2016.</i>	28
<i>Tabla 4-3: Transmitancia térmica “U” máxima y resistencia térmica “Rt” mínima para complejo de techumbre, muro, piso ventilado y puerta opaca en edificios de uso residencial, educación y salud, para zona térmica D. Fuente: NTM 011/2.</i>	28
<i>Tabla 5-1: Tabla resumen de superficie máxima de ventana para alcanzar la condición de confort.</i>	41
<i>Tabla 5-2: Superficie máxima de vidrio según normativa OGUC 2016 y NTM 11.</i>	43
<i>Tabla 5-3: Resumen de Horas de Disconfort para los requisitos de la norma OGUC 2016 y NTM11.</i>	44
<i>Tabla 6-1: Tabla resumen de superficie máxima de ventana para alcanzar la condición de confort con ventilación nocturna.</i>	52
<i>Tabla 6-2: Resumen de Horas de Disconfort para los requisitos de la norma OGUC 2016 y NTM 11, con Ventilación Nocturna.</i>	54
<i>Tabla 6-3: Tabla resumen de superficie máxima de ventana para alcanzar la condición de confort con protección solar.</i>	62
<i>Tabla 6-4: Resumen de Horas de Disconfort para los requisitos de la norma OGUC 2016 y NTM 11, con Protección Solar.</i>	64
<i>Tabla 6-5: Tabla resumen de superficie máxima de ventana para alcanzar la condición de confort con ventilación nocturna y protección solar.</i>	66
<i>Tabla 6-6: Resumen de Horas de Disconfort para los requisitos de la norma OGUC 2016 y NTM 11, con Ventilación Nocturna y Protección Solar.</i>	68

1 Introducción

1.1 Motivación

En la actualidad, donde el problema energético es inminente, se hace necesaria la búsqueda de alternativas que sean eficientes y logren reducir el consumo energético en los diferentes sectores del país. El balance nacional energético publicado por la CNE para el año 2015 estima que un 21% del consumo de energía eléctrica en Chile se debe al sector residencial, público y comercial, por lo que un cambio en el sector causaría un gran impacto, colaborando con el medio ambiente.

Uno de los problemas que conlleva un aumento en el consumo energético es el uso de aire acondicionado debido a las altas temperaturas que alcanzan los edificios de uso público y también las viviendas, que pueden ser superiores a los límites considerados como confortables para los usuarios. Esto genera que existan zonas inhabitables en los edificios, produciendo una baja en el confort térmico.

Este aumento de la temperatura en los edificios en verano es originado principalmente por los siguientes factores: uso indiscriminado del vidrio, mala ventilación, despreocupación de la orientación solar de los edificios, falta de aleros y en general una baja conciencia en un diseño eficiente, los cuales privilegian factores estéticos y de costos por sobre el confort térmico y el ahorro de energía.

Puppo, en su libro “Sol y Diseño: Índice térmico relativo” publicado por primera vez el año 1976, ya advertía sobre este problema indicando que “si el acondicionamiento lumínico sigue al ritmo de la nueva arquitectura, en algún momento el acondicionamiento acústico y el térmico serán relegados al olvido.”

A raíz de lo anterior surge la necesidad de estudiar los fenómenos mencionados, analizando la normativa y reglamentación térmica existente para proponer soluciones que contribuyan a generar confort térmico y disminuir el consumo energético en el país.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Estudiar el comportamiento térmico de viviendas y edificios habitacionales en verano, de material sólido tales como, hormigón armado o albañilería, ubicados en la Región Metropolitana.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudiar los distintos factores que influyen en el comportamiento térmico de las viviendas. En específico, estudiar cómo incide el efecto invernadero del vidrio, la ventilación, la orientación y el diseño en construcciones habitacionales.
- Estudiar la normativa técnica nacional y extranjera, relacionada con el campo de la Física de la Construcción.
- Estudiar la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones en lo referente a los porcentajes de vidrio permitidos para viviendas y su impacto en verano.
- Verificar el nivel de satisfacción actual sobre confort térmico de las personas en una serie de viviendas y edificios de la Región Metropolitana, en verano.
- Modelar el comportamiento del dormitorio de un departamento variando el tamaño de sus ventanas, ubicado en la Región Metropolitana.
- Proponer soluciones constructivas, si corresponde.

1.3 Confort térmico

La ASHRAE define el confort térmico como la condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico. Es decir, la sensación de comodidad y bienestar de los usuarios de una vivienda. Esta percepción depende del intercambio térmico entre las personas y el entorno, y varía principalmente por 6 factores: la temperatura del aire, temperatura de radiación de los elementos circundantes, velocidad del aire, humedad, tasa metabólica y vestimenta.

La interacción entre las personas y el entorno se debe a que el cuerpo humano, debido a su sistema termorregulador, mantiene temperaturas entre los 36° C y 37° C, lo que produce constantes pérdidas de calor con el ambiente. El metabolismo, a través del consumo de alimentos, compensa estas pérdidas y las asociadas a la actividad física. Cuando el intercambio de calor se produce a una velocidad constante y adecuada se alcanza sensación de confort, en cambio, si se dificulta la pérdida se entra en un estado de insatisfacción. Si se pierde calor aceleradamente, el organismo comienza a gastar más energía, proceso lento y costo, sintiendo frío. Por otro lado, si la pérdida es de manera lenta, el cuerpo transpira, y a medida que se evapora el sudor, libera energía, equilibrando la situación.

En conclusión, es una tarea compleja lograr siempre el confort térmico debido a la cantidad de factores que afectan. A continuación, se explican los factores más importantes:

1.3.1 Temperatura del aire

La temperatura del aire, denominada técnicamente como temperatura de bulbo seco, es la temperatura promedio del aire que rodea a un individuo. Se mide con un termómetro de mercurio seco.

El intercambio de energía con el cuerpo es producto de la convección, donde, dependiendo del gradiente térmico, cede o absorbe energía. Si la temperatura del aire es mayor, cederá calor al cuerpo, mientras que, si es menor, absorberá calor. Con esta información es insuficiente conocer la sensación térmica de las personas, por lo que se debe combinar con la temperatura de radiación, la velocidad del aire y la humedad para obtener la temperatura efectiva. Para condiciones estáticas se considera que se alcanza confort térmico para temperaturas de $21 \pm 3^\circ \text{C}$.

1.3.2 Temperatura de radiación de los elementos circundantes

Los objetos y cerramientos de un entorno emiten o absorben radiación electromagnética debido a su temperatura, causando transferencias de calor al contacto con la piel. El traspaso depende de la diferencia térmica entre el cuerpo humano y el objeto. Si el elemento tiene una temperatura superior a la del cuerpo, éste se calentará. Por el contrario, si es menor, el cuerpo se enfriará al emitir radiación hacia el objeto.

Este fenómeno se mide a través de la temperatura radiante media, que representa el calor emitido en forma de radiación por los muros y objetos del entorno, y queda descrita como el promedio de las temperaturas superficiales del lugar.

Los elementos expuestos al sol aumentarán su temperatura, produciendo un incremento en la radiación emitida. Por otro lado, los sistemas de iluminación también contribuyen con este fenómeno. Los casos anteriores se vuelven relevantes para cerramientos con cierto grado de exposición solar y escasa ventilación, donde se pueden alcanzar temperaturas elevadas.

1.3.3 Velocidad del aire

La influencia del movimiento del aire en la sensación térmica se debe a las diferencias en la cantidad de calor intercambiada por convección y al aumento en la eficiencia de la evaporación del sudor. En lugares calurosos, un aumento en su velocidad será beneficioso para alcanzar el confort térmico, producto de una disminución en la sensación de la temperatura ambiental.

En condiciones normales y considerando la temperatura ambiente inferior a la de la piel, una corriente de hasta 1 [m/s] puede ser agradable y beneficiosa. Si la temperatura supera este límite, el aire que circula calentará la piel por convección, lo que se contrapone con el efecto de enfriamiento por evaporación. En cambio, si la velocidad del aire es superior, se genera malestar debido al exceso de corriente en el lugar. Por otro lado, se considera que la velocidad del aire no puede ser inferior a 0,2 [m/s] ya que puede generar malestar debido a la sensación de estancamiento en el ambiente.

Los límites que se proponen en ANSI/ASHRAE Standard 55 corresponden a la situación en que las personas no tienen control local de la velocidad del aire en el recinto, y varían según la temperatura de operación del recinto. Los límites establecidos son:

- Para temperaturas por sobre los 25,5° C, se permiten velocidades de hasta 0,8 [m/s], para poder realizar actividades de oficina sin problemas.
- Para temperaturas inferiores a los 22,5° C, la velocidad del aire no debe ser menor a los 0,15 [m/s].
- Para temperaturas entre los 22,5 y 25,5° C, se permiten velocidades que van desde los 0,2 [m/s] a los 0,8 [m/s].

1.3.4 Humedad

La humedad se puede medir a través de la Humedad Relativa (HR), que es la relación entre la cantidad de vapor de agua contenido en el aire y la máxima cantidad de vapor de agua que el aire podría contener (aire saturado), a igual temperatura. Se expresa porcentualmente.

Este factor es relevante en la sensación de confort debido a que determina la eficiencia en el intercambio térmico entre el cuerpo humano y el ambiente, a través de la evaporación del sudor. A modo comparativo, se observa que, en lugares calurosos el tiempo que demora en evaporarse el agua de un vaso en un ambiente seco (baja humedad relativa), es menor que en un ambiente húmedo (alta humedad relativa), debido a que el primer caso tiene mayor capacidad de absorción de agua. Así mismo, la capacidad de evaporar el sudor en lugares calurosos con ambientes secos es más eficiente que en lugares húmedos. Este fenómeno se logra apreciar en climas tropicales, donde las temperaturas son altas y suelen tener elevados niveles de humedad, dificultando la evaporación del sudor, lo que trae consigo altos niveles de incomodidad con el ambiente.

Los niveles aceptables de HR oscilan entre los 30% y 70%, lo que posiciona a Santiago dentro los rangos aceptables la mayor parte del año.

1.3.5 Factores secundarios: Vestimenta, Actividad y Metabolismo

Como se mencionó anteriormente, la vestimenta, la actividad y el metabolismo también influyen en la sensación térmica, producto de que alteran el intercambio térmico del cuerpo con el ambiente. En el caso de la vestimenta, ésta disminuye el intercambio por convección debido a que protege del movimiento del aire alrededor de la persona. Su unidad de medida es clo y se relaciona con el nivel de aislación que provee la ropa. Justamente, este es el motivo por el cual en verano se eligen ropas ligeras ($\approx 0,5$ clo), y en invierno se escoge ropa más gruesa (≈ 1 clo). La influencia de la actividad y el metabolismo tiene que ver con la cantidad de energía que genera el cuerpo, y se mide a través de la unidad met, donde 1 met equivale a $55 \text{ [W/m}^2\text{]}$ de piel, correspondiente a la actividad metabólica de un adulto sedentario promedio (área= $1,8 \text{ [m}^2\text{]}$). Según el tipo de actividad que se realiza y la comida que se ingiere el cuerpo generará más calor. Por ejemplo, sentado se genera 1 met, mientras que cargando un objeto se genera 2.1 met, según la estandarización propuesta por ASHRAE. Del mismo modo, si consumimos alimentos con alto nivel calórico, se generará más energía.

En base a todos los factores mencionados anteriormente, ASHRAE propone un ábaco que combina la temperatura de operación y humedad relativa, considerando niveles de ropa ligeros y gruesos, para velocidades de aire de $0,2 \text{ [m/s]}$.

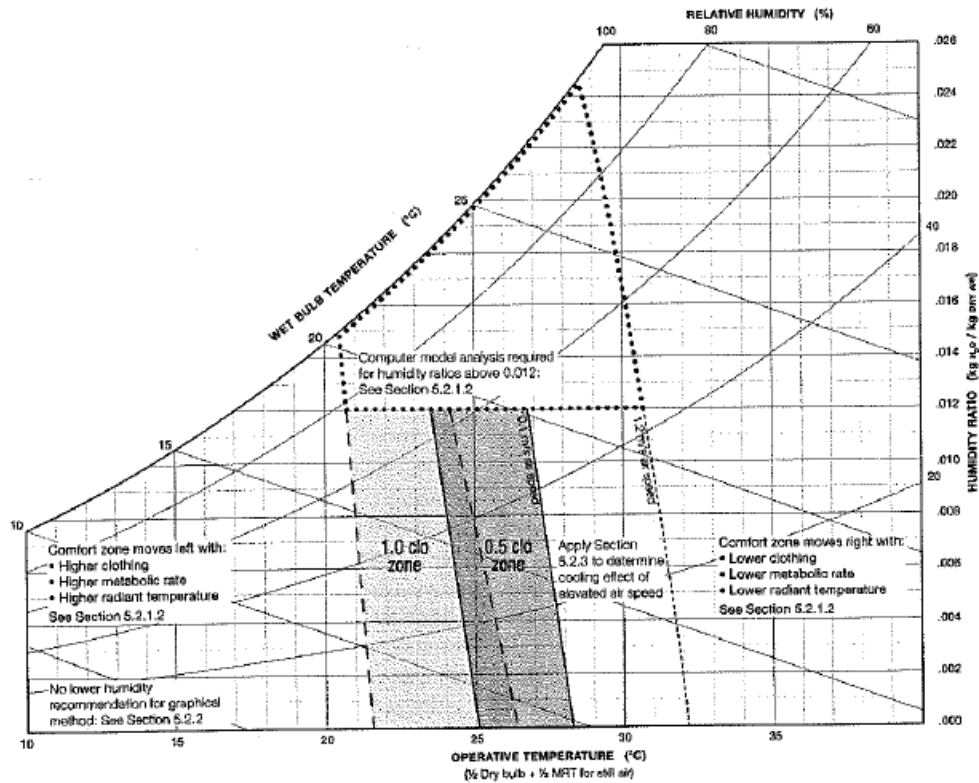


Ilustración 1-1: Zona de confort para edificios ventilados mecánicamente. Fuente: ASHRAE Standard 2010

1.4 Confort térmico adaptativo

En base al trabajo realizado por Godoy (Godoy, 2012), se estudia el origen y motivo de las dos teorías actuales relacionadas al confort térmico: La teoría del balance térmico, que se fundamenta en base a estudios con cámaras climáticas; y la teoría adaptativa, que se fundamenta en base a estudios de campo.

La primera teoría surge a partir de una serie de experimentos desarrollados por Fanger, los que consistían principalmente en encontrar el rango de temperaturas en las que un grupo de jóvenes, situados en cámaras térmicas, no sentían ni frío ni calor. Para ello, usó modelos estáticos de transferencia de calor, incorporando los 6 factores que influyen en el confort. A partir de los experimentos, elabora el modelo de balance térmico para poder predecir las condiciones necesarias para que los ocupantes sientan neutralidad térmica.

A pesar de que el modelo fue desarrollado inicialmente para edificios climatizados y controlados mecánicamente, ha sido el pilar de la mayoría de los estándares de confort actuales, como lo es ASHRAE Standard 55, los que consideran todo tipo de edificios. Sin embargo, al ser un modelo estacionario, no considera la respuesta de las personas a las variaciones de temperatura, vestimenta y actividad durante el día, siendo aplicable exclusivamente a periodos prolongados en condiciones constantes.

A raíz de lo anterior, se desarrollan diversos estudios que demuestran discrepancias entre los resultados obtenidos a partir de la teoría del balance térmico, y aquellos realizados *in situ*. Estas diferencias pueden generarse por distintos motivos, como lo son el contexto, la influencia a la adaptación, o experiencias pasadas, en resumen, a la realidad social y cultural de la persona. Así, surge la necesidad de estudiar la respuesta de los ocupantes en edificios ventilados naturalmente, donde las condiciones son mucho más variables, lo que da origen a la teoría del confort térmico adaptativo.

1.4.1 Teoría adaptativa

El confort adaptativo tiene por objetivo analizar la real aceptabilidad del ambiente térmico para los usuarios, lo que depende del contexto, el comportamiento de los ocupantes y sus expectativas. La adaptación térmica podría definirse como “una disminución gradual de la respuesta del organismo a una estimulación repetida del ambiente” (Godoy, 2012).

Una de las hipótesis más importantes del modelo adaptativo es que se deja de considerar al ocupante como un objeto que intercambia energía con el ambiente de manera pasiva. Ahora, se considera como un ser que actúa de manera activa en todos los procesos de interacción con el ambiente, a través de una constante retroalimentación. A partir de esto, se identifican 3 componente de adaptación:

- El ajuste por comportamiento, que considera actividades y acciones inmediatas, como regular el uso de ropa y el sistema de climatización, entre otras.
- La aclimatación (fisiológica), que considera los cambios en la respuesta psicológica de la persona debido a una exposición prolongada a un cierto clima.
- El acostumbramiento (psicológico), que considera los cambios en la percepción y la posterior reacción a la información sensorial debido a las experiencias pasadas y las expectativas.

Djongyang, el año 2010, elaboró el siguiente esquema que muestra cómo funciona el proceso de adaptación del ambiente al interior de un edificio.

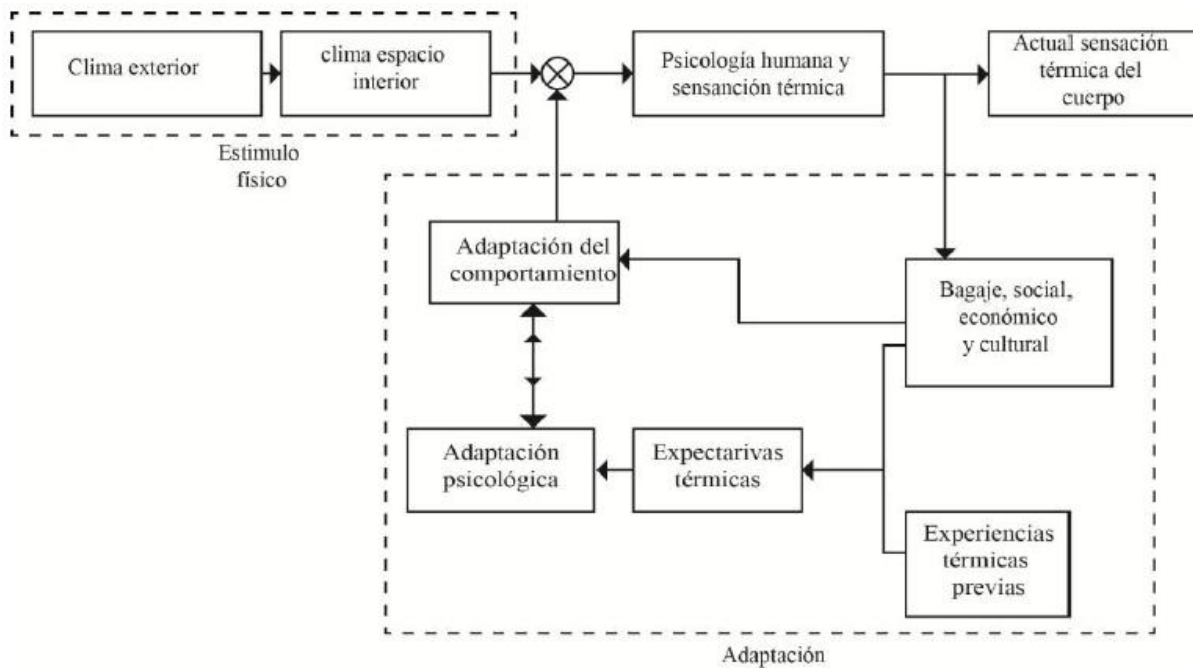


Ilustración 1-2: Esquema de funcionamiento del proceso adaptativo, Fuente: Godoy (2012)

De Dear y Brager desarrollaron uno de los proyectos más importantes respecto a la teoría adaptativa, bajo el nombre de ASHRAE RP-884, el año 1995. En éste se recogió alrededor de 21.000 muestras de experiencias de confort, de 160 edificios de oficina diferentes, en 4 continentes distintos, considerando distintos climas.

Los datos recogidos contenían un extenso cuestionario térmico, que consideraba vestimenta y estimaciones metabólicas de los ocupantes, medidas del clima interior, distintos índices térmicos y datos sobre la meteorología exterior. Además, se clasificaron los datos según el sistema de climatización del edificio, separando aquellos que se ventilaban naturalmente, de aquellos que tenían un sistema HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioned según sus siglas en inglés). Una de las distinciones que se hizo frente a esto, era que en los edificios con ventilación natural los usuarios tenían control de la ventilación a través de las ventanas.

En base a toda la información contenida, se realizó un análisis estadístico, comparando los edificios con ventilación natural frente a los con sistemas de climatización. De esa forma, se obtuvo una regresión lineal que relaciona la temperatura exterior y la temperatura media exterior, para cada caso, y se comparó con los resultados de los modelos de balance térmico.

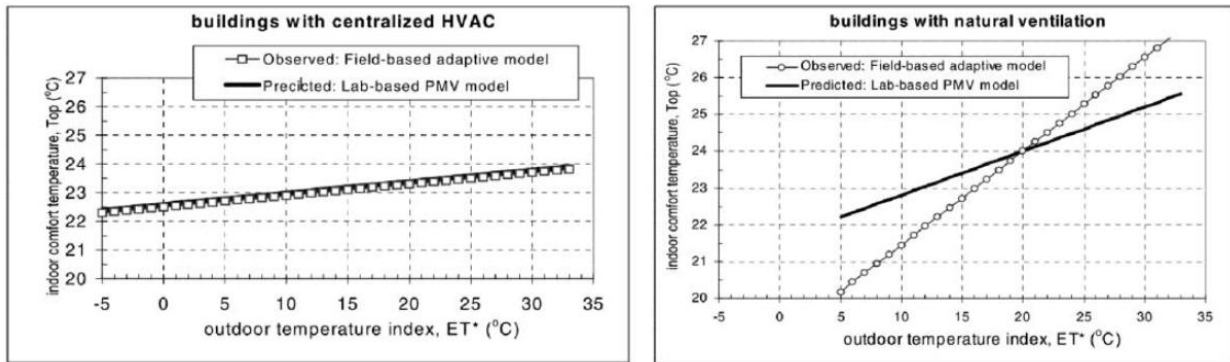


Ilustración 1-3: Regresión lineal que relaciona temperatura de confort y temperatura media exterior según PMV (modelo de balance térmico de Fanger) y adaptativo. A la izquierda, edificios con climatización centralizada. A la derecha, edificios con ventilación natural. Fuente: Godoy, 2012

Una conclusión importante que obtuvo De Dear fue que a medida que aumenta la temperatura exterior, aumenta la temperatura de neutralidad. Pero en el caso de los edificios ventilados naturalmente, se observa que los ocupantes toleran de mayor forma las altas temperaturas, lo que se podría explicar por el nivel de vestimenta de los usuarios, y por un proceso de adaptación psicológica derivado del nivel de expectativas. Con respecto a la comparación entre métodos, se concluyó que el modelo de Fanger era muy preciso prediciendo la temperatura de confort en edificios climatizados. Por otro lado, en los edificios con ventilación natural presenta gran diferencia. Los autores afirman que, en el caso de los edificios con ventilación natural, las temperaturas de confort son distintas debido a que cambian las expectativas térmicas de los usuarios, producto del control que tienen en el ambiente, y a las distintas experiencias térmicas de los ocupantes en el edificio.

Finalmente, en base a los resultados obtenidos, se logró la implantación del modelo adaptativo en ASHRAE Standard 55. La expresión lineal para obtener la temperatura de confort es:

$$T_{comf} = 0,31 \cdot T_{a,out} + 17,8$$

Donde:

T_{comf} : Corresponde a la temperatura de confort al interior del recinto

$T_{a,out}$: Corresponde a la temperatura en el exterior.

Posteriormente, se continuaron haciendo estudios para encontrar los rangos en que los ocupantes seguían sintiendo satisfacción con el ambiente. Así, se obtuvo que para tener un 90% de satisfacción, los rangos debían oscilar entre $\pm 5^\circ \text{C}$, y $\pm 7^\circ \text{C}$ para obtener 80% de satisfechos.

En base a esta metodología, se logra calcular la temperatura máxima de confort en Santiago para enero, dato que será utilizando posteriormente. La temperatura equivale a $26,6^\circ \text{C}$, para un porcentaje de satisfacción superior al 90%. Esta temperatura podría considerarse excesiva debido a que no se nota una gran diferencia térmica al venir del

exterior, pero tiempo después se siente comodidad. Se debe tener en cuenta que en verano las personas no cuentan con abrigo, por lo que temperaturas más bajas podrían causar frío.

2 Marco Teórico

En el siguiente capítulo se estudian los distintos fenómenos asociados al campo de la Física de la Construcción necesarios para comprender el presente trabajo de título.

2.1 Transferencia de calor

La transferencia de calor es el proceso de propagación de energía térmica en distintos medios, o a través de diferentes cuerpos. Este traspaso se genera siempre que exista una diferencia de temperatura entre los sistemas en interacción, hasta alcanzar el equilibrio térmico. El flujo de calor siempre va desde la región con temperaturas más altas hasta otro con temperaturas más bajas, y se puede generar a través de 3 mecanismos: conducción, convección y radiación.

La conducción se genera cuando entran en contacto dos medios sólidos con un gradiente de temperatura, generándose un flujo de calor debido al contacto y la vibración de las partículas en interacción. La convección ocurre cuando se produce flujo de calor por medio de corrientes dentro de un fluido (en estado líquido o gas). Por último, la radiación es el mecanismo de transferencia a través de ondas electromagnéticas, donde no es necesario un medio para que ocurra.

La conducción, convección y radiación influyen directamente en el confort térmico de las personas al ser los mecanismos por los que interactúa con el ambiente.

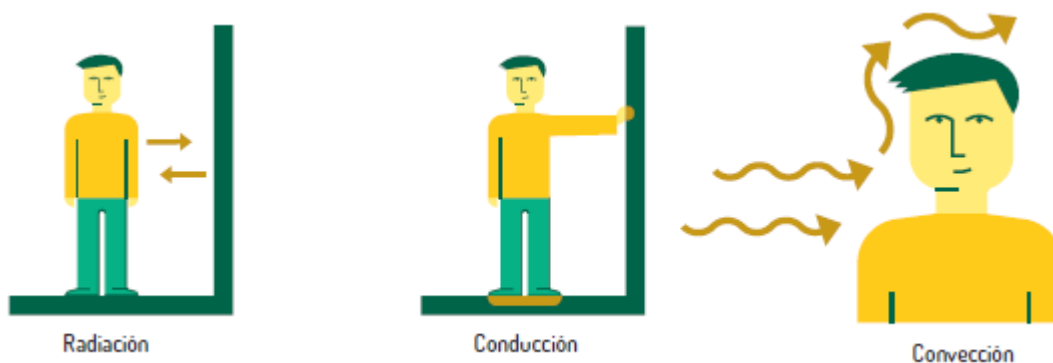


Ilustración 2-1: Mecanismos de Transferencia de Calor. Fuente: Manual de (Re)condicionamiento térmico (CChC).

En el caso de la envolvente de un edificio, en especial de los muros, el mecanismo que más influye en el comportamiento térmico es la conducción, ya que al aislar se impide la transmisión de calor desde el exterior hacia el interior, en verano, y desde el interior hacia el exterior en invierno, por lo que es necesario investigar ciertas propiedades de los materiales que lo componen.

2.2 Conductividad térmica de los materiales (λ)

La conductividad térmica es la propiedad intrínseca del material que expresa su capacidad para conducir calor a través del mismo, desde el lado de mayor temperatura, al de menor. Se define como la cantidad de calor que pasa a través del material para un tiempo, diferencia de temperatura y volumen unitario, considerando caras paralelas. Se expresa en $[W/(m K)]$. Bajo un flujo térmico constante, se puede expresar como:

$$\lambda = \frac{\Phi \cdot e}{S \cdot \Delta t}$$

Donde:

Φ es el flujo térmico

e es el espesor

S es la superficie

Δt es la diferencia de temperatura entre sus caras.

Esta propiedad puede verse afectada por la densidad media del material, la temperatura de trabajo, y el contenido de humedad, entre otros. Los elementos con una baja conductividad térmica se consideran aislantes, y por lo general, tienen una baja densidad. El vidrio tiene un valor característico de $\lambda = 1,2 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$.

2.3 Resistencia térmica (R)

La resistencia térmica es la capacidad de un material para oponerse al flujo de calor que pasa a través del mismo. Se expresa en $[W/(m^2 K)]$. Si el material es homogéneo, queda expresada a partir del espesor y la conductividad térmica de la siguiente forma:

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Si se desea calcular la resistencia térmica de una solución constructiva, expuesta a condiciones reales, se define la resistencia térmica total de la siguiente forma:

$$R_t = R_{si} + \sum \frac{e}{\lambda} + R_a + R_{se}$$

Donde:

R_{si} es la resistencia térmica superficial interior

R_{se} es la resistencia térmica superficial exterior

R_a es la resistencia térmica de los huecos de aire

$\sum \frac{e}{\lambda}$ es la resistencia térmica de todas las capas que conforman el elemento.

2.4 Transmitancia térmica

La transmitancia térmica es el flujo de calor que pasa por un sistema constructivo para un tiempo y superficie unitaria, cuando hay un gradiente térmico de 1°C entre los ambientes que está separando. Se expresa en $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ y queda expresada como la inversa de la resistencia térmica total:

$$U = \frac{1}{R}$$

Para obtener una buena envolvente térmica en el hogar, es necesario que ésta logre mantener temperaturas dentro del rango de confort. En el caso del invierno, donde la temperatura exterior es menor a la temperatura de confort, será necesario que la envolvente tenga un U bajo, de manera de disminuir en lo mayor posible el flujo de calor desde el interior de la casa hacia el exterior.

Si nos concentramos en la temporada de verano, aparece un fenómeno que genera grandes ganancias térmicas al interior del hogar, siendo una de las causas del sobrecalentamiento en los hogares. Este fenómeno se denomina efecto invernadero y se estudia a continuación.

2.5 Efecto invernadero del vidrio

Un material permite el paso de la luz debido a que, en su estructura, no existen electrones libres que interactúen con la energía radiante. En el caso del vidrio, posee una estructura que es débil a la interacción de la energía de radiación para longitudes de onda que van desde los $0,15$ a $4,5\ \mu\text{m}$. Así, la banda de transparencia del vidrio corresponde al ultravioleta cercano, al espectro visible, y a una pequeña franja del infrarrojo.

Gran parte de la energía de radiación que interactúa con el vidrio proviene de la radiación solar, que está formada por una mezcla de onda electromagnéticas de diferentes frecuencias. El espectro visible por el ojo humano (luz visible) está comprendido entre las longitudes de onda que van desde los $0,4$ a $0,7\ \mu\text{m}$. Además, existen otras radiaciones electromagnéticas que no son visibles, pero ceden la energía que transportan a los cuerpos con los que interactúan. Estas son el ultravioleta y el infrarrojo. El espectro electromagnético completo se muestra a continuación:

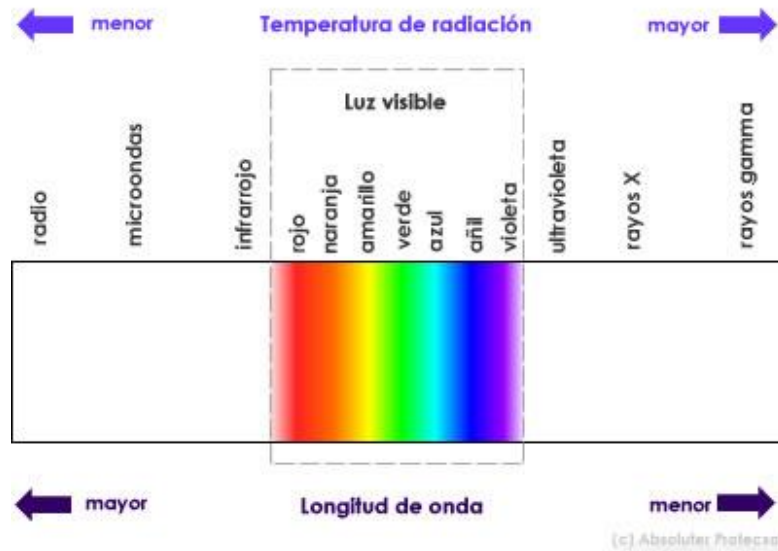


Ilustración 2-2: Espectro electromagnético que relaciona la temperatura y la longitud de onda. Fuente: Córdova, 2011.

Cuando la radiación solar incide directamente sobre la cara de un vidrio, parte se reflejará, otra será absorbida y luego re-irradiada hacia el interior y el exterior en frecuencias correspondientes al infrarrojo lejano, y la restante transmitida a través de él, denominada transmisión directa. El ángulo de incidencia de la radiación solar variará la proporción de flujo que será reflejada.

Una vez que penetra la radiación solar a través del vidrio, choca con los cerramientos y objetos que se encuentran en el lugar. Éstos, a su vez, se calientan y comienzan a re-irradiar, pero en el infrarrojo de ondas más largas, que son incapaces de atravesar hacia el exterior. Así, se comienza a acumular calor al interior, lo que produce un aumento en la temperatura. A este fenómeno se le denomina efecto invernadero, el que se esquematiza a continuación.

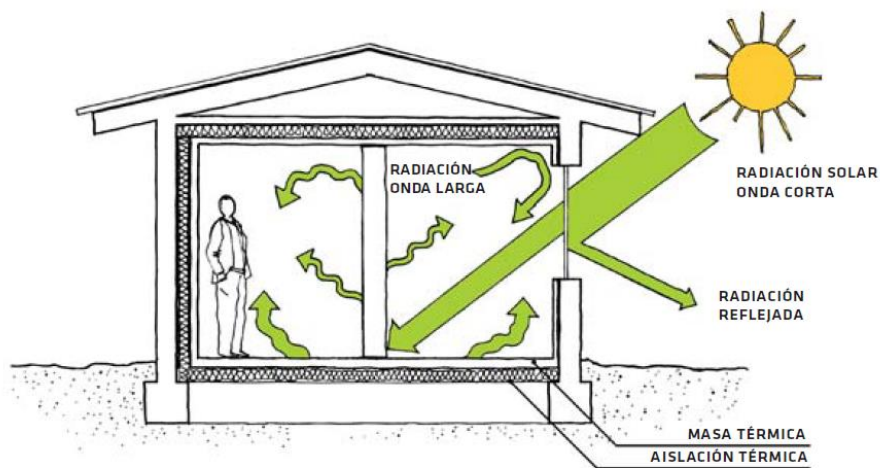


Ilustración 2-3: Efecto invernadero del vidrio. Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social.

Es importante mencionar que este fenómeno puede ser tanto beneficioso como perjudicial dependiendo de las circunstancias. Por ejemplo, en el invierno, se puede aprovechar de manera de obtener mayores temperaturas en el hogar, disminuyendo el uso de la calefacción. Por otro lado, en el verano, si no se toman ciertas consideraciones, como orientación o elementos que den sombra, se pueden alcanzar altas temperaturas que no permiten estar en los lugares afectados, causando incomodidad para los ocupantes.

2.6 Inercia térmica

La inercia térmica es otro fenómeno que influye en el comportamiento térmico de una vivienda. Indica la capacidad que tiene un material para acumular y almacenar la energía calorífica, y la velocidad a la que lo cede o absorbe. Si consideramos las fluctuaciones térmicas diarias, que se comportan como una senoide de periodo 24 horas, se observa que un muro absorberá calor, retrasando el “peak” de temperatura y amortiguando la amplitud, haciendo más estable la temperatura interior del hogar. Estos efectos se denominan retraso y amortiguamiento térmico, respectivamente.

La capacidad que tiene un muro para absorber calor depende de la masa del muro, su calor específico, y la diferencia entre la temperatura mínima y máxima. Queda descrita de la siguiente forma:

$$Q = M \cdot C_e \cdot \Delta T$$

Donde:

Q: corresponde a la cantidad de calor que se gana o pierde

M: corresponde a la masa del elemento

C_e : corresponde al calor específico del material

ΔT : corresponde a la diferencia de temperatura mínima y máxima.

Sabiendo que un muro de concreto tiene $C_e = 0,21$ [kcal/(kg °C)], se concluye que mientras más macizo sea un muro y mayor sea la oscilación térmica diaria, mayor será su capacidad de acumular calor. Como la ciudad de Santiago tiene oscilaciones en verano superiores a los 16° C, permite aprovechar este fenómeno para mejorar el desempeño de la vivienda, amortiguando la temperatura mínima y máxima diaria.

El retraso térmico, por su parte, depende de la conductividad térmica (λ), el calor específico y de la densidad del material (Puppo, 1999). Si se elige adecuadamente el material de su envolvente y el espesor, se puede desplazar la onda térmica de manera que cuando en el exterior se llegue a la temperatura máxima, en el interior se tenga el mínimo, y viceversa (Burgos, 2008). Un escenario ideal del efecto de la inercia térmica se muestra en el siguiente gráfico:

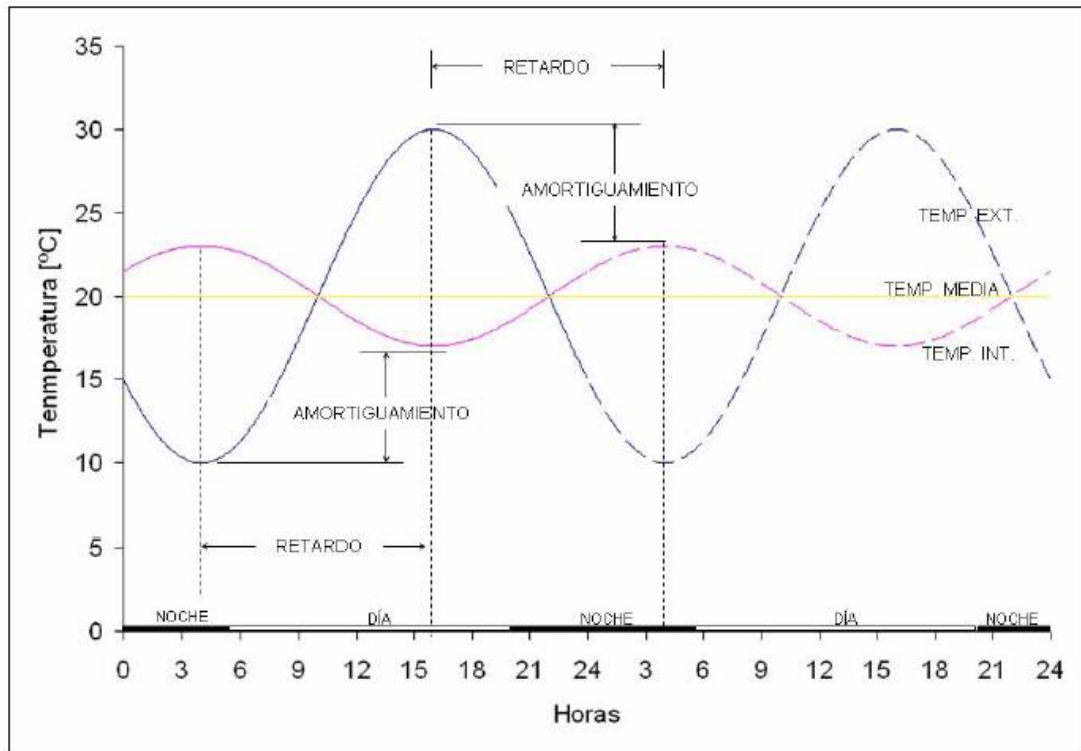


Ilustración 2-4: Efecto de la inercia térmica considerando un retardo ideal y un amortiguamiento severo de la onda. Fuente: Burgos, 2008.

De esta forma, la inercia térmica permite mantener un hogar fresco en verano y tibio en invierno. Este efecto será benéfico para lugares donde se tenga gran oscilación térmica diaria, y la temperatura media se encuentre cerca de los rangos del confort.

Una desventaja que presentan los edificios macizos frente a los ligeros, es que los segundos se calientan más rápido al utilizar un sistema de calefacción o se enfrían con mayor rapidez si se utiliza aire acondicionado, siendo más eficiente. Así, la inercia térmica es más beneficiosa para edificios que se utilizan a lo largo de todo el día, ya que sus efectos serán percibidos tanto en el día como en la noche. Para aprovechar de mejor manera este fenómeno, se recomienda aislar la envolvente por el exterior, de manera de que la liberación de calor sea solo hacia el interior.

3 Comportamiento térmico de la vivienda

El desempeño térmico de una vivienda influye directamente en el confort térmico de sus ocupantes. Si el hogar es capaz de proteger de las circunstancias desfavorables del exterior, y entrega las condiciones necesarias para que las personas se sientan cómodas con el ambiente en el interior, significará que tiene un buen comportamiento térmico. Éste es uno de los principios básicos de la arquitectura, ya que, como bien mencionan Filippín y Flores Larsen, citando a Liu, en una publicación del año 2010: “Los edificios proporcionan un entorno de vida y de trabajo a los seres humanos. La gente pasa más del 80% de sus vidas en el interior de los edificios, por eso se le debe prestar atención a la calidad del ambiente interior durante su etapa de diseño y la evaluación de su performance energético-ambiental (Liu *et al.*, 2010)” (Filippín y Flores Larsen, 2010).

Además, un lugar que provee de condiciones de confort a sus ocupantes genera mayores niveles de productividad. Así lo demuestran diversos estudios analizados por ASHRAE Standard 55, donde se comprueba que mientras menor es la diferencia entre la temperatura interior y la temperatura de confort, mayor será la productividad. Los resultados se exponen a continuación.

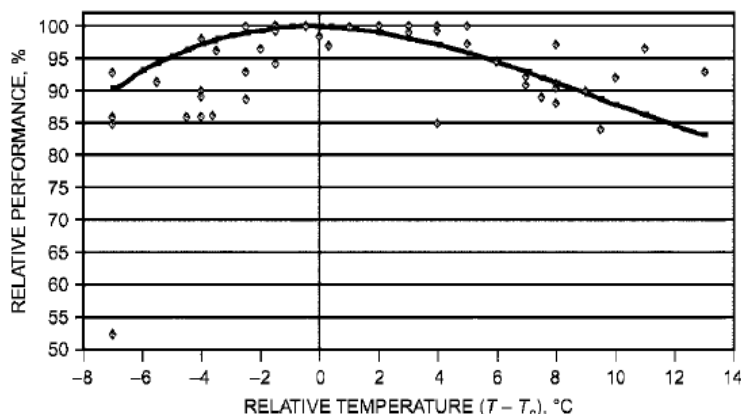


Ilustración 3-1: Desempeño relativo de la producción de un oficinista versus la desviación a la temperatura de confort. Fuente: ASHRAE Standard 55

Se observa que, si la temperatura en el interior es 8° C superior a la óptima, la productividad baja al 91%. Esto podría estar incidiendo en el desempeño de los trabajadores, en aquellos edificios que no generan condiciones de comodidad para la estación de verano en Santiago.

A raíz de lo anterior, se estudian todos aquellos factores que inciden en el comportamiento térmico de la vivienda, de manera de entender su funcionamiento y lograr encontrar aquellas condiciones que permitan su buen desempeño en la Región Metropolitana, en verano.

3.1 Clima

El clima es la primera variable que se debe tener en cuenta al momento de diseñar un edificio ya que impone las condiciones iniciales del sistema (Arquitectura Bioclimática). Dependiendo de éstas, se considerarán distintos materiales, soluciones constructivas y diseños, para lograr obtener condiciones de confort al interior de la vivienda. Las condiciones climáticas más importantes son:

- La temperatura del aire (mínima, máxima y media)
- Humedad del aire
- Radiación solar
- Viento
- Pluviometría y nubosidad

El clima en la zona urbana de la Región Metropolitana corresponde a un clima templado con lluvias invernales y estación seca prolongada, conocido como clima mediterráneo continentalizado. Cuenta con inviernos de 4 a 5 meses y presenta una gran oscilación térmica diaria, especialmente en verano. Respecto a la temperatura, se tiene que el promedio de la temperatura máxima en enero (mes más caluroso) es de 29,7° C y la media mínima es de 13° C, superando fácilmente los 30° C durante las tardes. Para el mes de julio (mes más frío) se tiene una media máxima de 13° C y media mínima de 3,9 °C. Concentra el 80% de las precipitaciones durante los meses de invierno, final de otoño e inicio de la primavera, variando sus precipitaciones entre 50 y 80 [mm] de agua caída en cada mes. La humedad relativa es cercana a 60% en los meses de verano y a 80% en los meses invernales, y presenta nubosidades bajas en verano.

3.2 Flujo térmico a través de la envolvente

Estos flujos corresponden a la transmisión por conducción que se genera en la envolvente debido a la diferencia térmica entre el interior y el exterior, la capacidad aislante de los materiales que la componen, que depende del valor U, y la superficie de contacto con el exterior.

Los elementos que participan de este intercambio son los muros perimetrales, ventanas, piso y techo, principalmente. Para disminuir el intercambio con el exterior es necesario que éstos tengan un valor U bajo, lo que se puede lograr utilizando algún material estructural con buenas características térmicas o agregando una capa de material aislante. El aire en reposo, a 0° C, tiene un valor $\lambda = 0,024$ [W/(m·K)], siendo considerado el mejor material para aislar. De esta manera, aquellos materiales capaces de retener aire quieto en su interior serán buenos aislantes. Por otro lado, las ventanas presentan problemas debido a su elevado valor U, siendo uno de los elementos de la envolvente por donde más se pierde energía. Además, existen zonas donde se generan discontinuidades en el aislamiento térmico, denominados “puentes térmicos”, como marcos de aluminio o

tornillos de conexión, que también generan pérdidas de energía. A continuación, se muestran algunos valores característicos de U, obtenidos según NCh853.

Elemento	U $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
Vidrio monolítico (3 mm)	5,8
Muro de hormigón (200 mm)	3,4
Muro de ladrillo (140 mm)	2,2
Poliestireno expandido (25 mm)	1,3

Tabla 3-1: Transmitancia térmica calculados mediante NCh853

Respecto a las ventanas, se han elaborado diversas alternativas para disminuir las pérdidas por estas superficies. Es el caso del doble vidriado hermético (DVH), que está compuesto por 2 láminas de vidrio, separadas por una capa de aire sellada herméticamente. De esta manera, se aprovechan las buenas propiedades aislantes del aire en reposo, alcanzando valores de transmitancia térmica que pueden ir entre los 2 a 3 $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$ dependiendo del espacio de aire y los tratamientos del vidrio. Otras alternativas, como el triple vidriado hermético alcanzan valores de hasta 1 $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$. Además, se recomienda el uso de marcos de PVC ($\lambda = 0,17 [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$), para eliminar los puentes térmicos producidos por los marcos de aluminio, que presentan una alta conductividad térmica ($\lambda = 210 [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$).

Finalmente, el comportamiento térmico de la vivienda depende de estos factores ya que en función de éstos se tiene la facilidad o dificultad de la envolvente para intercambiar energía con el ambiente. Si sus características aislantes son buenas, permitirá conservar el calor al interior de la vivienda, en invierno. En verano podrían presentarse problemas de sobrecalentamiento producto de la dificultad para perder calor a través de la envolvente. Por esto, en Santiago se debe diseñar de tal manera que se disminuyan las ganancias en verano, siendo una de sus principales ganancias debido al efecto invernadero del vidrio, incorporando protecciones solares, pero que permitan ganancias en el invierno. Si se cumple este diseño y se considera aislación por el exterior de la envolvente, el riesgo al sobrecalentamiento puede disminuir, debido a las menores ganancias a través de los muros y ventanas.

3.3 Intercambio de aire entre interior y exterior

Estos flujos se generan a través de las corrientes de aire entre el interior y el exterior de una edificación, intercambiando energía por medio de la convección. El traspaso de calor depende del gradiente de temperatura interior-exterior, y del caudal de la corriente.

A las renovaciones de aire del interior de una edificación se le denomina ventilación, la cual puede ser, o no, controlada. Dentro de la ventilación controlada se encuentran las renovaciones de aire por razones fisiológicas, y las renovaciones necesarias para la higiene de la vivienda, ya que es necesario mantener ciertos niveles de calidad del aire y humedad al interior. La ventilación necesaria para mantener la higiene dependerá del lugar, según

la función que desempeñe. A continuación, se muestran las renovaciones de aire por hora, n , recomendadas según el espacio, donde n representa la cantidad de veces que se debe renovar completamente el volumen de aire, en una hora.

Lugar	n
Dormitorio	0,5 – 1
Living	3 – 5
Comedor	3 – 5
Cocina	5 – 10
Baño	5 – 15

Tabla 3-2: Renovaciones de aire por hora para diferentes lugares. Fuente: Manual de Aislación térmica exterior (CChC)

Las ventilaciones de aire no controladas corresponden a aquellas infiltraciones que se generan debido a fisuras y juntas de puertas y ventanas, principalmente. Es importante intentar disminuir éstas al máximo, para tener un mejor control del desempeño de la vivienda.

Dependiendo de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, la ventilación producirá un aumento o disminución de ésta al interior del hogar. Así, si la temperatura es superior en el exterior, aumentará la temperatura en el hogar, mientras que, si es menor, la disminuirá. Este efecto será más notorio cuando el caudal intercambiado sea mayor.

Finalmente, para mejorar el desempeño de la vivienda, en el invierno se intentará disminuir la ventilación al mínimo recomendado, de manera de perder la menor cantidad de calor posible, mientras que en verano se aumentará la ventilación natural en ciertos instantes del día, para alcanzar la condición de confort. Los instantes adecuados serán aquellos en que el aire exterior presenta una temperatura inferior a la máxima de confort.

3.4 Ganancias por soleamiento a través de las ventanas

Estas ganancias se producen cuando la radiación solar atraviesa los huecos acristalados de la edificación, generando el efecto invernadero del vidrio (Ver Capítulo 2). La magnitud de este fenómeno va a depender de la trayectoria del sol, la orientación de la edificación, de las ventanas y de aquellos elementos que les den sombra. Como se mencionó anteriormente, este fenómeno puede ser beneficioso o perjudicial dependiendo de la época del año, por lo que se estudia la incidencia de cada factor en la ciudad de Santiago.

En primer lugar, se debe estudiar la trayectoria del sol, ya que gracias a la radiación que emite se genera el efecto invernadero y de ello dependerán las estrategias solares que se consideren. Esta trayectoria varía de acuerdo a la época del año, donde en el solsticio de verano (21 de diciembre) se genera el mayor ángulo con respecto a la horizontal (80°) y en el solsticio de invierno (21 de junio) se genera el menor ($33,2^\circ$). La trayectoria para

todos los días del año se encontrará entre estas inclinaciones. Una manera de conocer el recorrido completo es a través de las cartas de trayectoria solar (Bustamante, 2009).

Conociendo la trayectoria del sol, se puede tomar decisiones sobre la distribución de los espacios interiores, orientación y tamaño de las ventanas, y protecciones solares. En el caso de Santiago, el acceso del sol es beneficioso en invierno y en otoño, y es perjudicial para el verano y parte de la primavera. A continuación, se muestra la carta y la gráfica de distribución solar para la ciudad de Santiago.

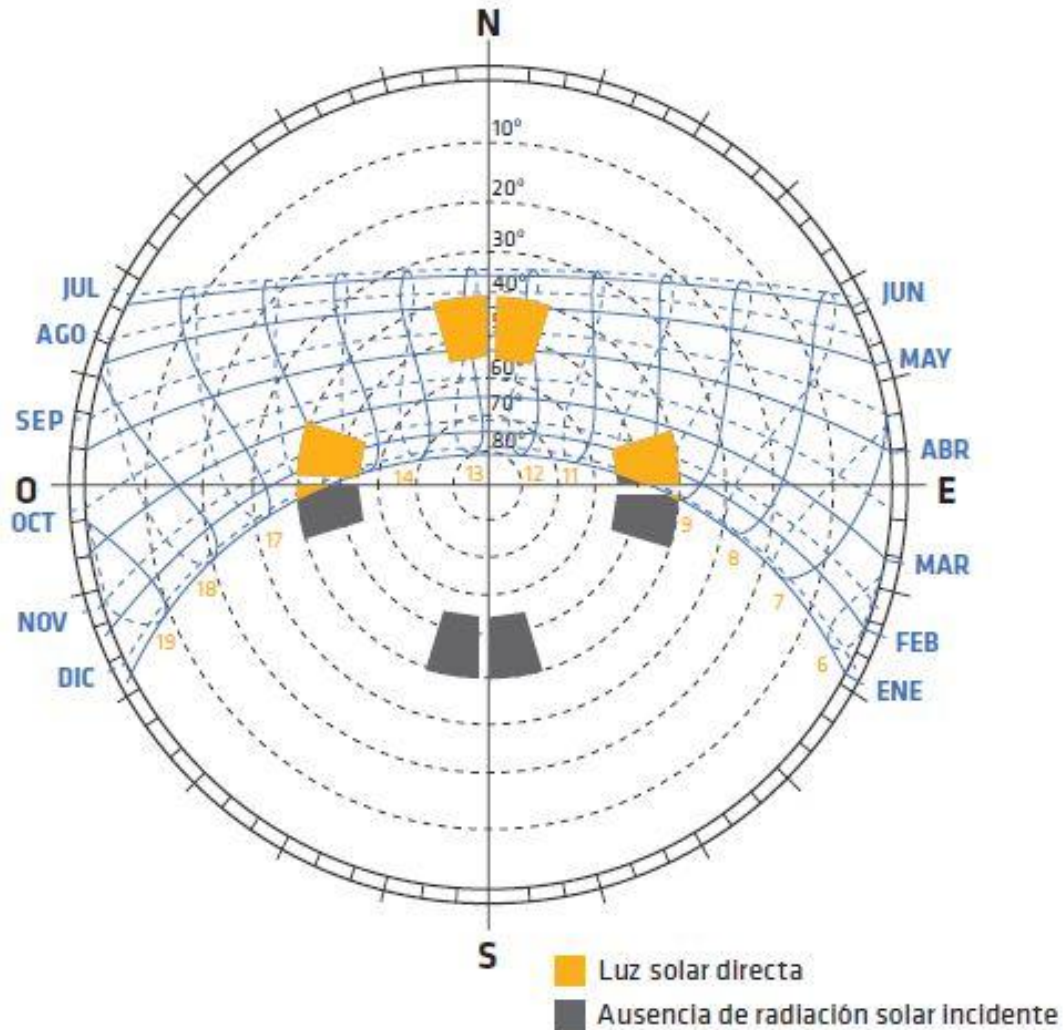


Ilustración 3-2: Carta de trayectoria solar para Santiago. Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética de la Vivienda Social.

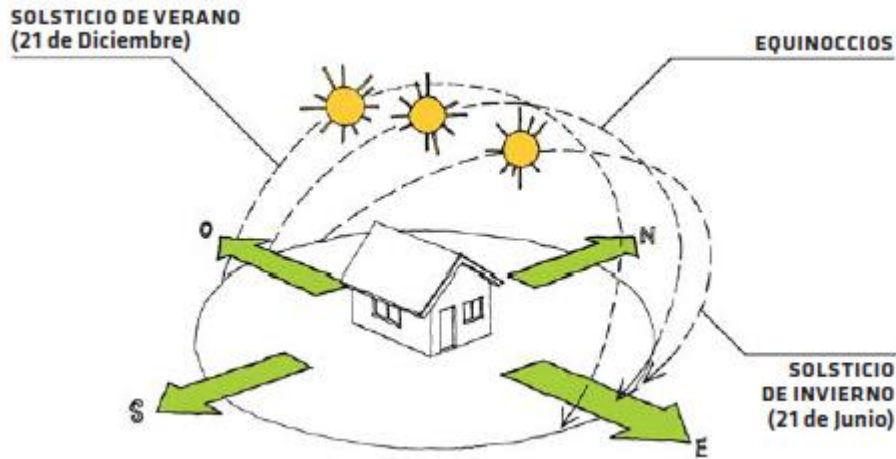


Ilustración 3-3: Gráfica de distribución solar. Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética de la Vivienda Social.

La radiación solar para cada orientación va a ser distinta, debido a las condiciones climáticas, la trayectoria del sol y las condiciones propias del lugar donde se encuentra la edificación. A continuación, se exponen los niveles de radiación promedio para las distintas orientaciones en Santiago, según hora y estación del año.

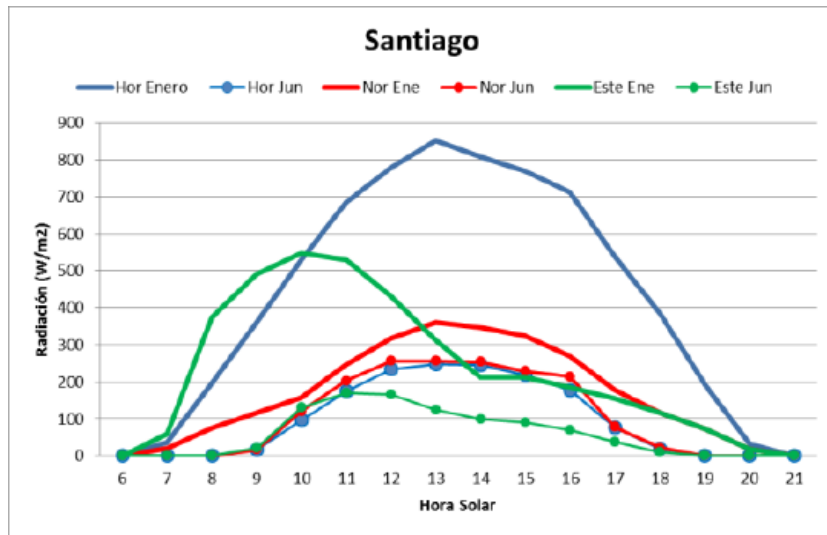


Ilustración 3-4: Niveles promedio de radiación solar en diferentes horas y épocas del año. Fuente: Sistema de calificación energética de vivienda.

En función de los niveles de radiación exhibidos, la orientación ideal para una vivienda para el caso de estudio será la norte, ya que permite la captación de buenos niveles de calor y de luz natural, permitiendo elevar las temperaturas en invierno. Por otro lado, se debe evitar la orientación oriente-poniente debido a los altos niveles de radiación que presenta, lo que puede generar sobrecalentamiento en el hogar en las estaciones de verano y primavera.

Del mismo modo, se recomienda ubicar las ventanas en la fachada norte, para aumentar las ganancias, y en menor medida en las fachadas oriente-poniente, para disminuir las ganancias excesivas que se generarán en verano. Sobre la fachada sur, se debe considerar que es la orientación que menos radiación directa y luz solar recibe, por lo que se recomienda la menor superficie posible, para evitar pérdidas en invierno. El tamaño de las ventanas se rige según la misma lógica.

Los elementos que producen sombra tienen por objetivo interceptar la radiación solar directa y parte de la radiación difusa. De esta manera, si se conoce la trayectoria solar, se puede controlar la cantidad de radiación a la que está expuesta una ventana, disminuyendo las posibilidades de que haya sobrecalentamiento. Estos elementos deben proteger la ventana por el exterior, y no por el interior, como es el caso de una cortina, ya que de esa manera la radiación solar ingresa a la vivienda y se genera el efecto invernadero. Los elementos que producen sombra pueden ser elementos que protejan directamente la ventana, como aleros, celosías o persianas exteriores, o bien, elementos que la protejan indirectamente, como árboles, muros, o construcciones cercanas.

Las ventanas en la orientación norte se pueden proteger a través de aleros o elementos horizontales. De esta manera se evitan las mayores radiaciones solares en el verano, que se producen cuando el sol está en su punto más alto, y en el invierno se permite su ingreso, siempre y cuando estén bien dimensionados.

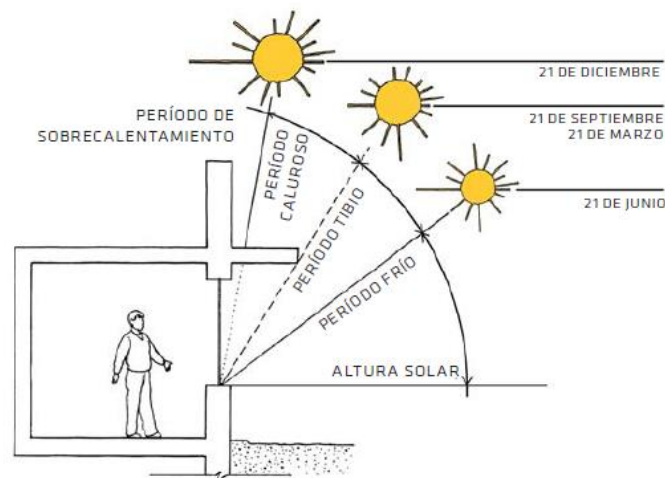


Ilustración 3-5: Dimensionamiento de alero fijo en orientación norte. Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética de la Vivienda Social.

En la orientación oriente y poniente, se recomienda elementos de protección solar del tipo verticales, como las celosías o cortinas exteriores. Esto se debe a que las mayores horas de radiación para estas orientaciones se generan en la mañana o en la tarde, cuando la inclinación del sol es menor, por lo que los elementos de protección horizontal disminuyen las ganancias solares en menor medida.

3.5 Ganancias internas

Las ganancias internas son aquellas que se generan producto de los equipos electrónicos, la iluminación artificial y las personas que se encuentran al interior de un recinto. Estas cargas serán beneficiosas en el invierno y perjudiciales en el verano.

La cantidad de calor generado por el ser humano dependerá del nivel de ocupación del edificio y las actividades que realicen. La ocupación se refiere a la cantidad de personas que se encuentran en el edificio, lo que será proporcional al calor generado. Las ganancias producto de la actividad dependerá de la tasa metabólica asociada. A continuación, se presentan las tasas metabólicas de actividades que se realizan en el hogar.

Actividad	Tasa metabólica [W/m ²]
Dormir	40
Leer, sentado	55
Caminar	100
Cocinar	95-115
Hacer aseo del hogar	115-200

Tabla 3-3: Tasa metabólica para actividades del hogar. Fuente: ASHRAE Standard 55

Las ganancias debido a la iluminación artificial y los equipos electrónicos dependerán del rendimiento de los artefactos. Respecto de la iluminación, se considera un consumo de 40 [W] o 20 [W], para el caso de iluminación eficiente (Miranda, 2008). Es importante mencionar que las ganancias producto de la iluminación en el hogar no son tan relevantes como la que se genera en edificios de oficina u hospitales.

Otros dos fenómenos que se deben considerar en el comportamiento térmico de la vivienda son la humedad y la inercia térmica. La humedad puede proceder de fuentes internas, como evapotranspiración de las personas o actividades como la cocina, o bien, de fuentes externas, como el contenido de humedad del exterior. Ésta podrá influir en el desempeño de la aislación térmica de la envolvente, empeorándola si la humedad es alta. Además, como es más difícil enfriar o calentar aire húmedo que seco, será más difícil calefaccionar o refrigerar la vivienda, si lo requiere. La inercia térmica será beneficiosa ya que permitirá mantener el hogar fresco en verano y tibio en invierno, debido a las grandes oscilaciones térmicas diarias que presenta la ciudad de Santiago.

Finalmente, el comportamiento térmico de la vivienda se debe comprender y estudiar como un sistema integrado, influenciado por el clima, la arquitectura, los materiales y las condiciones de uso, a través de los factores estudiados en este capítulo. Será de gran importancia incorporar todos estos factores a la hora de diseñar para alcanzar el mejor desempeño de la vivienda, y así alcanzar el confort térmico de las personas.

4 El Sobrecalentamiento

El sobrecalentamiento en términos de confort térmico se entiende como la exposición de las personas a temperaturas que superan la máxima de confort en un ambiente, causando insatisfacción. Particularmente en este estudio se consideró confort adaptativo según lo señalado en el punto 1.4 Confort Térmico Adaptativo. De esta forma, la máxima temperatura que se puede alcanzar para que exista satisfacción con el ambiente, es de 26,6° C.

En la actualidad, es común encontrar problemas de sobrecalentamiento en el interior de la edificación en Santiago, tanto habitacional como edificios de uso público tales como oficinas, comercio, hospitales o colegios, entre otros, donde estos últimos presentan los casos más desfavorables debido a la particularidad de su arquitectura, presentando grandes zonas vidriadas, y por su uso intensivo con cargas internas elevadas, lo cual genera acumulación de calor.

Estas alzas en la temperatura, que puede superar los 30° C al interior en los meses más calurosos, generan que los lugares sean prácticamente inhabitables, lo que produce una disminución en el confort de las personas. Para solucionar este problema se han incorporado mecanismos de refrigeración en el diseño de los edificios de oficina, los que presentan altos consumos energéticos, siendo una alternativa poco eficiente. Por otro lado, en las viviendas, aunque generalmente no es tan crítico como en oficinas, también se presenta sobrecalentamiento, sin embargo, a diferencia de las oficinas u espacios de uso público, el uso de sistemas de climatización para refrigeración es poco común en Chile.

Para ambos casos, edificios de uso público o viviendas, surge la obligación de buscar estrategias pasivas para disminuir las elevadas temperaturas y los altos consumos. Esto, con el objetivo de disminuir nuestra dependencia en el consumo de energías provenientes en su mayoría de combustibles fósiles.

Esta problemática surge principalmente por una baja conciencia térmica en los diseños arquitectónicos de las estructuras y en el caso de las viviendas, la baja exigencia de la reglamentación térmica nacional para los casos de verano. Respecto de la arquitectura, no se considera el diseño de los inmuebles como un sistema integrado, preocupándose principalmente de la transmitancia térmica de los materiales, y aprovechando de forma secundaria los factores climáticos, la orientación de la fachada, los elementos de protección solar, entre otros. Así, en los edificios de uso público, buscan solucionar el problema a través de sistemas mecánicos de climatización, y no a través de estrategias pasivas, como es el caso de la arquitectura bioclimática, que se centra en la construcción de edificios que utilizan los beneficios de la energía solar y el flujo del aire natural para producir calefacción natural y refrigeración pasiva (Castilla et al., 2010). Por otro lado, en las viviendas, la reglamentación nacional exige sus requerimientos enfocados principalmente para la época de invierno, lo que termina empeorando la situación en verano.

Son diversos los estudios que han investigado acerca del sobrecalentamiento y sus posibles soluciones en la Región Metropolitana, mediante la modelación de distintas alternativas en base a un caso real, como viviendas sociales o edificios de oficina. Tal es el caso del estudio de una vivienda social de albañilería de 32 m² (Vera y Ordenes, 2002) donde se concluye que las cargas de refrigeración representan el 40% del total de la energía de climatización, para lograr el confort térmico. Las cargas de refrigeración alcanzan los 76 kWh/m² - año, representando una elevada carga, por sobre los 15 kWh/m² - año que se exigen en reglamentaciones europeas. En la misma línea, se estudian dos edificios de oficina característicos en Santiago (Bustamante, 2011). El primero, presentó consumos de refrigeración por sobre los 50 kWh/m² - año y con máximas cercanas a los 120 kWh/m² - año, y el segundo presentó un consumo cercano a los 30 kWh/m² - año, presentando un elevado consumo de refrigeración en ambos casos. Además, se menciona que en Santiago es común que los edificios de oficina que contienen un alto porcentaje de vidrio presenten mayores consumos de refrigeración que de calefacción.

A raíz de lo anterior, en la siguiente sección se estudia y compara la normativa nacional y la extranjera, con el fin de identificar las implicancias que conlleva el diseño actual de la reglamentación nacional diseñada para la calefacción, con respecto al sobrecalentamiento. Además, se presentan los resultados de una encuesta que se realizó para comprobar el nivel de satisfacción de los hogares en la Región Metropolitana que presentan sobrecalentamiento. Así, se busca identificar los principales factores que generan este problema y sus efectos en la vivienda.

4.1 Reglamentación térmica

Las reglamentaciones térmicas entregan los requisitos que determinan la manera de diseñar los espacios de un inmueble. Dependiendo de los criterios de confort utilizados cambiarán las estrategias y recursos en el diseño, lo que genera diversas alternativas para alcanzar los objetivos por parte de los profesionales. Producto de lo anterior se vuelve esencial el análisis de la normativa nacional y extranjera que estandarizan el diseño de los ambientes interiores de un edificio, para encontrar los defectos que influyen en el sobrecalentamiento.

4.1.1 Nacional

En Chile, la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), mediante el artículo 4.1.10, es la encargada de reglamentar sobre los requisitos de acondicionamiento térmico de las viviendas. Este artículo nace producto del Programa de Reglamentación sobre Acondicionamiento Térmico de Viviendas, impulsado el año 1996, por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), que contempló 3 etapas:

1^{ra} Etapa: aislación de techos.

2^{da} Etapa: aislación de muros, ventanas y pisos.

3^{ra} Etapa: certificación térmica.

La primera y segunda etapa comenzaron a regir el año 2000 y 2007 respectivamente, mediante la modificación de la OGUC, dando origen al artículo 4.1.10. Actualmente se está avanzando la 3^{ra} etapa, mediante el programa de Calificación Energética de Viviendas (CEV), desarrollado por el MINVU.

El artículo 4.1.10 entrega todas las exigencias de acondicionamiento térmico que debe cumplir una vivienda, las que consisten principalmente en la aislación de su envolvente, según la zona en la que es construida, basado en cálculos de la norma NCh853: “Acondicionamiento térmico – Envolvente térmica de edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas”. Las zonas son 7 y se dividen según sus grados-día, donde la 3^{ra} zona contiene a la Región Metropolitana. A continuación, se exponen todos los requisitos exigidos por este artículo.

En primer lugar, para los complejos de techumbre, muros perimetrales y pisos inferiores ventilados, entendidos como los elementos que constituyen la envolvente de la vivienda, se exigen valores de transmitancia térmica “U”, igual o menor, o valores de resistencia térmica total “Rt”, igual o superior a la señalada en la siguiente tabla, según la zona en la que se emplaza el proyecto de arquitectura:

ZONA	TECHUMBRE		MUROS		PISOS VENTILADOS	
	U	Rt	U	Rt	U	Rt
	W/m ² K	m ² K/W	W/m ² K	m ² K/W	W/m ² K	m ² K/W
1	0,84	1,19	4	0,25	3,6	0,28
2	0,60	1,67	3	0,33	0,87	1,15
3	0,47	2,13	1,9	0,53	0,7	1,43
4	0,38	2,63	1,7	0,59	0,6	1,67
5	0,33	3,03	1,6	0,63	0,5	2
6	0,28	3,57	1,1	0,91	0,39	2,56
7	0,25	4	0,6	1,67	0,32	3,13

Tabla 4-1: Transmitancia térmica máxima y resistencia térmica mínima para complejos de techumbre, muros perimetrales y pisos inferiores ventilados, según zona térmica. Fuente: OGUC 2016.

Además, el complejo de ventanas, considerado como los elementos constructivos que constituyen los vanos vidriados de la envolvente de la vivienda, debe cumplir con una superficie máxima vidriada, dependiendo del tipo de vidrio que se especifique y la zona térmica en la cual se emplace el proyecto de arquitectura. En la siguiente tabla se exponen las exigencias establecidas:

ZONA	VENTANAS		
	% MÁXIMO DE SUPERFICIE VIDRIADA RESPECTO A PARAMENTOS VERTICALES DE LA ENVOLVENTE		
	VIDRIO MONOLÍTICO	DVH DOBLE VIDRIADO HERMÉTICO	
		$3,6 \text{ W/m}^2\text{K} \geq U \geq 2,4 \text{ W/M}^2\text{k}$	$U \leq 2,4 \text{ W/M}^2\text{k}$
1	50%	60%	80%
2	40%	60%	80%
3	25%	60%	80%
4	21%	60%	75%
5	18%	51%	70%
6	14%	37%	55%
7	12%	28%	37%

Tabla 4-2: Porcentaje máximo de superficie vidriada respecto a superficie de paramentos verticales de la envolvente. Fuente: OGUC 2016.

En definitiva, la OGUC, a través del artículo 4.1.10, aborda el acondicionamiento térmico de las viviendas exigiendo valores de transmitancia y resistencia térmica para los elementos que constituyen la envolvente del hogar, y restringiendo la superficie vidriada de la envolvente, según la zona térmica en la que se emplaza el proyecto de arquitectura.

En la actualidad, se está trabajando en la modificación de la reglamentación de aislación térmica de viviendas, a través del documento NTM 011/2: “Requisitos y mecanismos de acreditación para acondicionamiento ambiental de las edificaciones. Parte 2: Comportamiento higrotérmico y calidad del aire interior” (Anteproyecto). En este documento se busca aumentar las exigencias en aislación de la envolvente en las distintas zonas térmicas del país. Las zonas térmicas se dividen de la A a la I, donde la Región Metropolitana está contenida en la zona D. La propuesta para esta zona es la siguiente:

Zona Térmica: D		
Complejo de techumbre	U [W/(m ² K)]	0,38
	R [(m ² K)/W]	2,63
Complejo de muro	U [W/(m ² K)]	0,80
	R [(m ² K)/W]	1,25
Complejo de piso ventilado	U [W/(m ² K)]	0,70
	R [(m ² K)/W]	1,43
Complejo de puerta opaca	U [W/(m ² K)]	1,70
	R [(m ² K)/W]	0,59

Tabla 4-3: Transmitancia térmica “U” máxima y resistencia térmica “Rt” mínima para complejo de techumbre, muro, piso ventilado y puerta opaca en edificios de uso residencial, educación y salud, para zona térmica D. Fuente: NTM 011/2.

Además, se proponen nuevos valores de porcentaje máximo de superficie vidriada, los que dependerán de la transmitancia térmica del elemento, la zona térmica en la que se emplace el proyecto de arquitectura y la orientación. A modo de ejemplo, se muestra la propuesta para la zona D en el siguiente gráfico:

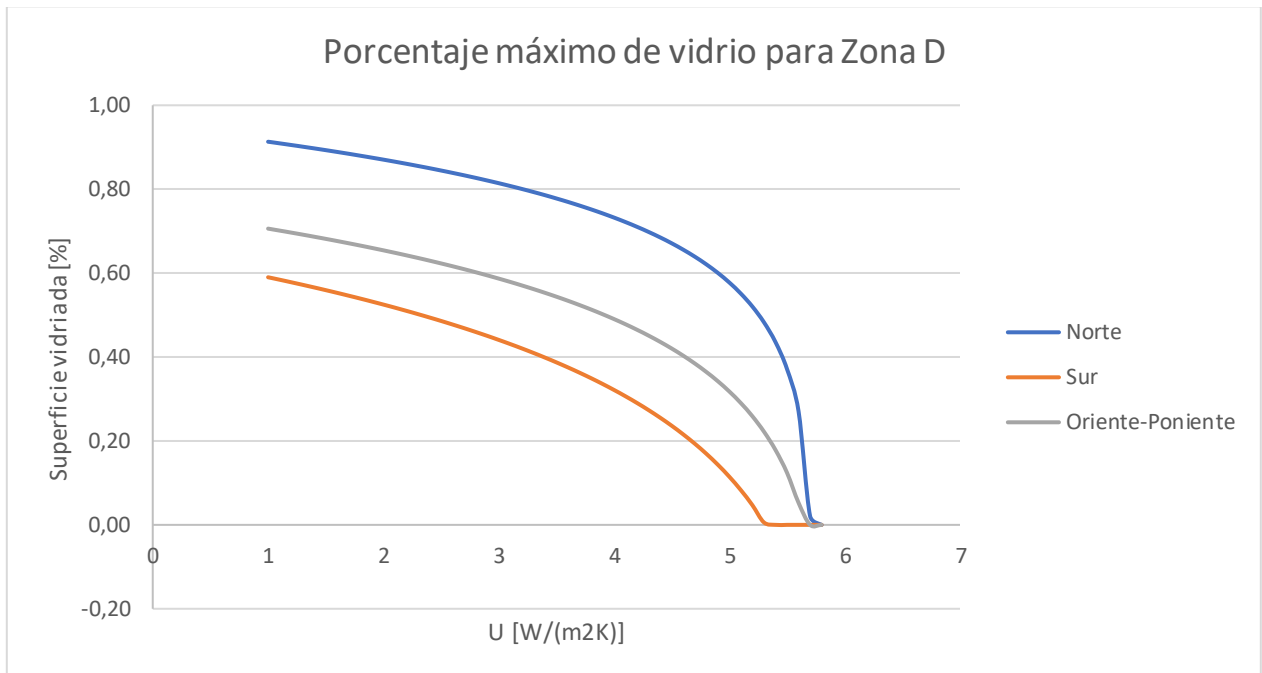


Gráfico 4-1: Porcentaje máximo de vidrio para Zona Térmica D. Fuente: NTM 011/2.

Es importante mencionar que este documento aún no es oficial, por lo que los valores propuestos podrían sufrir modificaciones. De todas formas, es importante destacar el aumento de la exigencia en la aislación de la envolvente y la incorporación de la orientación para obtener la superficie máxima de vidrio.

4.1.2 Extranjera

Uno de los estándares más importante respecto al acondicionamiento térmico de edificios es el diseñado por la American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) de los Estados Unidos, lo que motiva su análisis. Para esto, es necesario estudiar el estándar ASHRAE 55, y los estándares ASHRAE 90.1 y 90.2.

El estándar ASHRAE 55: “Thermal environmental conditions for human occupancy” define los criterios de confort y los rangos de las condiciones térmicas ambientales que debe haber al interior de un edificio para que la mayoría de sus ocupantes se encuentren cómodos. Así, estandariza el efecto que tienen los seis factores ambientales en las condiciones de confort térmico, comentados en la Introducción de este trabajo. Como se mencionó anteriormente, este análisis lo hace de manera estática, sin considerar las exposiciones previas y actividades que puedan alterar la percepción del confort de las personas, por lo que la sensación de confort de los usuarios no será inmediata.

Este estándar considera que para alcanzar las condiciones térmicas necesarias que generan confort al interior de los recintos se debe diferenciar entre los edificios acondicionados mecánicamente y los edificios acondicionados naturalmente.

Respecto a los edificios acondicionados mecánicamente, ASHRAE propone dos métodos. Ambos se basan en el método de balance térmico de Fanger, obteniendo las condiciones térmicas necesarias para alcanzar el confort mediante el cálculo de la temperatura operativa, la humedad, la influencia de la velocidad del aire y el disconfort local térmico. En ambos se debe conocer la humedad, la velocidad del aire, la tasa metabólica y la vestimenta para obtener la temperatura operativa.

El primer método es a través del ábaco psicométrico expuesto en la Ilustración 1-1. Se debe tener en cuenta que su uso está restringido para valores de tasa metabólica cercano a 1,1 met (actividad sedentaria), tasa de arropamiento entre 0,5 y 1,0 clo, y velocidad del aire menor a 0,2 [m/s]. Luego, conociendo la humedad al interior del recinto se puede obtener la temperatura operativa del edificio. El segundo método propuesto en el estándar es a través de un programa computacional basado en el balance térmico, que permite la obtención de la temperatura operativa para un rango más amplio de valores. Ambos métodos consideran un nivel de aceptabilidad del 80%, utilizando el índice PMV-PPD (del modelo de balance térmico de Fanger).

Respecto a los edificios acondicionados naturalmente, se propone un método en base a la teoría adaptativa de Dear y Brager et al. Para utilizarlo, el edificio no debe tener sistema mecánico de climatización en funcionamiento (o bien, precisar de ellos), y los ocupantes deben tener el control de las ventanas del edificio como primera alternativa para regular el ambiente térmico. Es decir, el edificio debe tener ventanas operables donde haya personas. Además, la tasa metabólica debe estar entre 1 y 1,3 met (actividad sedentaria) y las personas deben tener la libertad para adaptar su vestimenta tanto al interior como al exterior del edificio. Así, en base a la temperatura promedio mensual en el exterior se puede obtener la temperatura operativa al interior del edificio, según la siguiente ilustración:

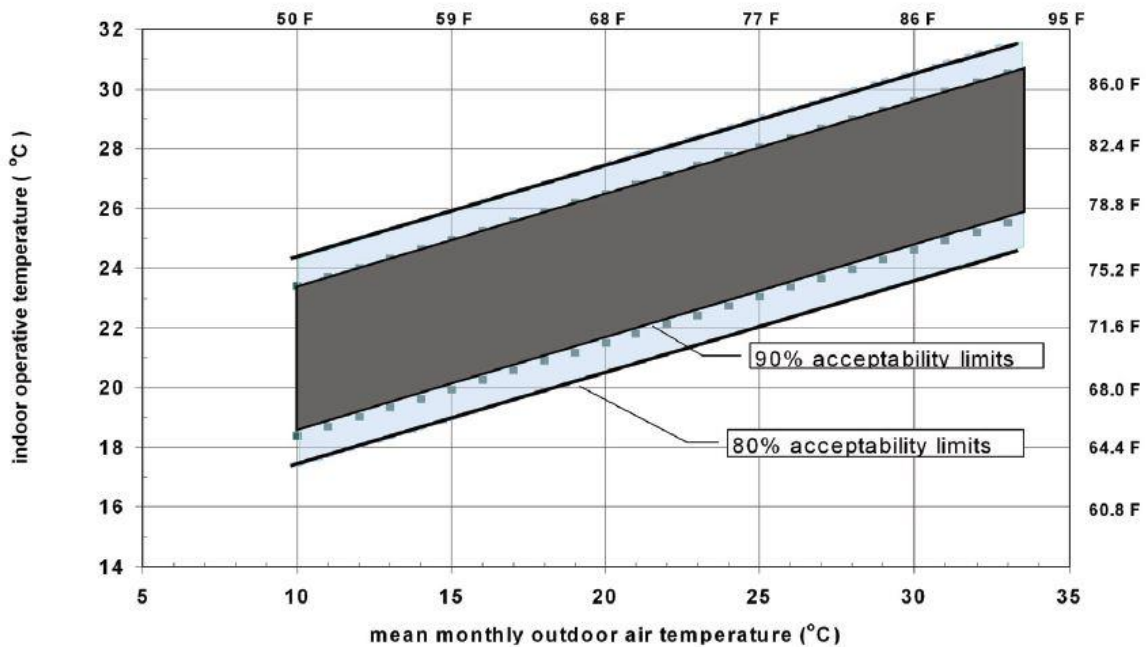


Ilustración 4-1: Rangos de temperatura operativa para edificios ventilados naturalmente. Fuente: ASHRAE Standard 55.

Este método presenta rangos de aceptabilidad para el 80% y el 90% de las personas y no precisa de valores de humedad y velocidad de aire para ser utilizado. Además, si la temperatura promedio mensual del exterior no se encuentra entre los 10° C y 33,5° C, esta opción no puede ser utilizada.

Éstos son los métodos propuestos por ASHRAE para obtener las condiciones térmicas que generan confort al interior del edificio. Una vez que se conoce la temperatura operativa del edificio se debe diseñar de tal manera que se logren aquellas condiciones, lo que es tratado en los estándares 90.1 y 90.2, presentados a continuación.

El estándar 90.1: “Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings” y el estándar 90.2: “Energy-Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings” entregan los requisitos mínimos para el diseño y construcción de edificios energéticamente eficiente, de gran altura, así como residenciales de menos de 3 pisos. Estos requisitos se entregan para los edificios nuevos y sus equipos de climatización, y para edificios antiguos. Para ello, se indican los límites de la transmitancia térmica U de elementos opacos y transparentes, dependiendo de la zona climática. Además, incorpora el control solar indicando los límites de factor solar de los cerramientos transparentes, en base a la razón entre ventana-muro y la orientación de los elementos.

Por otra parte, en países de Europa se ha fijado el objetivo de disminuir al máximo el consumo de la edificación mediante distintas opciones, manteniendo las condiciones de confort al interior de los edificios. Por ejemplo, el año 2013 se publicó en España la actualización del Documento Básico de Ahorro de Energía (DB HE 2013) del Código

Técnico de la Edificación, que dentro de sus principales novedades limita el consumo y la demanda energética de los edificios. Para la refrigeración, se limita la demanda a 15 o 20 kWh/m² - año dependiendo de la zona climática del país. La demanda de calefacción, en cambio, varía entre 15 a 40 kWh/m² - año dependiendo de la zona, más un factor corrector que dependerá de la zona climática y la superficie total habitable del edificio. Este documento es la fase previa para alcanzar una demanda casi nula en la edificación. En la misma línea, surge en Alemania el estándar “Passivhaus”, que tiene por objetivo mejorar las condiciones interiores del hogar, tanto térmicas como de calidad del aire, pero con el menor consumo posible. Para ello restringe la demanda de refrigeración y calefacción a 15 kWh/m² - año.

4.1.3 Discusión

Una vez que se estudia la normativa nacional y extranjera se pueden evidenciar ciertos puntos que contribuyen a la generación de ambientes más confortables, disminuyendo los tiempos en los que los usuarios se encuentran fuera de su banda de confort térmico, en particular el sobrecalentamiento, sin embargo, también otros que contribuyen a su generación, según lo estudiado en el Capítulo 3.

En primer lugar, al definir la ASHRAE los criterios de confort y entregar métodos para calcular las condiciones térmicas de confort al interior de los edificios, permite fijar un objetivo a la hora de diseñar. De esta forma, si se busca alcanzar estas condiciones (o bien, se exigen), los profesionales deberán identificar la mejor alternativa para alcanzar el confort, ya sea aumentando el aislamiento de la envolvente, modificando la razón entre muro-ventana, incorporando protecciones solares, mediante el apoyo de equipos de climatización u otras alternativas.

Al analizar los requisitos de la reglamentación nacional se observa que las superficies máximas de ventana exigidas por la OGUC y la NTM 011/2, en la Tabla 4-2 y el Gráfico 4-1, respectivamente, están orientadas a mejorar la situación en invierno, pero producen un empeoramiento en verano. Esto se debe a que al aumentar la superficie máxima de vidrio a medida que disminuye la transmitancia térmica del vidrio, se elevan las ganancias producto de la radiación solar, y disminuyen las pérdidas por la superficie vidriada, es decir, el efecto invernadero es mayor, mejorando la situación en invierno. Pero cuando las temperaturas son elevadas, las temperaturas alcanzadas superan el rango de confort, causando sobrecalentamiento. Por otro lado, se destaca la incorporación de la orientación en la superficie de vidrio, ya que disminuye la superficie para la orientación oriente-poniente y sur.

Además, es esencial incorporar el control solar en la normativa, ya que es una de las alternativas más eficientes para disminuir las ganancias solares en verano, al no requerir energía, lo que se verá más adelante. El hecho de que no sean obligatorias las protecciones solares permite eliminarlas cuando se busca disminuir costos de construcción, perdiendo los beneficios que generan a futuro.

Finalmente, se observa que las restricciones en la demanda máxima de climatización exigidas por el estándar “Passivhaus” o DB HE 2013, producen un aumento en la búsqueda de alternativas pasivas que mejoren el desempeño térmico de las viviendas, motiva el diseño energéticamente eficiente, además de disminuir el consumo total de energía en el sector residencial, público y comercial. Por ejemplo, “Passivhaus” indica que una casa que cumpla con el estándar reduce su consumo energético en un 70% en comparación a las construcciones convencionales. En Chile, una casa de 84 m² que cumple con la reglamentación térmica, tiene una demanda promedio para calefacción de 123 kWh/m² - año según se indica en el Manual de (Re)Acondicionamiento Térmico, lo que se traduciría en una disminución del 88% de la demanda total de calefacción.

4.2 Encuesta

Entre el 15 y el 19 de diciembre del año 2016 se realizó una encuesta a un universo de 180 personas, 63% hombres y 37% mujeres (Ver Anexo A). El objetivo de la encuesta fue verificar el nivel de satisfacción actual de los hogares en la Región Metropolitana que presentan sobrecalentamiento, e identificar las posibles causas del problema. Del total, 151 personas consideran tener el problema, donde un 68% considera que su hogar es caluroso y un 32% lo considera muy caluroso. Las 29 personas restantes consideran que su hogar es placentero. El 66% de los encuestados vive en una casa, y el 34% en departamento.

De las zonas que presentan el problema, un 71% alcanza temperaturas de discomfort principalmente en la tarde, después del mediodía, un 27% durante todo el día, y el 2% solo durante la mañana. Además, un 60% considera que su hogar es caluroso durante la noche. Las zonas más afectadas son los dormitorios, viéndose afectados en 94% de los hogares, y en el 72% de los casos afecta a más de uno. La sala de estar y el living/comedor también se ven afectados, presentándose en un 34% y 33% de los casos. El 85% de los usuarios consideran que es molesto estar en la zona afectada, y un 11% no puede estar en la zona. A pesar de ello, el 83% utiliza la zona afectada.

Con esta información, se puede comprobar cómo el sobrecalentamiento afecta en el confort de los usuarios, ya que se presenta en los periodos del día donde las personas se encuentran en sus hogares, además de que afecta las zonas más utilizadas por los usuarios. Las molestias que genera el sobrecalentamiento pueden estar afectando el rendimiento de las personas en sus actividades cotidianas, como las domésticas, al estudiar o trabajar, e incluso a la hora de dormir, afectando el descanso. Estas razones motivan la búsqueda de soluciones que disminuyan o eliminen el problema, por lo que se debe identificar cuáles son las posibles causas que generan las elevadas temperaturas.

Para identificar las posibles causas que generan el sobrecalentamiento es necesario saber en qué meses se produce el discomfort. El 58% consideró que los meses más calurosos son entre enero y marzo, un 4% entre octubre y diciembre, y un 38% similar en ambos casos. Al analizar la orientación de la envolvente en la zona afectada se observa que un 52% de los casos presenta muros hacia el poniente, casi el 40% hacia el norte y el

oriente, y un 23% hacia el sur. Respecto de la exposición de la zona afectada, un 48% de los casos está expuesta durante la tarde principalmente, un 25% durante la mañana, un 17% durante todo el día, y un 11% no está expuesta directamente.

Con esta información se observa la estrecha relación que existe entre la teoría y la práctica respecto al sobrecalentamiento. En primer lugar, los meses más calurosos en el hogar son los con mayor radiación en Santiago. Además, se confirma que la orientación poniente es la más desfavorable al presentar la mayor radiación, junto con la orientación oriente, pero para el primer caso se acumula calor durante todo el día lo que lo hace más desfavorable, presentándose en más de la mitad de los hogares que presentan problemas. Por último, se tiene que casi el 90% de los casos está expuesto directamente a la radiación solar en algún momento del día, lo que genera el efecto invernadero al interior.

Por otro lado, se pidió elegir a las personas con hogar placentero entre una serie de alternativas que mejor se relacionen a las zonas que están orientadas hacia el poniente o norte. Del total, un 50% tiene sombra debido a protección solar, como aleros o toldos, a vegetación, o a construcciones cercanas, y un 72% considera tener buena ventilación natural.

Finalmente, al consultar sobre el desempeño general del hogar en verano, se observa que un 33% lo considera bueno o muy bueno, lo que parece elevado ya que de este porcentaje, la mayoría considera molesto permanecer en la zona afectada, siendo principalmente dormitorios. Esto puede deberse a la costumbre, o bien, a las bajas expectativas de los usuarios respecto a este problema.

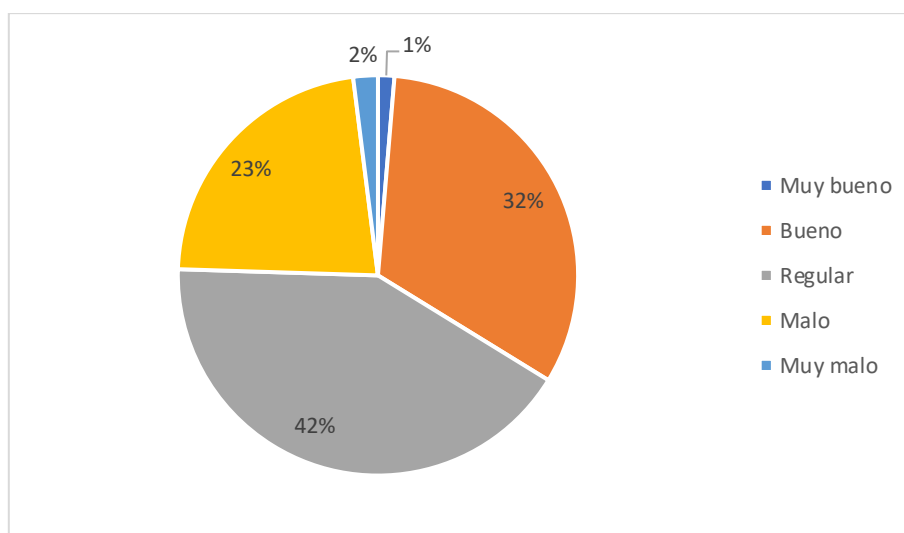


Ilustración 4-2: Desempeño general del hogar en verano.

La información obtenida a través de esta encuesta, en conjunto con lo investigado, permitió identificar las variables de interés para generar los modelos del capítulo siguiente. Además, entrega información sobre soluciones que se pueden aplicar para generar viviendas con un buen comportamiento térmico en verano.

5 Modelamiento Térmico

El propósito del presente trabajo es estudiar el comportamiento térmico de los hogares de la Región Metropolitana y analizar su interacción en función de la superficie vidriada, en verano. Para ello, se modeló el comportamiento del dormitorio de un edificio al que se le modificaron distintos factores, como transmitancia térmica de los muros y del vidrio, superficie vidriada y orientación, para obtener la temperatura en su interior, y así poder encontrar la superficie óptima de ventana que no genera sobrecalentamiento. Además, se comprueba el estado actual de los hogares utilizando los requisitos de la OGUC 2016 para la Región Metropolitana, que corresponden a la zona 3. Finalmente, se buscaron técnicas pasivas que logran disminuir la generación de calor en verano, mejorando el desempeño del hogar.

Para la obtención de la temperatura interior del recinto se utilizó un motor de cálculo desarrollado por la oficina “E3 INGENIERIA” en Microsoft Visual Basic, por encargo del Ministerio de Vivienda y Urbanismo para el programa de Calificación Energética de Viviendas. Este motor de cálculo entrega la transferencia de calor de las distintas superficies de un recinto y su temperatura interior de forma horaria. La entrega de los resultados es a través de un archivo “.xls”, lo que facilita el manejo de éstos. Además, el programa que integra este motor de cálculo permite simular modelos en serie, optimizando la obtención de resultados.

A continuación, se describen los modelos y las cargas térmicas que influyen en su comportamiento para obtener los resultados. Además, se detallan los procedimientos seguidos para obtener las posibles soluciones al problema del sobrecalentamiento.

5.1 Descripción del modelo

La zona escogida para el análisis fue un dormitorio debido a que fue la zona más afectada por sobrecalentamiento según la encuesta, además de ser la habitación más utilizada por las personas en sus hogares. De esta manera, se modela un dormitorio de 16 [m²] de base cuadrada y lado 4 [m], con una altura de 2,3 [m], en un departamento sin sistema mecánico de climatización, ubicado en la Región Metropolitana. Uno de sus muros está orientado hacia el exterior y tiene una ventana, mientras que los 3 restantes son muros divisorios interiores. El muro exterior, el piso y el cielo son de material pesado, mientras que los 3 muros divisorios son de material liviano. Además, no hay elementos que produzcan sombra en la ventana. A este modelo base se le varían los siguientes factores:

- Se consideran 3 orientaciones para el muro exterior: norte, sur y poniente.
- Se consideran 3 valores de transmitancia térmica de muro: 1,9; 0,8 y 0,0 [W/m²°C].
- Se consideran 4 valores de transmitancia térmica de ventana: 5,8; 3,6; 2,4; 1 [W/m²°C].

Para cada una de estas 36 alternativas, se varía el tamaño de la ventana para encontrar la superficie límite que no genera sobrecalentamiento, y para comprobar el estado actual de la normativa nacional. Estos porcentajes de superficie vidriada se exponen en el Anexo B. De esta forma, se generan 207 modelos.

Los valores de transmitancia térmica escogidos para el muro corresponden a los exigidos en la OGUC 2016 ($U=1,9$) y en la actual propuesta ($U=0,8$). El caso $U=0,0$ corresponde a un caso teórico.

Los valores de transmitancia térmica escogidos para el vidrio corresponden a distintas posibilidades de ventana, como un vidrio monolítico simple ($U=5,8$), o DVH o triple vidriado hermético ($U=3,6$; $U=2,4$; $U=1,0$).

Respecto de la orientación, no se considera el oriente debido a que las ganancias solares entre oriente-poniente se comportan de forma similar, obteniéndose prácticamente las mismas temperaturas interiores. Por ello, se decide modelar solo la orientación poniente, además de la norte y sur.

5.2 Descripción de las cargas

En Santiago, el mes donde se alcanza la mayor radiación solar y temperatura máxima y media, es enero. Por lo mismo, enero representa el mes más desfavorable respecto al sobrecalentamiento, por lo que se decide considerar un día típico de enero para la modelación. Para ello, se utilizan los datos climáticos de un estudio para el MINVU realizado por Sr. Adelqui Fissore, que incluye el perfil de temperatura y radiación solar por hora, para un día típico del mes. A continuación, se presenta la temperatura por hora utilizada en el estudio:

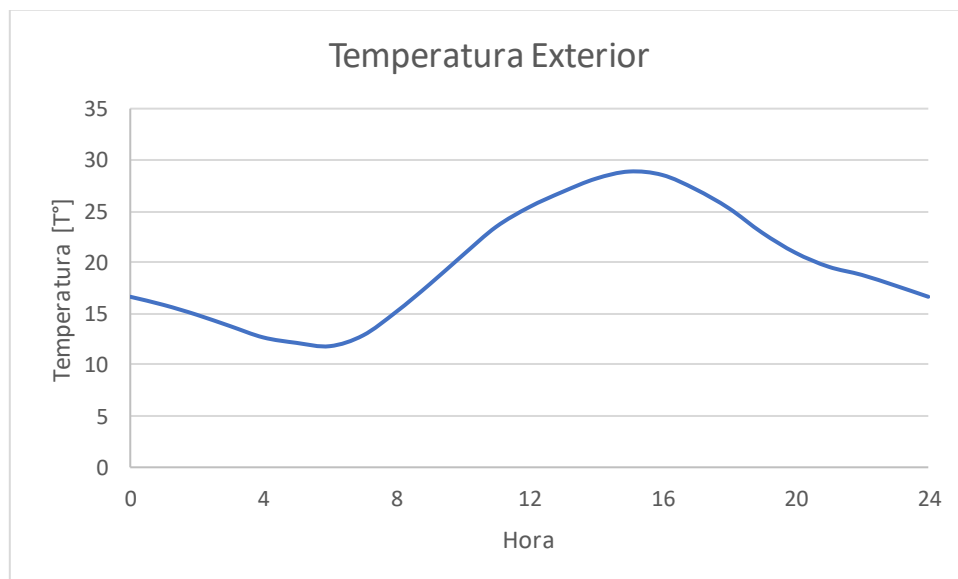


Gráfico 5-1: Temperatura exterior para un día típico de enero.

Como el departamento en estudio no considera un sistema mecánico de climatización, se considera la temperatura máxima de confort de $26,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, según indica la teoría adaptativa.

Para la ventilación, se considera 1 renovación de aire por hora (RAH), para cumplir con el valor recomendado para la higiene de los dormitorios, según el “Manual de Aislación térmica exterior” y estudios en el campo.

Respecto a las cargas internas, se considera que una persona realiza actividades sedentarias en el dormitorio, como dormir, leer, escribir, o descansar, durante la mayor parte del día. Así, se obtiene que la generación es de $5,5\text{ W/m}^2$. Por otro lado, se desprecian las cargas asociadas a equipos o iluminación ya que se utilizan una fracción pequeña del día, por lo que no representan una carga significativa, como es el caso de oficinas.

5.3 Presentación y Análisis de Resultados

Con la simulación de las distintas alternativas para el modelo base, se obtiene la temperatura interna del recinto por hora. Con ello, se generan gráficos para analizar el comportamiento del dormitorio en función del porcentaje de ventana respecto del muro exterior, los que se muestran en el Anexo B. A continuación, se presenta el caso particular para la orientación norte, con $U_{\text{muro}}=1,9\text{ [W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C]}$ y $U_{\text{ventana}}=5,8\text{ [W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C]}$.

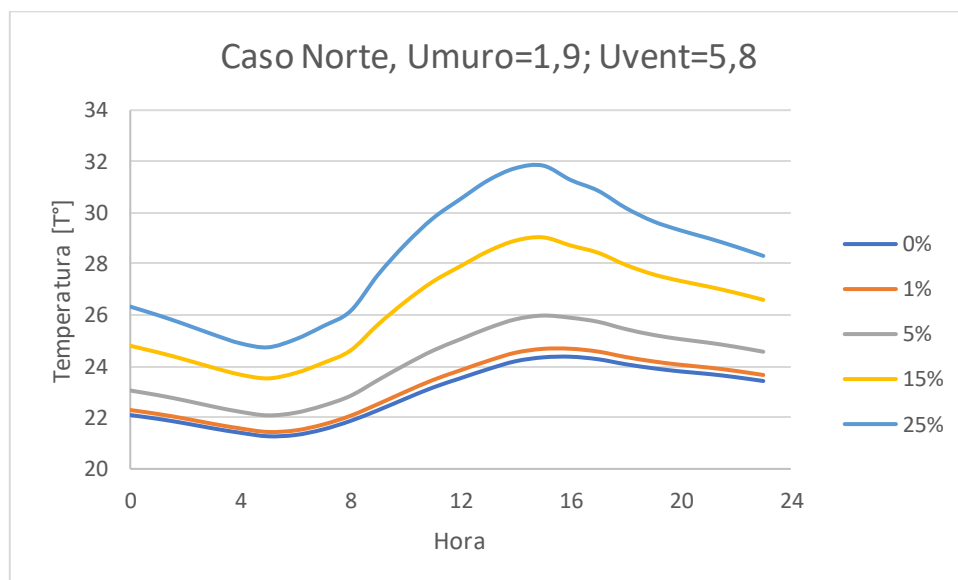


Gráfico 5-2: Temperatura interior del dormitorio, orientación norte, $U_{\text{muro}}=1,9$; $U_{\text{vent}}=5,8$.

En el gráfico anterior se observa que la temperatura interior del dormitorio tiene un comportamiento similar al perfil de temperatura exterior, presentando su peak a las 15 horas, y su mínimo a las 5 horas. A medida que aumenta el porcentaje de ventana en el muro, aumenta la temperatura interior del recinto. Para este caso en particular, la temperatura máxima aumenta en $7,5^{\circ}\text{C}$ al pasar de 0% a 25% de superficie de ventana. Además, la diferencia de la temperatura interior entre las 8 horas y 15 horas es superior a

medida que aumenta el porcentaje de ventana. La razón del aumento de la temperatura se debe a que a medida que aumenta la superficie vidriada, aumentan las ganancias por radiación solar por esta superficie, pasando de una participación casi nula para porcentajes menores al 10%, a tener influencia en la temperatura para porcentajes superiores al 15% aprox. Este comportamiento también se presenta en las 35 alternativas restantes.

Al estudiar el comportamiento del recinto en función de la transmitancia térmica del muro se observa que a medida que ésta disminuye, se dificulta el intercambio de calor a través del muro, como era de esperar. Este efecto se observa de mejor manera entre las 19 horas y las 4 horas, dónde la temperatura cae en mayor medida para transmitancias altas. Sin embargo, se observa que el comportamiento general del dormitorio se encuentra comandado por su superficie vidriada.

Para ello, se compara el caso particular del dormitorio orientado hacia el oeste, con transmitancia térmica de la ventana de $3,6 \text{ [W/m}^2 \text{ °C]}$, con 3 superficies distintas: 15%, 25% y 60%. En el primer caso (Gráfico 5-3) se observa que la temperatura máxima y mínima es inferior cuando la aislación del muro aumenta. Esto se debe a que el intercambio de calor por la envolvente se genera principalmente por el muro, y la participación de la ventana es muy baja. Como el intercambio de calor se produce principalmente por el muro, una mayor transmitancia facilitará el paso de calor del exterior del muro hacia el interior, alcanzando mayor temperatura. En el segundo caso (Gráfico 5-4) ocurre una transición, dónde el caso con mejor aislación del muro tiene una temperatura mínima superior y una máxima inferior, pero con una baja diferencia entre los casos. En el último caso (Gráfico 5-5) se observa que la temperatura máxima y mínima es superior cuando la aislación del muro aumenta. Esto porque se generan grandes ganancias térmicas a través de la superficie vidriada, pero se dificulta la disipación del exceso de calor al aumentar la aislación. Finalmente, se concluye que una mayor aislación puede traer beneficios en la medida en que las ganancias térmicas no sean elevadas, como para porcentajes de ventana inferiores al 20%. En el caso contrario, aumentará el sobrecalentamiento producto de la dificultad para disipar el exceso de calor, como ocurre para porcentajes de ventana superiores al 30%.

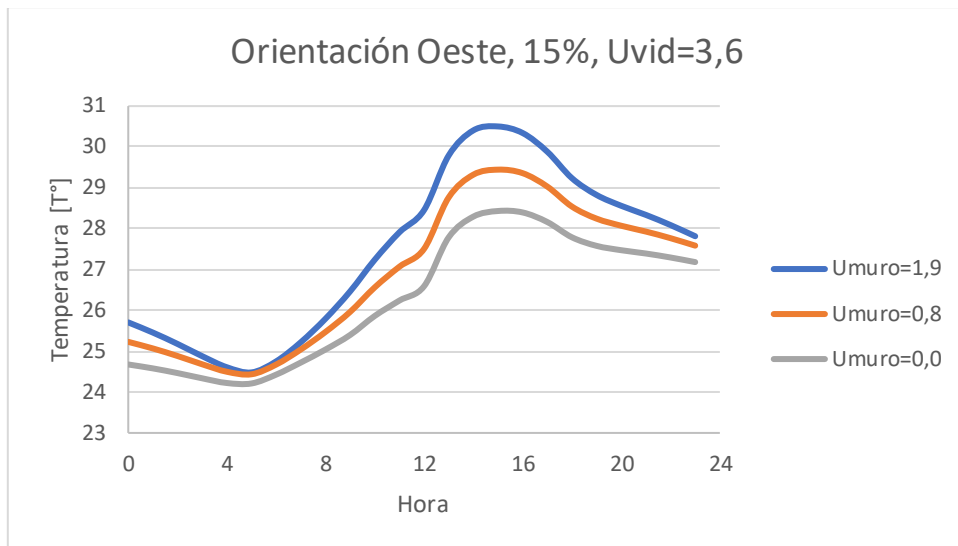


Gráfico 5-3: Caso 15% de superficie vidriada.

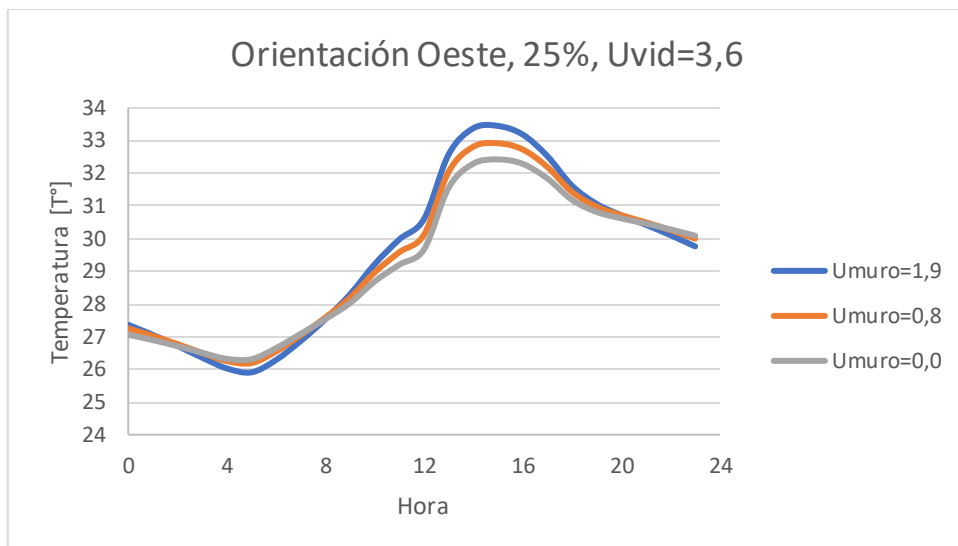


Gráfico 5-4: Caso 25% de superficie vidriada.

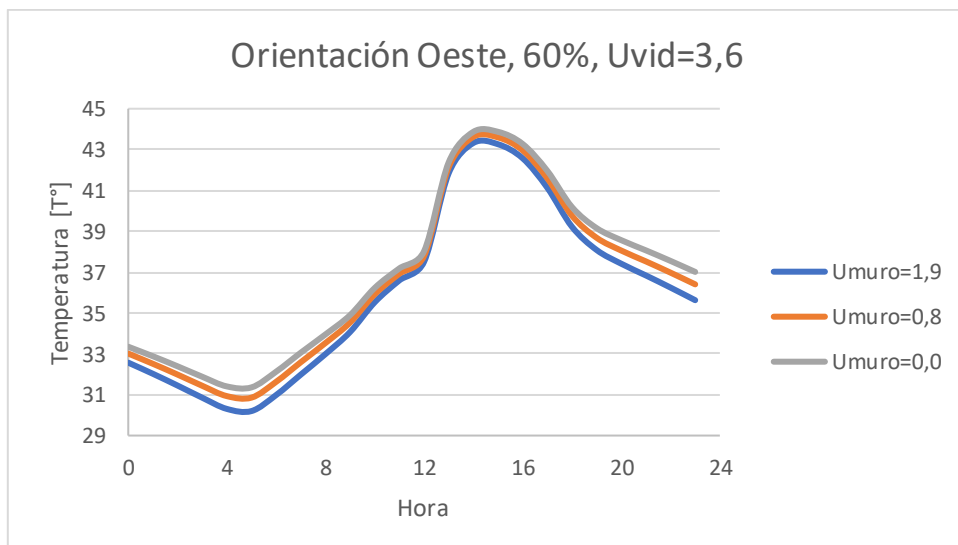


Gráfico 5-5: Caso 60% de superficie vidriada.

Para encontrar la superficie máxima de ventana que entrega condiciones de confort durante todo el día se realizó un ajuste lineal entre la superficie de ventana y la temperatura máxima alcanzada para cada alternativa (Ver Anexo B). Así, se pudo obtener el porcentaje de ventana tal que la temperatura no supere los 26,6° C. A continuación, se presentan los valores obtenidos en función de la transmitancia térmica de la ventana.

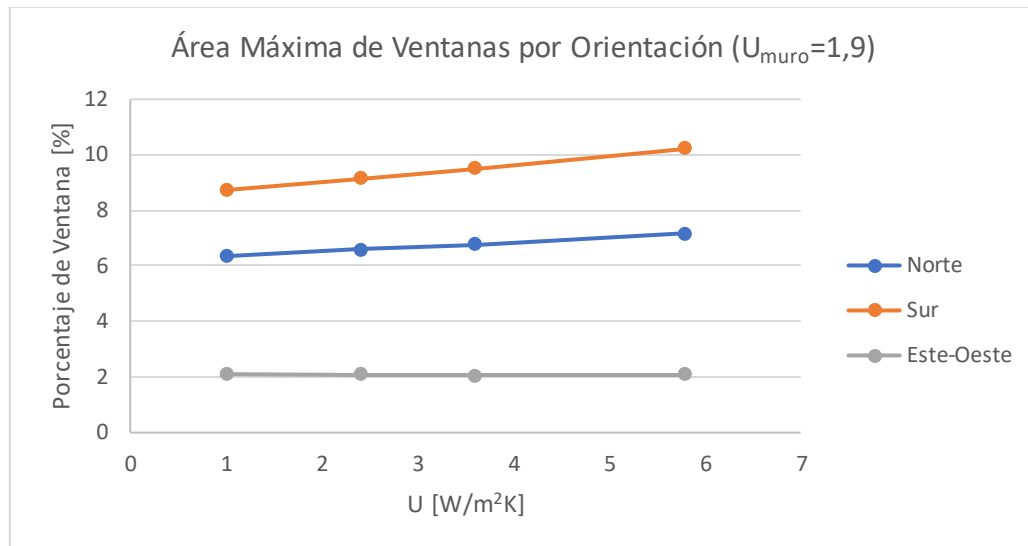


Gráfico 5-6: Área máxima de ventana por orientación para tener temperatura de confort, con $U_{muro}=1,9$.

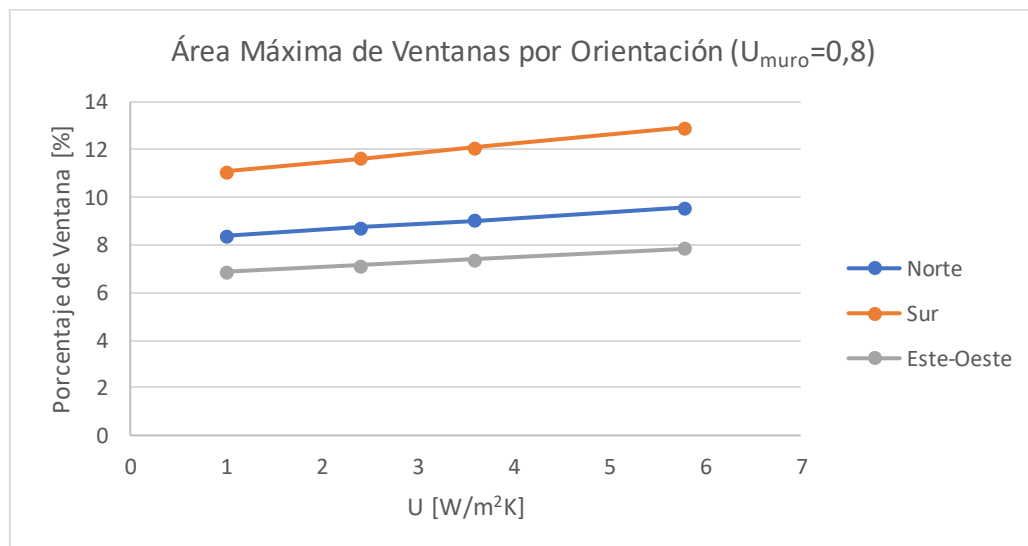


Gráfico 5-7: Área máxima de ventana por orientación para tener temperatura de confort, con $U_{muro}=0,8$.

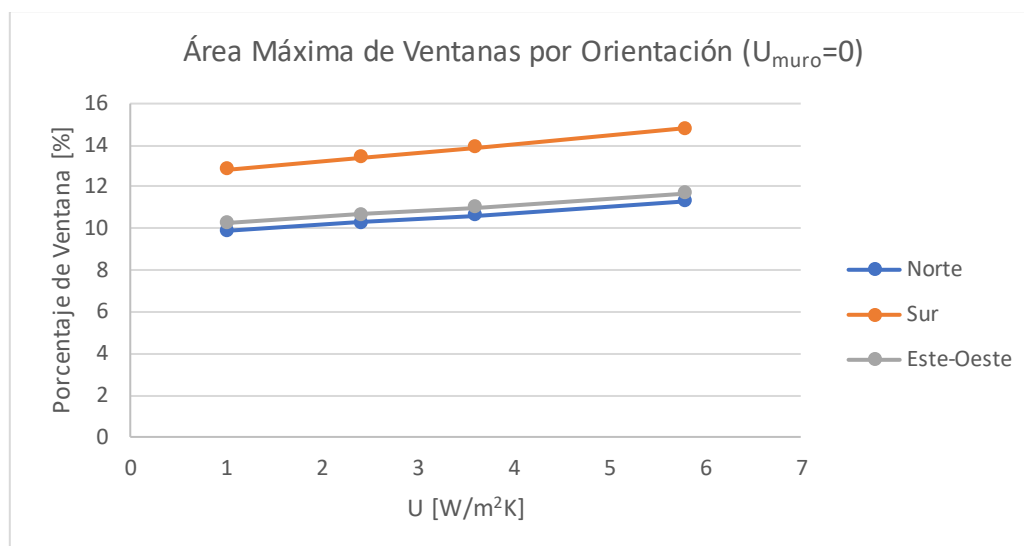


Gráfico 5-8: Área máxima de ventana por orientación para tener temperatura de confort, con $U_{muro}=0,0$.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las superficies de ventana máxima para cada alternativa.

		Superficie máxima de vidrio [%]		
U muro [W/m² °C]	U vidrio [W/m² °C]	N	S	O-P
1,9	5,8	7	10	2
	3,6	7	10	2
	2,4	7	9	2
	1	6	9	2
0,8	5,8	10	13	8
	3,6	9	12	7
	2,4	9	12	7
	1	8	11	7
0	5,8	11	15	12
	3,6	11	14	11
	2,4	10	13	11
	1	10	13	10

Tabla 5-1: Tabla resumen de superficie máxima de ventana para alcanzar la condición de confort.

De los resultados obtenidos se puede comprobar que la superficie máxima de ventana para todos los casos es baja. La orientación más perjudicada por el sobrecalentamiento es la oriente y poniente. Esto ocurre por los altos niveles de radiación solar en ambas orientaciones, comentados en el Capítulo 4. En segundo lugar, se encuentra la orientación norte.

Respecto de la transmitancia térmica, se observa que a medida que disminuye el valor para las ventanas, disminuye la superficie máxima de vidrio. Esto ocurre porque las ganancias por esta superficie, debido a la radiación solar, no varían de gran manera, pero mientras más aísla, más se dificulta la pérdida de calor, aumentando la temperatura interior. Por otro lado, como las superficies máximas no superan el 15%, al aumentar la aislación del muro, mejora la situación en verano.

En el Gráfico 5-6, se puede apreciar que para la orientación oriente-poniente el porcentaje de ventana es de tan solo un 2%. Esto se genera debido a que el dormitorio alcanza elevadas temperaturas tan solo por el aporte de los flujos por el muro, la ventilación y las ganancias internas. Por ello, sin importar el tamaño de la ventana, ya existe sobrecalentamiento en el dormitorio.

Uno de los problemas que causa sobrecalentamiento en el dormitorio es la dificultad que presenta éste para eliminar el exceso de calor, lo que se traduce en una baja superficie vidriada. El hecho de haber impuesto en el modelo una ventilación de 1 RAH impide eliminar este exceso, lo que no representa una situación real, ya que instintivamente la persona abrirá las ventanas cuando las temperaturas sean muy altas. Sin embargo, el hecho de considerar una ventilación de 1 RAH representa correctamente el momento de llegada de los usuarios al hogar, entendiéndose de que éste se encontrará cerrado después de recibir el soleamiento durante gran parte del día. Esto puede generar un gran cambio, sobre todo si se ventila durante la noche, donde la temperatura es inferior a los 18° C.

Finalmente, la aplicación de estas superficies en la fachada de una vivienda es inviable arquitectónicamente, tanto por funcionalidad como por estética, ya que dificulta el ingreso de luz natural al recinto, la ventilación, y podría generar sensación de encerramiento para la persona. Además, la diferencia entre la mejor y la peor alternativa (5% de superficie) no representa un gran cambio arquitectónico, por lo que este tipo de soluciones no representa un cambio relevante frente al sobrecalentamiento. En la misma línea, el estudio realizado por Vera y Ordenes el año 2002 (Vera y Ordenes, 2002) indica que la reducción de las cargas de refrigeración producto de la aislación es de tan solo un 5% anual. Por estos motivos, se debe buscar soluciones que permitan aumentar la superficie de ventana manteniendo las condiciones de confort al interior del hogar.

Por otro lado, se desea comprobar el estado actual del dormitorio al cumplir con la superficie vidriada de la OGUC 2016 y NTM 11. Los requisitos exigidos por ambas normativas dependerán de la transmitancia térmica del vidrio y, en el caso de la NTM 11, la orientación. A continuación, se exponen los requisitos para ambas normativas.

Normativa	U vidrio [W/m ² °C]	Orientación	Superficie
OGUC 2016	5,8	No aplica	25%
	3,6>=U>2,4	No aplica	60%
	U<=2,4	No aplica	80%
NTM 11	U=3,6	N	77%
		S	40%
		O-P	53%
	U=2,4	N	85%
		S	51%
		O-P	63%
	U=1,0	N	91%
		S	60%
		O-P	71%

Tabla 5-2: Superficie máxima de vidrio según normativa OGUC 2016 y NTM 11.

Para comprobar el estado de los dormitorios se estudia la cantidad de horas por sobre la banda de confort (sobrecalentamiento) que hay en el dormitorio al cumplir con los requisitos de ambas normativas. Así, se grafica la cantidad de horas de disconfort en función del porcentaje de vidrio en la fachada (Ver Anexo B). A continuación, se muestra el caso particular para la orientación oriente-poniente, con transmitancia térmica de muro de 1,9 [W/m² °C].

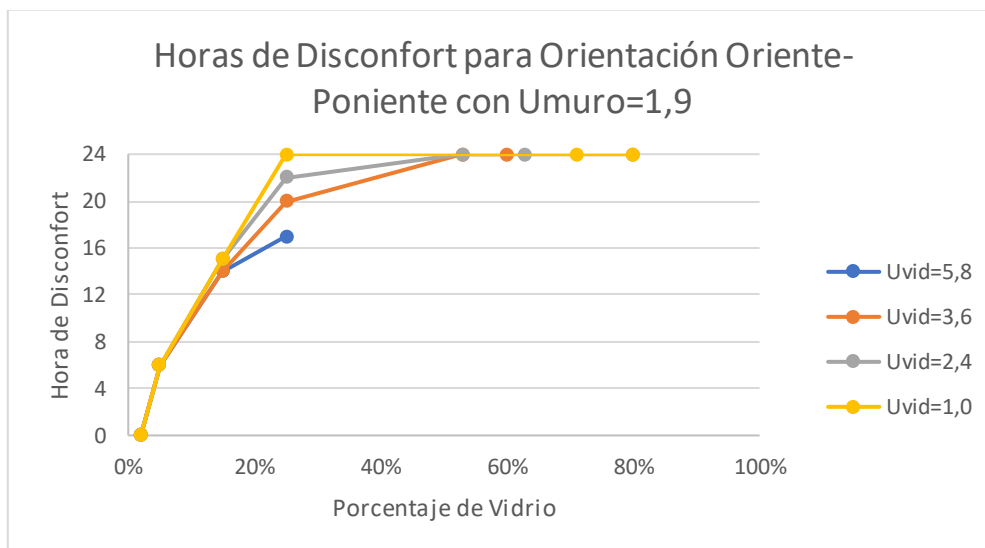


Gráfico 5-9: Horas de Disconfort en el dormitorio.

En la siguiente tabla se resume todos los resultados para cada una de las alternativas, donde se indica las horas de disconfort en el dormitorio al cumplir con el requisito máximo para cada normativa. Es importante mencionar que, a pesar de que la NTM 11 exija una transmitancia térmica de muro de 0,8 [W/m² °C], se calcula las horas considerando el valor 1,9 [W/m² °C] de modo comparativo.

		Máximo % Vidrio / Horas de Disconfort											
		OGUC 2016						NTM 11					
U muro [W/m ² °C]	U vidrio [W/m ² °C]	N		S		O-P		N		S		O-P	
1,9	5,8	25%	15	25%	14	25%	17	0%	-	0%	-	0%	-
	3,6	60%	24	60%	21	60%	24	77%	24	40%	21	53%	24
	2,4	80%	24	80%	24	80%	24	85%	24	51%	24	63%	24
	1	80%	24	80%	24	80%	24	91%	24	60%	24	71%	24
0,8	5,8	25%	16	25%	14	25%	17	0%	-	0%	-	0%	-
	3,6	60%	24	60%	24	60%	24	77%	24	40%	24	53%	24
	2,4	80%	24	80%	24	80%	24	85%	24	51%	24	63%	24
	1	80%	24	80%	24	80%	24	91%	24	60%	24	71%	24
0	5,8	25%	17	25%	14	25%	16	0%	-	0%	-	0%	-
	3,6	60%	24	60%	24	60%	24	77%	24	40%	24	53%	24
	2,4	80%	24	80%	24	80%	24	85%	24	51%	24	63%	24
	1	80%	24	80%	24	80%	24	91%	24	60%	24	71%	24

Tabla 5-3: Resumen de Horas de Disconfort para los requisitos de la norma OGUC 2016 y NTM11.

De la tabla anterior se comprueba que la mayoría de las alternativas estudiadas presentan sobrecalentamiento las 24 horas del día. Esto se debe a que la normativa permite altos porcentajes de superficie vidriada para las fachadas cuando se utiliza un DVH. Como se vio anteriormente, esta solución permite reducir las cargas de calefacción en invierno, pero los altos niveles de vidrio aumentan las ganancias por radiación solar, traduciéndose en altos niveles de disconfort en el verano. En el caso de los vidrios monolíticos, se observan menos horas de disconfort al día, aunque de todas formas alto, porque solo se permite un 25% de vidrio, mientras que las otras opciones superan el 40%. Éste es el caso más representativo en las personas encuestadas, que en su mayoría presentaron el problema.

De esta forma, se concluye que la normativa, tanto actual como la propuesta, está enfocada en mejorar las condiciones de confort en invierno, reduciendo las cargas de calefacción, pero deja de lado las altas temperaturas cuando los niveles de radiación solar son altos. Así, se presentarán altos niveles de disconformidad en el verano. Esta situación incluso puede empeorar, ya que la propuesta, en algunos casos, permite niveles mayores de superficie de ventana.

6 Aplicación de técnicas de acondicionamiento pasivo

Con el propósito de mejorar el desempeño térmico de los hogares de la Región Metropolitana en verano, y de mantener niveles adecuados de superficie vidriada, tanto por estética como por utilidad, se estudiaron y evaluaron distintas estrategias de control térmico para la edificación. Para ello, se investigaron diferentes alternativas aplicadas en inmuebles que sufren de sobrecalentamiento, y se probaron en el caso base para tener órdenes de magnitud de las posibles mejoras que se alcanzan. De esta forma, se busca generar recomendaciones que permitan disminuir las elevadas temperaturas alcanzadas en los hogares, y así aumentar el confort de las personas.

Las técnicas estudiadas en este trabajo son de carácter pasivo, ya que buscan proveer las mejores condiciones ambientales al interior de los recintos en función del clima. Para lograrlo es necesario analizar cada vivienda en particular, identificando los beneficios y restricciones del clima en que se encuentra. Así, con estas técnicas pasivas se fija el objetivo de mantener condiciones favorables a lo largo de todo el año, por lo que se debe tener en cuenta los periodos de frío y calor, de manera que las alternativas seleccionadas sean compatibles entre ellas. De esta forma, una estrategia que beneficia un periodo en específico debe intentar afectar en la menor manera posible el comportamiento de la vivienda en el periodo en el que ésta no se aplica.

En los periodos de calor, las estrategias de enfriamiento apuntan a impedir, en lo posible, las ganancias solares a través de los elementos de la envolvente, evitándolas por medio de protecciones solares. Además, se busca eliminar los excesos de calor al interior de los inmuebles por medio de la ventilación, y reducir las ganancias internas, sobre todo en edificios de oficina, donde éstas son altas.

Para periodos fríos, se busca calentar de manera pasiva los recintos captando la radiación proveniente del sol, principalmente por las ventanas. Además, se debe proteger de las bajas temperaturas y conservar el calor interior, a través de una envolvente bien aislada.

Una de las ventajas que presenta este tipo de soluciones es que busca aprovechar y proteger el inmueble de las adversidades climáticas sin utilizar energía eléctrica, lo que se traduce en un ahorro económico. Si no se alcanzan condiciones de confort, y se utilizan sistemas mecánicos de climatización, permiten reducir su consumo.

Conociendo los beneficios que entregan estas técnicas, este capítulo se enfoca en buscar alternativas pasivas que logren eliminar las ganancias térmicas al interior de la vivienda e impedir las ganancias a través de la envolvente, para disminuir las elevadas temperaturas que se alcanzan al interior de las viviendas en la Región Metropolitana. A continuación, se presentan las opciones estudiadas.

6.1 Ventilación Nocturna (VN)

La ventilación en la vivienda tiene un papel fundamental para el bienestar de los usuarios ya que: permite mantener la calidad del aire al interior de los recintos, conservando niveles aceptables de humedad; y logra extraer las masas de calor acumuladas debido a las ganancias internas y solares, logrando enfriar el interior del recinto en los periodos calurosos del año. Ésta puede ocurrir de manera natural, a través de ventanas y puertas, o bien, de manera forzada, producto de ventilación mecánica.

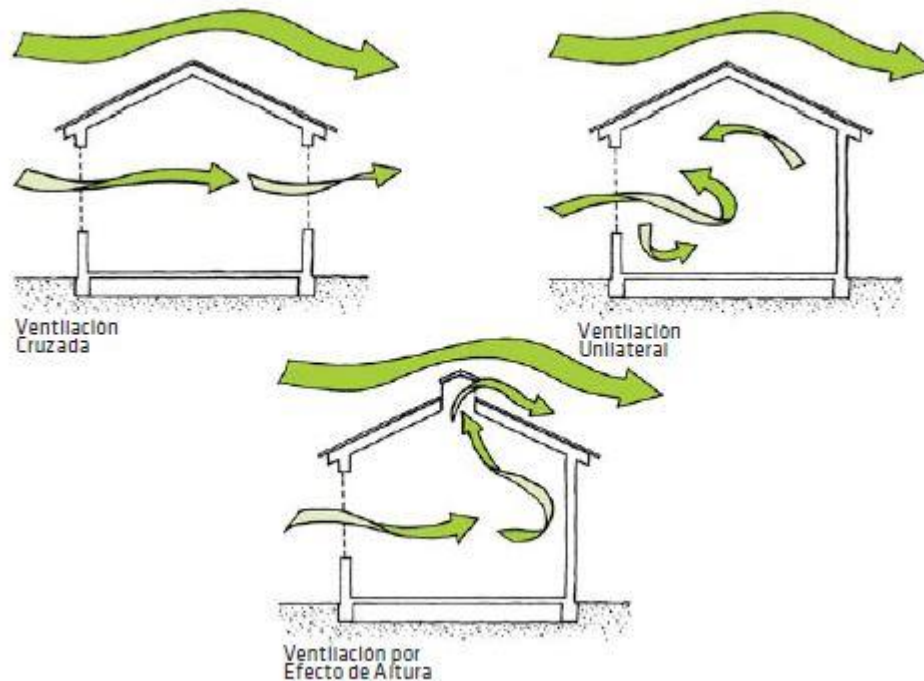


Ilustración 6-1: Tipos de ventilación natural. Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética de la Vivienda Social.

Una de las alternativas pasivas que se investigó fue la ventilación nocturna, que consiste en ventilar el recinto durante la noche, siempre que la temperatura exterior sea inferior a la temperatura de confort, para disminuir la temperatura y enfriar la masa estructural del recinto. Esta masa enfriada durante la noche, permite absorber el calor que se genera al día siguiente, haciendo disminuir su temperatura. Esto provoca un amortiguamiento en la oscilación térmica al interior del edificio, además de retardar la hora en la que se produce la temperatura máxima interior frente a la exterior. La efectividad de este método dependerá de que al interior de los recintos existan elementos de gran inercia térmica, como lo son los elementos masivos, como el hormigón. Durante las horas más calurosas se debe mantener la ventilación al mínimo, para evitar que el aire exterior, que se encuentra a una temperatura superior a la de confort, ingrese.

Una de las características principales de esta técnica es su facilidad para ser aplicada, ya que responde a la lógica de que cuando el usuario sienta calor al interior del recinto,

abrirá las ventanas para eliminarlo. Si se quiere lograr un mejor desempeño con este tipo de ventilación, se debe ventilar directamente la masa estructural del edificio, como lo son los muros, pisos y divisiones interiores, para aprovechar el efecto de la inercia térmica.

Para que la ventilación nocturna sea una alternativa real para disminuir las elevadas temperaturas al interior de las viviendas, se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Se debe aplicar preferentemente en lugares donde exista una gran oscilación térmica diaria, y donde gran parte de la noche la temperatura exterior se encuentre bajo la temperatura de confort.
- Aumentar el caudal de aire que ingresa cuando la temperatura exterior es inferior a la interior, pero sin causar corrientes molestas cuando aplique, por ejemplo, cuando hay personas en la habitación.

Además, si el inmueble cuenta con elementos de alta inercia térmica en contacto con el aire interior y se evitan ganancias de calor a través de la aislación de la envolvente o de protección solar, aumentará el beneficio de la ventilación nocturna.

Es importante mencionar que esta alternativa de enfriamiento pasivo no considera a costo alguno, ya que solo requiere abrir las ventanas del recinto durante la noche.

A continuación, se muestra el comportamiento de un recinto emplazado en un lugar con gran oscilación térmica, donde se ha aplicado la ventilación nocturna.

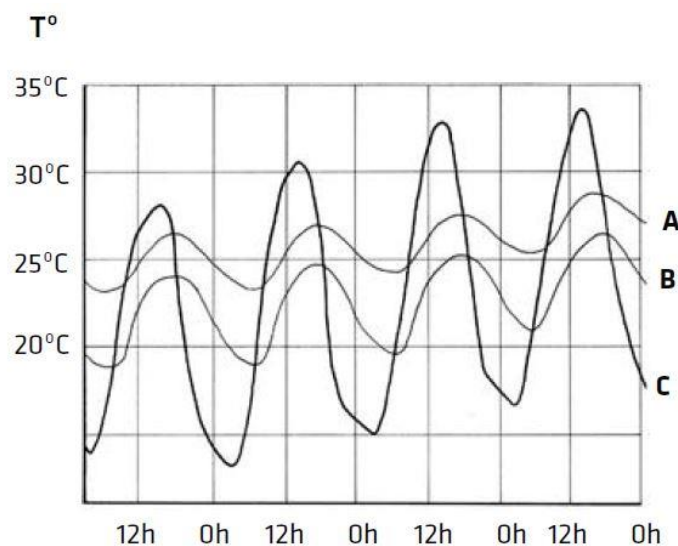


Ilustración 6-2: Curva de temperatura interior con o sin ventilación nocturna. Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética de la Vivienda Social.

La curva A corresponde a la temperatura interior sin ventilación nocturna, la curva B corresponde a la temperatura interior con ventilación nocturna, y la curva C corresponde a la temperatura exterior. El efecto de la ventilación nocturna se observa en la mayor caída de la temperatura durante la noche, lo que permite alcanzar temperaturas más bajas durante el día.

Diversos edificios en la Región Metropolitana han optado por utilizar la ventilación nocturna para poder reducir las elevadas cargas de refrigeración que presentan, especialmente los edificios de oficina. Debido a la gran oscilación térmica que existe en Santiago, esta alternativa logra buenos resultados, más aún en estos edificios, donde predominan las estructuras de hormigón, aprovechándose la inercia térmica, además de que la ocupación durante la noche es baja, por lo que se puede aumentar el caudal del aire al interior. El Edificio Las Industrias y Edificio Pedro de Valdivia son ejemplos de haber aplicado esta alternativa, donde presentan una disminución entre un 20% a 30% en las cargas de refrigeración durante los meses de octubre a marzo principalmente (Miranda, 2008). Por otro lado, en los edificios de oficina estudiados por Bustamante (Bustamante, 2011), se modela esta alternativa, donde se obtienen grandes disminuciones en las cargas de refrigeración, pero se comentarán más adelante, ya que analiza la ventilación nocturna aplicando otras técnicas de enfriamiento pasivo.

Finalmente, esta técnica de enfriamiento pasivo puede ser beneficiosa para las viviendas en la Región Metropolitana, debido a la gran oscilación térmica de la zona, y por el predominio de estructuras de material pesado, con gran inercia térmica, como las de hormigón o albañilería.

6.1.1 Modelación

Se decidió incorporar la ventilación nocturna al caso base debido a que éste presenta características recomendables en la aplicación de esta técnica. Primero, se emplaza en Santiago, zona con gran oscilación térmica, además de que el piso, cielo y muro exterior son de material pesado.

El horario escogido para aplicar la ventilación fue entre las 10 pm y las 8 am, horas en que la temperatura exterior siempre es inferior a 18° C. De esta forma, se asegura un mayor enfriamiento de la masa estructural. La ventilación aplicada será de 5 RAH, ya que ésta se puede alcanzar fácilmente con ventilación a través de la ventana. Durante el resto del día se mantendrá una ventilación de 1 RAH, como había sido establecido en el modelo base. A continuación, se muestra el perfil de temperatura donde se aplica la ventilación nocturna.

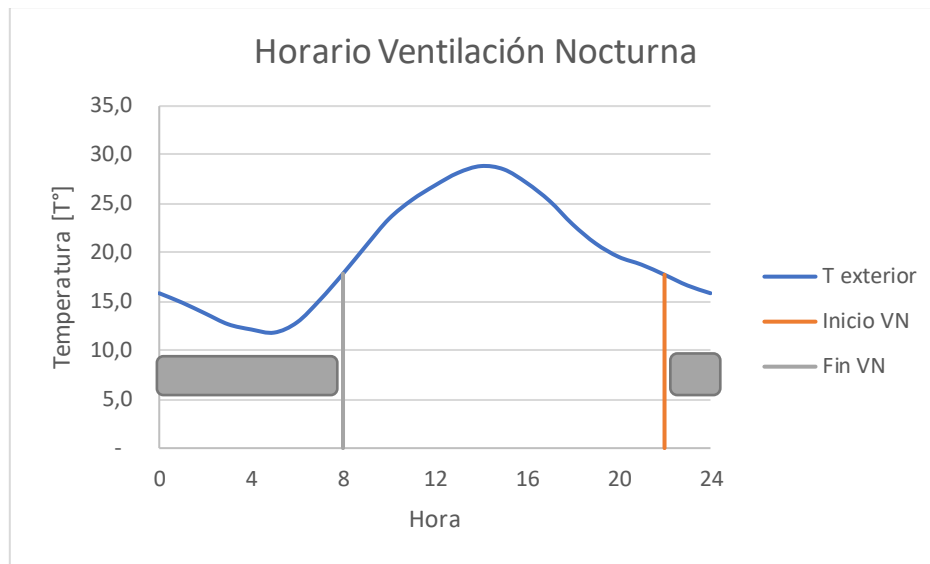


Gráfico 6-1: Horario Ventilación Nocturna.

Una vez definida la ventilación nocturna en el modelo, se simularon los mismos casos de estudio que en el modelo base, obteniéndose así la temperatura interior del recinto para cada hora. Con ello, se generaron los gráficos para comprobar el efecto de la ventilación nocturna en el comportamiento del dormitorio y en el porcentaje de vidrio, los que se muestran en el Anexo C. A continuación, se presentan 3 casos particulares, para los 3 Umuro modelados con orientación norte, 25% de superficie vidriada y U_{vent} igual a 3,6 [W/(m²°C)], para comprobar el efecto de esta técnica.

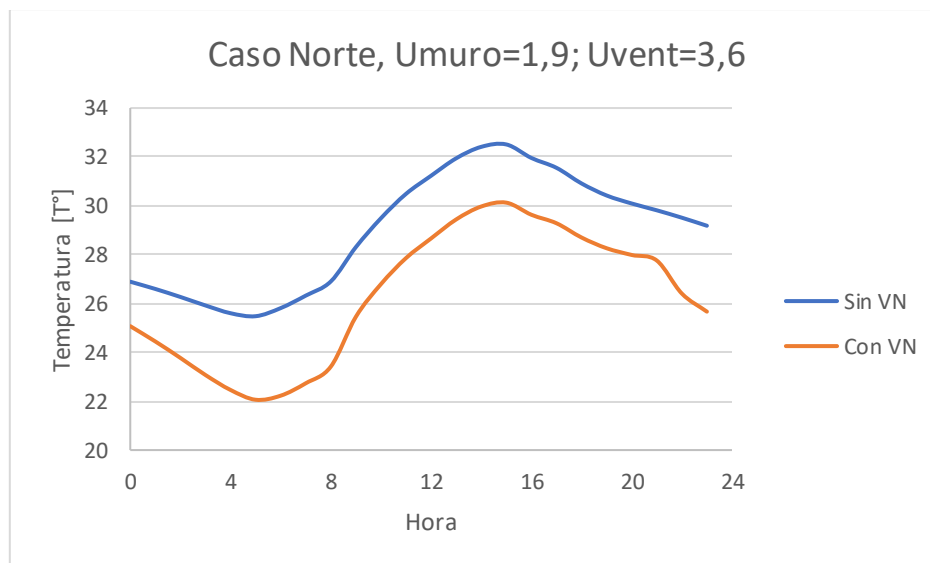


Gráfico 6-2: Temperatura interior del dormitorio con Umuro=1,9; con o sin ventilación nocturna.

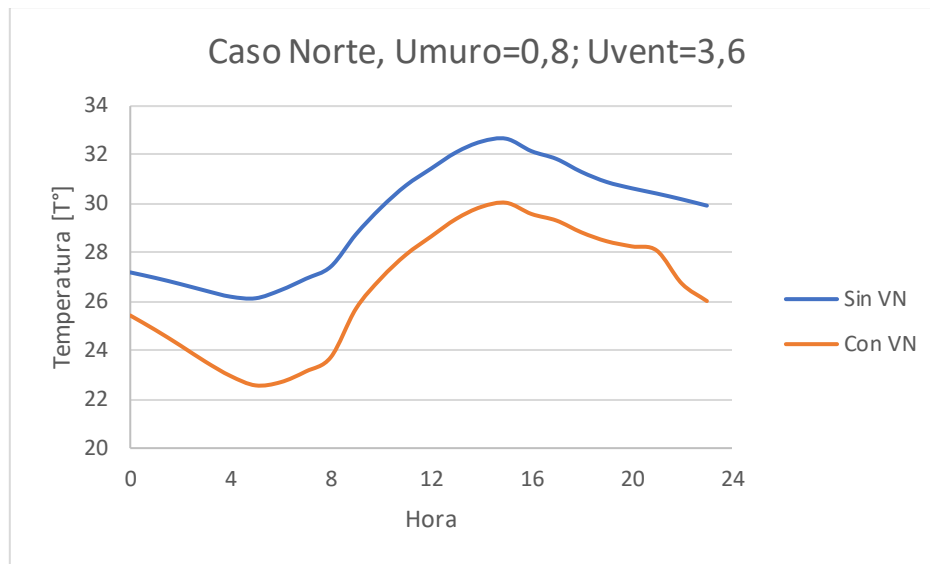


Gráfico 6-3: Temperatura interior del dormitorio con $U_{muro}=0,8$; con o sin ventilación nocturna.

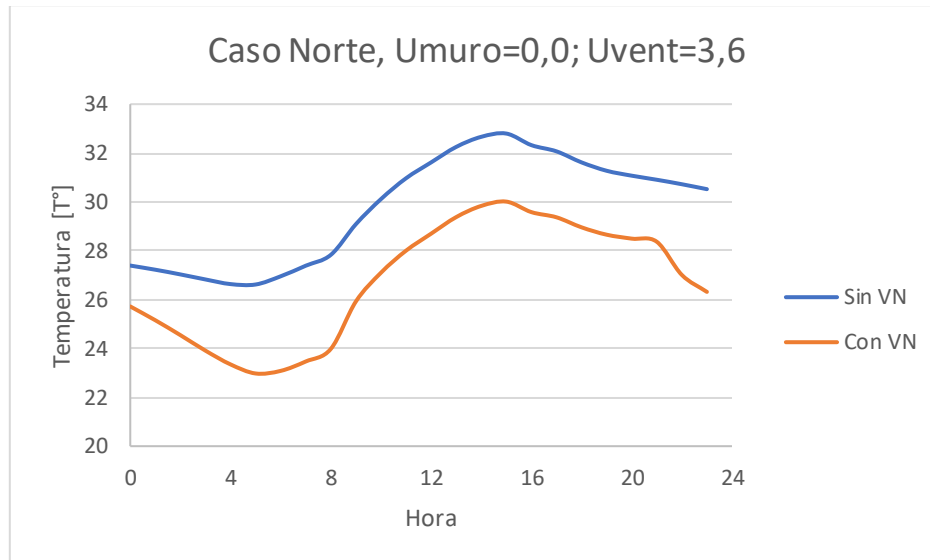


Gráfico 6-4: Temperatura interior del dormitorio con $U_{muro}=0,0$; con o sin ventilación nocturna.

De los gráficos anteriores se comprueba que la ventilación nocturna logra mejorar el desempeño térmico de la vivienda en verano. Al igual que en la Ilustración 6-2, se puede observar que en los horarios donde se aplica la ventilación nocturna (entre 22 pm a 8 am) el descenso de la temperatura interior es elevado, ya que logra eliminar la acumulación de calor que se produjo durante el día y enfriar la masa estructural. Por este motivo, al día siguiente, la masa estructural enfriada absorbe calor, lográndose temperaturas inferiores. La disminución de la temperatura máxima diaria alcanza los 2° C, y puede aumentar esta disminución a medida que incrementa la superficie vidriada. Además, se comprueba que la ventilación afectará sin importar la transmitancia térmica del muro ni de la ventana.

La superficie máxima de ventana se obtuvo de la misma forma que el caso base, es decir, a través de un ajuste lineal entre la superficie de ventana y la temperatura máxima alcanzada para cada alternativa (Ver Anexo C). De esta forma, se obtuvo el porcentaje de ventana tal que la temperatura no supere los 26,6° C. A continuación, se presentan los valores obtenidos en función de la transmitancia térmica de la ventana.

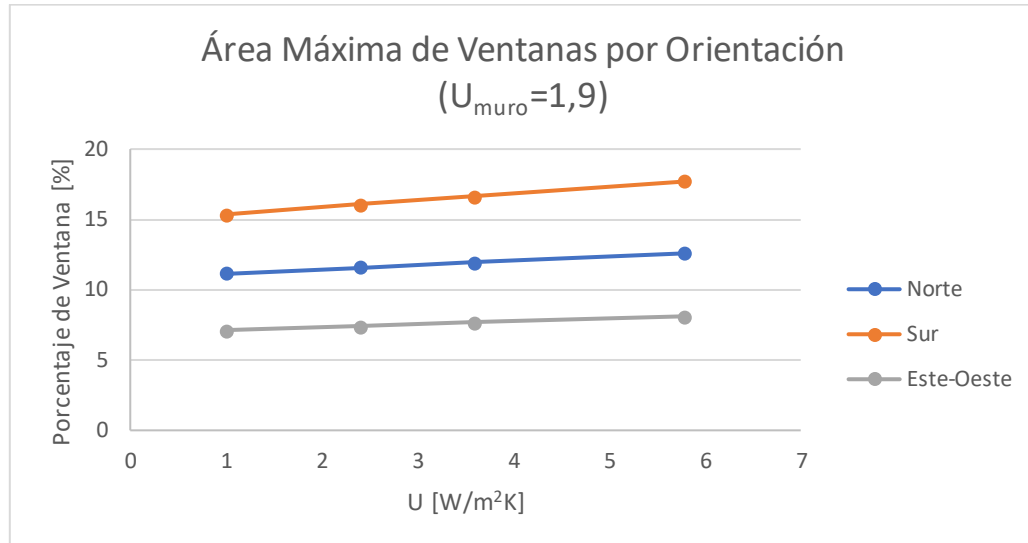


Gráfico 6-5: Área máxima de ventana por orientación para tener temperatura de confort, con $U_{muro}=1,9$ con VN.

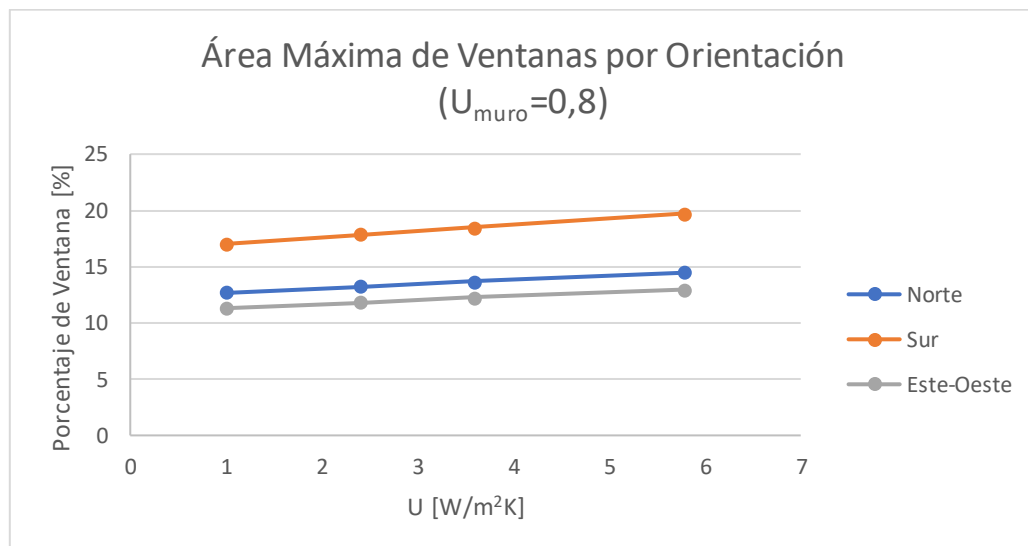


Gráfico 6-6: Área máxima de ventana por orientación para tener temperatura de confort, con $U_{muro}=0,8$ con VN.

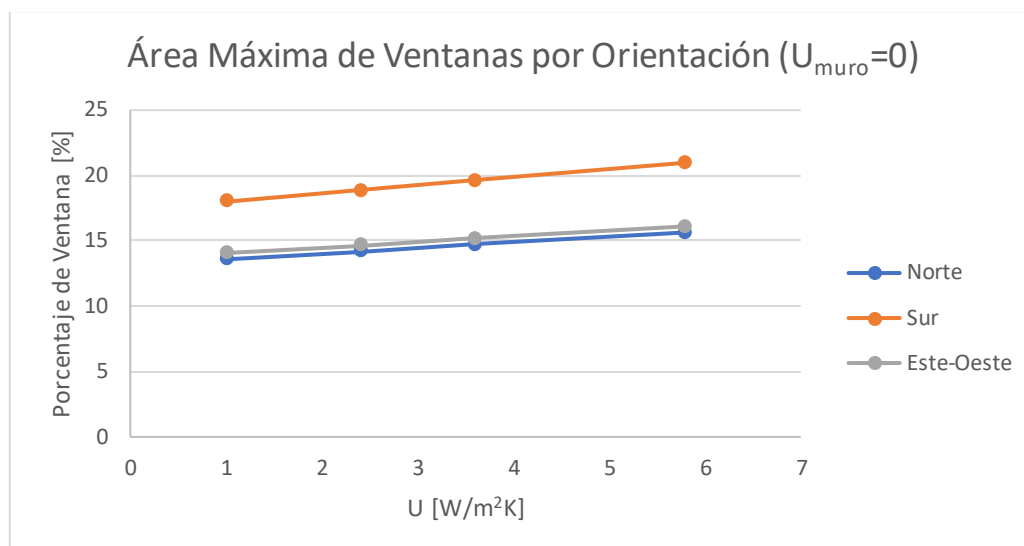


Gráfico 6-7: Área máxima de ventana por orientación para tener temperatura de confort, con $U_{muro}=0$, 0 con VN.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las superficies de ventana máxima para cada alternativa considerando ventilación nocturna.

		Superficie máxima de vidrio [%]		
U muro [W/m2 °C]	U vidrio [W/m2 °C]	N	S	O-P
1,9	5,8	13	18	8
	3,6	12	17	8
	2,4	12	16	7
	1	11	15	7
0,8	5,8	14	20	13
	3,6	14	19	12
	2,4	13	18	12
	1	13	17	11
0	5,8	16	21	16
	3,6	15	20	15
	2,4	14	19	14
	1	14	18	14

Tabla 6-1: Tabla resumen de superficie máxima de ventana para alcanzar la condición de confort con ventilación nocturna.

Además, se presentan gráficos comparativos entre la alternativa con y sin ventilación nocturna.

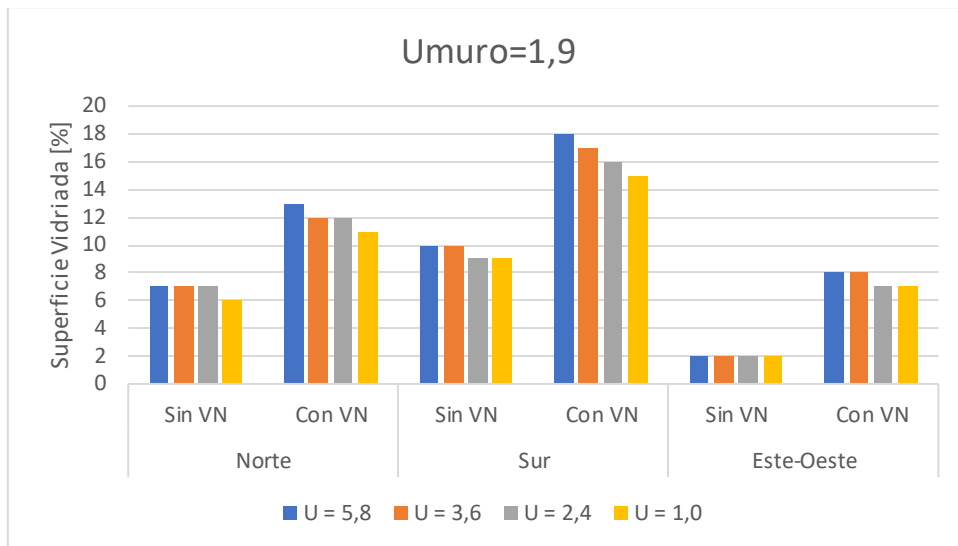


Gráfico 6-8: Comparación de Ventilación Nocturna para Umuro=1,9.

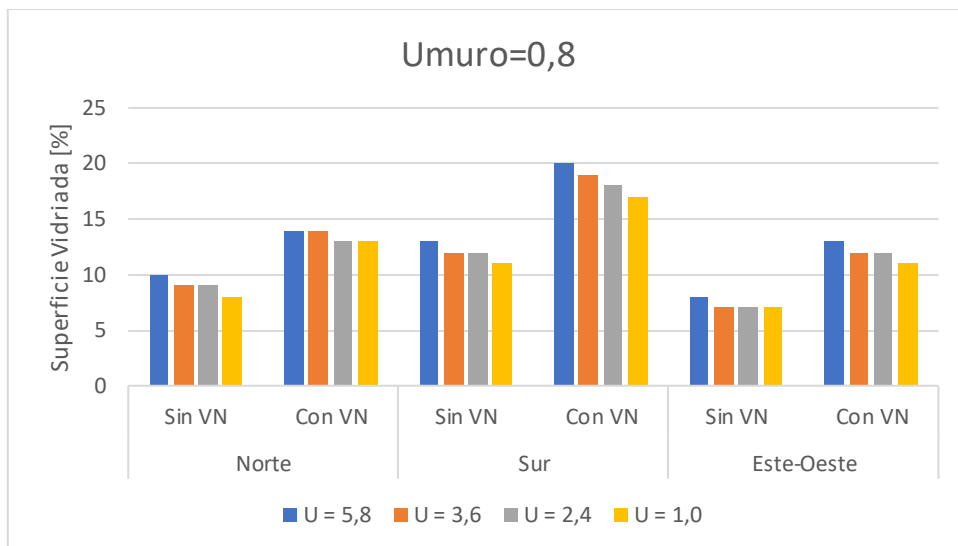


Gráfico 6-9: Comparación de Ventilación Nocturna para Umuro=0,8.

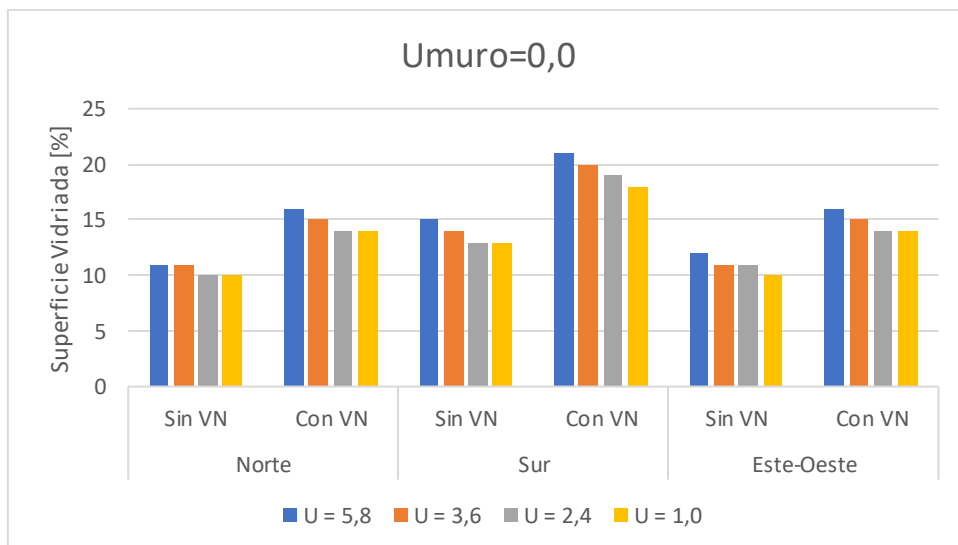


Gráfico 6-10: Comparación de Ventilación Nocturna para Umuro=0,0.

De los gráficos anteriores se observa que en todos los casos la ventilación nocturna permitió aumentar la superficie máxima de vidrio para el dormitorio. En promedio, se logra aumentar la superficie en un 5% respecto al muro, lo que representa un 79% más respecto al caso base. A pesar de ello, solo la orientación sur logra superar el 20% de superficie vidriada. Las superficies alcanzadas aún podrían generar dificultades en el confort, ya que siguen siendo bajas, por lo que se debe buscar una alternativa complementaria para alcanzar superficies mayores a 25% en todas las orientaciones. De todas formas, se puede concluir que la ventilación nocturna es una técnica altamente efectiva para mejorar el desempeño térmico de la vivienda en verano en la Región Metropolitana, ya que solo requiere abrir las ventanas, lo que no genera costo alguno.

Por otro lado, para comprobar el estado actual del dormitorio respecto a la OGUC 2016 y NTM 11, se utilizaron los porcentajes de cada normativa, especificados en la Tabla 5-2. Al modelar estos casos, se obtuvieron las horas de disconfort en función del porcentaje de vidrio en la fachada (Ver Anexo C). A modo de resumen, se presentan las horas de disconfort en el dormitorio al cumplir con la normativa para cada caso. Al igual que para el caso base, se estudia el caso de la NTM 11 con una transmitancia térmica de muro igual a 1,9 [W/m² °C], a pesar de que se exija 0,8 [W/m² °C].

		Máximo % Vidrio / Horas de Disconfort											
		OGUC 2016						NTM 11					
U muro [W/m ² °C]	U vidrio [W/m ² °C]	N		S		O-P		N		S		O-P	
1,9	5,8	25%	11	25%	6	25%	11	0%	-	0%	-	0%	-
	3,6	60%	19	60%	17	60%	19	77%	21	40%	13	53%	17
	2,4	80%	24	80%	22	80%	24	85%	24	51%	17	63%	22
	1	80%	24	80%	24	80%	24	91%	24	60%	21	71%	24
0,8	5,8	25%	11	25%	6	25%	10	0%	-	0%	-	0%	-
	3,6	60%	19	60%	17	60%	19	77%	23	40%	13	53%	19
	2,4	80%	24	80%	22	80%	24	85%	24	51%	18	63%	23
	1	80%	24	80%	24	80%	24	91%	24	60%	22	71%	24
0	5,8	25%	11	25%	5	25%	9	0%	-	0%	-	0%	-
	3,6	60%	21	60%	18	60%	21	77%	23	40%	15	53%	19
	2,4	80%	24	80%	22	80%	24	85%	24	51%	18	63%	24
	1	80%	24	80%	24	80%	24	91%	24	60%	24	71%	24

Tabla 6-2: Resumen de Horas de Disconfort para los requisitos de la norma OGUC 2016 y NTM 11, con Ventilación Nocturna.

A pesar de que se logra una mejora en la mayoría de los casos, siguen existiendo elevadas horas de disconfort diarias al cumplir con la normativa. Los buenos resultados de la ventilación nocturna no logran contrarrestar las excesivas ganancias producto de los altos porcentajes de vidrio permitido en ambas normativas.

6.2 Protección Solar (PS)

Se le denomina protección solar a cualquier elemento opaco, que puede ser fijo o móvil, diseñado para impedir que la radiación solar ingrese al interior de un recinto. Esta estrategia es altamente efectiva para evitar ganancias térmicas a través de los elementos vidriados y la generación del efecto invernadero, siempre que se localice por el exterior. En el caso de los elementos ubicados en el interior, ocurre que la radiación ya ingresó hacia el recinto, por lo que no evita el efecto invernadero y solo logra eliminar al exterior la fracción de radiación que puede pasar nuevamente por el vidrio.

Para lograr el objetivo de la protección solar se debe dimensionar considerando la trayectoria solar y la orientación de la ventana. De esta forma, se diseñarán de manera tal que en el verano se impida el paso a la mayor cantidad de radiación solar, mientras que en el invierno se buscará lo contrario. Esto se puede lograr gracias a que la inclinación del sol en el verano es mayor que en el invierno (Ver Ilustración 3-5).

Con respecto a la orientación de la ventana se debe tener en cuenta que si está orientada hacia el norte, los elementos horizontales serán los más indicados, ya que la mayor radiación se produce al mediodía, cuando el sol está en su punto más alto. Estos elementos puede ser aleros, parasoles, toldos, entre otros. En el caso de estar orientada hacia el oriente o poniente, los elementos verticales serán los más indicados, ya que la mayor radiación se produce en horas de la mañana o la tarde, cuando la inclinación del sol es baja. Los elementos recomendados en estos casos son celosías verticales y cortina exterior.

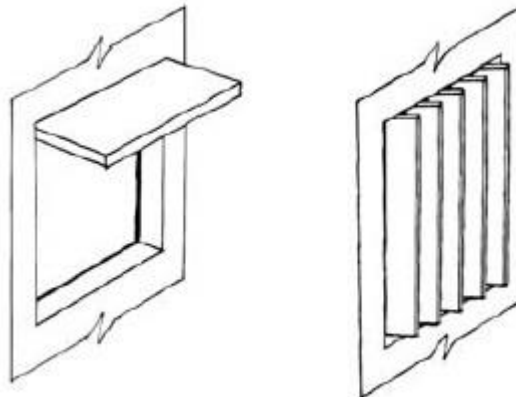


Ilustración 6-3: Elementos de protección solar. A la izquierda, un alero; a la derecha, una celosía vertical. Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética de la Vivienda Social.

A diferencia de la ventilación nocturna, los elementos de protección solar sí consideran costos, asociados a la construcción o instalación de éstos. Por ello, se realizó un análisis de costos directos de dos de las alternativas antes mencionadas, para comprobar el nivel de inversión de estas soluciones. El análisis se realizó mediante la base de datos de la empresa “CYPE Ingenieros S.A”, en donde se detallan los costos de cada partida para las alternativas vistas. Además, se corroboró los valores de la base de datos

con los valores de mercado de dos grandes empresas del rubro en Chile (“Easy” y “Sodimac”).

La primera alternativa evaluada consiste en un alero de 50 [cm] de largo, construido en madera. El costo directo de esta opción es de \$32.839 por metro lineal de alero. La otra alternativa evaluada consiste en la compra e instalación de celosías de aluminio, con un ancho de lama de 120 [mm] y perfiles montantes de aluminio. Para este caso, el costo directo es de \$181.781 por metro cuadrado de celosía. Es importante mencionar que, el 96% del costo directo corresponde al valor del producto. El detalle del análisis de costos directos de ambas alternativas se encuentra en el Anexo E. Las alternativas evaluadas se exponen a continuación.

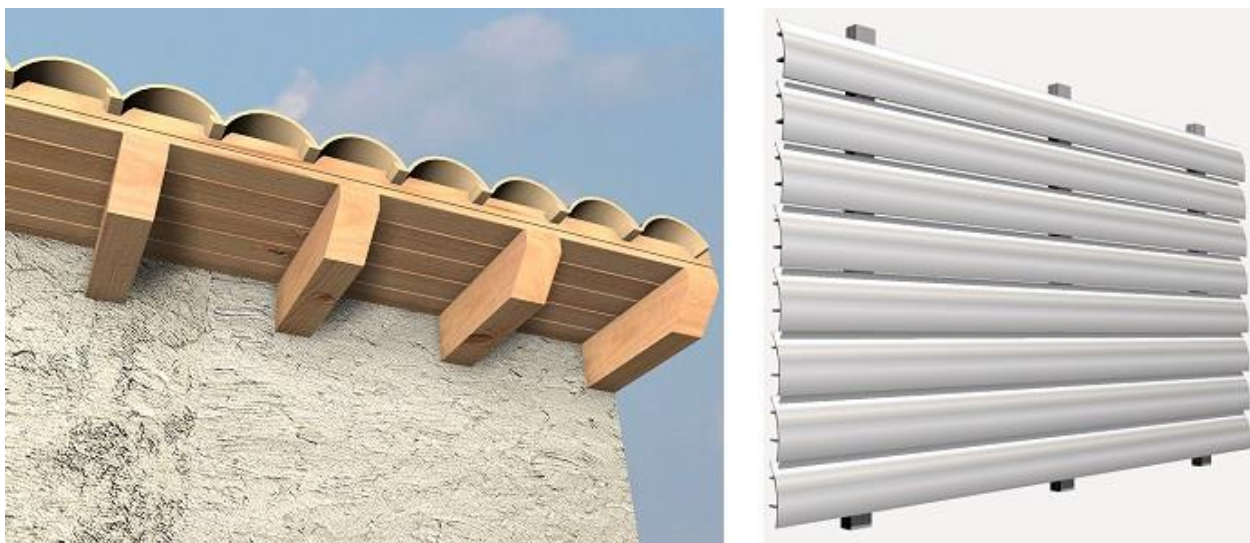


Ilustración 6-4: Alero de 50 [cm] en madera y celosía de aluminio.

Con los costos directos de ambas alternativas se puede comprobar que no es necesaria una gran inversión si se quiere considerar el alero en una vivienda, respecto al total del valor de la vivienda. Por otro lado, la celosía requiere de una inversión mayor. De todas formas, su uso será recomendable solo en aquellos casos donde existan grandes superficies vidriadas, debido a su bajo Factor de Sombra. Es importante mencionar que en ambos casos pueden aumentar los costos si se realizan después de la etapa de construcción.

6.2.1 Estandarización de la protección solar

Para comparar las distintas alternativas de protección solar existentes, primero se debe definir Factor Solar, Factor de Sombra y Factor Solar Modificado (Jara, 2013).

- El **Factor Solar** corresponde a la energía transferida hacia el interior de un recinto a través de una superficie acristalada, respecto a la energía solar incidente, expresada porcentualmente (0 a 1). La energía transferida hacia el interior corresponde a la ganancia solar producto de la energía solar transmitida

directamente a través del vidrio, más la energía solar absorbida y re-irradiada hacia el interior. A continuación, se presentan distintos factores solares dependiendo del tipo de vidrio.

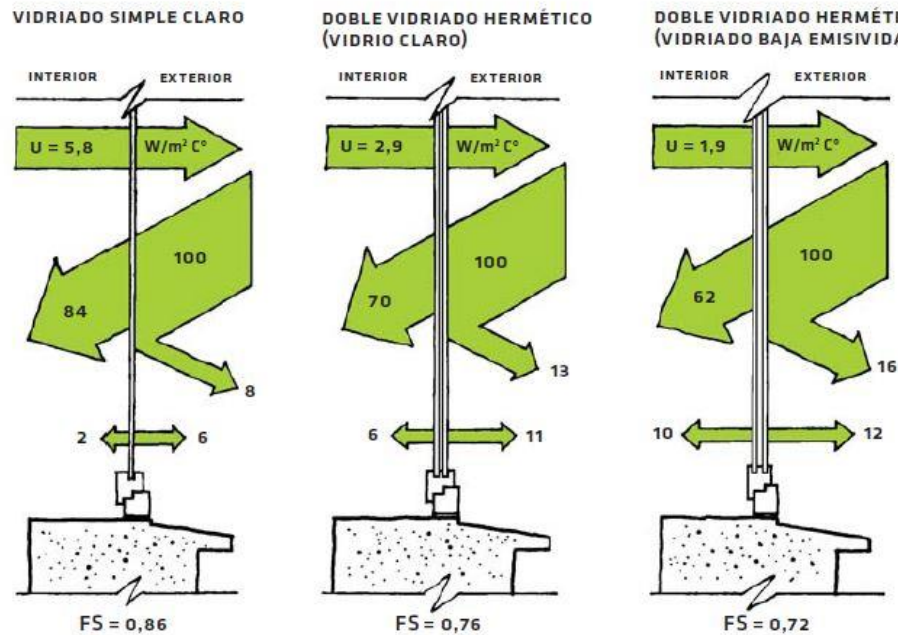


Ilustración 6-5: Factor solar de diferentes vidrios. Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética de la Vivienda Social.

- El **Factor de Sombra** corresponde a la fracción de radiación incidente que no ha sido bloqueada por un elemento de protección solar, que llega a la superficie vidriada. De esta forma, si la superficie vidriada se encuentra completamente expuesta al sol, su valor será 1. Existen distintos autores que presentan valores del factor de sombra para distintos tipos de protección solar, como Olgyay o el Código Técnico de la Edificación (CTE) de España, los que se especifican en el Anexo D.
- El **Factor Solar Modificado** es la medida porcentual de la ganancia de calor producto de la energía transmitida, absorbida y nuevamente radiada por los elementos de la ventana, en conjunto con los elementos de protección solar. De esta forma, el factor solar modificado queda definido como el producto entre el factor solar y el factor de sombra, y su valor está entre 0 y 1.

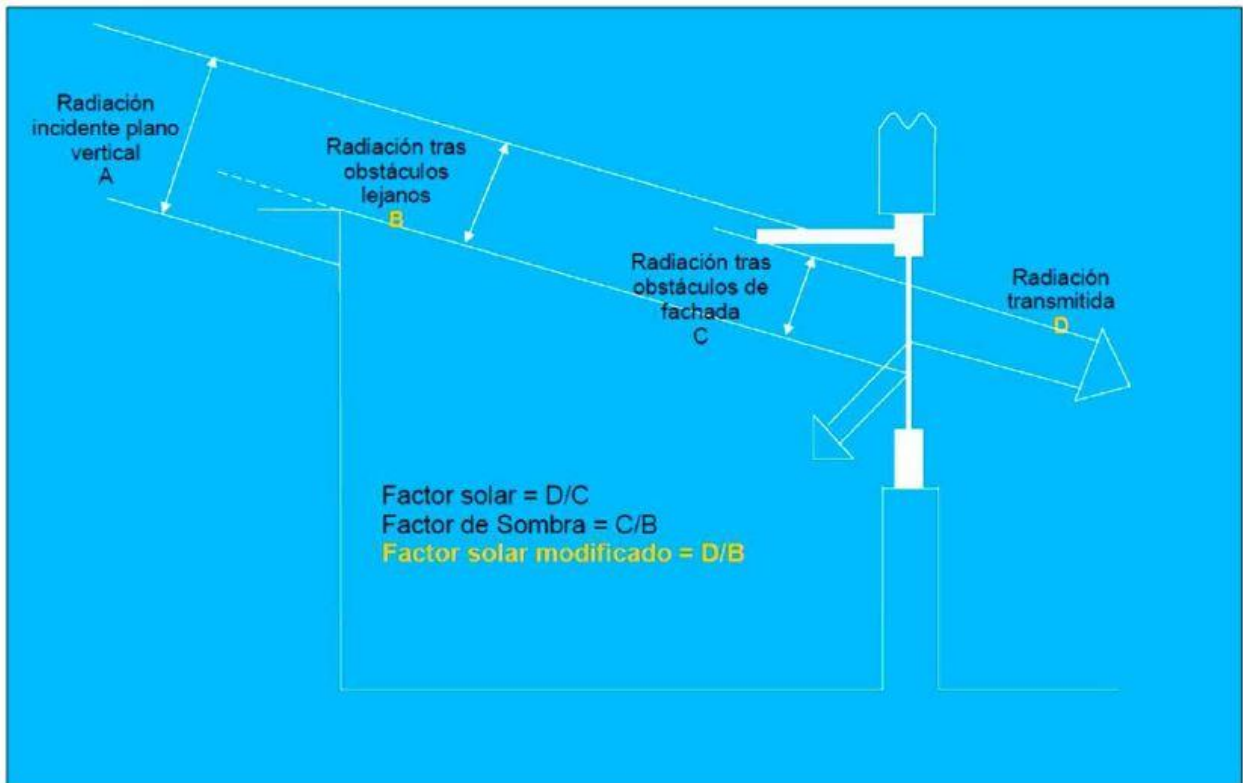


Ilustración 6-6: Factor Solar Modificado, Factor Solar y Factor de Sombra. Fuente: Jara, 2013.

6.2.2 Ejemplo en la Región Metropolitana

Al igual que con la ventilación nocturna, edificios en la Región Metropolitana han optado por la protección solar como una alternativa para evitar el excesivo asoleamiento en su interior, que ha traído problemas a los usuarios del edificio. Los casos estudiados tienen en común que sus fachadas consideran una elevada superficie vidriada, razón por la cual se generan elevadas temperaturas interiores, y que a pesar de tener mecanismos de refrigeración (con altos consumos), no era posible tener condiciones aceptables al interior del edificio.

Este es el caso del Aeropuerto de Santiago, en Pudahuel, y la Clínica Avansalud, en Providencia, donde los rayos solares ingresaban directamente por la fachada poniente. En el primer caso, el personal de trabajo y las impresoras se veían afectados por las altas temperaturas y el reflejo de la luz, mientras que, en el segundo, los pacientes en las salas de espera eran los afectados. En ambos edificios se optó por quiebravistas exteriores en las fachadas afectadas, que lograron dar solución al problema. La gracia de esta solución, es que permitió disminuir el asoleamiento sin perjuicio de la visual hacia el exterior, donde se estima una reducción entre el 15% y el 20% en las cargas de refrigeración mensual, por lo que se podría recuperar la inversión entre 5 y 7 años.

Otro ejemplo es el Edificio Consorcio en Santiago, que tiene un diseño bioclimático que incorpora una doble cortina vegetal, que permite reducir la radiación solar que entra

al edificio en verano, y permite su paso en el invierno, debido a la estacionalidad de la vegetación. En este caso, las cargas de climatización del edificio son de 90 KWh/m² - año aproximadamente, y si no se considerara la doble piel sería de 140 KWh/m² - año, solo por el buen diseño. Estos consumos están muy por debajo del consumo promedio de la edificación en Santiago, que alcanza unos 170 KWh/m² - año.



Ilustración 6-7: Edificio Consorcio, Santiago, en el año 1993 (izq) y 2007 (der), en distintas estaciones. Fuente: www.arqa.com

Por otro lado, en los edificios de oficina estudiados por Bustamante (Bustamante, 2011), se modelan los edificios con protección solar, donde se alcanza una disminución del 16,6% en las cargas de refrigeración en el edificio de Las Condes, mediante la incorporación de aleros en la fachada norte y de celosías opacas verticales en las fachadas oriente y poniente. En el edificio de Providencia, se alcanza una disminución del 6% en las cargas de refrigeración, con protección vertical en la fachada oriente y poniente, y con aleros en la fachada norte, pero considerando que además se incluyó aislación térmica en los muros y DVH al edificio actual, lo que altera la disminución.

6.2.3 Modelación

Se decidió incorporar la protección solar al caso base debido a la alta radiación solar que presenta la Región Metropolitana durante los meses de verano, parte del otoño y primavera, por lo que podría presentar mejoras.

Esta solución solo se incorporó a los casos con transmitancia térmica de muro igual a 0,8 [W/m² °C], de manera de comprobar el desempeño del hogar considerando la

aislación térmica requerida por la nueva normativa. Además, se modelan solo en los casos en que la ventana está orientada hacia oriente-poniente debido a que estos son los casos donde se alcanzaron las mayores temperaturas.

La aplicación de la protección solar se realizó mediante la modificación del Factor Solar Modificado en el caso base. De esta forma, se modelaron 3 nuevos casos, considerando un FSM de 0,6; 0,4 y 0,2. El modelo base considera un FSM igual a 0,8. Como se vio anteriormente, existen distintas combinaciones de “factor de sombra” y “factor solar” que permiten alcanzar los FSM requeridos. A modo de ejemplo, se generan opciones para alcanzar dichos valores.

- El FSM=0,6 se puede alcanzar en un vidrio monolítico (Factor Solar=0,86) con un alero de más de 1 [m] a 20 [cm] sobre una ventana de 1 [m], o en un DVH (Factor Solar=0,76) con un alero de más de 70 [cm] a 10 [cm] sobre la misma ventana. El Factor de Sombra en esos casos es de 0,7 y 0,8 respectivamente.
- El FSM=0,4 se puede alcanzar en un vidrio monolítico o DVH con una persiana veneciana abatible (Factor de Sombra=0,43).
- El FSM=0,2 se puede alcanzar en vidrio con tinte especial para alcanzar un Factor Solar=0,6 (ej: tinte verde) con una lama vertical de 15 [cm] de ancho, separada a 15 [cm] y un ángulo de 60°.

Una vez definidos los criterios para la protección solar en el modelo, se simularon los casos de estudio, obteniéndose así la temperatura interior del recinto para cada hora. Con ello, se generaron los gráficos para comprobar el efecto de la protección solar en el comportamiento del dormitorio y en el porcentaje de vidrio, los que se muestran en el Anexo C. A continuación, se presentan 2 casos particulares, con una superficie vidriada de 25% donde uno tiene transmitancia térmica de vidrio igual a 5,8 [W/(m²°C)] y el otro 3,6 [W/(m²°C)], para comprobar el efecto de esta técnica.

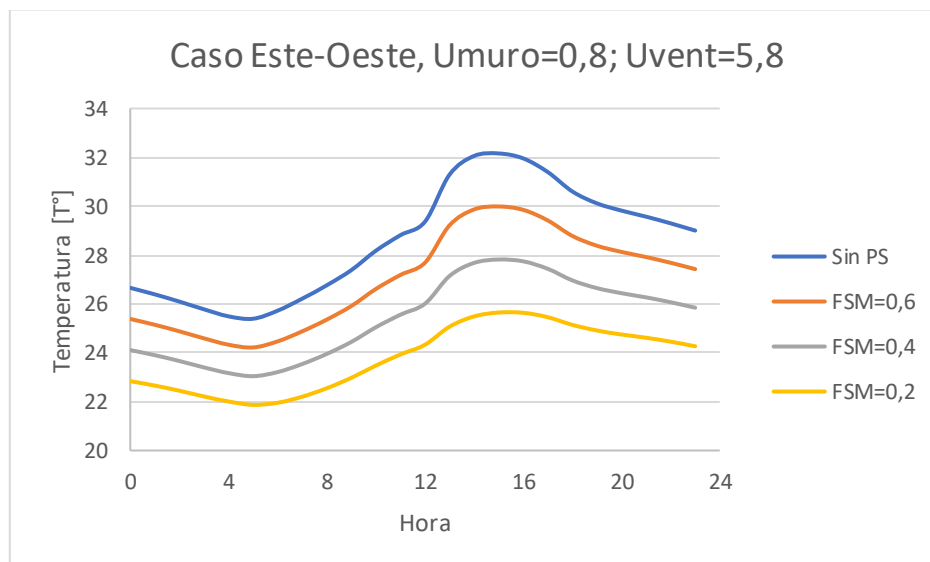


Gráfico 6-11: Temperatura interior del dormitorio con $U_{vent}=5,8$ para distintas PS.

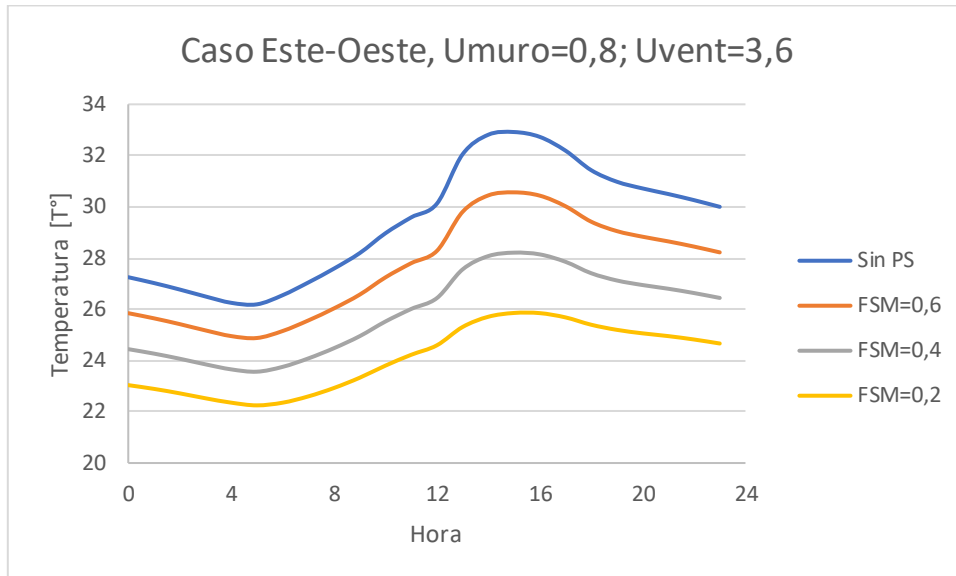


Gráfico 6-12: Temperatura interior del dormitorio con $U_{vent}=3,6$ para distintas PS.

De los gráficos anterior se comprueba que la protección solar logra mejorar el desempeño térmico de la vivienda en verano. La mejora está directamente relacionada al FSM, ya que éste incide directamente en la radiación solar que pasa a través de la ventana. De esta forma, a medida que disminuye el FSM, menor será la radiación que pasa por la ventana, por ende, menor será la temperatura al interior del dormitorio. En promedio, se logra disminuir $2,3^{\circ}\text{C}$ al interior del dormitorio por cada $0,2$ menos de FSM. Además, se comprueba que esta alternativa afecta de la misma forma a las distintas transmitancias térmicas de vidrio.

Una vez que se comprobó el efecto de la protección solar sobre el caso base, se obtiene la superficie máxima de ventana utilizando la misma metodología que el caso base, es decir, a través de un ajuste lineal entre la superficie de ventana y la temperatura máxima alcanzada para cada alternativa (Ver Anexo C). De esta forma, se obtuvo el porcentaje de ventana tal que la temperatura no supere la máxima de confort ($26,6^{\circ}\text{C}$). A continuación, se presentan los valores obtenidos en función de la transmitancia térmica de la ventana.

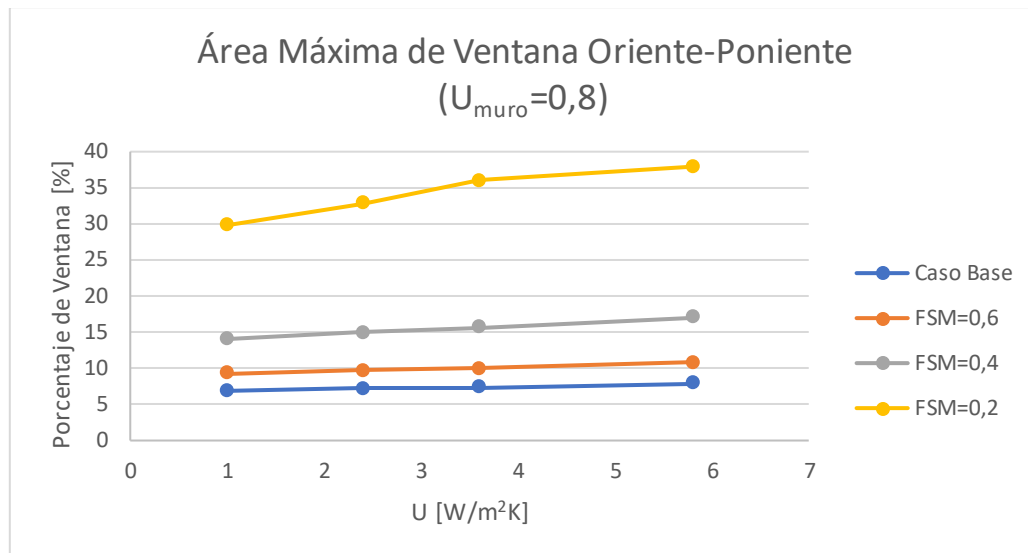


Gráfico 6-13: Área máxima de ventana para orientación oriente-poniente para tener temperatura de confort, con $U_{muro}=0,8$ con PS.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las superficies de ventana máxima para cada alternativa considerando protección solar.

		Superficie máxima de vidrio [%]			
U muro [W/m² °C]	U vidrio [W/m² °C]	Factor Solar Modificado			
		0,8	0,6	0,4	0,2
0,8	5,8	8	11	17	38
	3,6	7	10	16	36
	2,4	7	10	15	33
	1	7	9	14	30

Tabla 6-3: Tabla resumen de superficie máxima de ventana para alcanzar la condición de confort con protección solar.

Además, se presenta un gráfico comparativo entre la alternativa sin protección solar y con protección solar.

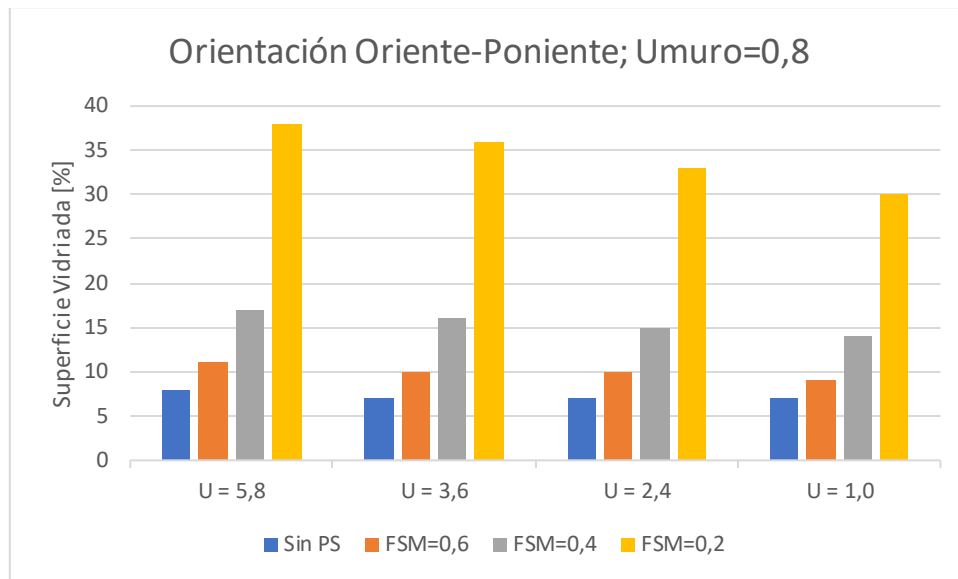


Gráfico 6-14: Comparación de protección solar para orientación oriente-poniente y Umuro=0,8.

Del gráfico anterior se logra comprobar que la protección solar permite aumentar la superficie máxima de vidrio en el dormitorio en todas sus alternativas. Si se compara cada alternativa con el caso base, se tiene que para el FSM=0,6 se logra incrementar en promedio un 3% la superficie máxima de ventana, lo que significa un incremento del 38% respecto al caso base. Para el FSM=0,4 se logra incrementar en promedio un 8% la superficie máxima de ventana, lo que significa un incremento del 114% respecto al caso base. Por último, para el FSM=0,2 se incrementa en promedio un 27% la superficie máxima de ventana, lo que significa un aumento del 372% respecto al caso base. De esta manera se tiene que con la última alternativa se logran alcanzar superficies de vidrio adecuadas para la vivienda, pero la inversión de esta alternativa (vidrio con tinte especial más lama vertical) con respecto a las otras dos es muy alta. De todas formas, se puede concluir que la protección solar es muy efectiva para mejorar el desempeño térmico de la vivienda en verano, en la Región Metropolitana.

Por otro lado, se comprueba el estado actual del dormitorio respecto a la OGUC 2016 y NTM 11, al igual que para el caso base y con ventilación nocturna. Para ello se calculó las horas de desconfort en función del porcentaje de vidrio en la fachada (Ver Anexo C), utilizando los porcentajes de cada normativa especificados en la Tabla 5-2. Es importante mencionar que no se obtienen las horas de desconfort para la NTM 11 en el caso de transmitancia térmica de vidrio igual a 5,8 [W/m² °C] ya que permite 0% de superficie vidriada. A continuación, se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos.

		Horas de Discomfort							
		OGUC 2016				NTM 11			
U muro [W/m ² °C]	U vidrio [W/m ² °C]	FSM				FSM			
		0,8	0,6	0,4	0,2	0,8	0,6	0,4	0,2
0,8	5,8	17	14	7	0	-	-	-	-
	3,6	24	24	18	7	24	24	17	6
	2,4	24	24	24	14	24	24	24	12
	1	24	24	24	17	24	24	15	15

Tabla 6-4: Resumen de Horas de Discomfort para los requisitos de la norma OGUC 2016 y NTM 11, con Protección Solar.

Al igual que con la ventilación nocturna, se logra una mejora en la mayoría de los casos. A pesar de eso, siguen existiendo elevadas horas de discomfort al cumplir con la normativa, menos en un caso. Así, los buenos resultados de la protección solar no logran contrarrestar las excesivas ganancias producto de los altos porcentajes de vidrio permitido en ambas normativas cuando el vidrio no es monolítico. A raíz de lo anterior, se decide comprobar el desempeño térmico de la vivienda considerando ambas soluciones, para ver si se alcanzan superficies adecuadas.

6.3 Ventilación Nocturna y Protección Solar

Se incorporan ambas alternativas para comprobar el desempeño térmico del dormitorio y la vivienda en general, debido a que ambas técnicas se complementan entre sí. La ventilación nocturna permite eliminar la energía acumulada al interior de la vivienda de manera simple, ya que a medida que el usuario sienta calor, abrirá las ventanas para ventilar. Por su parte, la protección solar impedirá las ganancias energéticas al evitar que la radiación solar llegue a las ventanas. De esta forma, aumenta el potencial que tienen las alternativas para mejorar el desempeño de la vivienda.

La incorporación de ambas técnicas como solución fue estudiada por Bustamante (Bustamante, 2011) en los edificios de oficina ya mencionados. En el edificio Las Condes se alcanzó una disminución del 36,3% en las cargas de refrigeración, duplicando la disminución que se había obtenido solo con protección solar. Por otro lado, en el edificio de Providencia se alcanza una disminución del 54,5% en las cargas de refrigeración, 9 veces mayor a lo obtenido solo con protección solar. Esto demuestra el potencial que tienen ambas alternativas al aplicarse juntas.

6.3.1 Modelación

Para la modelación de esta alternativa se aplican las mismas consideraciones que se aplicaron en cada técnica individualmente. De esta forma, se ventila entre las 10 pm a 8 am y se aplica una protección solar con FSM 0,6; 0,4 y 0,2 solo a los casos con transmitancia térmica de muro igual a 0,8 [W/m² °C] y orientación oriente-poniente.

Una vez que se definieron los modelos considerando ambas alternativas, se aplica la misma metodología utilizada en las modelaciones anteriores. Así, se obtienen los gráficos de temperatura interior del recinto por cada hora, los que se encuentran en el Anexo C. A continuación, se presenta el caso particular del dormitorio con 25% de superficie vidriada, con transmitancia térmica de muro igual a $0,8 \text{ [W/(m}^2\text{°C)]}$ y de superficie vidriada igual a $3,6 \text{ [W/m}^2\text{°C]}$, aplicándose todas las técnicas estudiadas, para comprobar el efecto de ambas alternativas juntas.

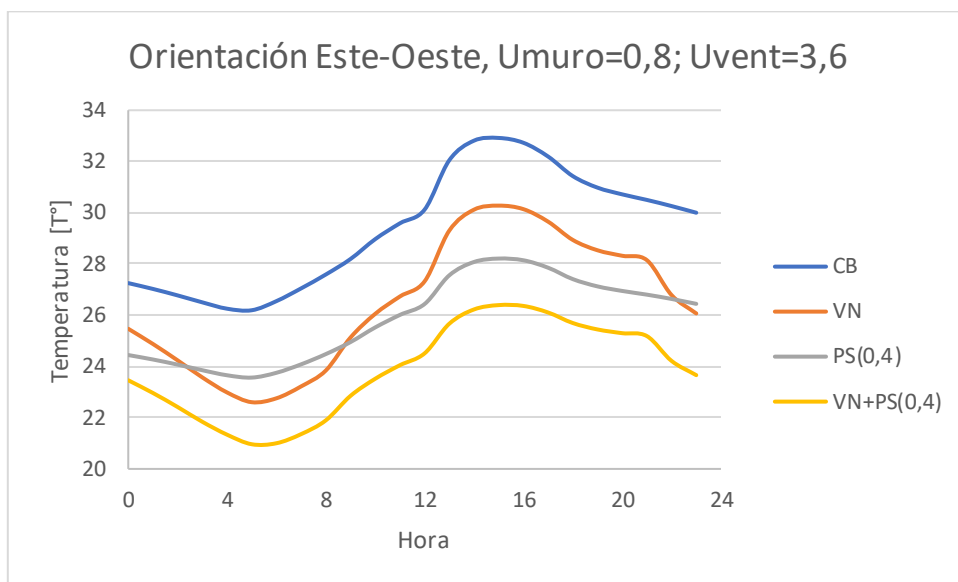


Gráfico 6-15: Temperatura interior del dormitorio para el caso base, con ventilación nocturna, protección solar y ambas juntas.

En el gráfico anterior se logra comprobar cómo se benefician la ventilación nocturna y la protección solar al aplicarse juntas. Por un lado, el dormitorio logra eliminar la acumulación de calor que se produjo durante el día a través de la ventilación nocturna y, por otro lado, se logra evitar que parte de la radiación solar ingrese por la ventana mediante protección con $FSM=0,4$. De esta forma, se obtienen menores temperaturas que al aplicar cada técnica por separado.

A través de un ajuste lineal entre la superficie de ventana y la temperatura máxima alcanzada para cada alternativa (Ver Anexo C) se pudo encontrar la superficie máxima de ventana tal que la temperatura no supere los $26,6^\circ \text{ C}$. A continuación, se presentan los valores obtenidos en función de la transmitancia térmica de ventana.

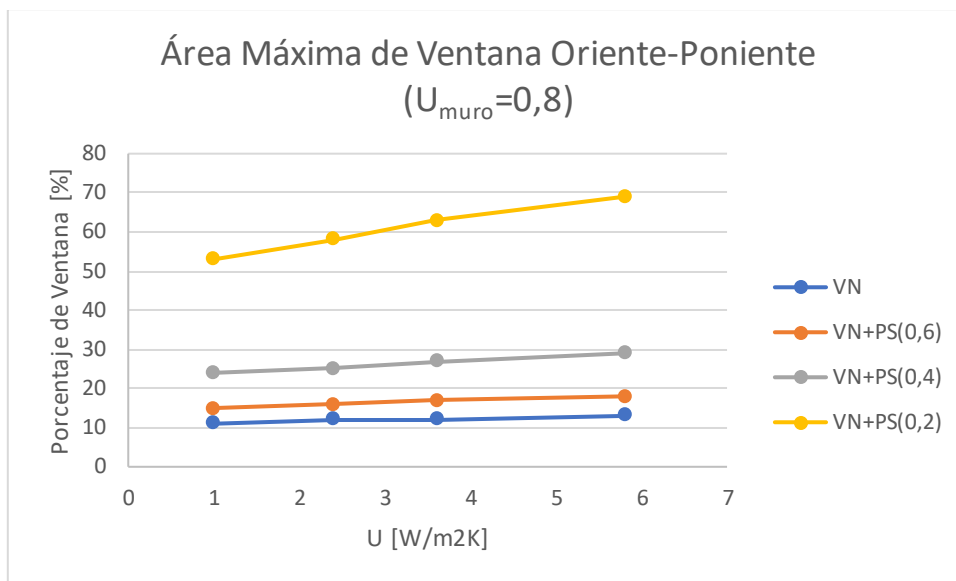


Gráfico 6-16: Área máxima de ventana oriente-poniente para tener temperatura de confort, con $U_{\text{muro}}=0,8$ y VN+PS.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las superficies de ventana máxima para cada alternativa considerando ventilación nocturna y protección solar.

U muro [W/m2 °C]	U vidrio [W/m2 °C]	Superficie máxima de vidrio [%]			
		Factor Solar Modificado			
		0,8	0,6	0,4	0,2
0,8	5,8	13	18	29	69
	3,6	12	17	27	63
	2,4	12	16	25	58
	1	11	15	24	53

Tabla 6-5: Tabla resumen de superficie máxima de ventana para alcanzar la condición de confort con ventilación nocturna y protección solar.

Además, se presenta un gráfico comparativo entre el caso base (CB) y todas las alternativas estudiada en este capítulo.

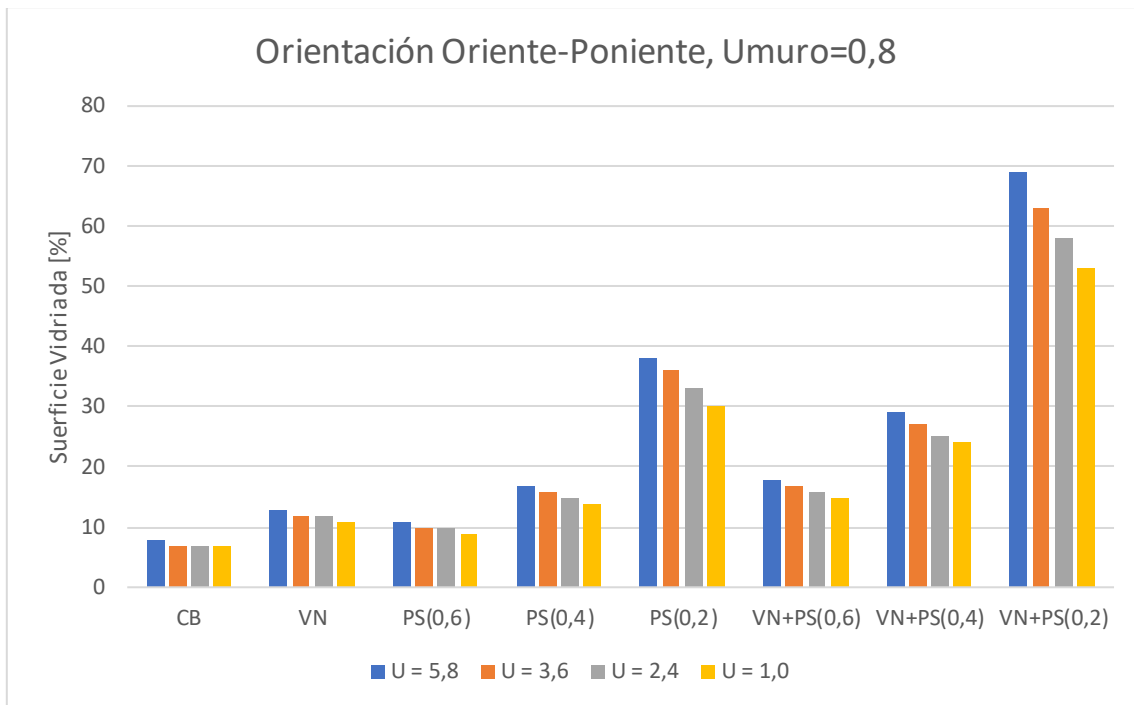


Gráfico 6-17: Comparación del caso base con VN, PS y VN+ PS, para Umuro=0,8 y orientación oriente-poniente.

Del gráfico anterior se aprecia que la combinación de ambas alternativas logra aumentar considerablemente la superficie máxima de vidrio para el dormitorio, respecto al caso base. Al comparar las alternativas se tiene que el caso de ventilación nocturna más protección solar con FSM=0,6 logra aumentar en 7% la superficie respecto a la alternativa sin VN, lo que significa un aumento del 65% mejor que sin VN y de un 128% respecto al caso base. La alternativa que incluye VN+PS(0,4) logra aumentar en 11% la superficie respecto a la alternativa sin VN, es decir, 69% mejor que sin VN y 262% mejor que el caso base. Esta opción permite superficies de ventana superiores a 25%, permitiendo así porcentajes de ventana adecuados y practicables arquitectónicamente. Además, esta protección solar se alcanza con una persiana veneciana abatible o bien, con un alero, que al ser considerado desde la etapa de diseño no se generan grandes costos. Por último, la alternativa que incluye VN+PS(0,2) logra aumentar un 27% la superficie respecto a la alternativa sin VN, lo que significa un aumento de 77% y de un 737% respecto al caso base. Esta opción permite superficies de ventana superiores al 50%, pero es necesario recurrir a celosías verticales, con un costo mayor.

Por último, se comprueba el estado actual del dormitorio respecto a la OGUC 2016 y NTM 11, utilizando los porcentajes permitidos por ambas normativas, especificados en la Tabla 5-2. Para ello, fue necesario obtener las horas de discomfort en función del porcentaje de vidrio en la fachada (Ver Anexo C). A continuación, se presenta una tabla resumen con las horas de discomfort en el dormitorio al cumplir con la normativa para cada caso (La NTM 11 no permite superficie vidriada cuando la transmitancia térmica del vidrio es de 5,8 [W/(m²°C)]).

		Horas de Disconfort							
		OGUC 2016				NTM 11			
U muro [W/m ² °C]	U vidrio [W/m ² °C]	FSM				FSM			
		0,8	0,6	0,4	0,2	0,8	0,6	0,4	0,2
0,8	5,8	11	6	0	0	-	-	-	-
	3,6	19	16	10	0	19	15	10	0
	2,4	24	21	15	6	23	18	13	3
	1	24	24	18	9	24	24	17	9

Tabla 6-6: Resumen de Horas de Disconfort para los requisitos de la norma OGUC 2016 y NTM 11, con Ventilación Nocturna y Protección Solar.

Al aplicar ambas técnicas de acondicionamiento pasivo, se tiene que en solo 4 alternativas se alcanza el confort total en el dormitorio, donde 3 de éstas consideran lamas verticales en la solución. En el resto de los casos se tienen 6 o más horas de disconfort en el dormitorio. Finalmente, se concluye que a pesar de los excelentes resultados que se logran con la aplicación de las técnicas de acondicionamiento pasivo, no se logra alcanzar el confort térmico en el dormitorio en la mayoría de los casos. Esto producto de las elevadas superficies vidriadas que permiten ambas normativas a medida que disminuye la transmitancia térmica del vidrio, lo que deja en evidencia que la normativa busca mejorar el desempeño de la vivienda en invierno, en desmedro de lo que pasa en verano. Si a lo anterior se le suma la baja implementación de elementos de protección solar en los diseños de las viviendas, incluso en las orientaciones más desfavorables, se producen los elevados casos de sobrecalentamiento que existen hoy en la Región Metropolitana.

7 Conclusiones

En el siguiente capítulo se presentan las conclusiones obtenidas en base a los resultados de este trabajo, tanto de la revisión bibliográfica, la modelación computacional y del análisis y elaboración de sus partes.

En Chile, durante la década de los 90' se comenzó a concientizar sobre la necesidad de incorporar mecanismos para proteger los hogares de las bajas temperaturas, dando origen al artículo 4.1.10 de la OGUC. Por otro lado, las discusiones respecto a las elevadas temperaturas que se pueden alcanzar en un inmueble no han tenido la misma relevancia, por lo que en la actualidad es común encontrar hogares en la Región Metropolitana que sufren de sobrecalentamiento, disminuyendo el bienestar de las personas. Es por ello que, para alcanzar condiciones más cercanas al confort térmico durante todo el año en la edificación habitacional de la región es necesario replantear el diseño y construcción de estos, junto con la reglamentación.

En primer lugar, para construir inmuebles energéticamente eficientes que alcancen condiciones cercanas al confort térmico es necesario considerar el clima específico en donde se emplaza la obra a la hora de diseñar, ya que impone las condiciones iniciales del sistema. En el caso particular de la Región Metropolitana, se tiene que para el invierno la temperatura varía entre los 3,9° y 13° C, mientras que para el verano varía entre los 13° y 29,7° C, presentando una gran oscilación térmica diaria, sobre todo en verano. Con estos antecedentes queda claro que mejorar la aislación de la envolvente y reducir infiltraciones no es suficiente para alcanzar la condición térmica adecuada durante todo el año, ya que no disminuyen la posibilidad de sobrecalentamiento en la vivienda. Para lograrlo, es necesario incorporar técnicas pasivas que impidan las ganancias a través de la envolvente y que eliminen éstas del interior de la vivienda en las estaciones más calurosas, que se pueden extender desde fines de la primavera hasta inicios del otoño.

Otro factor relevante del diseño es la orientación de la construcción. Como se pudo comprobar a través de este trabajo, los inmuebles que presentan superficie vidriada orientada hacia el poniente se ven más perjudicados por el sobrecalentamiento, debido a la elevada radiación solar durante la tarde, junto con la acumulación de calor durante todo el día. Por ello, no se deben considerar grandes extensiones de superficie vidriada en esta orientación (hasta un 30% para confort) y se deben considerar elementos de protección solar para impedir la radiación directa durante las estaciones con altas temperaturas. Del mismo modo, se deben tomar estas precauciones cuando existan elementos vidriados orientados hacia el norte u oriente, ya que también presentan riesgo de sobrecalentamiento si no son cuidados.

En definitiva, se debe pensar los edificios como sistemas integrados, que incluyan factores climáticos, arquitectónicos, de materialidad y uso para alcanzar las condiciones de confort. Si, a pesar de lo anterior, no se alcanza el confort, se debe complementar con sistemas mecánicos de climatización.

Respecto a la reglamentación térmica nacional se pudo concluir que ésta es deficiente en el verano, ya que se elaboró en condición de invierno, enfocada principalmente a proteger las viviendas de las bajas temperaturas. En base a los modelos, se comprobó que cumpliendo con la OGUC 2016 y con la NTM11, la mayoría de los casos presentan 12 horas de desconfort o más, incluso al aplicar ventilación nocturna y protección solar. Esto se debe a la elevada superficie de vidrio permitida para DVH, superior a 60% en las orientaciones más expuestas a la radiación solar, aumentando el efecto invernadero, lo que genera sobrecalentamiento durante gran parte del día. Por ello, es necesario disminuir la máxima superficie vidriada permitida por orientación, la cual no debe superar el 30% en el poniente, para que exista confort térmico.

Además, dada las características climáticas que presenta la Región Metropolitana, donde fácilmente se superan los 28° C durante el verano, será necesario incluir en la reglamentación el control solar. Esto se puede realizar indicando los límites de factor solar modificado de los cerramientos transparentes, en base a la razón entre ventana-muro y la orientación de los elementos. De esta forma se evitará que existan grandes zonas transparentes expuestas en las orientaciones con mayor radiación. Esta indicación debe permitir el soleamiento en el invierno e impedirlo en el verano.

A través de la encuesta se pudo evidenciar que en la mayoría de los casos donde hay sobrecalentamiento existe una despreocupación en la protección de los elementos vidriados que están orientados hacia el poniente, oriente y norte. De los casos afectados, un 48% está expuesto durante la tarde principalmente, un 25% durante la mañana y un 17% durante todo el día. Por lo que se reitera la necesidad de incorporar elementos de control solar para evitar estos casos.

Además, se pudo comprobar que el sobrecalentamiento está afectando en el bienestar de las personas, ya que se presenta en los periodos del día donde éstos se encuentran en sus hogares, afectando las zonas más utilizadas por las personas, como lo son los dormitorios. A pesar de que el 85% declaró que es molesto estar en la zona afectada y el 11% no puede estar en la zona, el 83% utiliza la zona afectada. Esto claramente disminuye el rendimiento de las personas en sus actividades cotidianas, como lo comprobó un estudio de ASHRAE.

Finalmente, llama la atención que un 33% de las personas que sufren del problema consideren que el desempeño del hogar es bueno o muy bueno, siendo que la mayoría de éstos considera molesto permanecer en la zona afectada. El motivo de ello puede deberse a la costumbre de tener altas temperaturas en su hogar, o bien, a las bajas expectativas de las personas respecto a este problema.

De los resultados obtenidos de la modelación del dormitorio se puede concluir que, si éste tiene una ventilación deficiente, la superficie vidriada cubre un 25% de la fachada y se encuentra completamente expuesta, fácilmente se pueden alcanzar una temperatura interior superior a 30° C. Esta situación se puede encontrar actualmente en la Región Metropolitana. Bajo estas condiciones, no se puede superar el 10% de superficie vidriada

en cualquier orientación si se quiere alcanzar el confort térmico, lo que es impracticable arquitectónicamente. Este bajo porcentaje se debe principalmente a la dificultad para eliminar el exceso de calor al interior del dormitorio, comprobando la importancia que tiene la ventilación en el desempeño térmico del hogar.

Al analizar la transmitancia térmica del muro se observa que cuando la superficie vidriada es baja (menor al 20%), una mayor aislación mejorará el comportamiento del dormitorio, debido a que el intercambio de calor por la envolvente se genera principalmente por el muro y la participación del vidrio es muy baja. Cuando la superficie vidriada esté entre 20% y 30%, el comportamiento será similar, debido a que se comienzan a compensar ambos efectos. Por otro lado, cuando la superficie vidriada supera el 30%, una mayor aislación empeorará el comportamiento del dormitorio, debido a la dificultad para eliminar el exceso de calor sumado a las grandes ganancias térmicas a través del vidrio. Este efecto será mayor a medida que aumenta ese porcentaje. De todos modos, la diferencia de temperatura no supera los 2° C, y si se incluye ventilación nocturna se reduce a 1° C. Como la diferencia de temperatura es mínima, y además se busca restringir las grandes superficies vidriadas, será recomendable una mayor aislación del muro, debido al beneficio que genera en el invierno. Es importante que la aislación sea exterior, para aprovechar el efecto de la inercia térmica, y no se produzca condensación al interior de la solución constructiva.

Por su parte, una disminución de la transmitancia térmica del vidrio aumentará la temperatura al interior del dormitorio. Esto se genera porque los niveles de radiación solar no varían de gran manera, pero al aislar más, se dificulta la pérdida de calor, aumentando el efecto invernadero. Este problema tiene mayor efecto si la superficie vidriada se encuentra desprotegida. Como son conocidos los beneficios que genera el DVH en el invierno, y considerando que los vidrios monolíticos son una de las superficies por donde más se pierde calor en esta época, se reitera la necesidad de considerar protecciones solares para diseñar, ya que en la Región Metropolitana son necesario los elementos vidriados con menor transmitancia térmica.

Las soluciones estudiadas para mejorar el desempeño térmico de la vivienda fueron la ventilación nocturna y la protección solar, con las que se buscó eliminar del interior e impedir las ganancias hacia el interior de la vivienda respectivamente. En ambos casos se generó una mejora considerable en el desempeño térmico, al igual que en los distintos estudios donde se aplicaban estas técnicas.

Respecto a la ventilación nocturna, se logró aumentar en un 79% la superficie vidriada para mantener las condiciones de confort. A pesar de la mejora, no se logró superar los 20% de superficie (menos en 1 caso). Es importante considerar que esta solución no requiere costo alguno ya que funciona bajo la lógica de que la persona abrirá las ventanas para ventilar el exceso de calor en el hogar.

Por su parte, con la protección solar se logró aumentar en un 38% la superficie vidriada para un FSM=0,6; en un 114% para un FSM=0,4 y en un 372% para un FSM=0,2.

En los primeros dos casos no se logra superar el 20% de superficie vidriada, mientras que en el último se supera el 30%. Las primeras 2 alternativas, que consideran como protección solar un alero, requieren de una inversión entre \$32.000 y \$60.000 aprox. por metro lineal si se considera en la etapa de construcción, lo que representa una pequeña fracción del total del proyecto, lo que hace posible su aplicación. Por otro lado, la aplicación de la última alternativa, que considera celosías verticales, considera una inversión entre 3 a 6 veces mayor por metro cuadrado de superficie vidriada, lo que representa un elevado costo para el proyecto, lo que dificulta su aplicación.

El mejor comportamiento térmico se obtuvo de la aplicación de ambas soluciones a la vez. Se aplicaron los mismos FSM que el caso individual, es decir, 0,6; 0,4 y 0,2 y con ello se logró una mejora de 128%, 262% y 737% respectivamente. Con esta alternativa se destaca que para la combinación VN+PS(0,4) se alcanzan superficies vidriadas superiores al 25% para tener confort al interior de la vivienda. De esta manera, se concluye que se logran alcanzar superficies de vidrio razonables para alcanzar condiciones de confort en una vivienda aplicando técnicas de acondicionamiento pasivo, sin una gran inversión.

Con ello, se concluye que las técnicas de acondicionamiento pasivo son esenciales para alcanzar un buen comportamiento en los inmuebles, por lo que se debe avanzar en la aplicación de éstas. Además, se recuerda que el sobrecalentamiento es originado por distintos motivos, como el efecto invernadero, altas cargas internas, intercambios de aire cuando las temperaturas exteriores son altas, etc., por lo que se deben buscar nuevas alternativas para aplicar en conjunto, ya que de esta manera se obtienen mejores resultados.

Bibliografía

BNE 2015: Distribución consumo total. Recuperado de <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/236881/-/>

Burgos, D. C. (2008). *Análisis y Propuestas de Soluciones Técnicas de Aislación Térmica Exterior en el Mercado Chileno* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103294>

Bustamante, W. (2009). *Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social*. Santiago de Chile: Ministerio de Vivienda y Urbanismo. División Técnica de Estudios y Fomento Habitacional (MINVU) y Programa País de Eficiencia Energética (CNE).

Bustamante, W., De Herde, A., & Encinas, F. (2011). *Análisis de comportamiento térmico de edificios de oficinas en comunas de la Región Metropolitana, Chile*. Revista de la Construcción, 10(1), 64-77.

Cámara Chilena de la Construcción (CChC) – Corporación de Desarrollo Tecnológico (2008). *Aislación Térmica Exterior: Manual de diseño para soluciones en edificaciones*.

Cámara Chilena de la Construcción (CChC) - Corporación de Desarrollo Tecnológico (2016). *Manual de (Re)Acondicionamiento Térmico: Una guía para el dueño de casa*.

Castilla, M., Álvarez, J.D., Berenguel, M., Pérez, M., Rodríguez, F., Guzmán, J.L. (2010). *Control del Confort en Edificios*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI), 7(3), 5-24.

Córdova, C. (2011). *Estudio de tecnologías para la reducción del consumo energético destinado a confort térmico para el Edificio de Ingeniería Civil* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104291>

De la Carrera, J. P. (1991). *Radiación solar en el diseño térmico de construcciones habitacionales* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile. Santiago de Chile.

Del Río, J. (2011). *Guía Básica para Fachadas Ventiladas y Protección Solar. Envolvertes Inteligentes*. HunterDouglas. Recuperado de http://www.hunterdouglas.cl/ap/uploads/cl/guia_solar_sustantibilidad.pdf

EEUU - American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE) (2010). *ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.

EEUU - American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE) (2009). *ASHRAE Handbook Fundamentals*.

Filippín, C., & Flores Larsen, S. (2010). *Comportamiento térmico de verano de viviendas unifamiliares compactas en condiciones reales de uso en clima templado en Argentina*. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14, 1-8.

Flores, A. (2007). *Métodos constructivos para la aislación térmica de muros por el exterior de una vivienda. Soluciones a puntos singulares* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104640>

Godoy, A. (2012). *El confort térmico adaptativo: Aplicación en la edificación en España* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Cataluña. España.

Instituto Nacional de Normalización (2007). NCh853-2007: *Acondicionamiento térmico – Envoltura térmica de edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas*. Chile.

Jara, J. (2013). *Formulación de un Procedimiento de Evaluación de Protecciones Solares en Edificios de Oficina en relación a la Demanda Energética* (Tesis de maestría). Universidad del Bío-Bío.

Maldonado, D. (enero, 2009). Protector Solar. *Revista BIT*, 64, 82-85.

Mercado, I. (2016). *Reacondicionamiento térmico de las viviendas de la Región Metropolitana a través de la implementación de cubiertas vegetales* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/138424>

Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2015). *NTM 011: Requisitos y mecanismos de acreditación para acondicionamiento ambiental de la edificación. Parte 2: Comportamiento higrotérmico y calidad del aire interior (Anteproyecto)*. Chile.

Miranda, L. G. (2008). *Estudio térmico del Edificio de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103138>

Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Artículo 4.1.10. (2016). Chile.

Pino, A., Bustamante, W., Escobar, R., Encinas Pino, F. (abril, 2012). *Thermal and lighting behavior of office buildings in Santiago of Chile*. *Energy and Buildings*, 47, 441-449.

Puppo, E., Puppo, G. A., Puppo, G. (1999). *Sol y Diseño – Índice térmico relativo*. México: Alfaomega Grupo Editor.

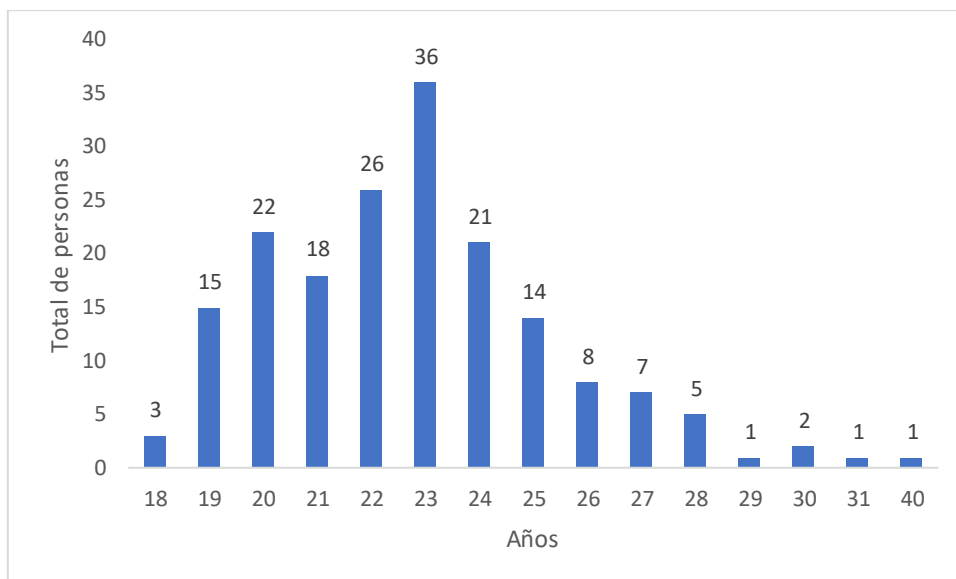
Suárez, R., & Fragosó, J. (2016). *Estrategias pasivas de optimización energética de la vivienda social en clima mediterráneo*. *Informes de la Construcción*, 68(541), 136.

Vera, S., & Ordenes, M. (2002). *Evaluación del desempeño energo-térmico de una vivienda social en Chile, utilizando un programa de simulación energética de edificios*. *Revista Ingeniería De Construcción*, 17(3), 133-142.

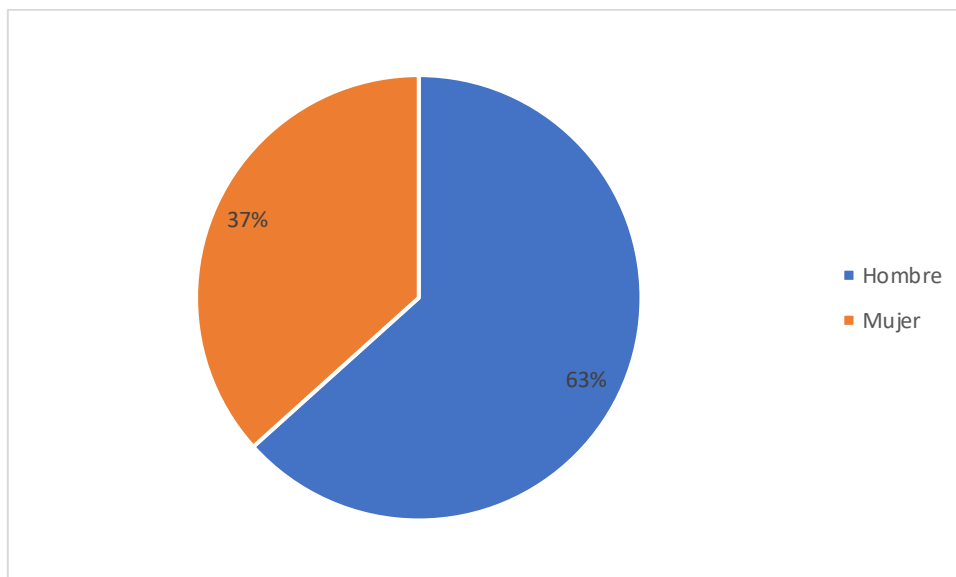
Anexo A

A continuación, se exponen los resultados de la encuesta realizada vía web entre el 15 al 19 de diciembre del 2016, a 180 personas de la comunidad de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile.

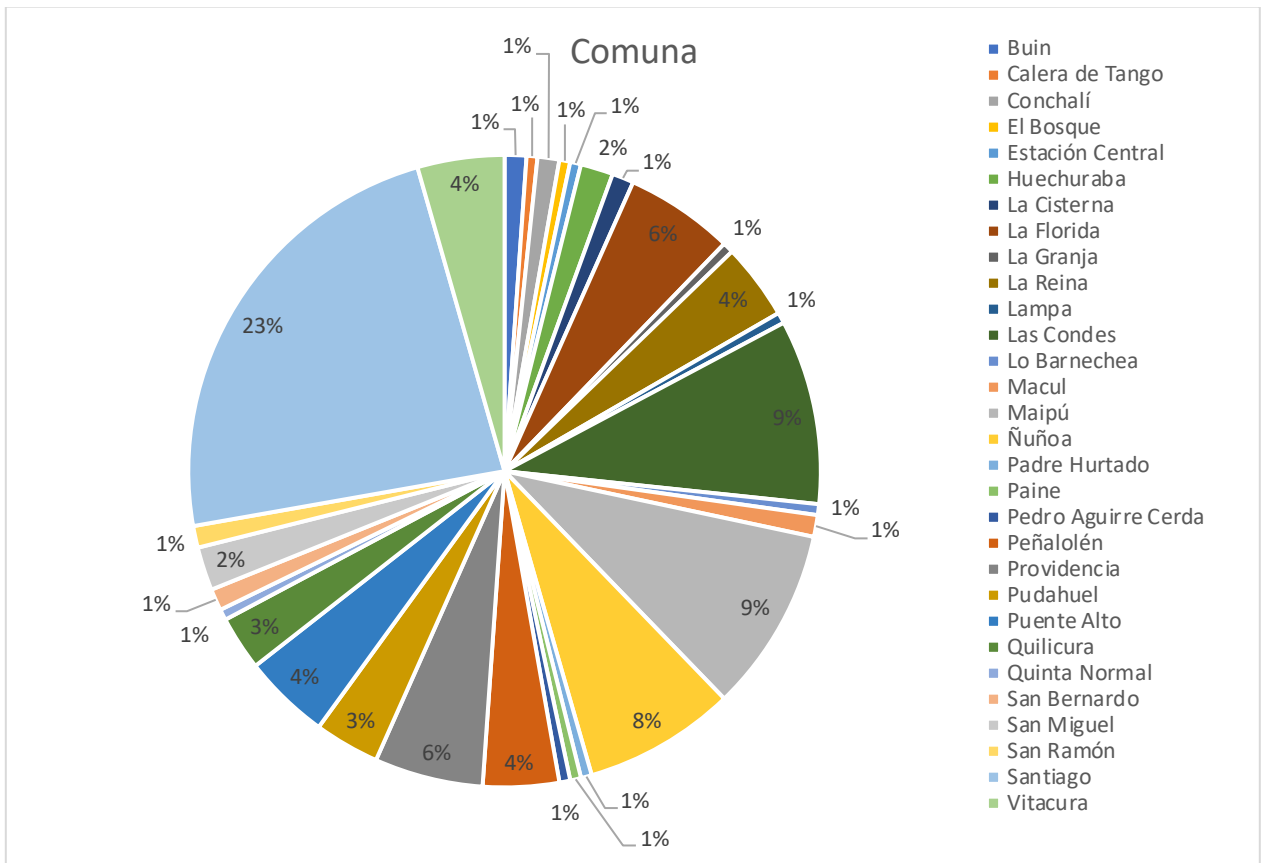
1. Edad (180 respuestas)



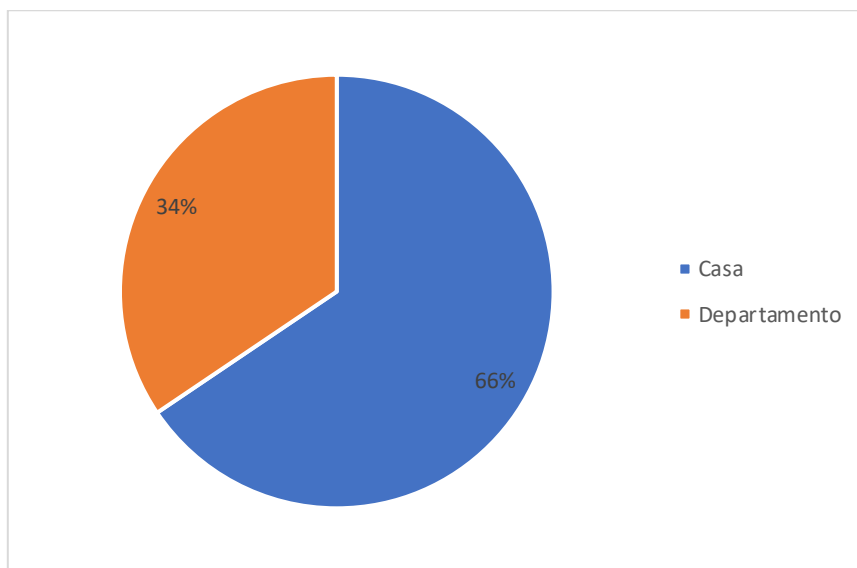
2. Género (180 respuestas)



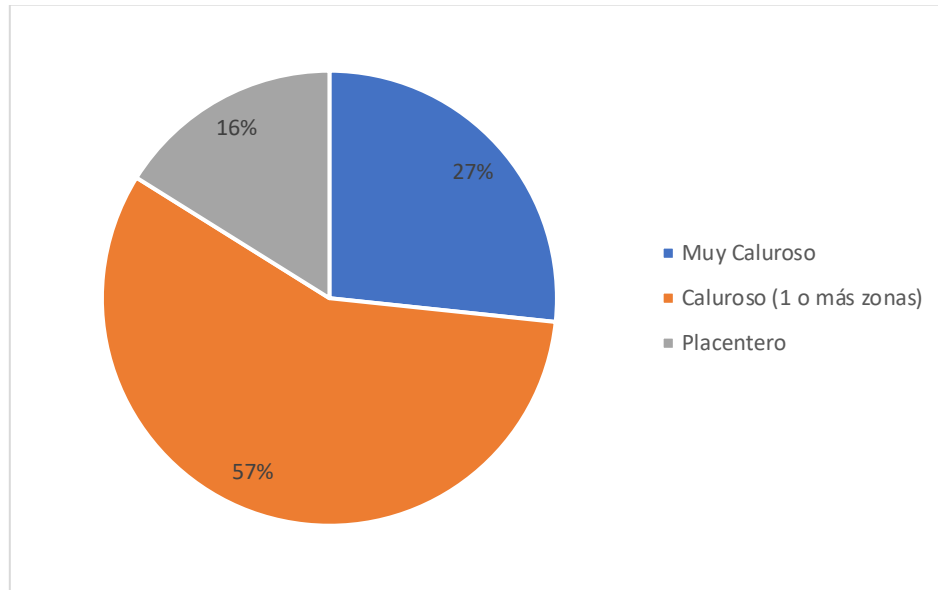
3. Comuna (180 respuestas)



4. ¿Dónde vive? (180 respuestas)

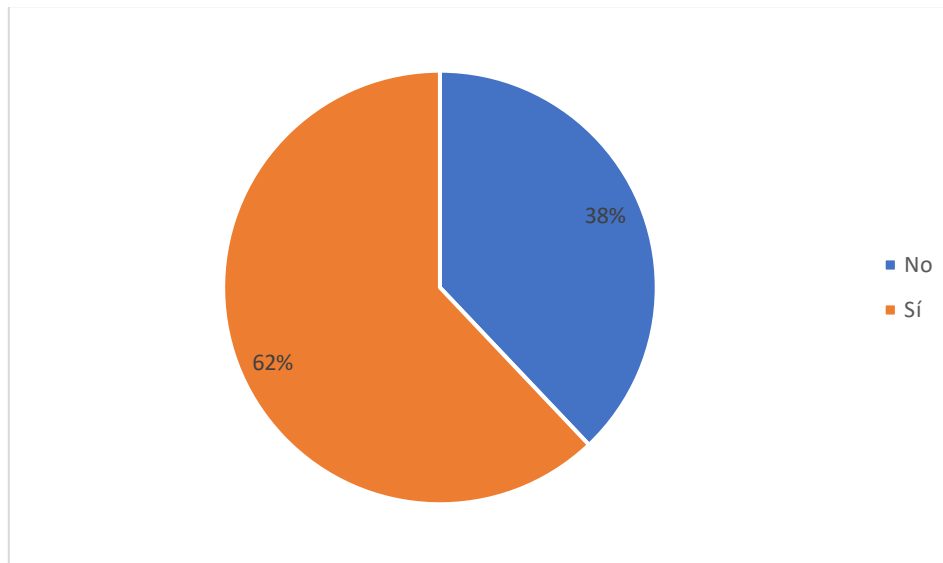


5. Califique su hogar en verano (180 respuestas)

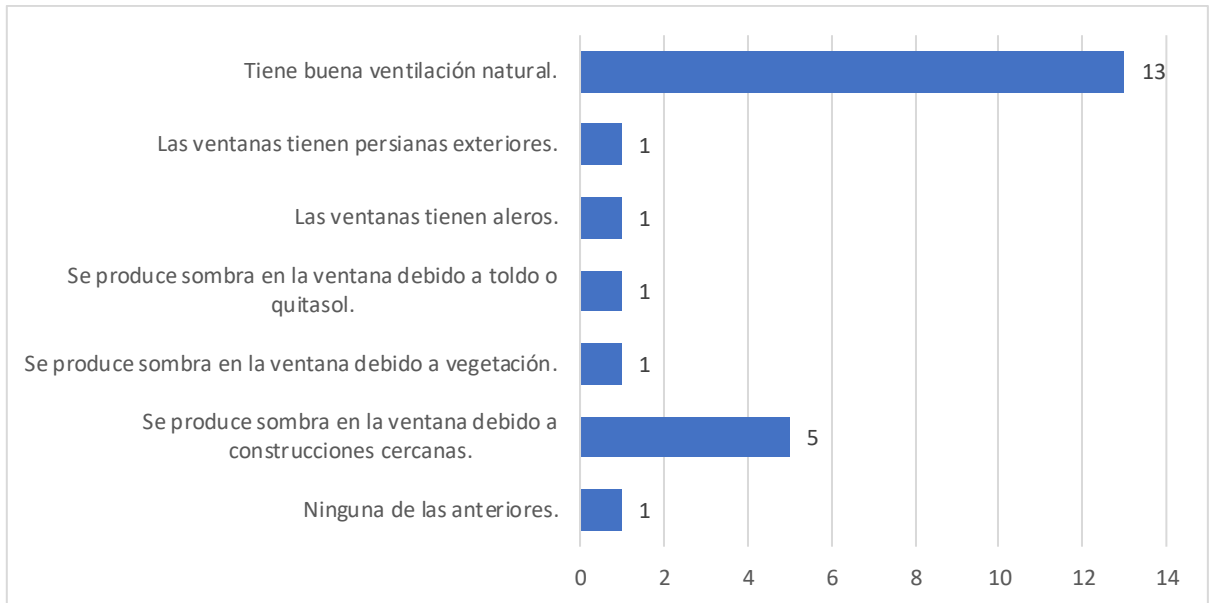


Las siguientes preguntas solo se realizaron a aquellas personas que contestaron “Placentero” en la pregunta anterior, que corresponde a 29 personas.

6. ¿Existen zonas orientadas al Norte o al Poniente que tengan ventanas? (29 respuestas)

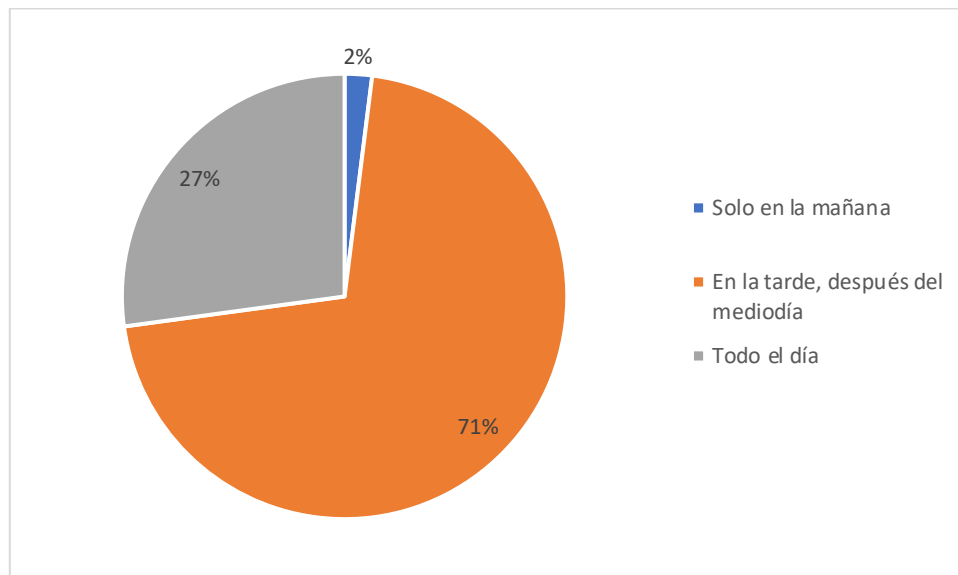


7. Si la respuesta anterior es afirmativa, ¿cuál de las siguientes alternativas se relacionan con esas zonas? (18 respuestas)

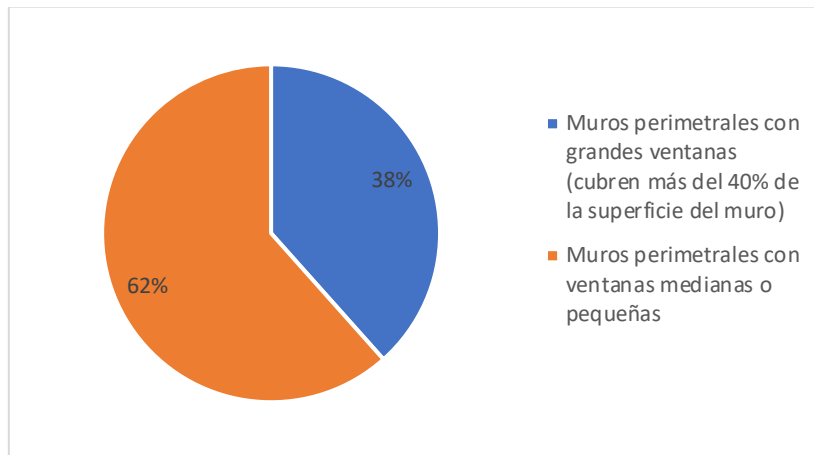


Las siguientes preguntas se les realizó a aquellas personas que consideran que su hogar tiene 1 o más zonas calurosas, que corresponde a 151 personas.

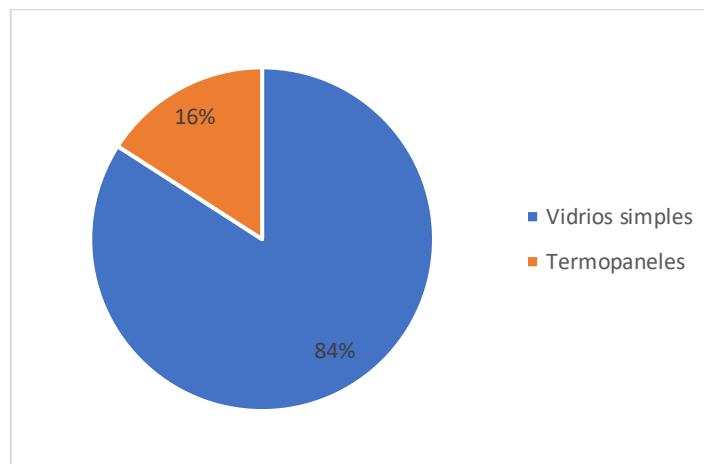
8. Si el hogar o alguna zona es calurosa, ¿cuántas horas se mantiene en esa condición? (151 respuestas)



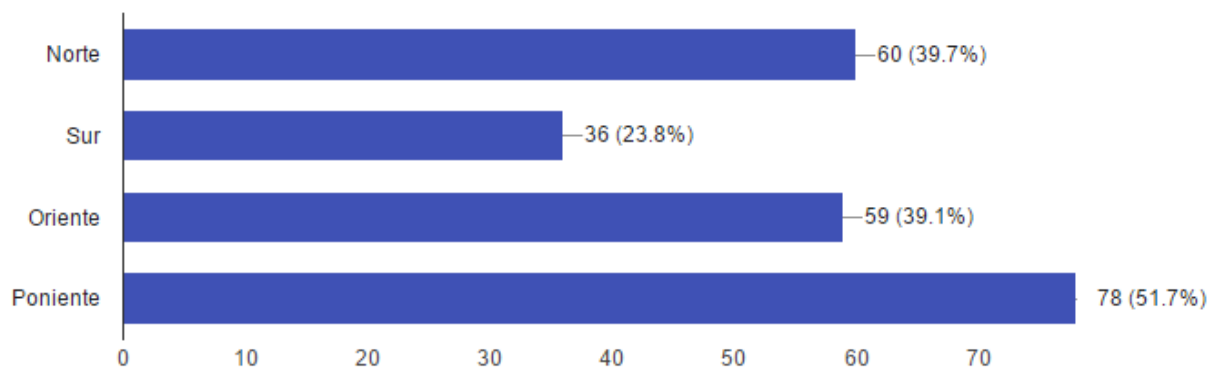
9. Características del sector del hogar más caluroso (151 respuestas)



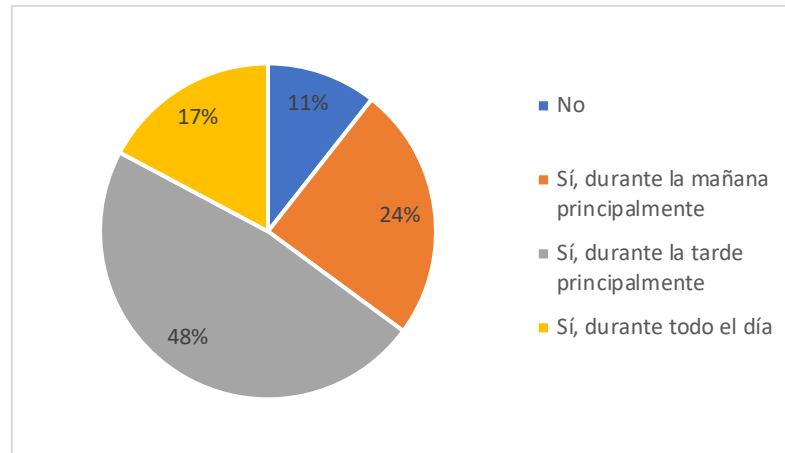
10. Las ventanas son: (151 respuestas)



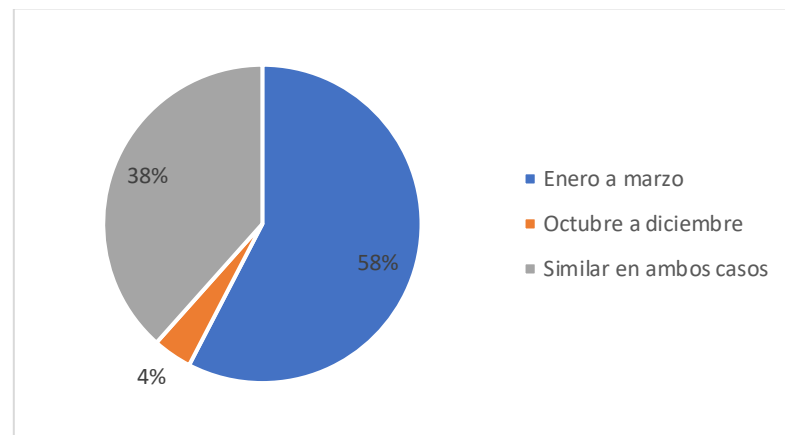
11. ¿Hacia dónde están orientados los muros perimetrales (que separan con el exterior) de las zonas afectadas? (151 respuestas)



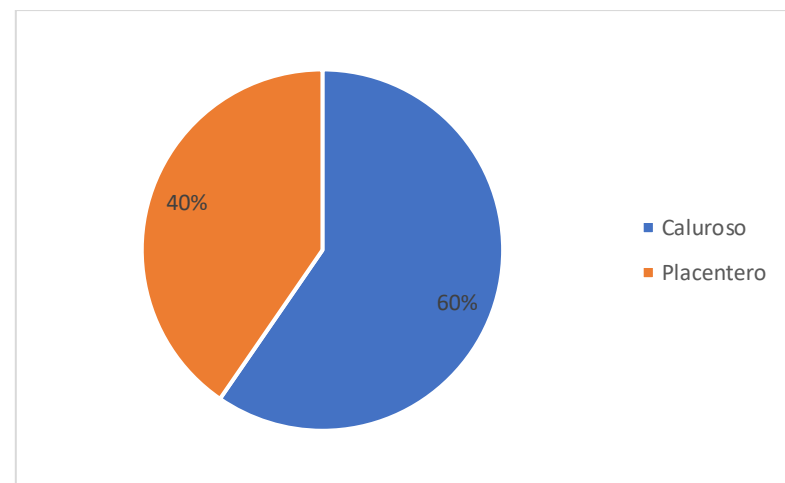
12. ¿Llega luz solar directamente en la zona afectada? (151 respuestas)



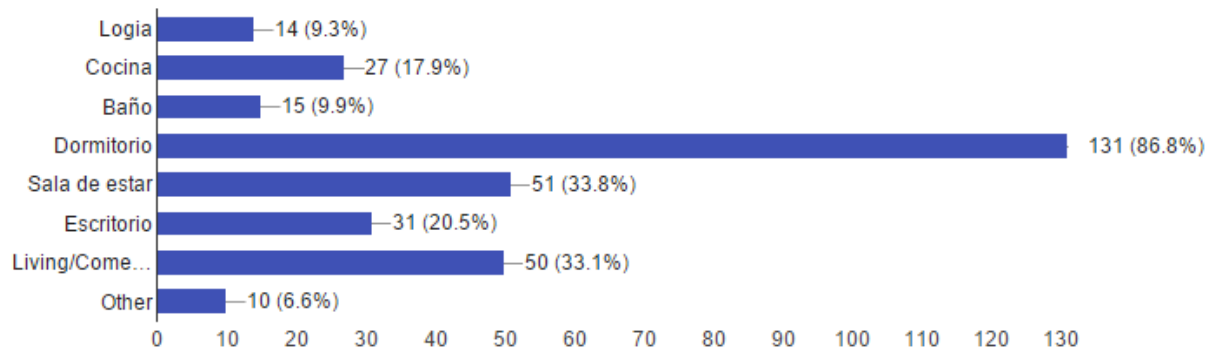
13. Meses más calurosos en el hogar (151 respuestas)



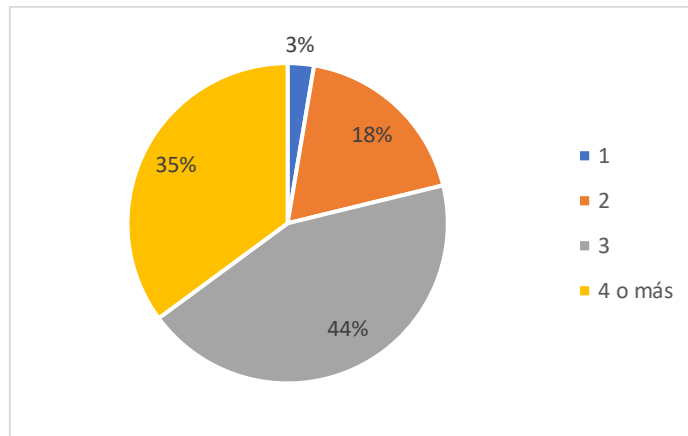
14. Durante la noche, el hogar es: (151 respuestas)



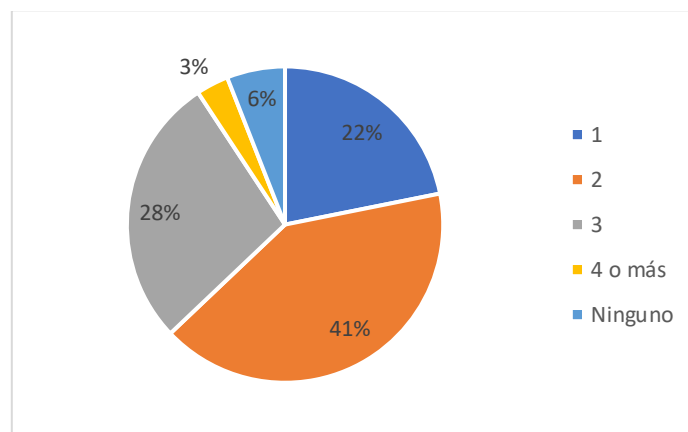
15. ¿Qué zonas sufren del problema? (151 respuestas)



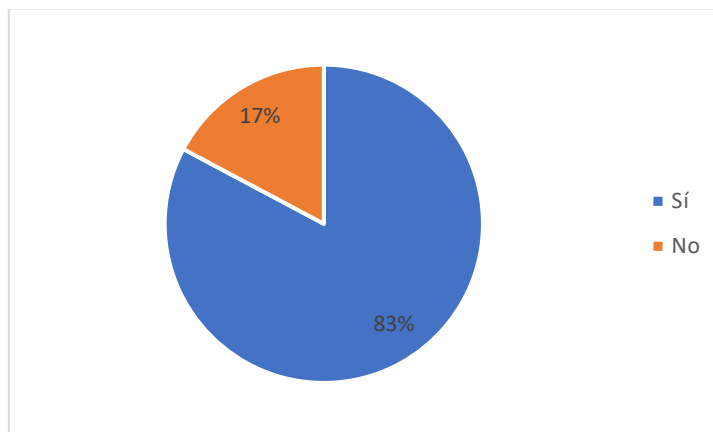
16. ¿Cuántos dormitorios hay en el hogar? (151 respuestas)



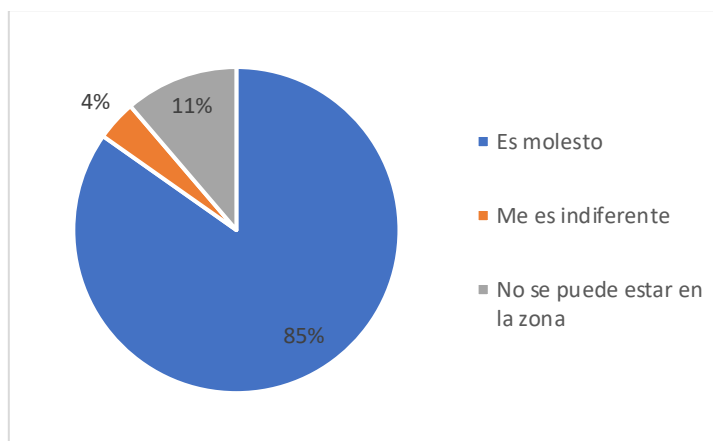
17. ¿Cuántos dormitorios sufren del problema? (151 respuestas)



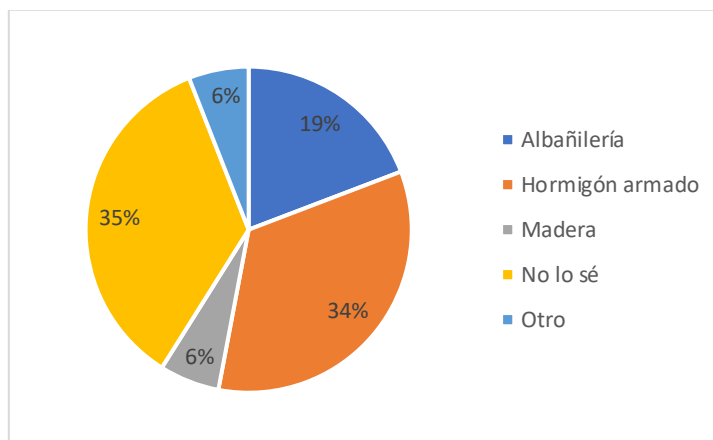
18. ¿Utilizan la zona afectada cuando hay sobrecalentamiento? (151 respuestas)



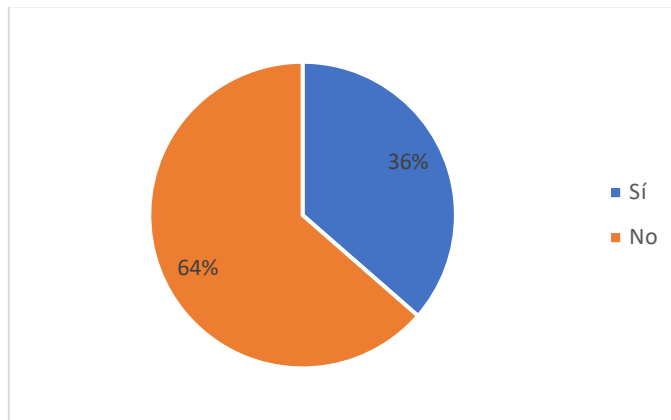
19. ¿Qué tan molesto es estar en la habitación cuando hay sobrecalentamiento? (151 respuestas)



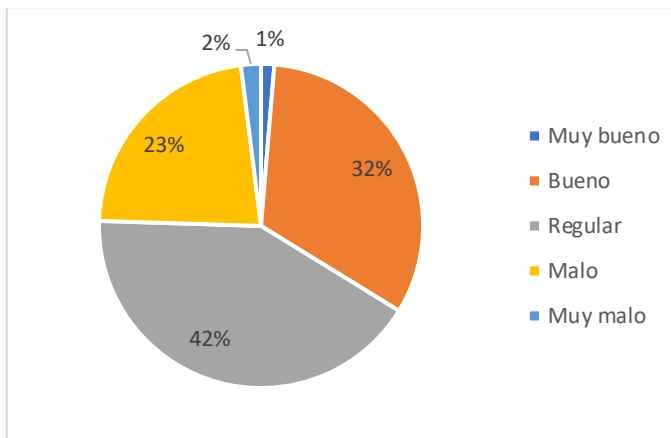
20. ¿De qué material está construido el lugar afectado? (151 respuestas)



21. ¿Ha considerado la instalación de aire acondicionado? (151 respuestas)



22. Finalmente, ¿cómo considera que es el desempeño de su hogar en verano? (151 respuestas)



Anexo B

B.1 Casos a modelar

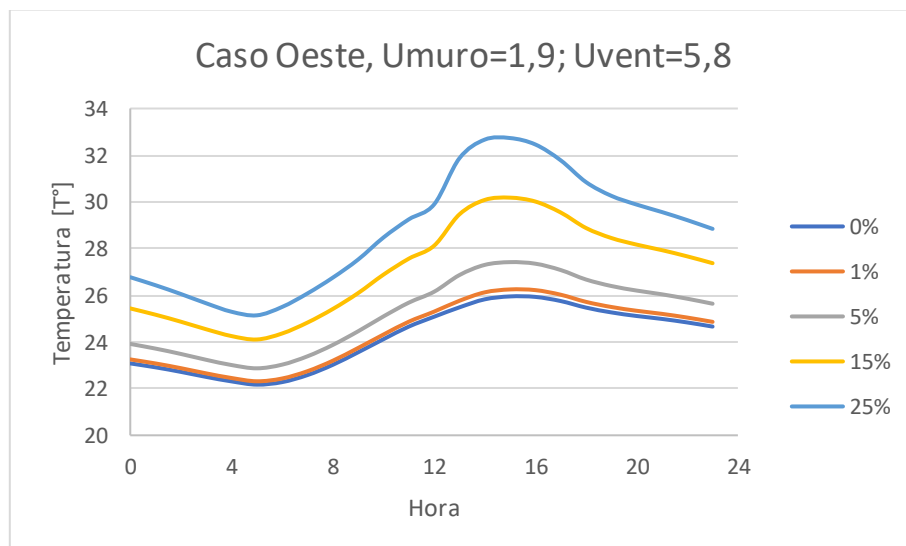
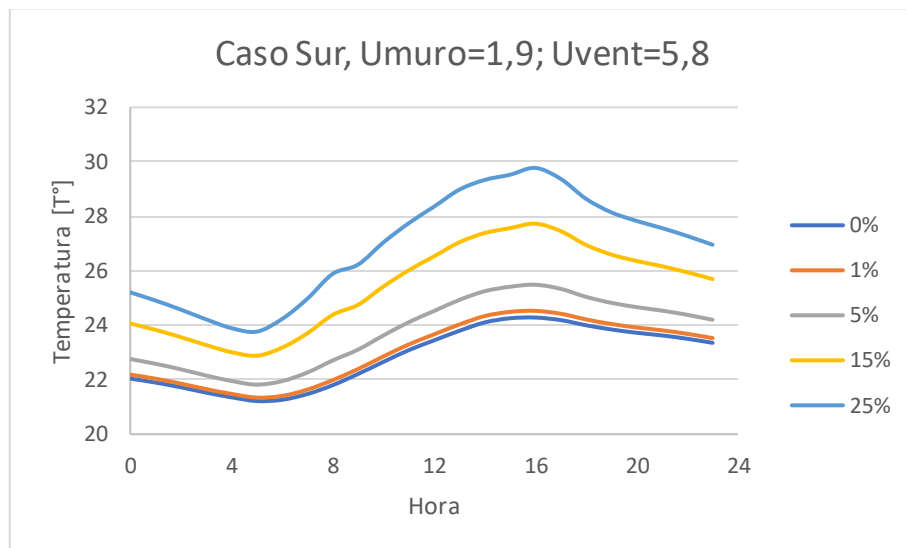
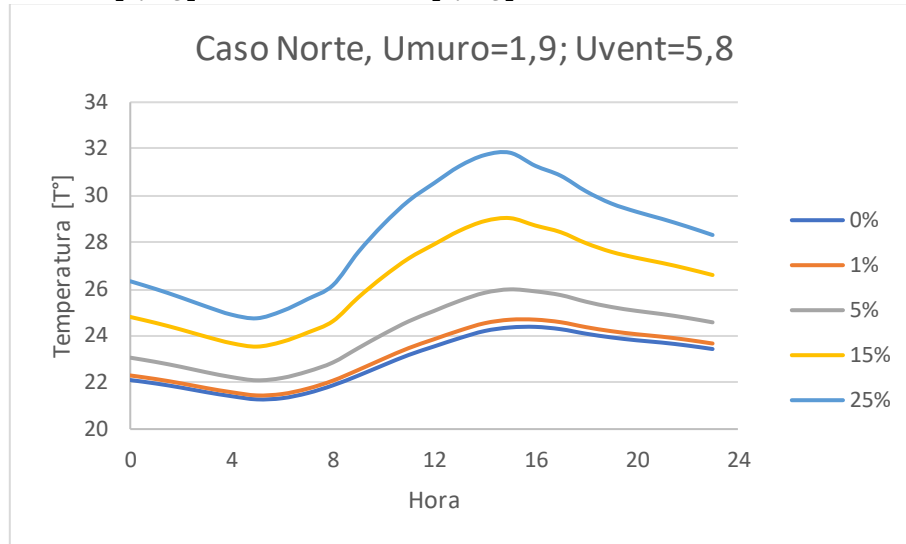
A continuación, se muestran los porcentajes de vidrio a modelar para las 36 configuraciones. Dependiendo de la transmitancia térmica del vidrio y su orientación se deberán considerar los casos especiales, para comprobar el estado de la reglamentación nacional.

Caso	Norma	U	Orientación	% de vidrio
Todos los casos	No aplica	No aplica	No aplica	0%
				1%
				5%
				15%
				25%
Casos especiales	OGUC 2016	3,6>=U>2,4	No aplica	60%
		U<=2,4	No aplica	80%
	NTM 11	U=3,6	N	77%
			S	40%
			O-P	53%
		U=2,4	N	85%
			S	51%
			O-P	63%
		U=1,0	N	91%
			S	60%
			O-P	71%

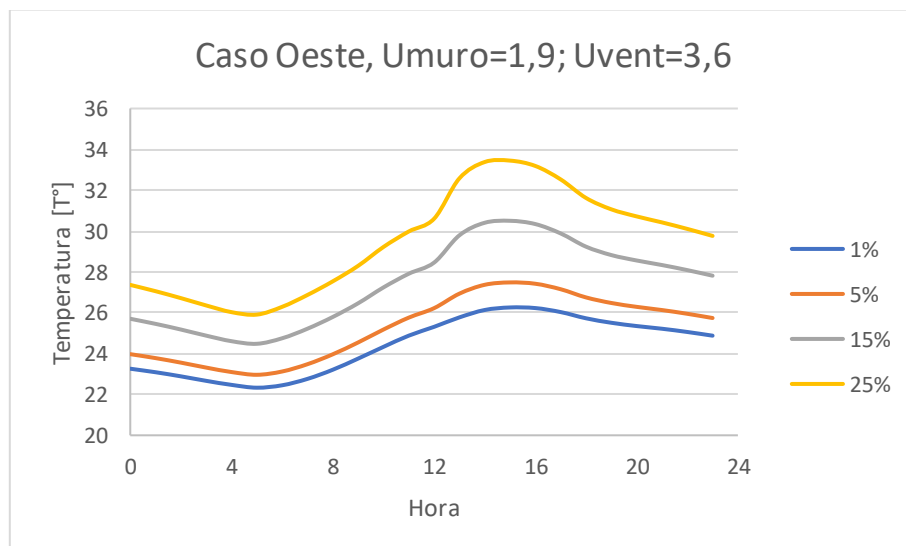
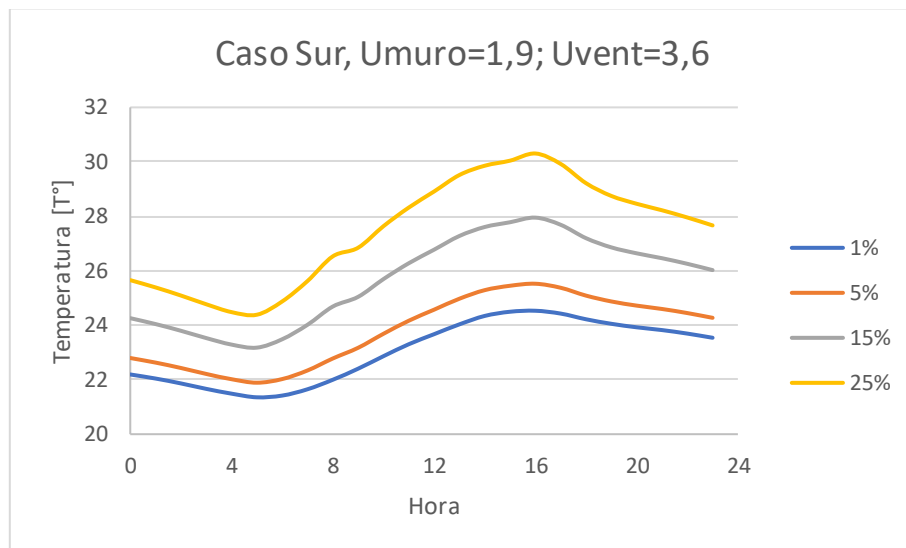
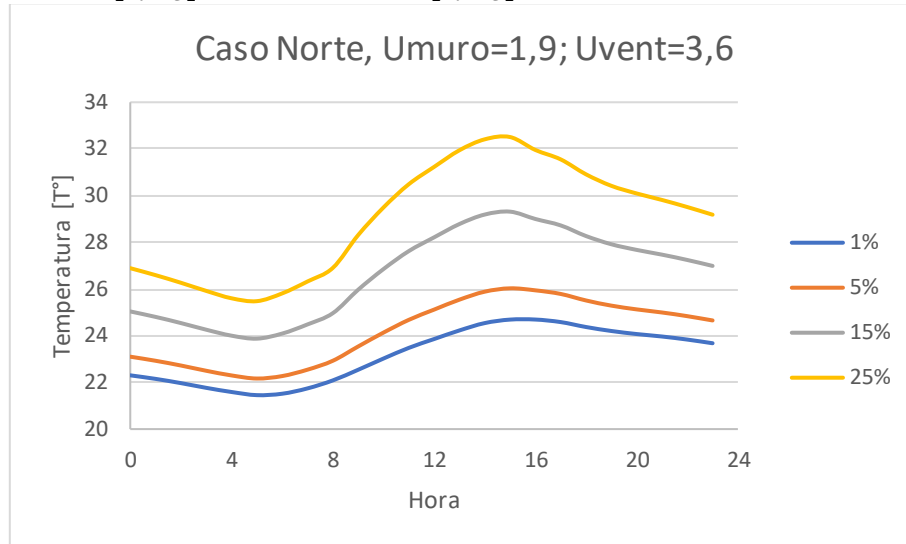
B.2 Gráficos de temperatura interior para modelo base

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la simulación del caso base, en particular, la temperatura interior del dormitorio en función de la hora para un día típico de enero.

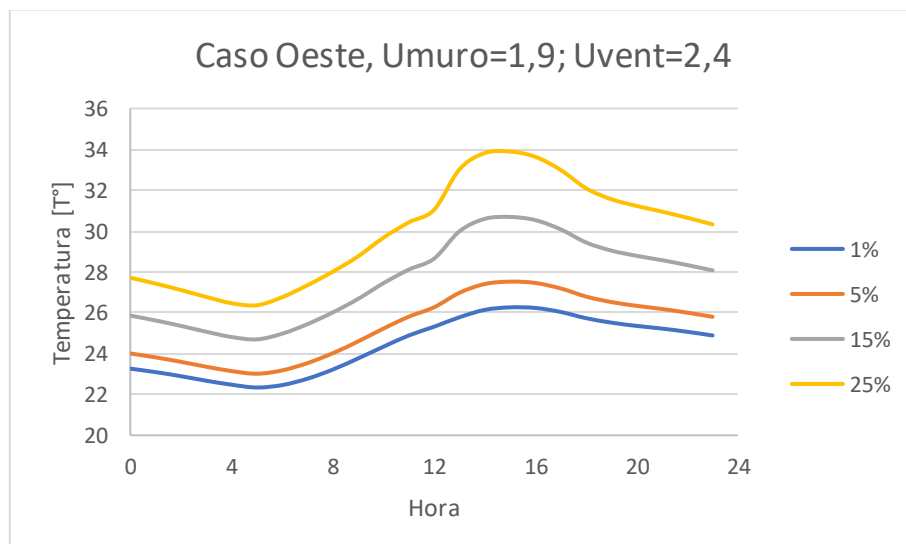
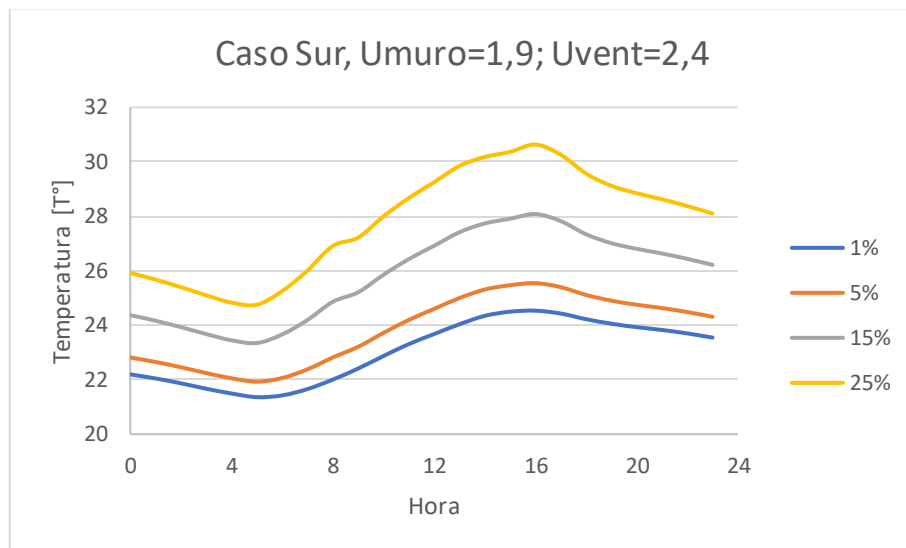
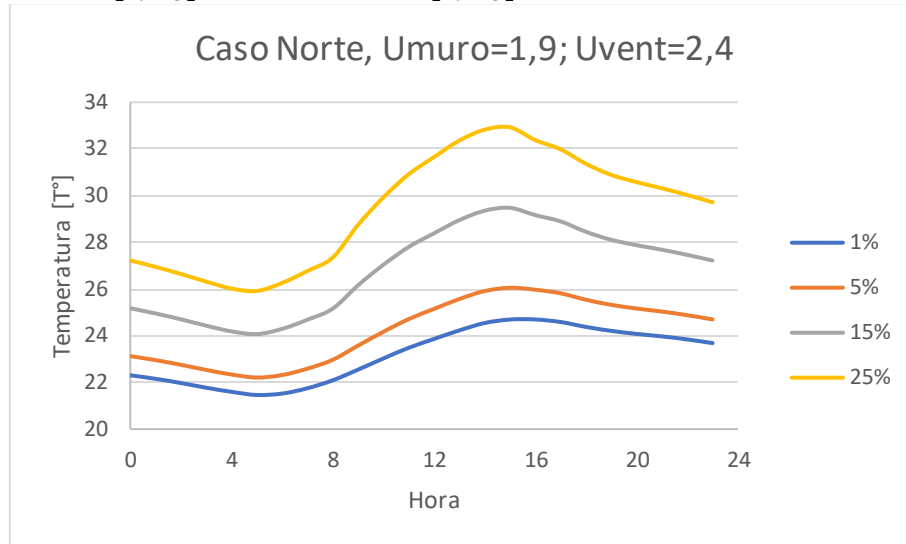
- $U_{muro} = 1,9 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 5,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



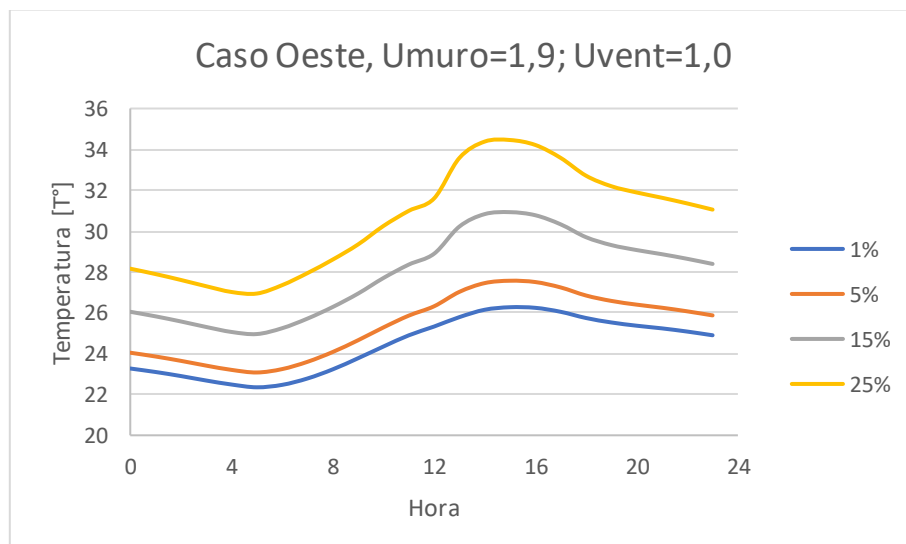
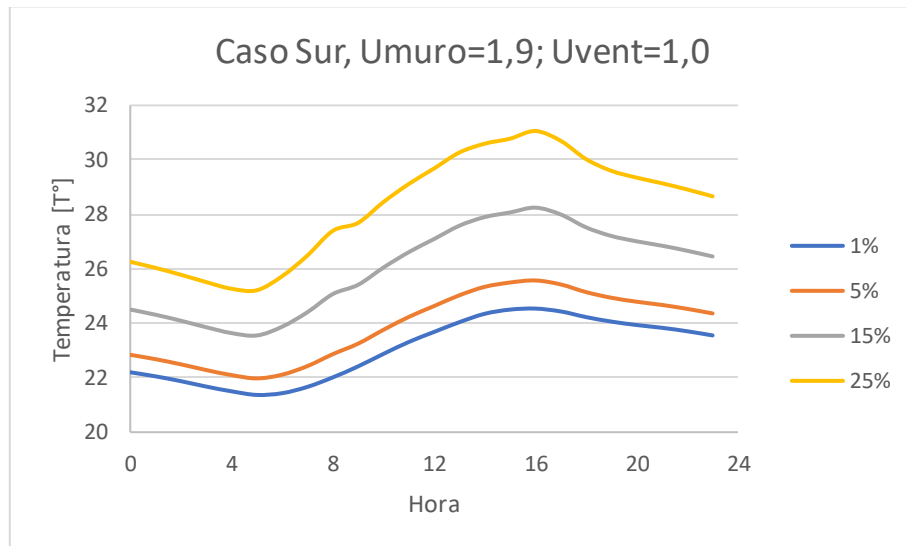
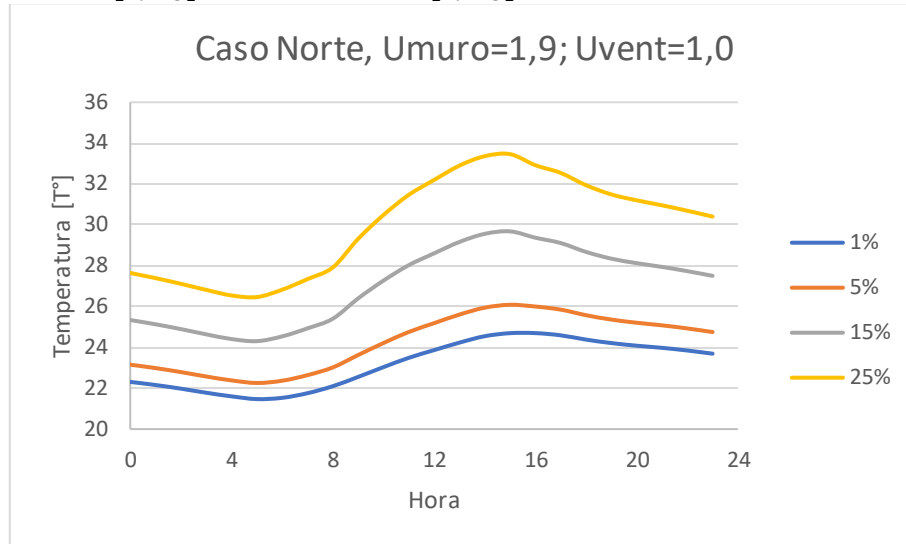
- $U_{muro} = 1,9 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 3,6 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



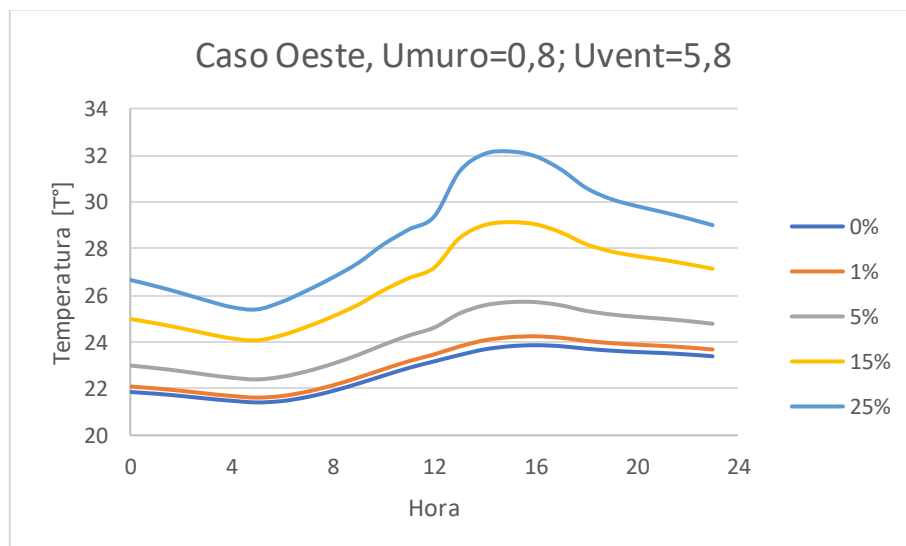
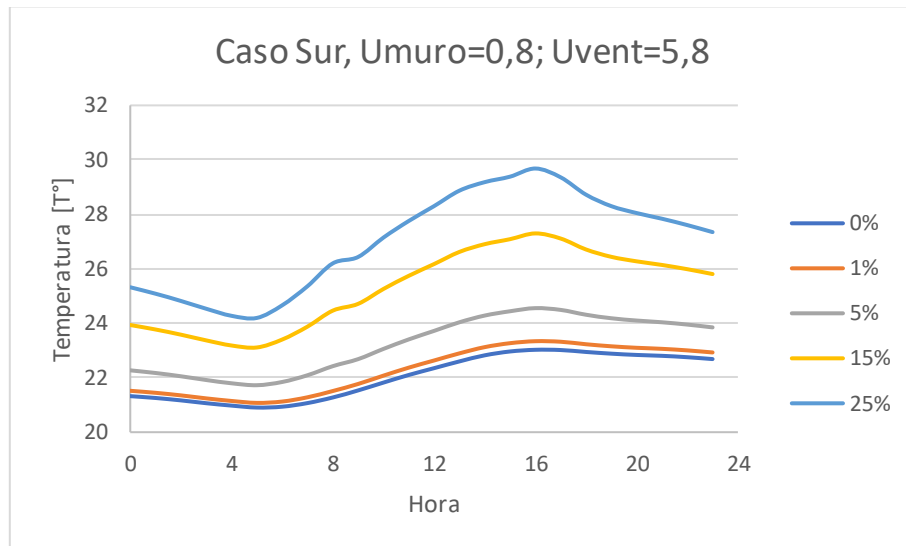
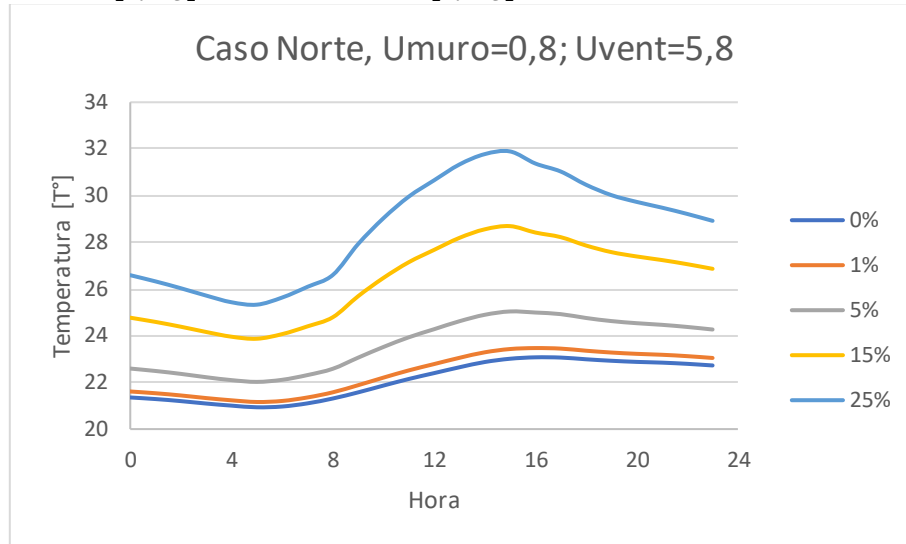
- $U_{muro} = 1,9 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 2,4 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



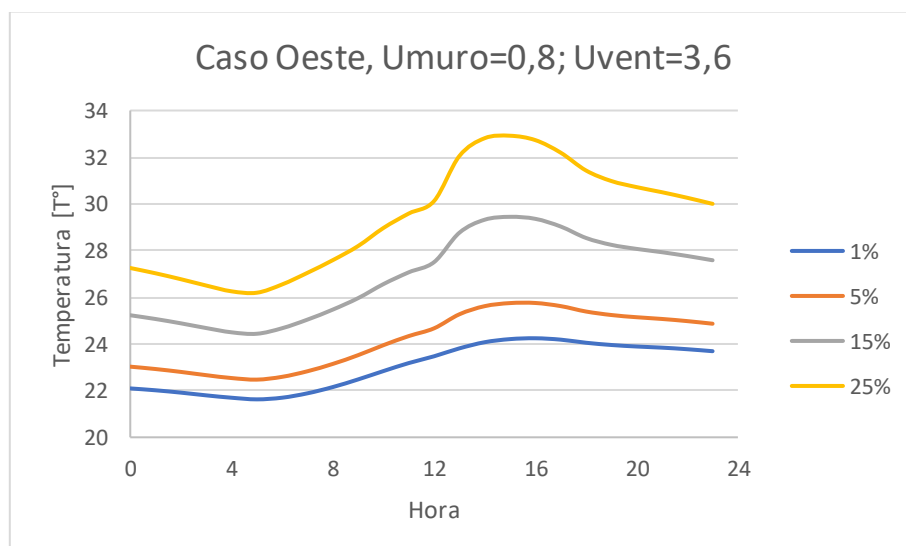
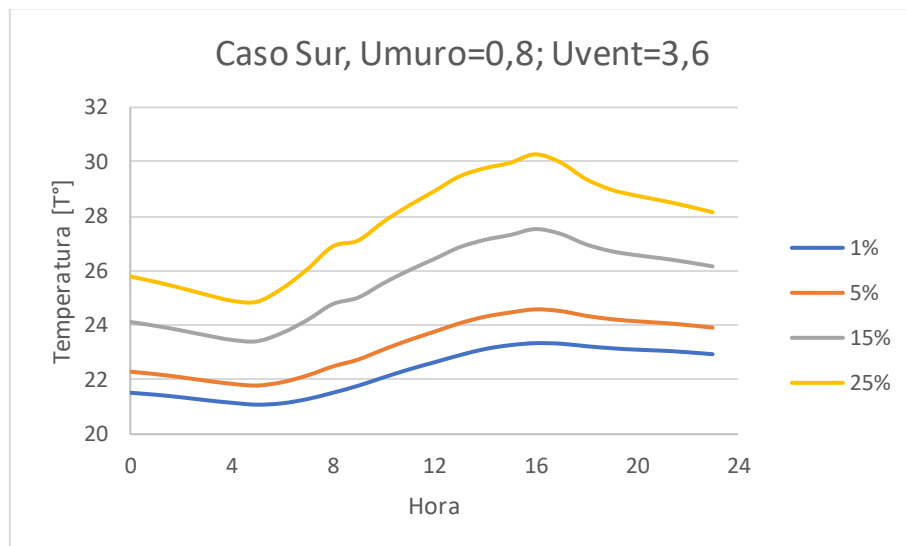
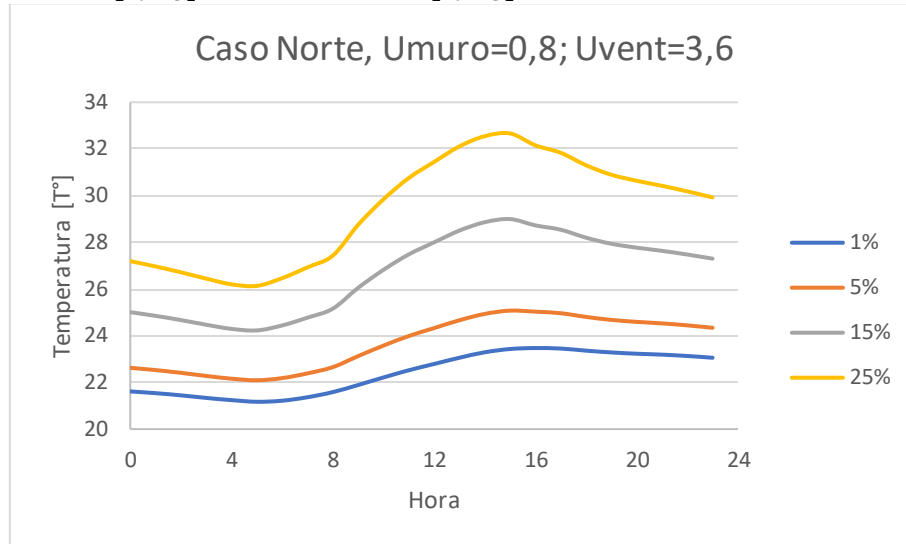
- $U_{muro} = 1,9 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 1,0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



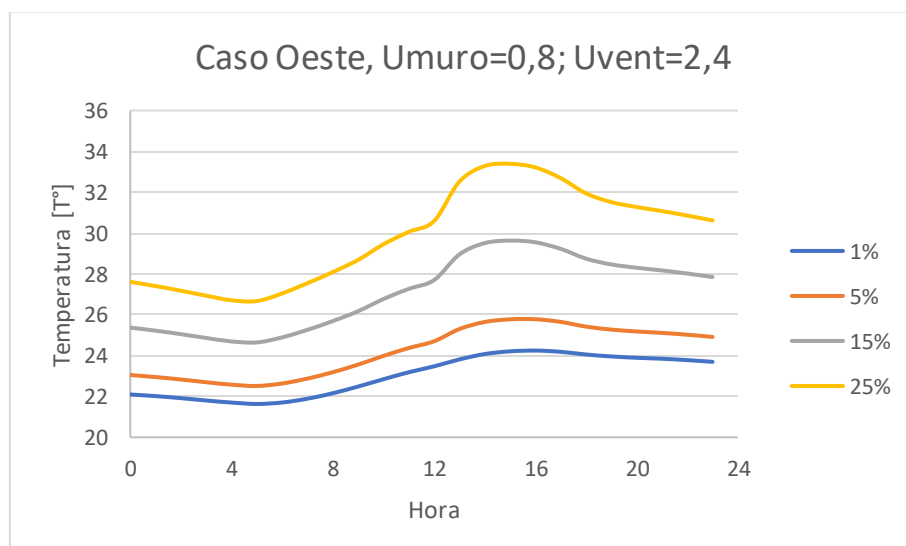
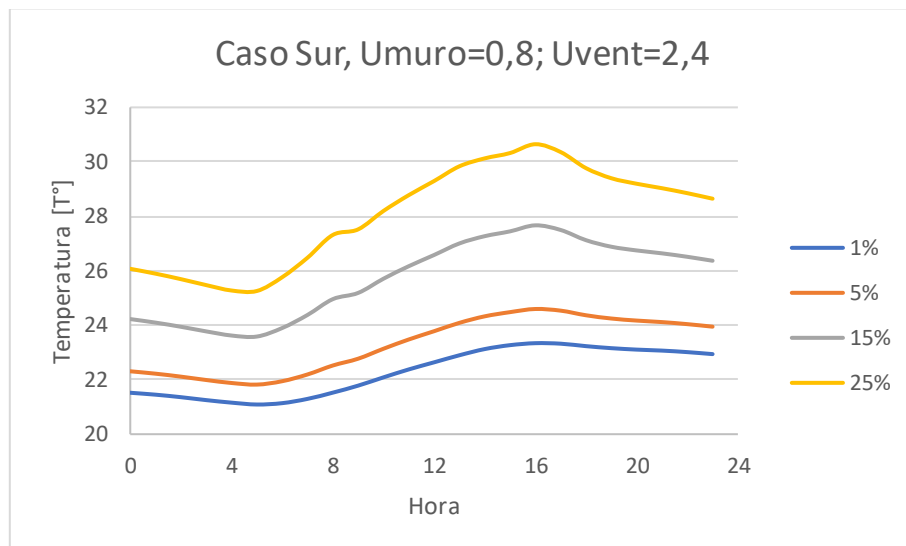
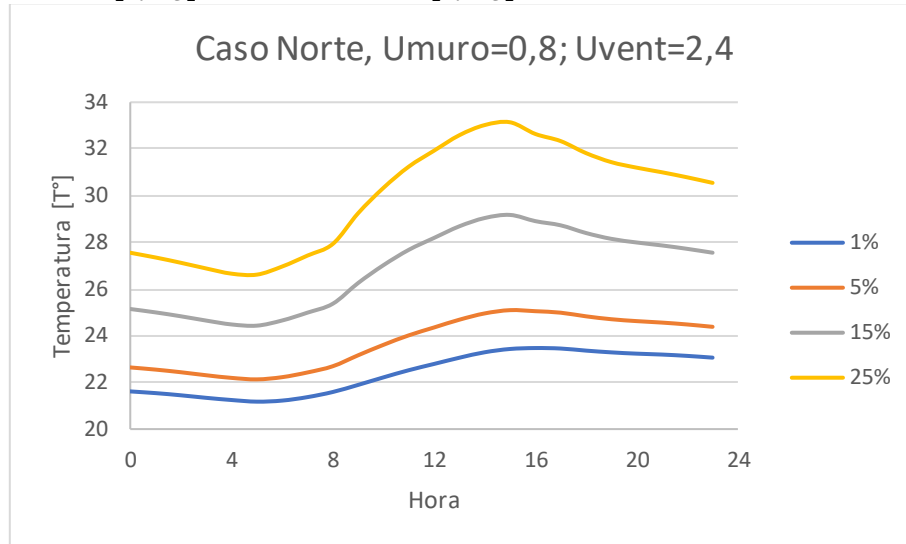
- $U_{muro} = 0,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 5,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



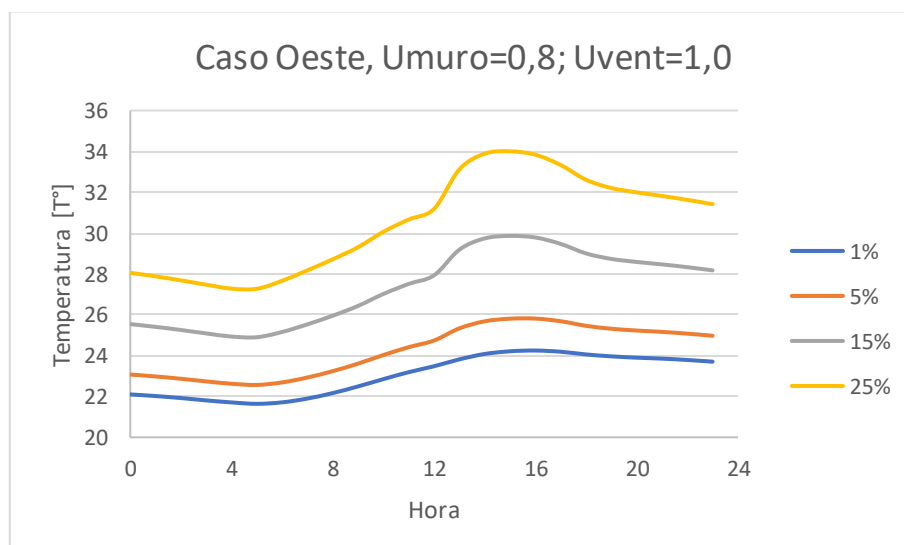
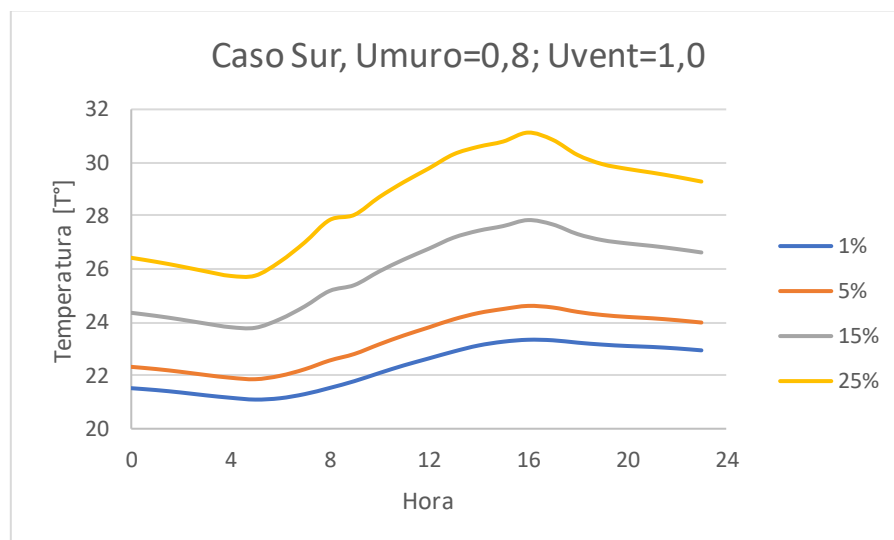
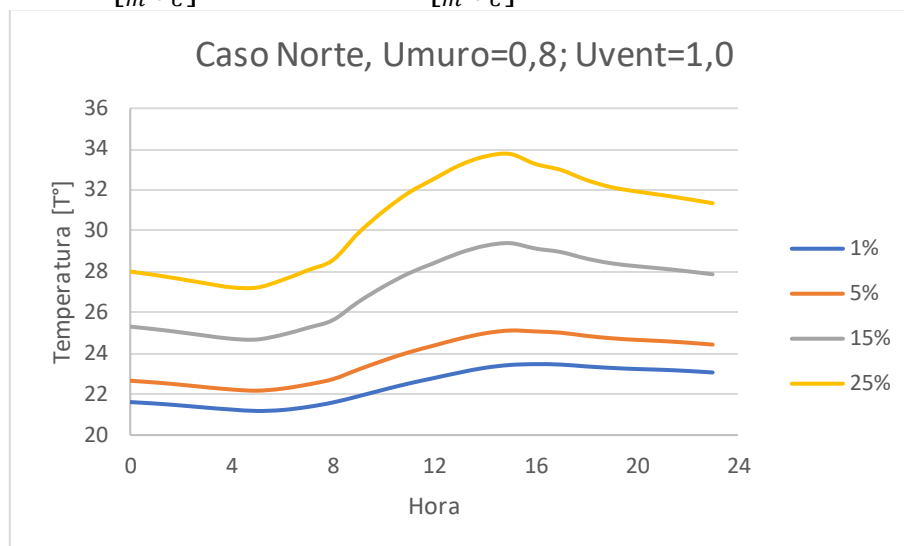
- $U_{muro} = 0,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 3,6 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



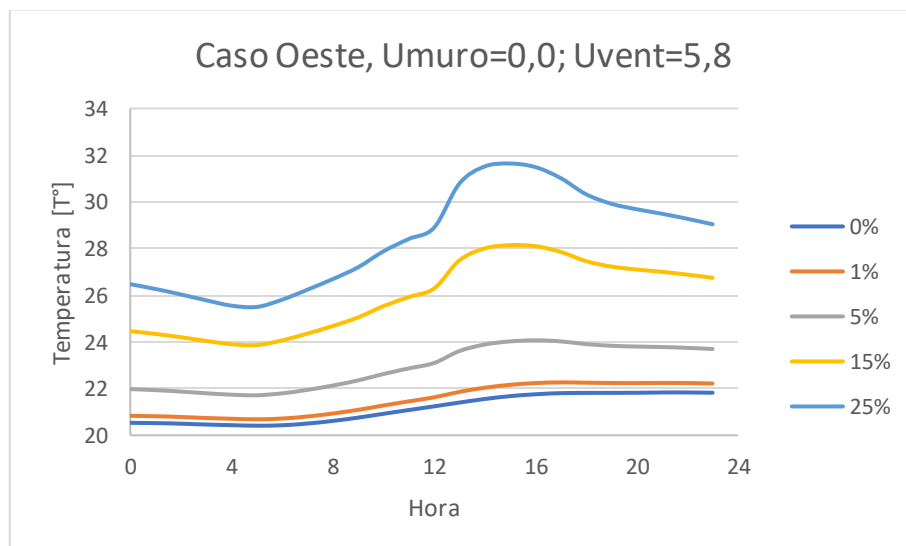
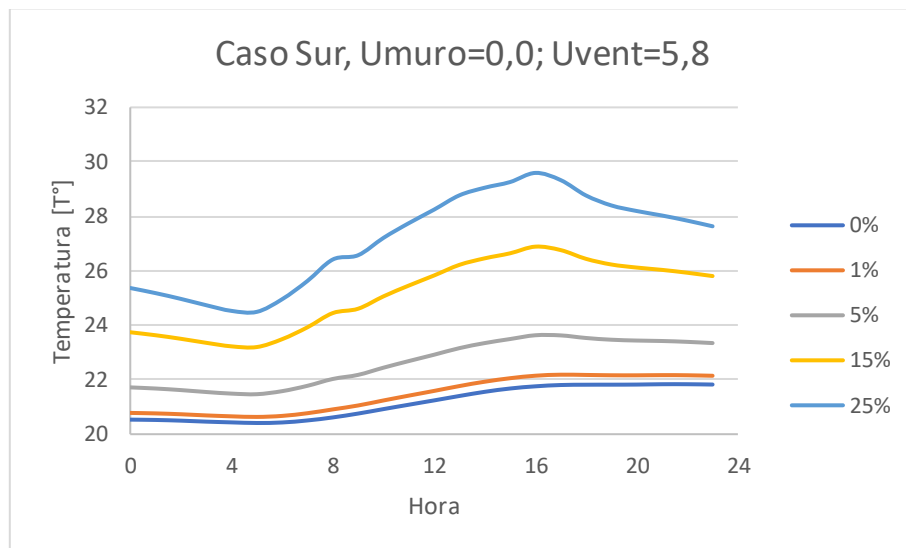
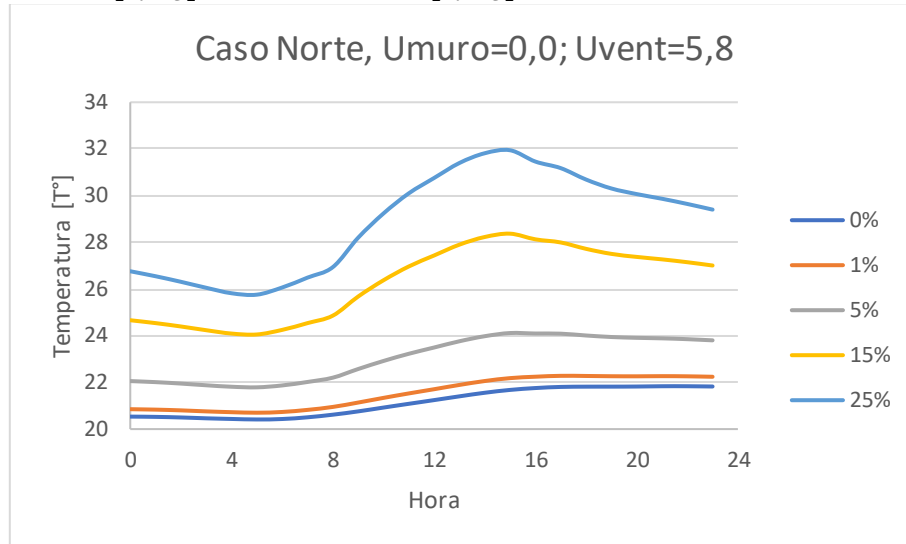
- $U_{muro} = 0,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 2,4 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



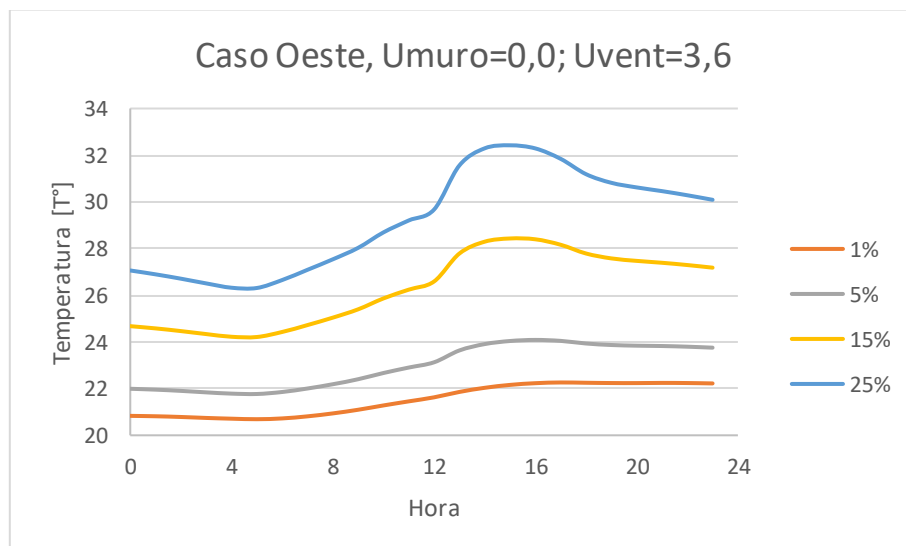
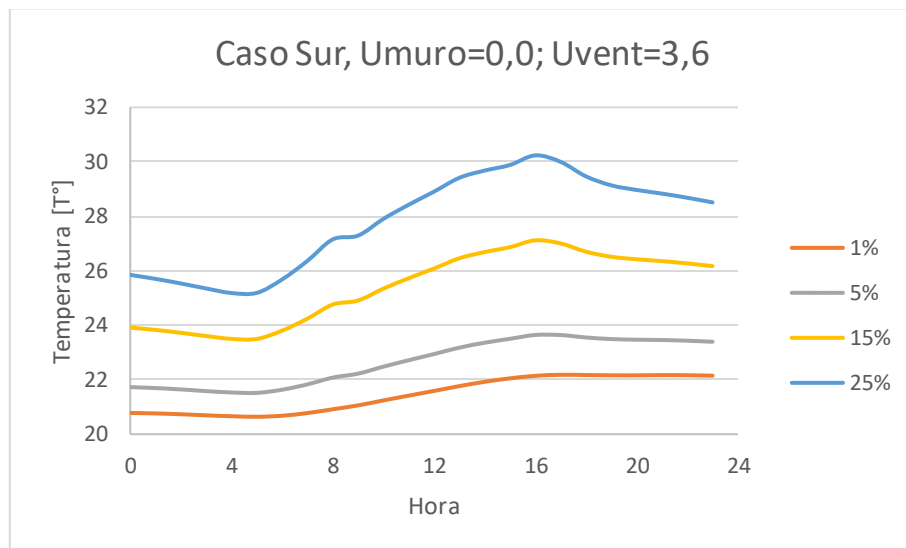
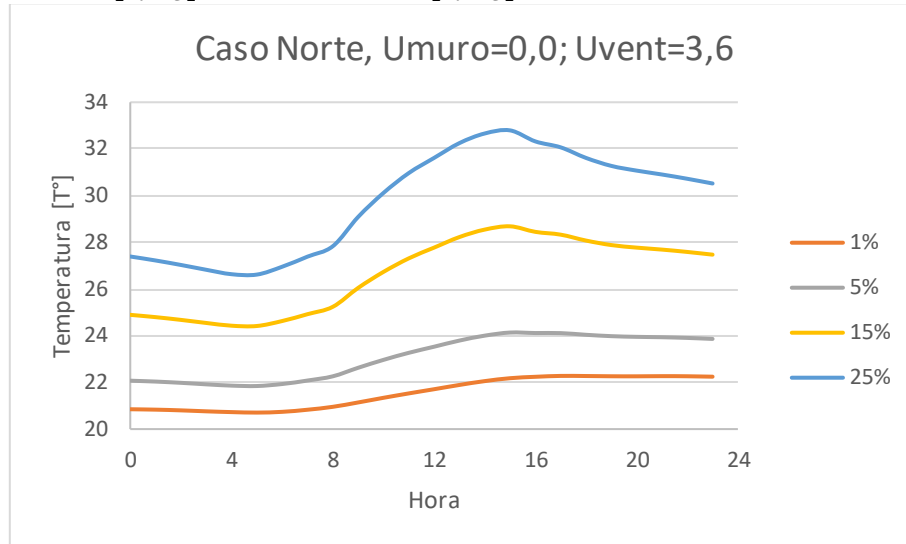
- $U_{muro} = 0,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 1,0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



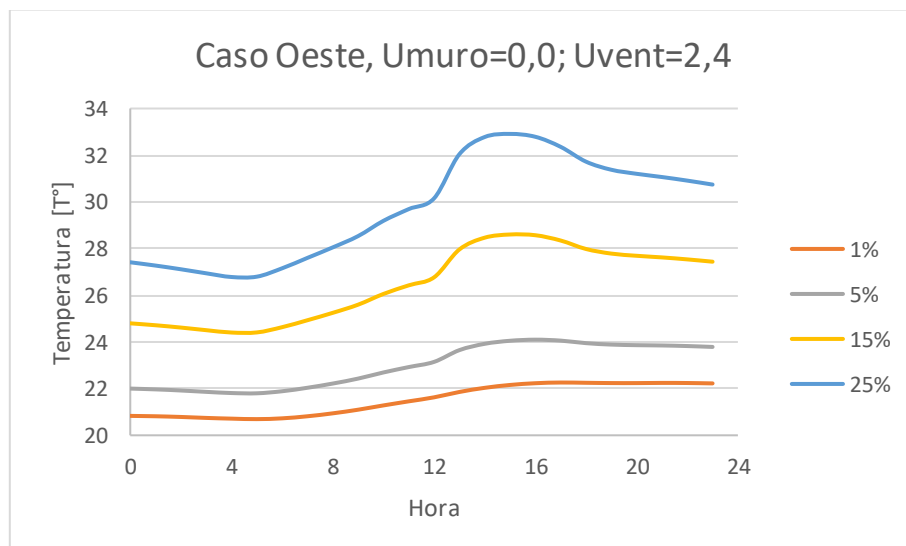
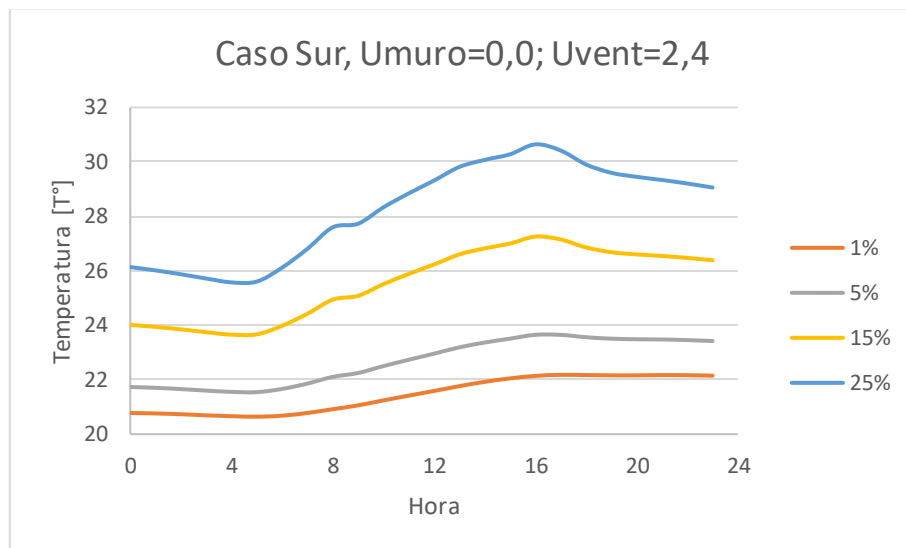
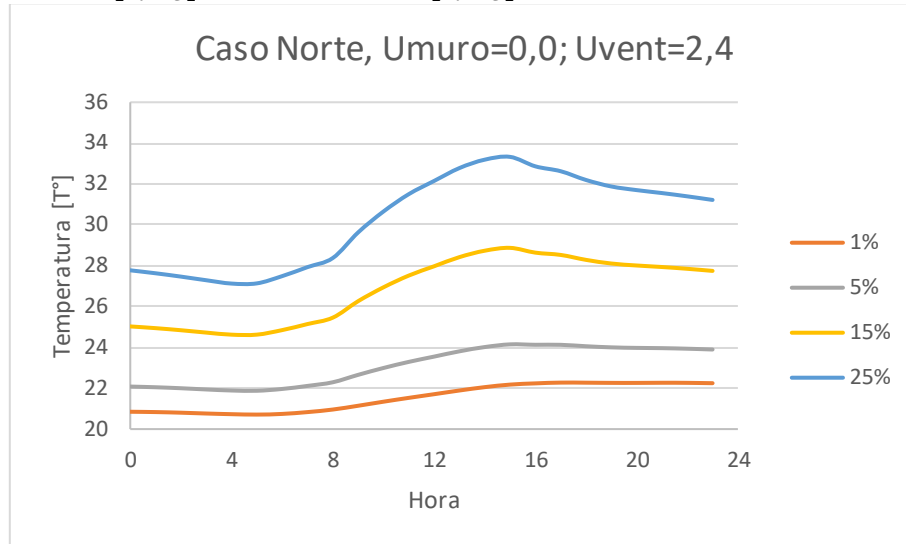
- $U_{muro} = 0,0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 5,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



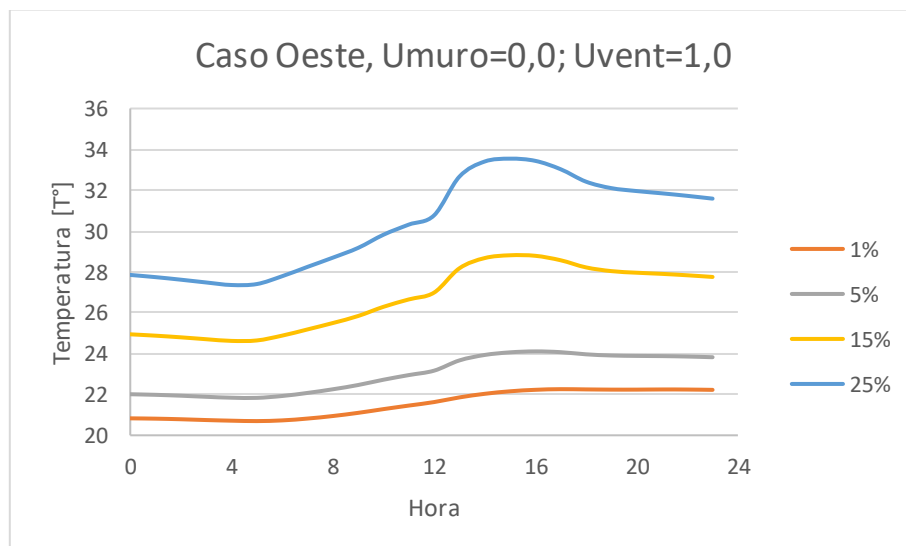
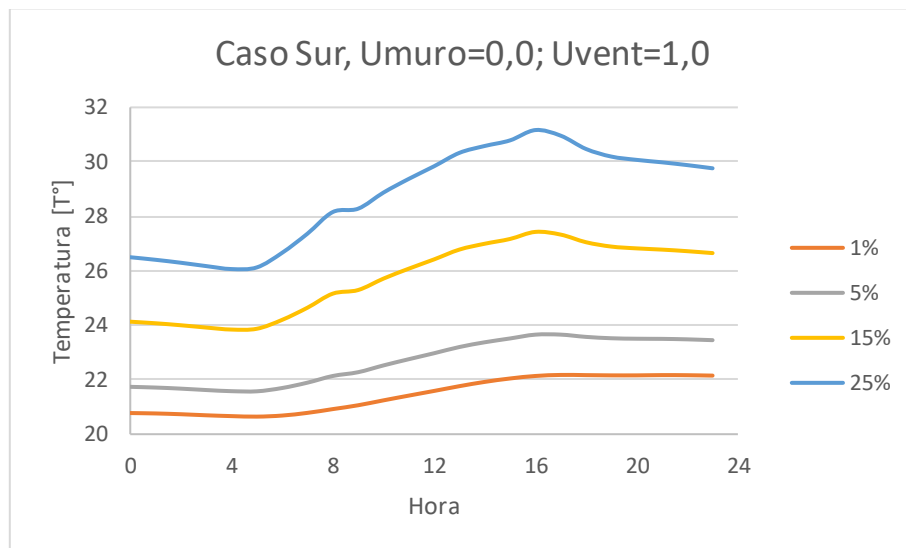
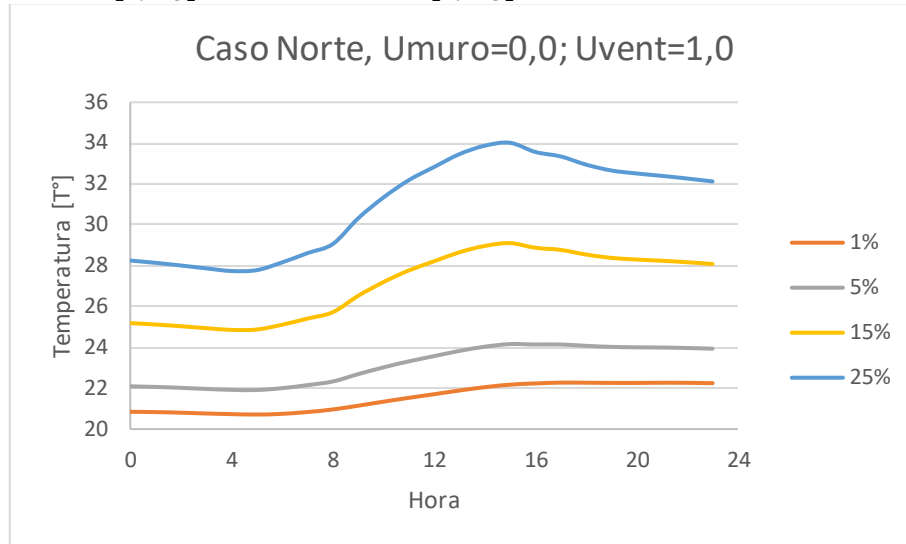
- $U_{muro} = 0,0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 3,6 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



- $U_{muro} = 0,0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 2,4 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



- $U_{muro} = 0,0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 1,0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



B.3 Ajuste Lineal

A continuación, se presentan los ajustes lineales para las 36 alternativas, con la superficie máxima de vidrio tal que no se superen los 26,6° C, de manera de obtener temperatura de confort en todo momento.

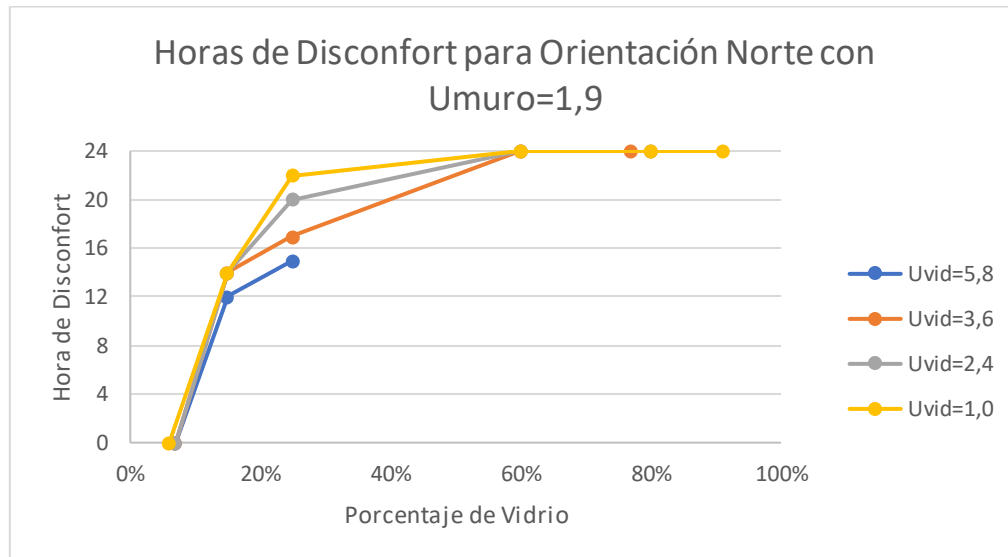
U muro	Orientación	U vidrio	ajuste lineal	R ²	Y	% max
1,9; OGUC 2016	Ventanas Norte	5,8	$y = 29,773x + 24,463$	1	26,6	7
		3,6	$y = 32,571x + 24,391$	1	26,6	7
		2,4	$y = 34,296x + 24,344$	1	26,6	7
		1	$y = 36,513x + 24,281$	1	26,6	6
	Ventanas Sur	5,8	$y = 21,851x + 24,368$	1	26,6	10
		3,6	$y = 24,051x + 24,313$	1	26,6	10
		2,4	$y = 25,413x + 24,277$	1	26,6	9
		1	$y = 27,169x + 24,228$	1	26,6	9
	Ventanas Este-Oeste	5,8	$y = 27,007x + 26,04$	1	26,6	2
		3,6	$y = 29,956x + 25,979$	1	26,6	2
		2,4	$y = 31,776x + 25,938$	1	26,6	2
		1	$y = 34,114x + 25,882$	1	26,6	2

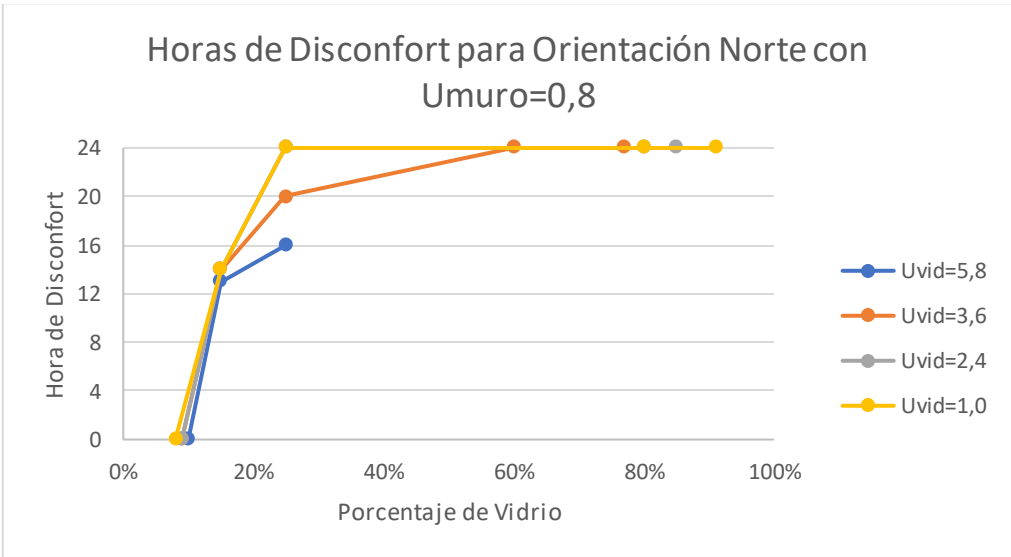
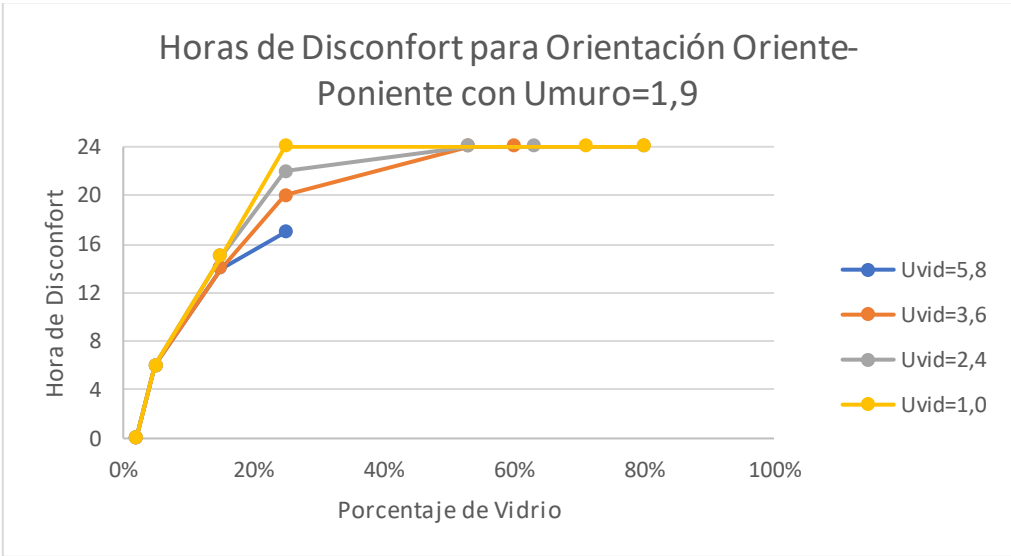
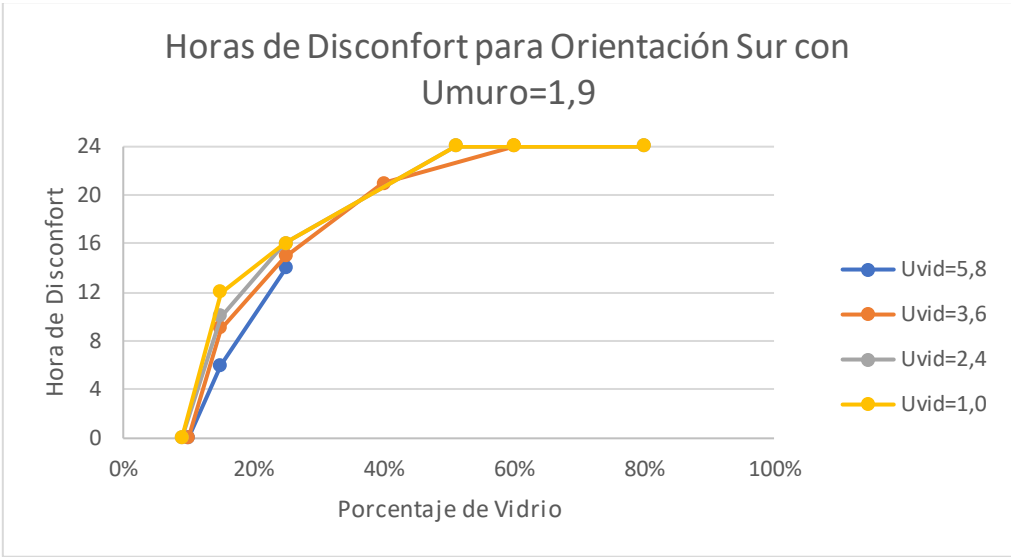
U muro	Orientación	U vidrio	ajuste lineal	R ²	Y	% max
0,8; NTM 11	Ventanas Norte	5,8	$y = 35,106x + 23,237$	1	26,6	10
		3,6	$y = 38,336x + 23,142$	1	26,6	9
		2,4	$y = 40,339x + 23,082$	1	26,6	9
		1	$y = 42,923x + 23,001$	1	26,6	8
	Ventanas Sur	5,8	$y = 26,387x + 23,185$	1	26,6	13
		3,6	$y = 28,882x + 23,111$	1	26,6	12
		2,4	$y = 30,434x + 23,064$	1	26,6	12
		1	$y = 32,442x + 23$	1	26,6	11
	Ventanas Este-Oeste	5,8	$y = 32,998x + 24,014$	1	26,6	8
		3,6	$y = 36,166x + 23,931$	1	26,6	7
		2,4	$y = 38,131x + 23,877$	1	26,6	7
		1	$y = 40,665x + 23,804$	1	26,6	7

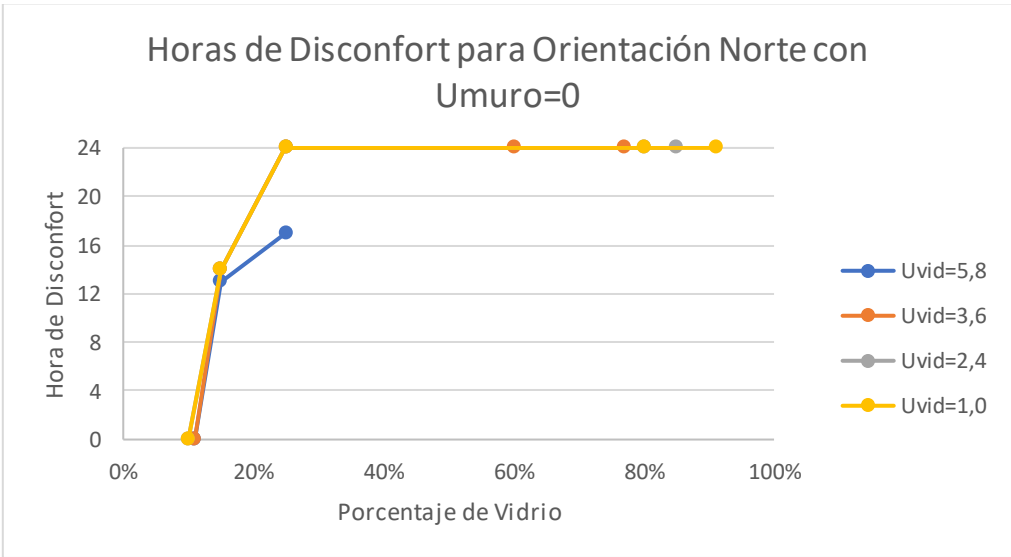
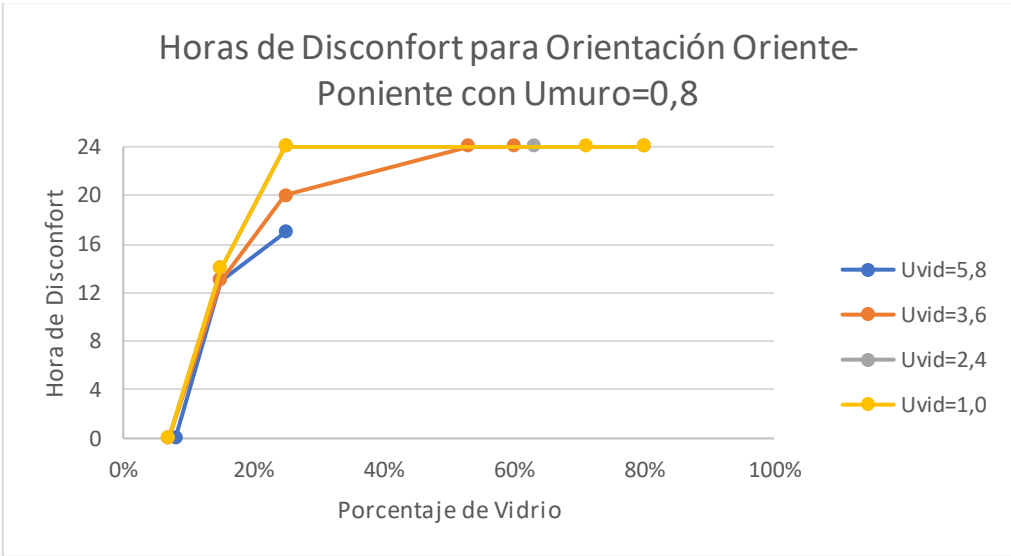
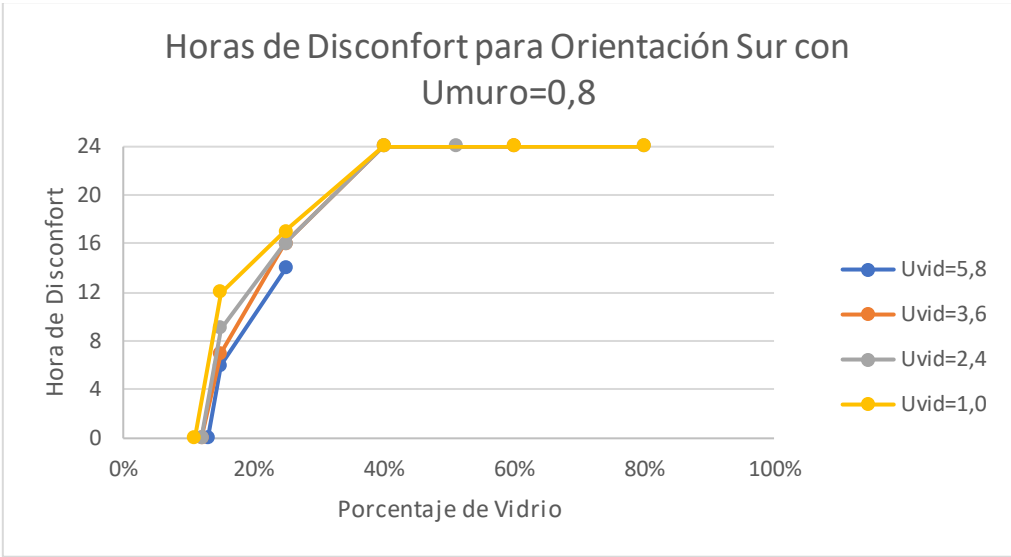
U muro	Orientación	U vidrio	ajuste lineal	R ²	Y	% max
0	Ventanas Norte	5,8	$y = 40,308x + 22,042$	1	26,6	11
		3,6	$y = 43,905x + 21,924$	1	26,6	11
		2,4	$y = 46,143x + 21,849$	1	26,6	10
		1	$y = 49,039x + 21,749$	1	26,6	10
	Ventanas Sur	5,8	$y = 30,856x + 22,026$	1	26,6	15
		3,6	$y = 33,589x + 21,932$	1	26,6	14
		2,4	$y = 35,294x + 21,872$	1	26,6	13
		1	$y = 37,504x + 21,794$	1	26,6	13
	Ventanas Este-Oeste	5,8	$y = 39,026x + 22,042$	1	26,6	12
		3,6	$y = 42,335x + 21,933$	1	26,6	11
		2,4	$y = 44,391x + 21,863$	1	26,6	11
		1	$y = 47,05x + 21,77$	1	26,6	10

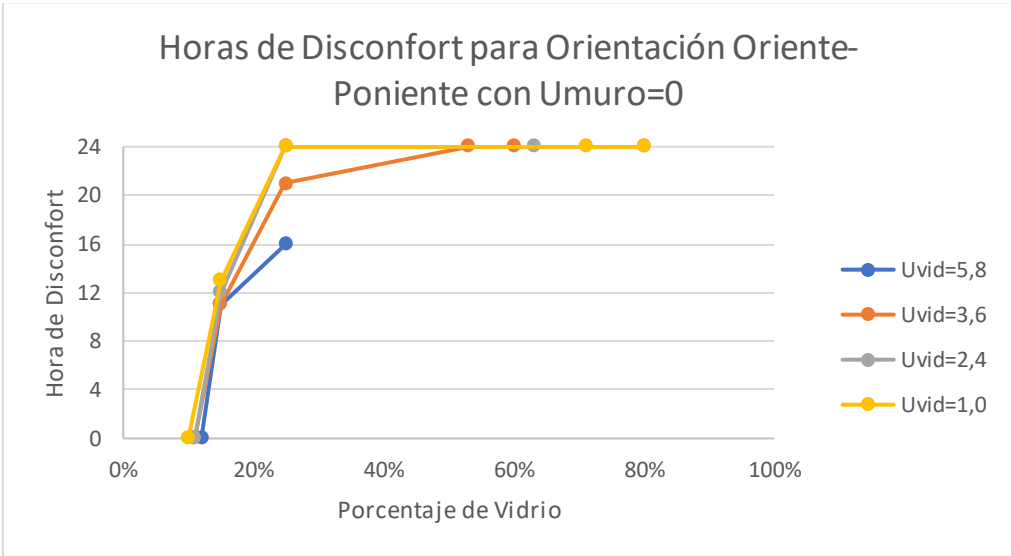
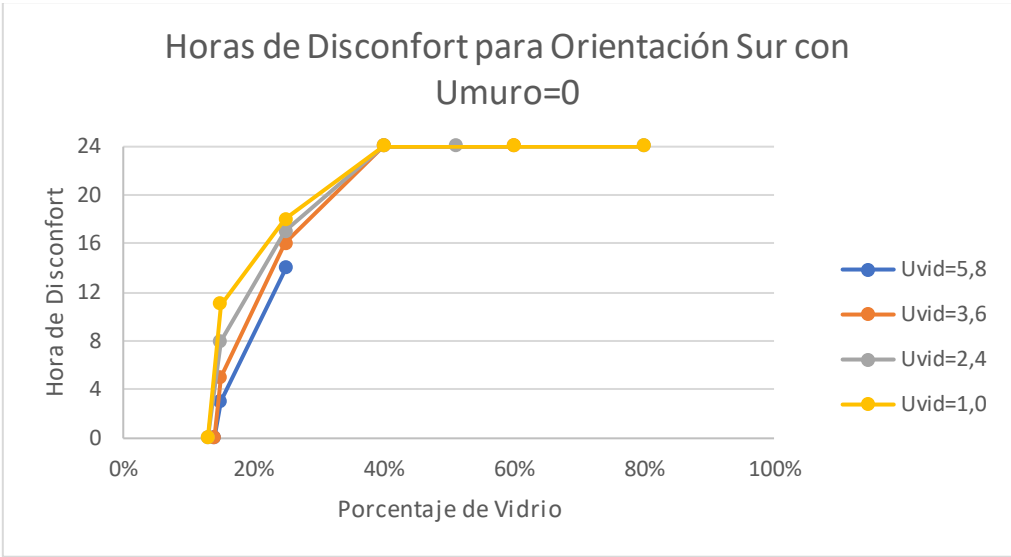
B.4 Horas de Discomfort en el dormitorio

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes a las horas de discomfort en el dormitorio en función de la superficie de ventana en la fachada.







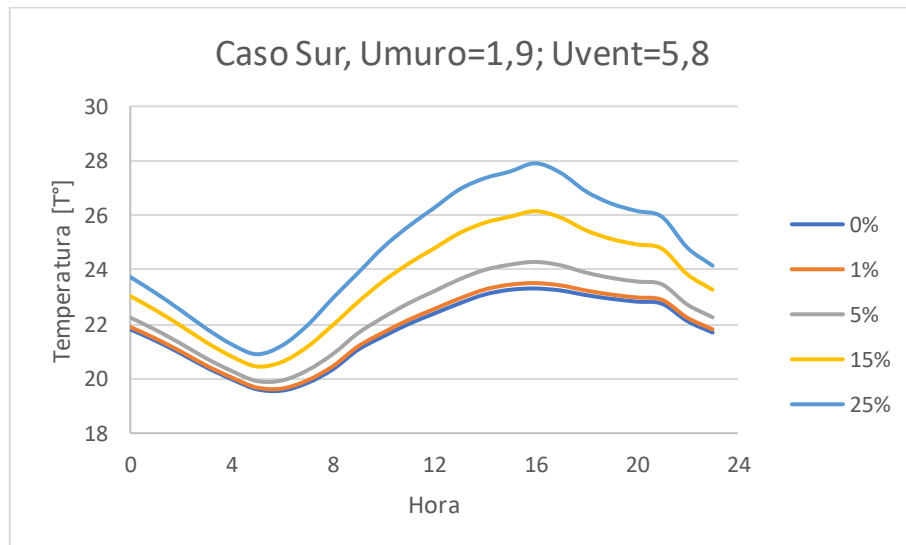
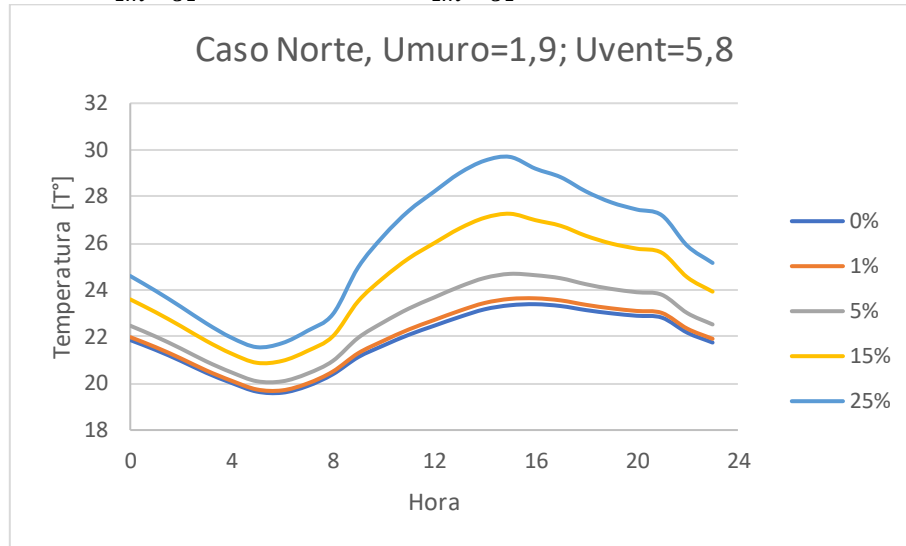


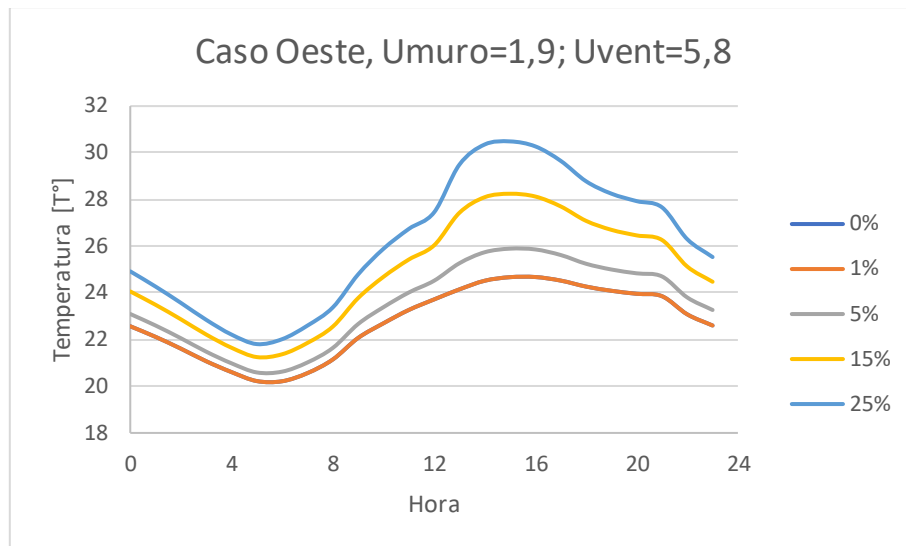
Anexo C

C.1 Gráficos de temperatura interior para modelo con ventilación nocturna

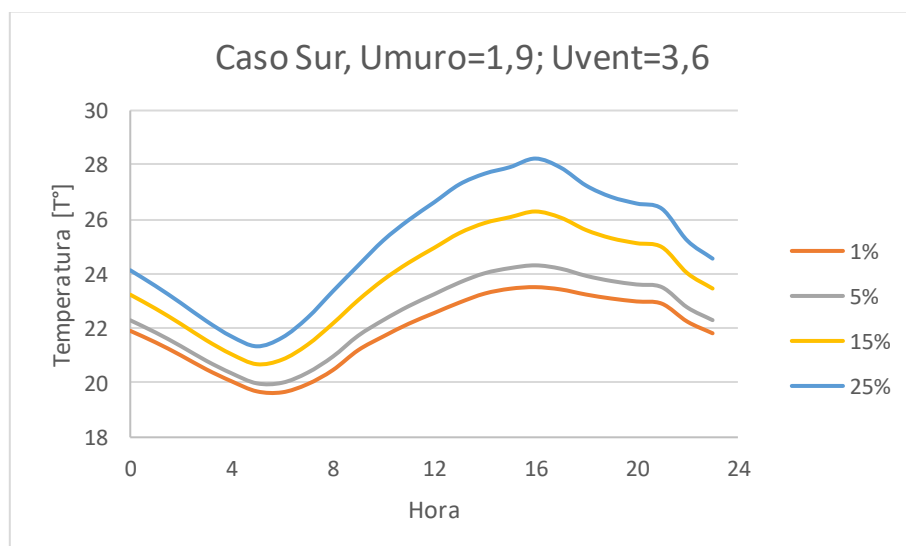
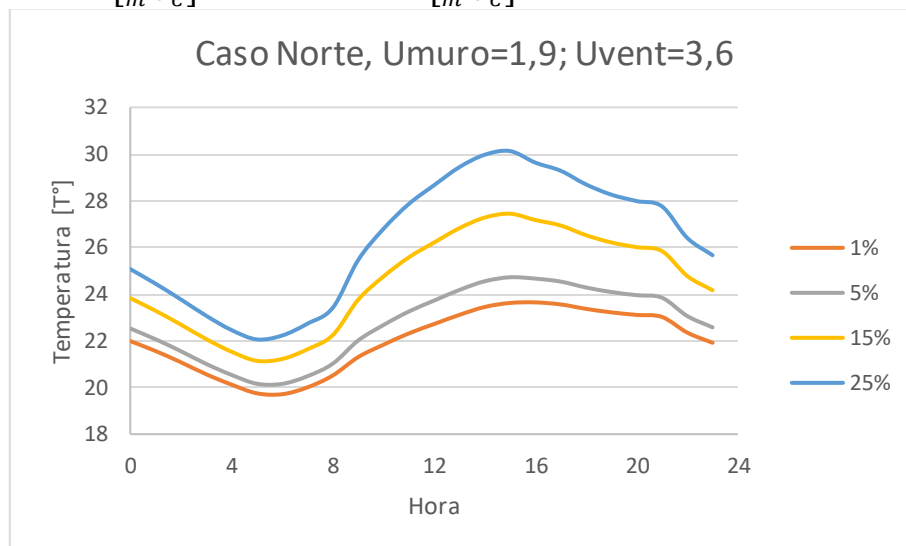
A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la simulación del caso base con ventilación nocturna, en particular, la temperatura interior del dormitorio en función de la hora para un día típico de enero.

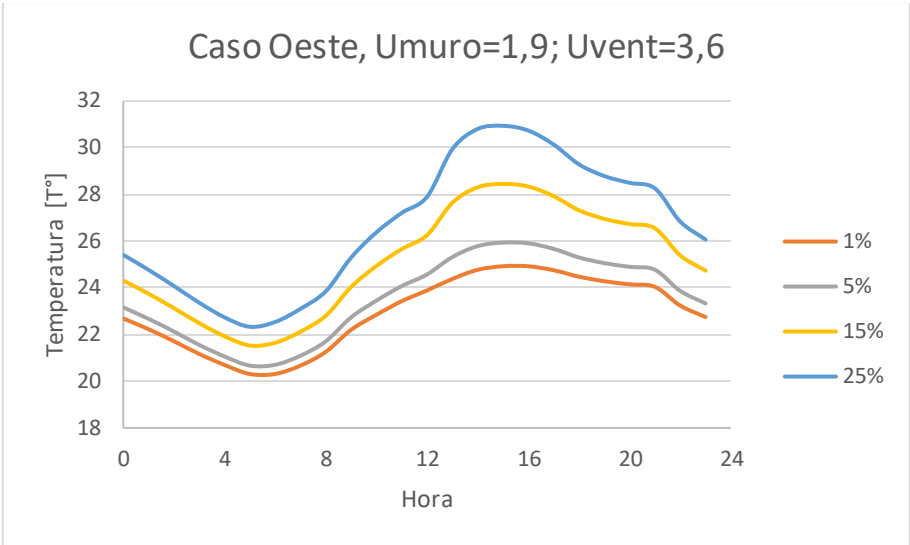
- $U_{muro} = 1,9 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 5,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



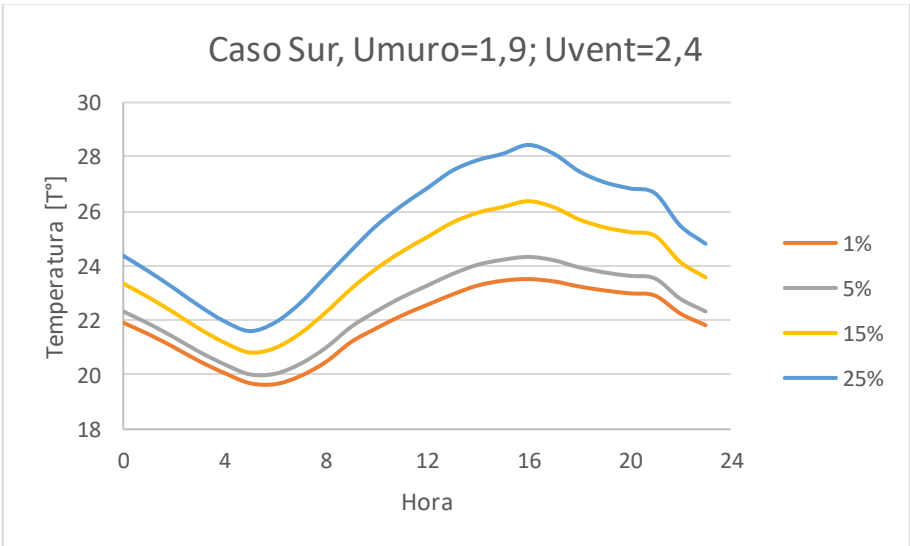
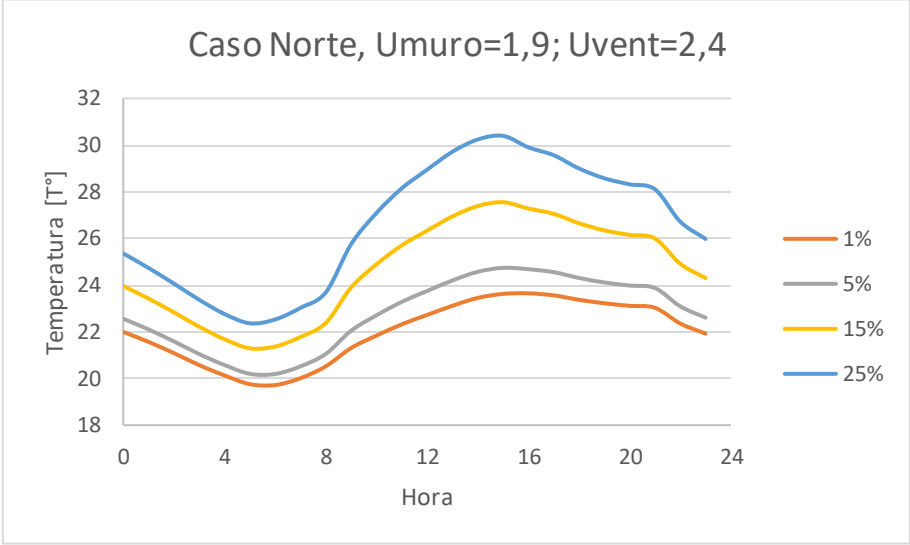


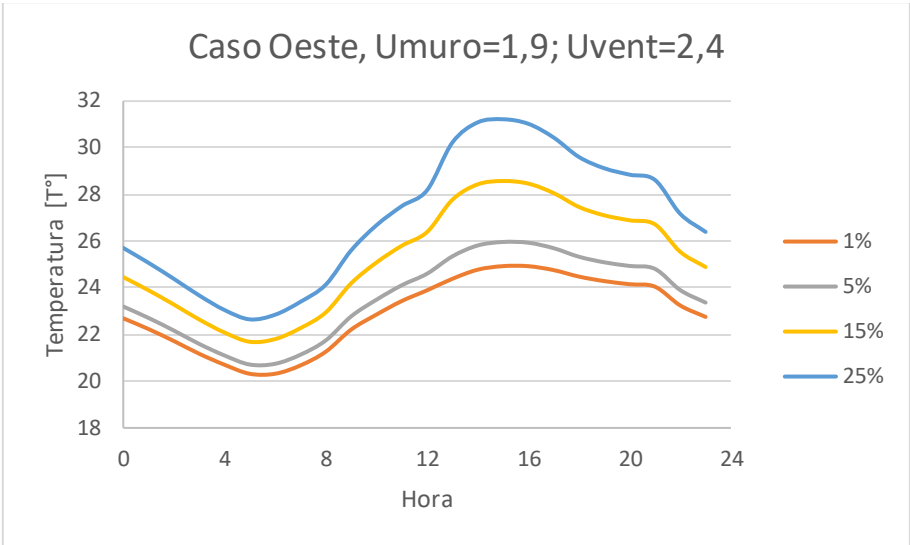
- $U_{muro} = 1,9 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 3,6 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



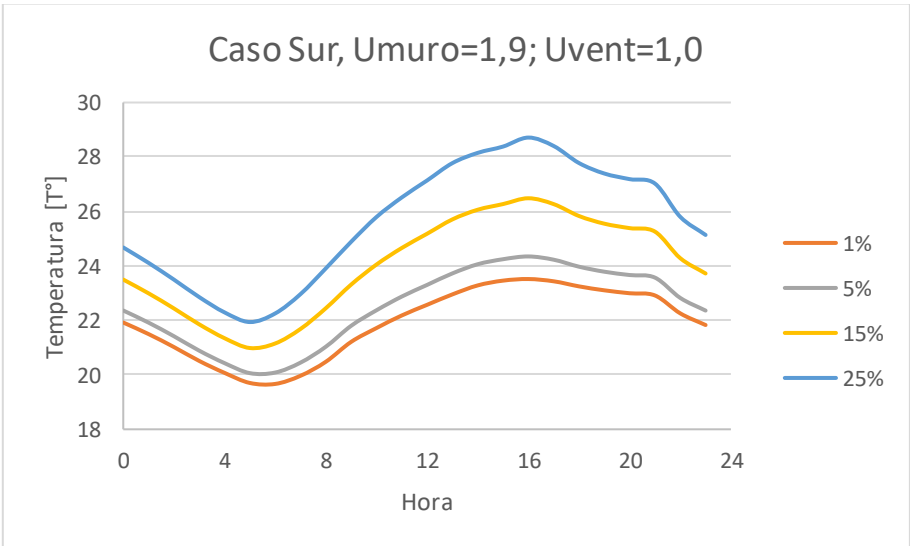
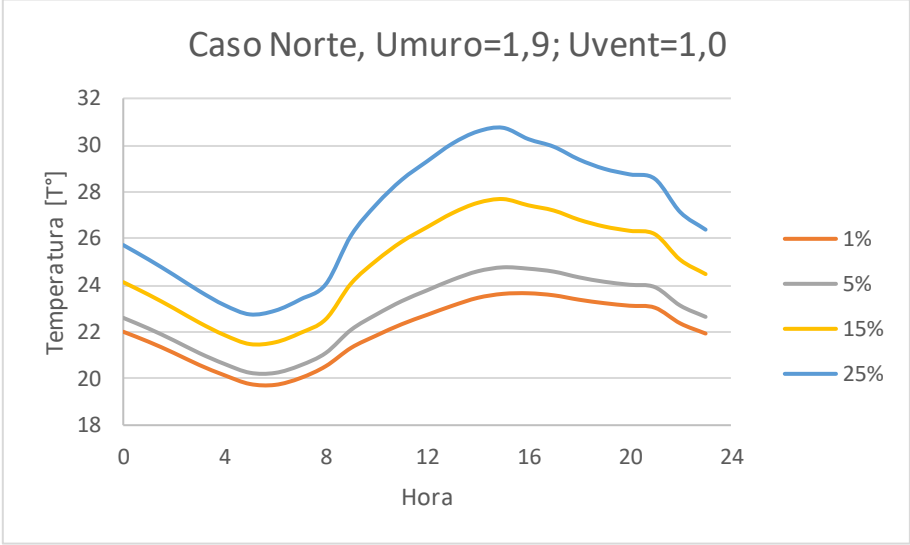


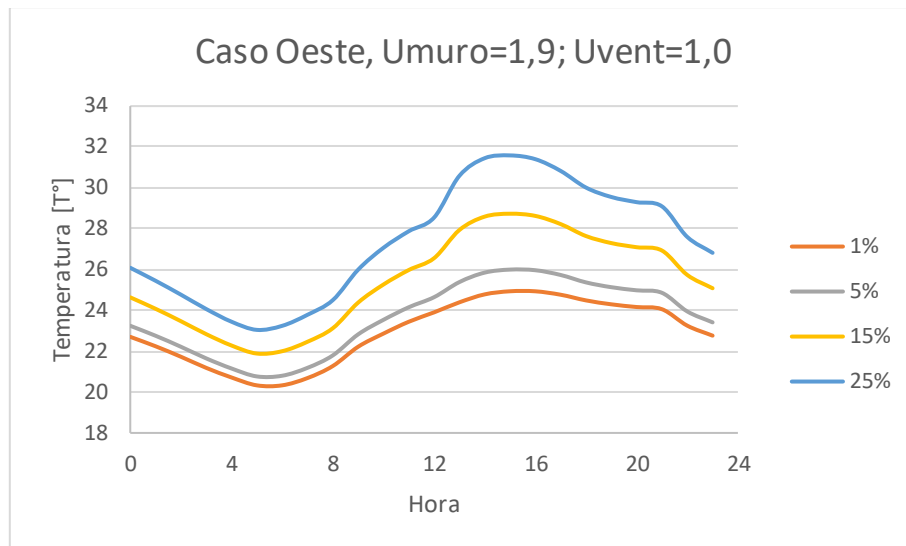
- $U_{muro} = 1,9 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 2,4 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



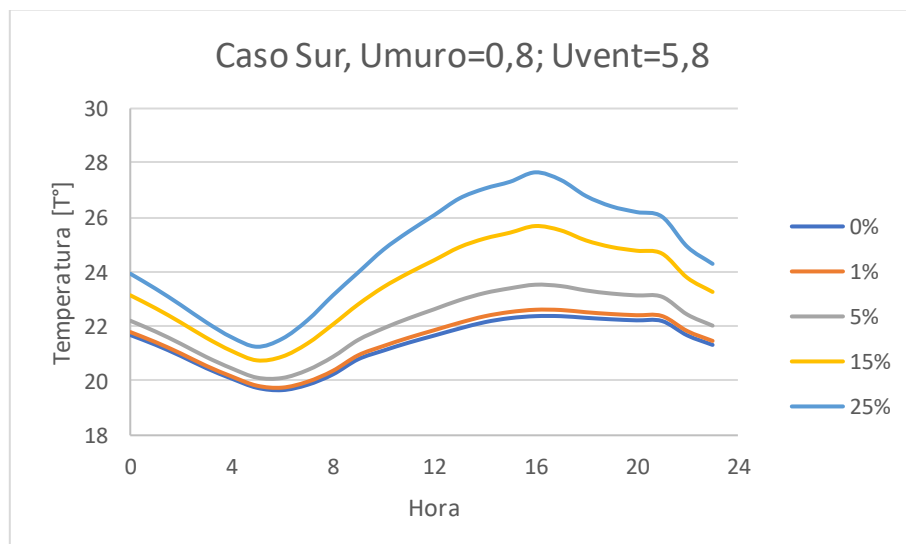
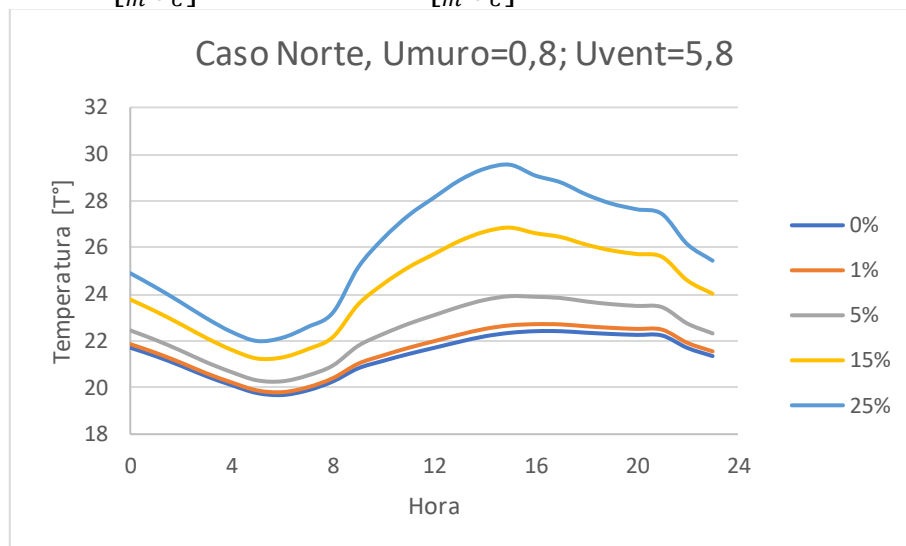


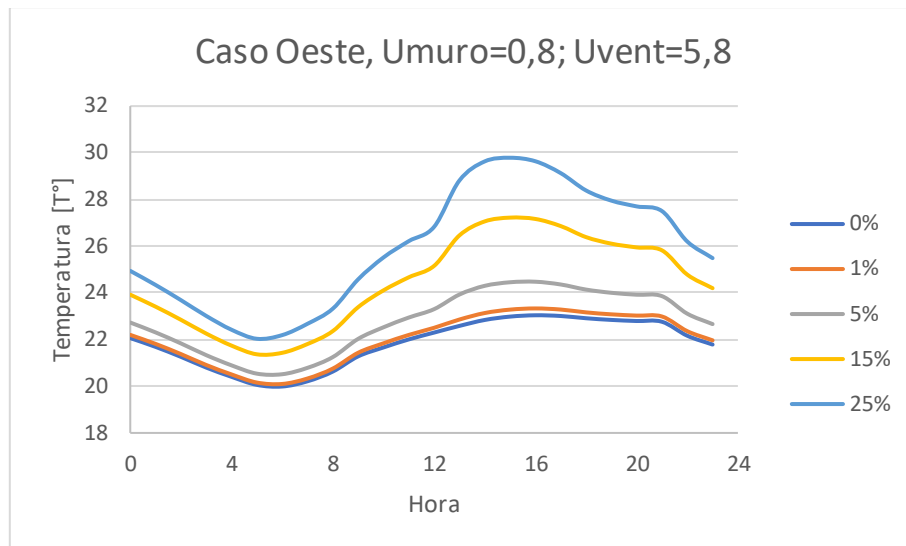
- $U_{muro} = 1,9 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 1,0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



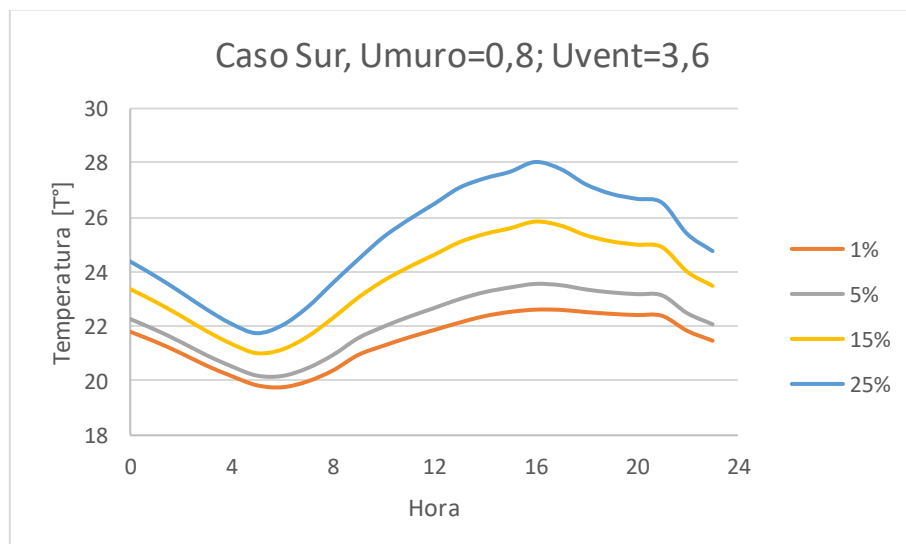
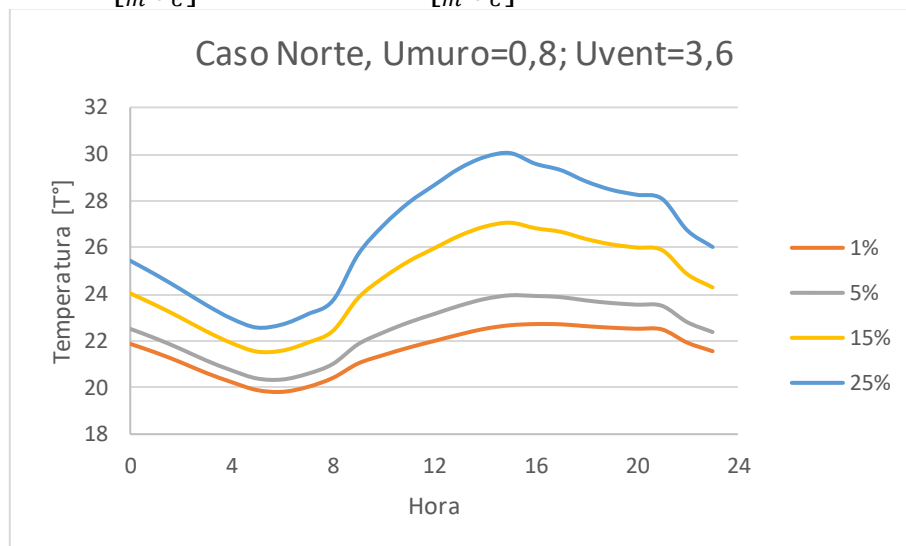


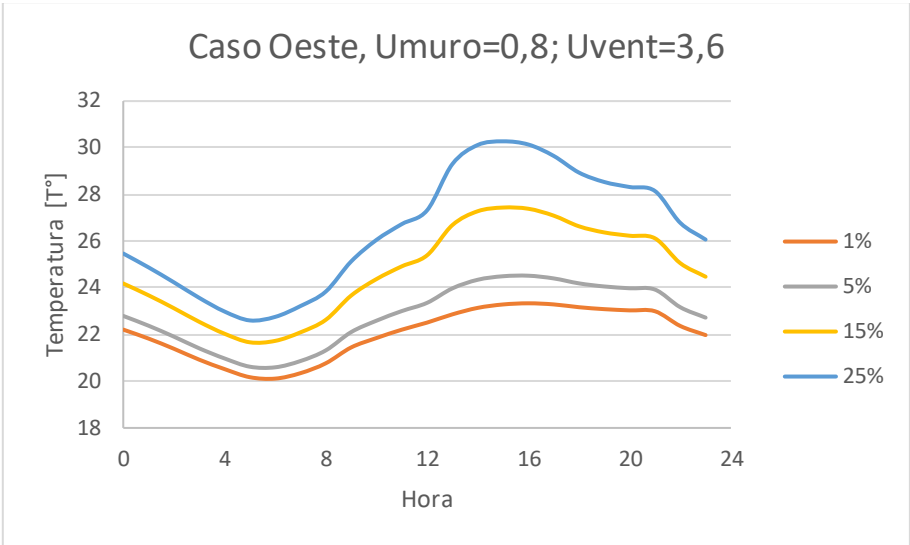
- $U_{muro} = 0,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 5,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



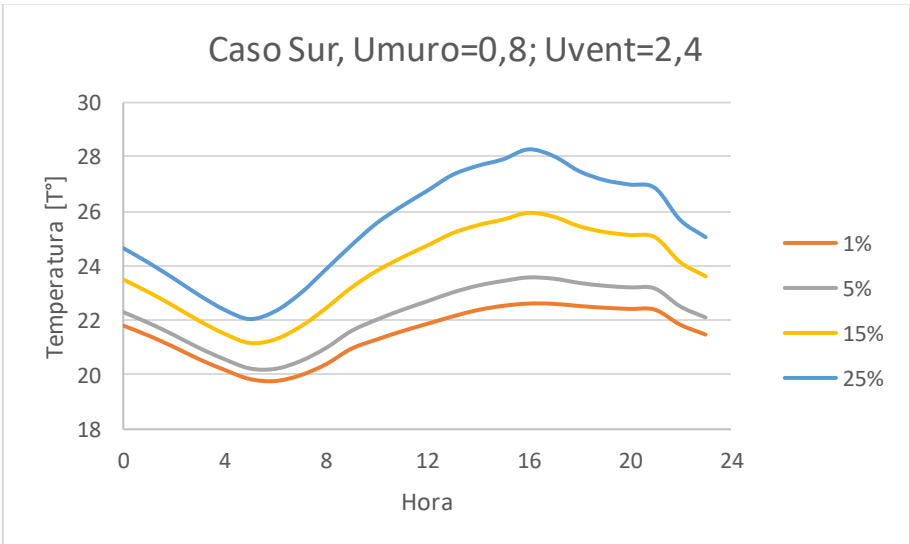
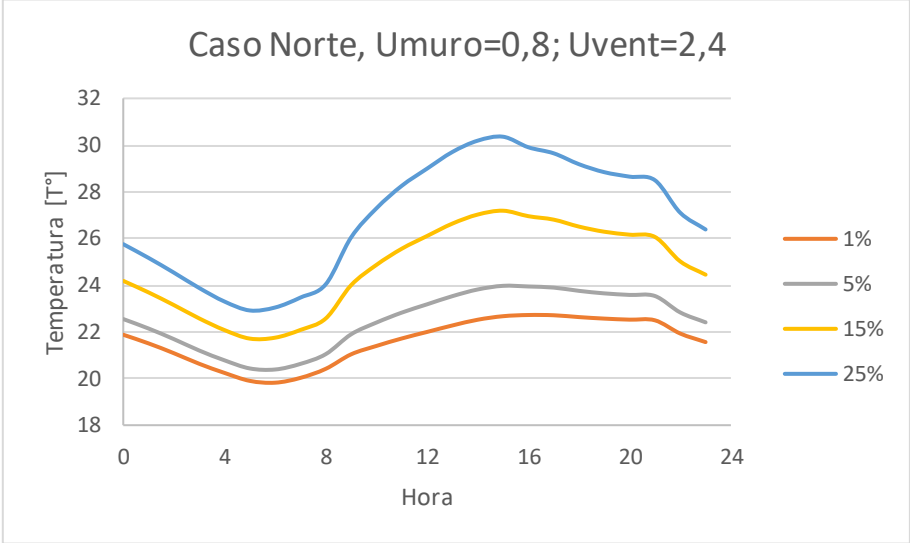


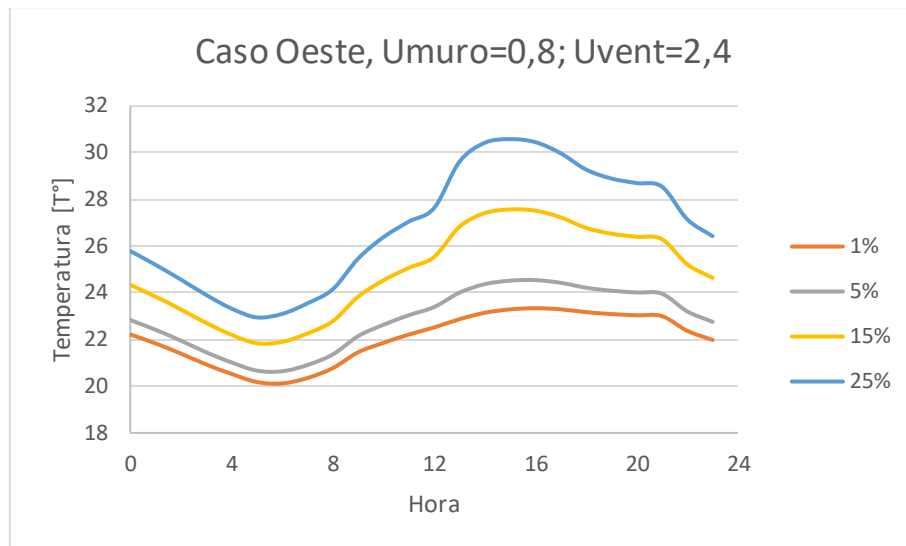
- $U_{muro} = 0,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 3,6 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



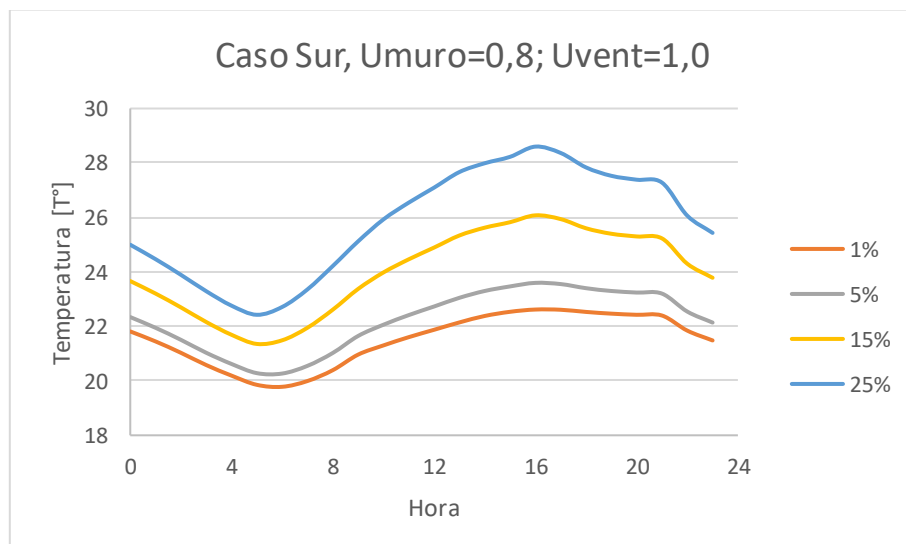
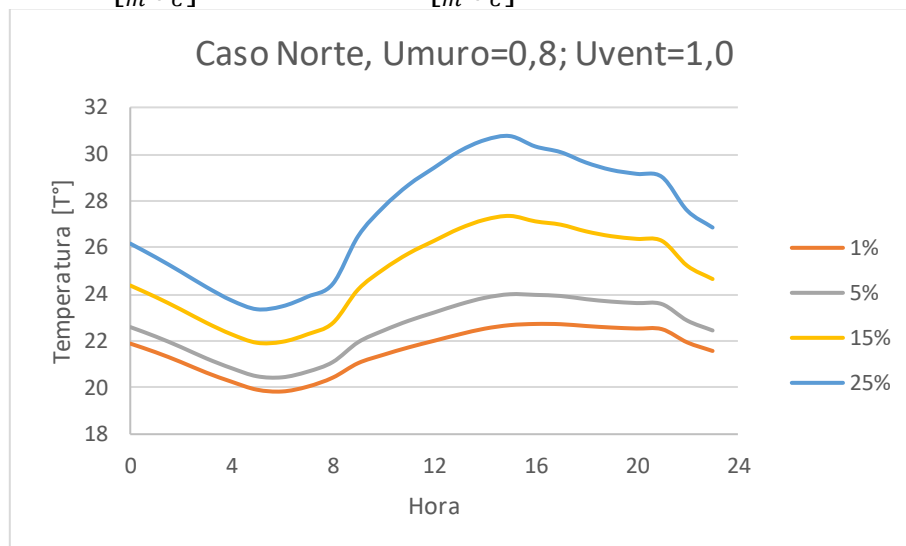


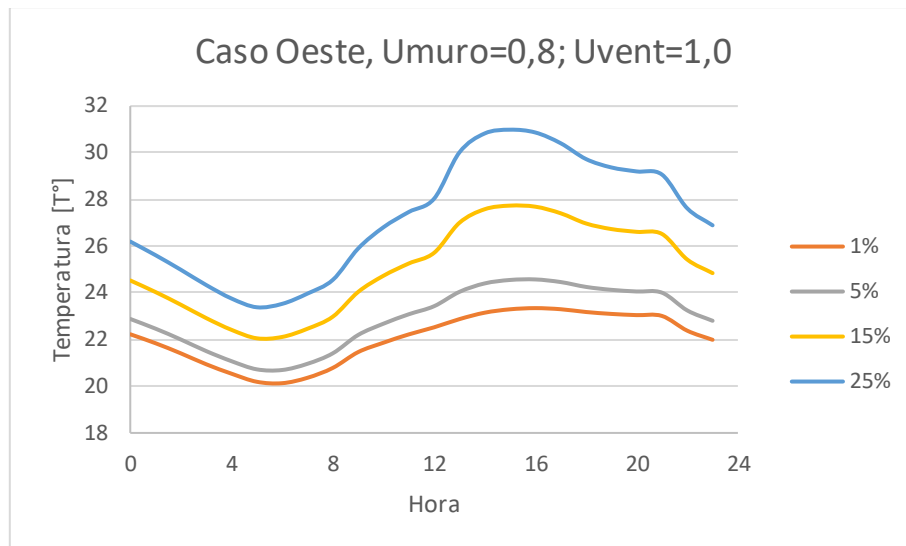
- $U_{muro} = 0,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 2,4 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



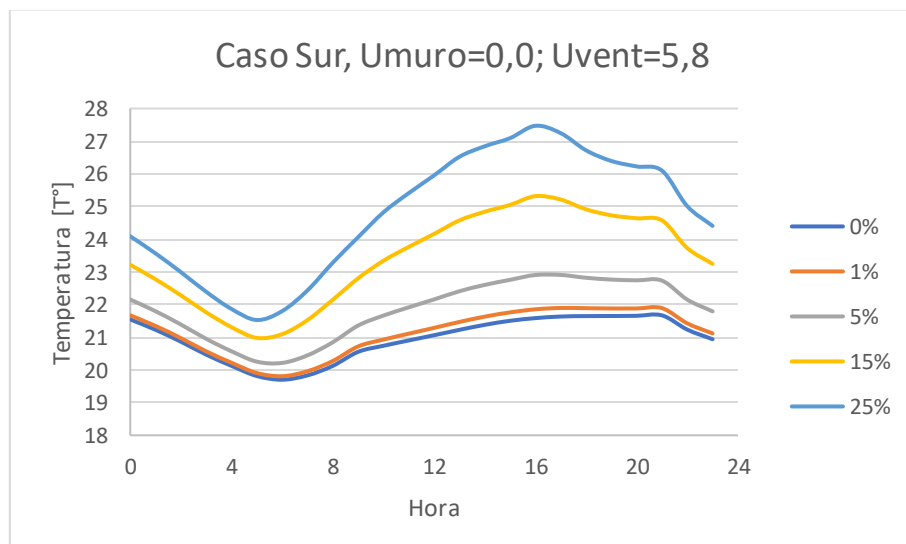
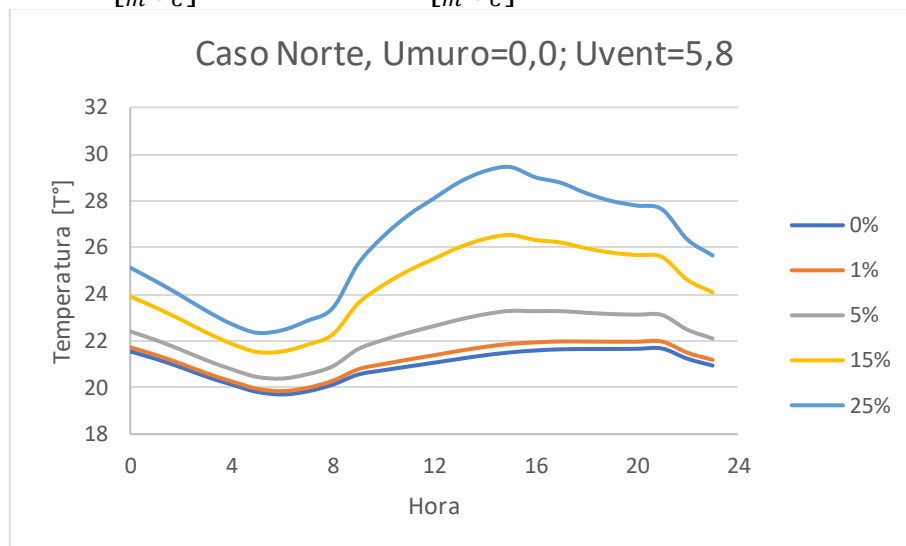


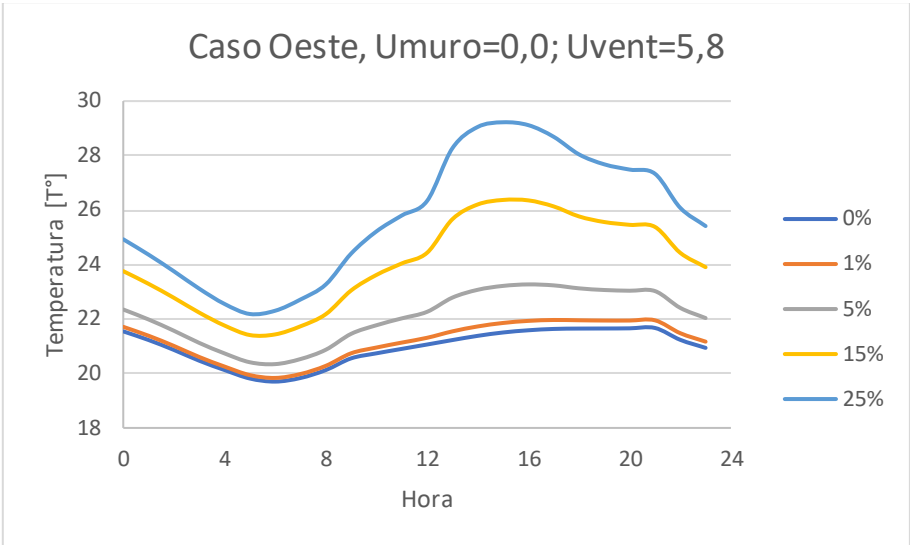
- $U_{muro} = 0,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 1,0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



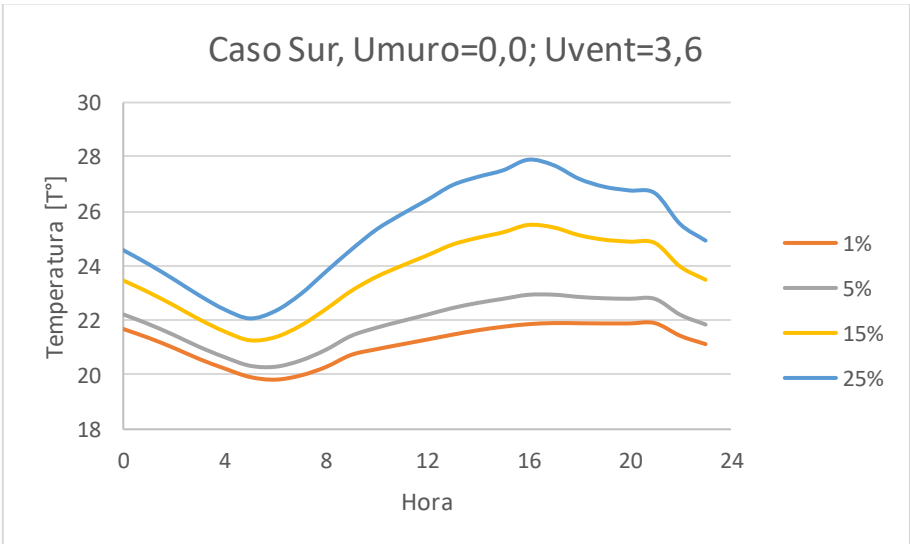
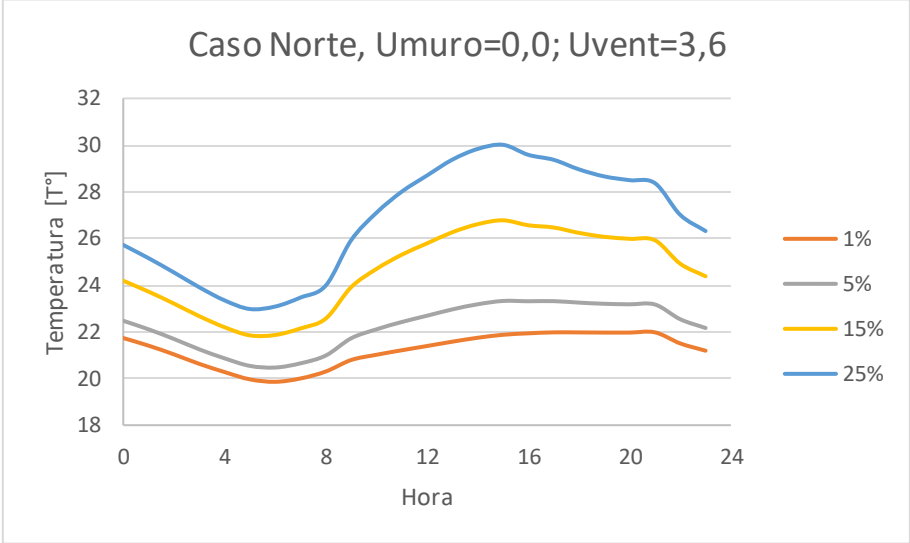


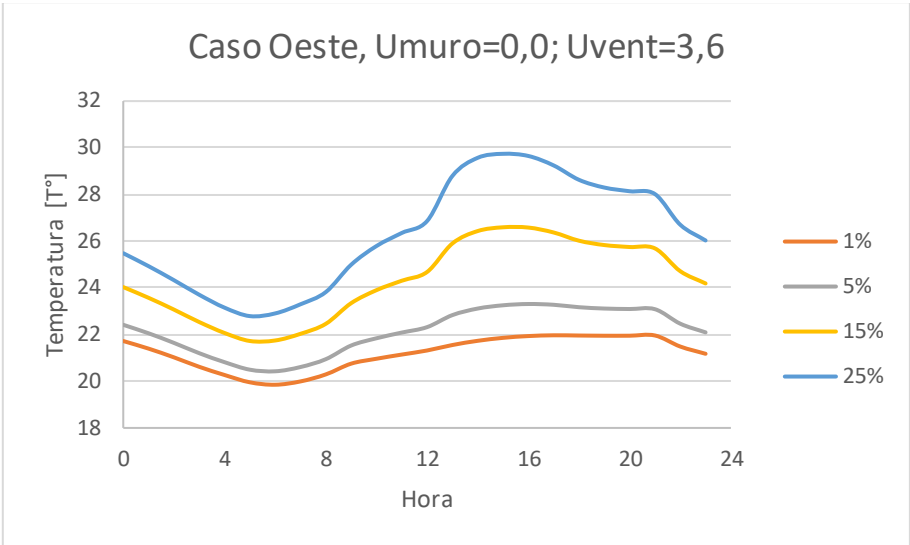
- $U_{muro} = 0,0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 5,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



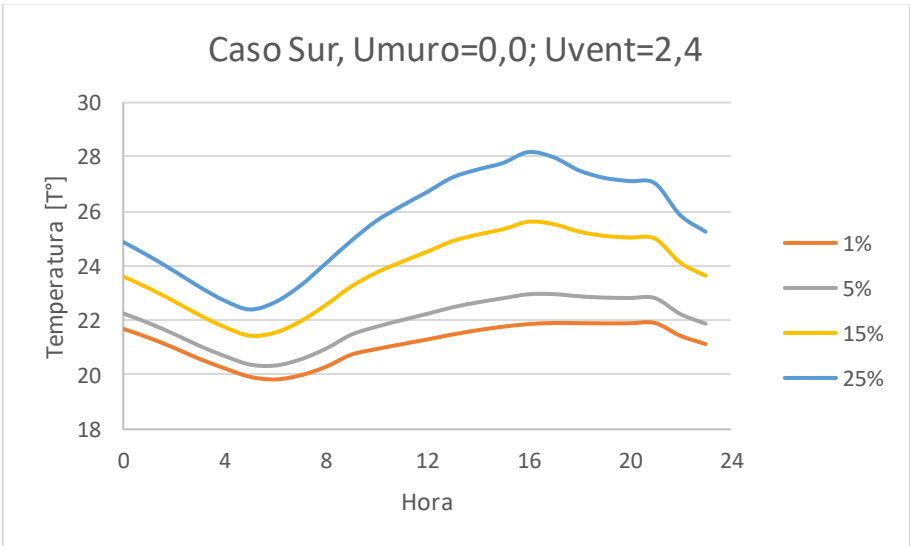
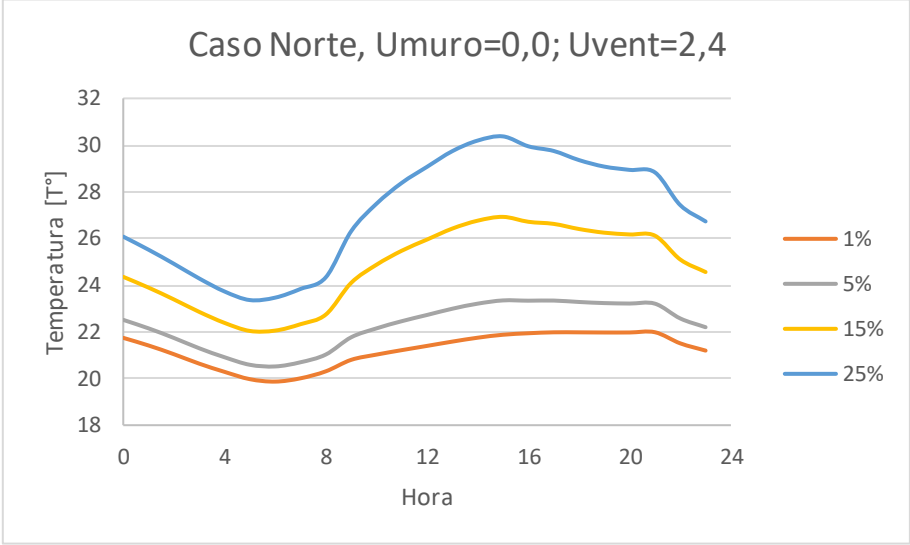


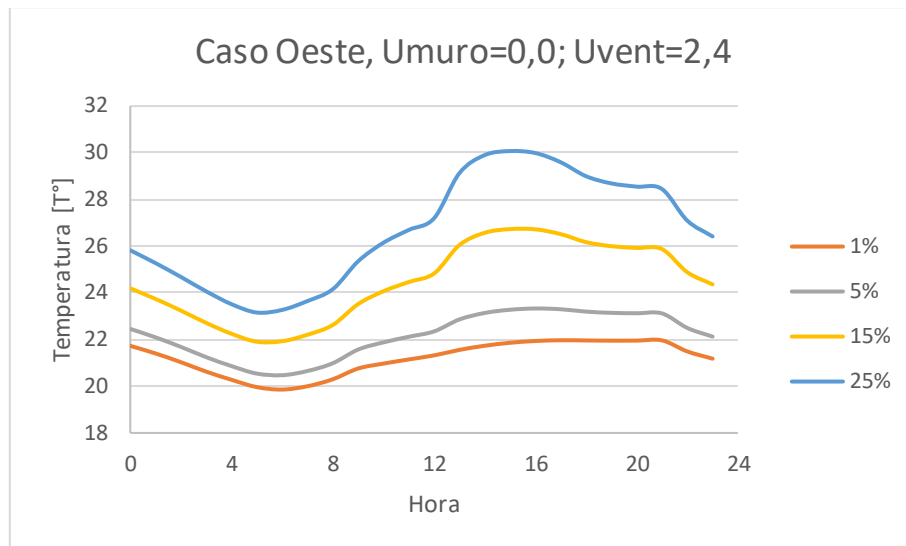
- $U_{muro} = 0,0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 3,6 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



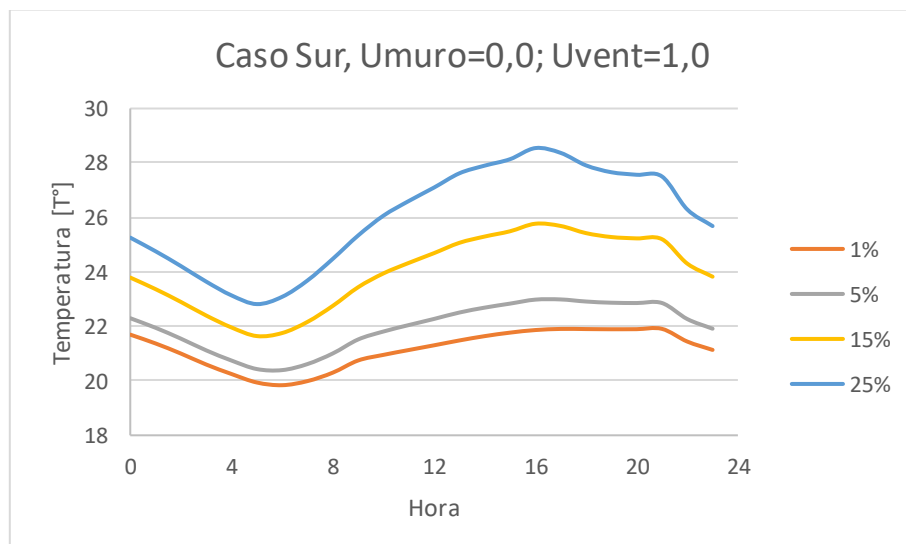
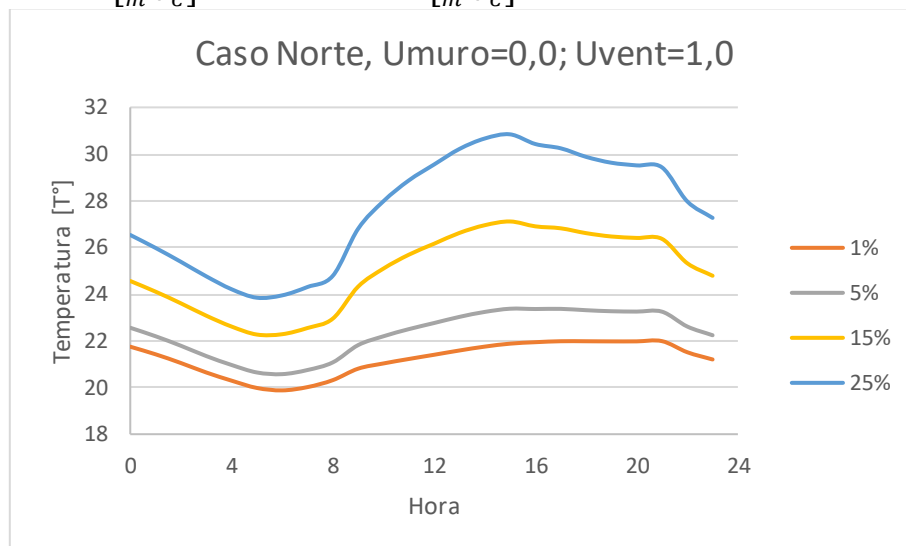


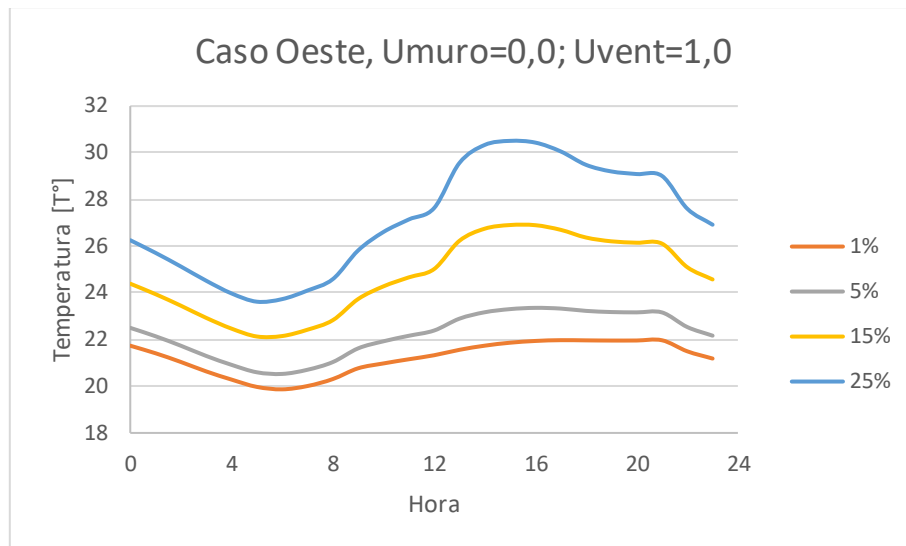
- $U_{muro} = 0,0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 2,4 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$





- $U_{muro} = 0,0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 1,0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$





C.2 Ajuste lineal (Ventilación Nocturna)

A continuación, se presentan los ajustes lineales para las 36 alternativas con ventilación nocturna, con la superficie máxima de vidrio tal que no se superen los 26,6° C, de manera de obtener temperatura de confort en todo momento.

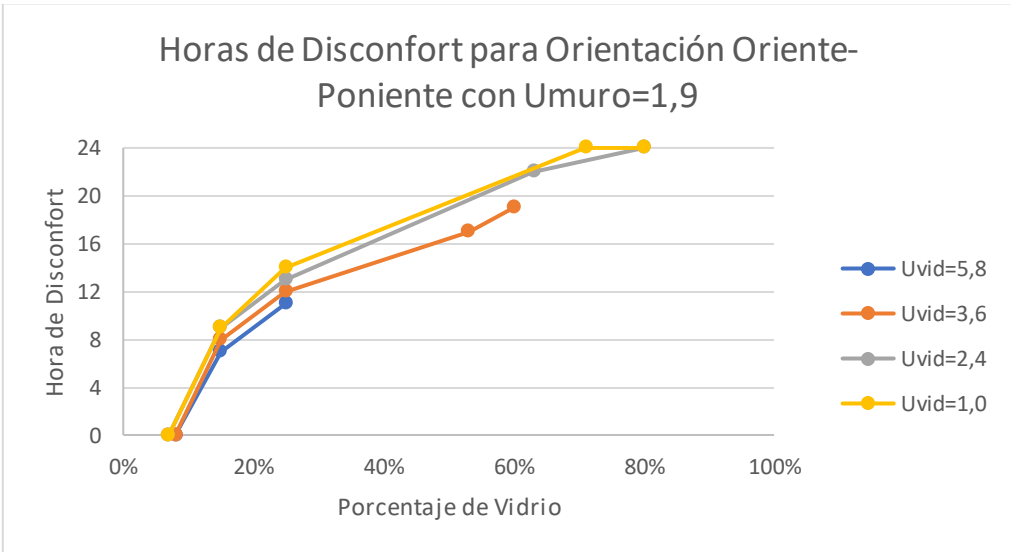
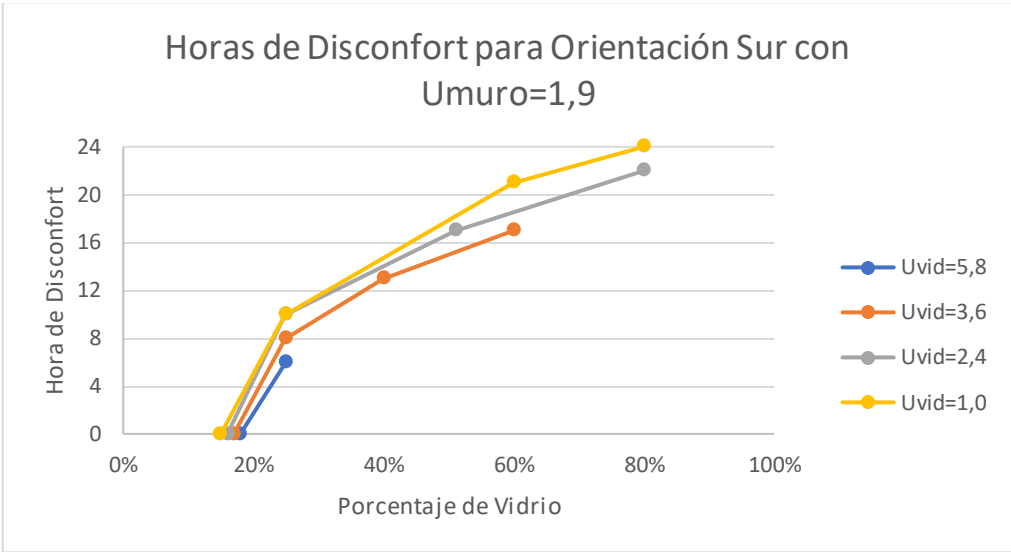
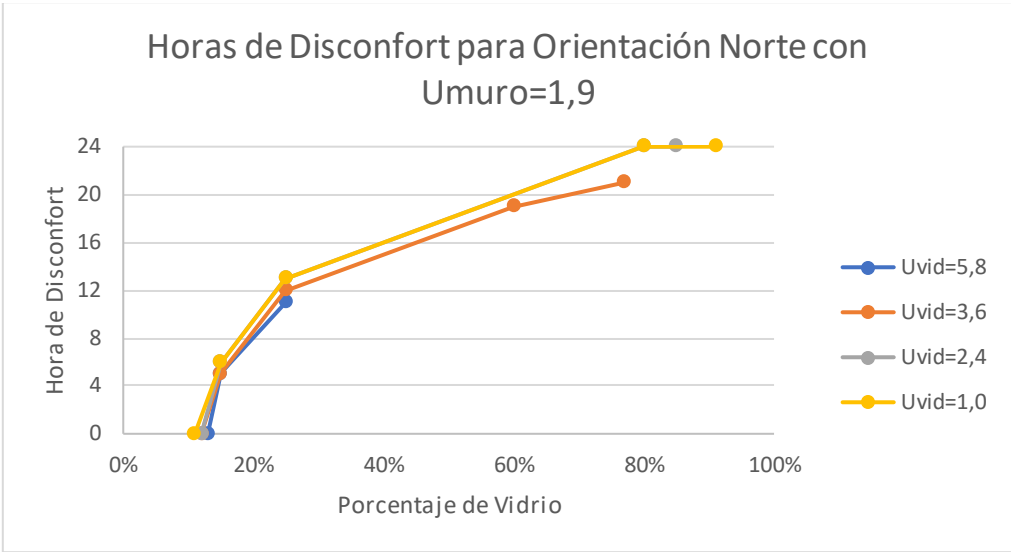
U muro	Orientación	U vidrio	ajuste lineal	R ²	Y	% max
1,9; OGUC 2016	Ventanas Norte	5,8	$y = 25,259x + 23,42$	1	26,6	13
		3,6	$y = 27,031x + 23,377$	1	26,6	12
		2,4	$y = 28,136x + 23,348$	1	26,6	12
		1	$y = 29,57x + 23,31$	1	26,6	11
	Ventanas Sur	5,8	$y = 18,322x + 23,357$	1	26,6	18
		3,6	$y = 19,673x + 23,326$	1	26,6	17
		2,4	$y = 20,527x + 23,305$	1	26,6	16
		1	$y = 21,646x + 23,276$	1	26,6	15
	Ventanas Este-Oeste	5,8	$y = 23,197x + 24,718$	1	26,6	8
		3,6	$y = 25,057x + 24,683$	1	26,6	8
		2,4	$y = 26,216x + 24,658$	1	26,6	7
		1	$y = 27,717x + 24,624$	1	26,6	7

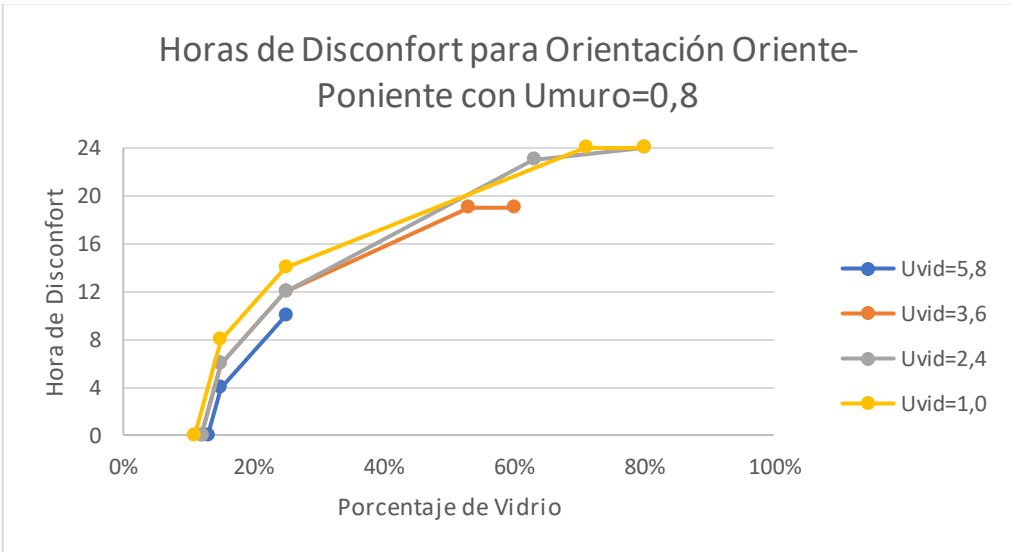
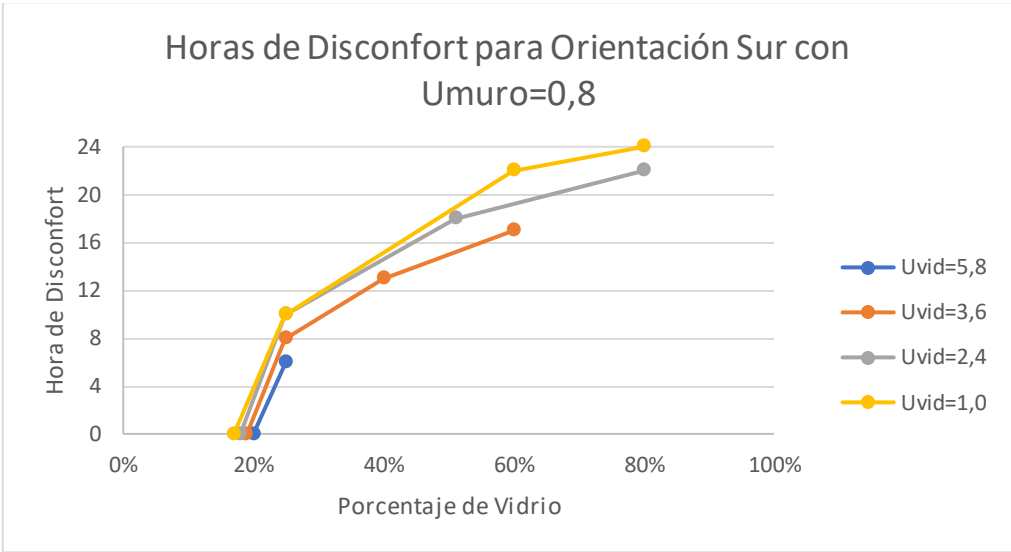
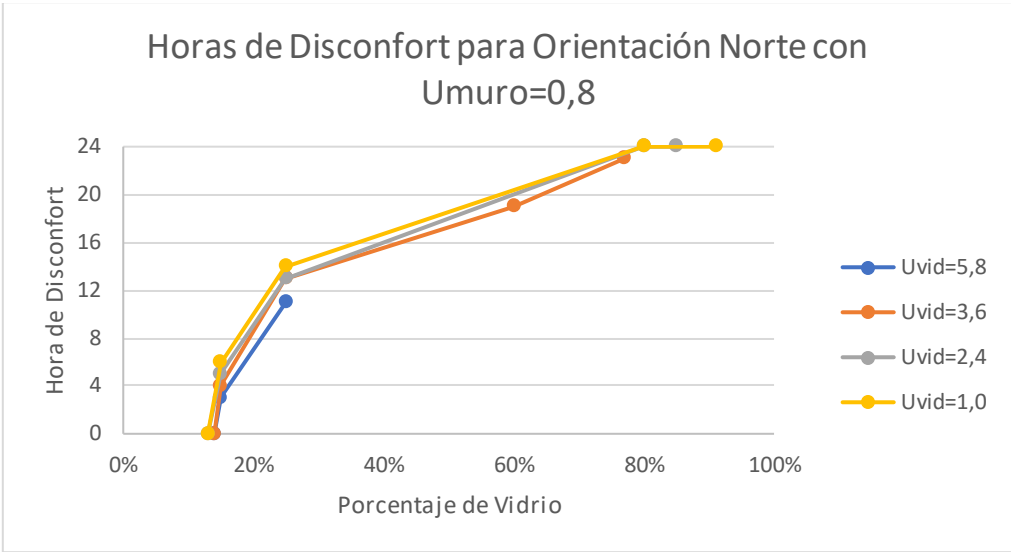
U muro	Orientación	U vidrio	ajuste lineal	R ²	Y	% max
0,8; NTM 11	Ventanas Norte	5,8	$y = 28,491x + 22,478$	1	26,6	14
		3,6	$y = 30,57x + 22,427$	1	26,6	14
		2,4	$y = 31,88x + 22,393$	1	26,6	13
		1	$y = 33,593x + 22,346$	1	26,6	13
	Ventanas Sur	5,8	$y = 21,007x + 22,454$	1	26,6	20
		3,6	$y = 22,584x + 22,417$	1	26,6	19
		2,4	$y = 23,593x + 22,392$	1	26,6	18
		1	$y = 24,926x + 22,357$	1	26,6	17
	Ventanas Este-Oeste	5,8	$y = 26,893x + 23,112$	1	26,6	13
		3,6	$y = 28,917x + 23,068$	1	26,6	12
		2,4	$y = 30,193x + 23,038$	1	26,6	12
		1	$y = 31,863x + 22,997$	1	26,6	11

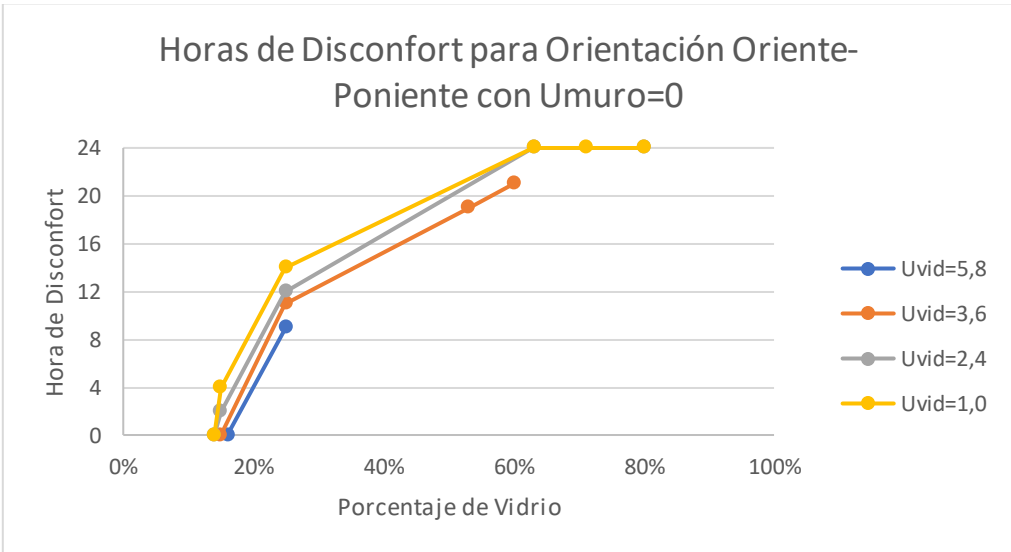
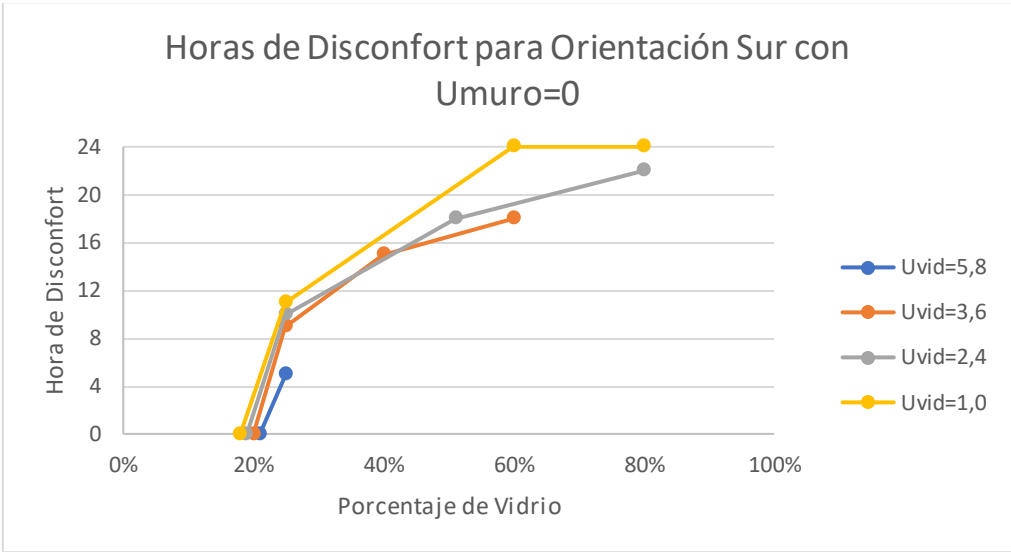
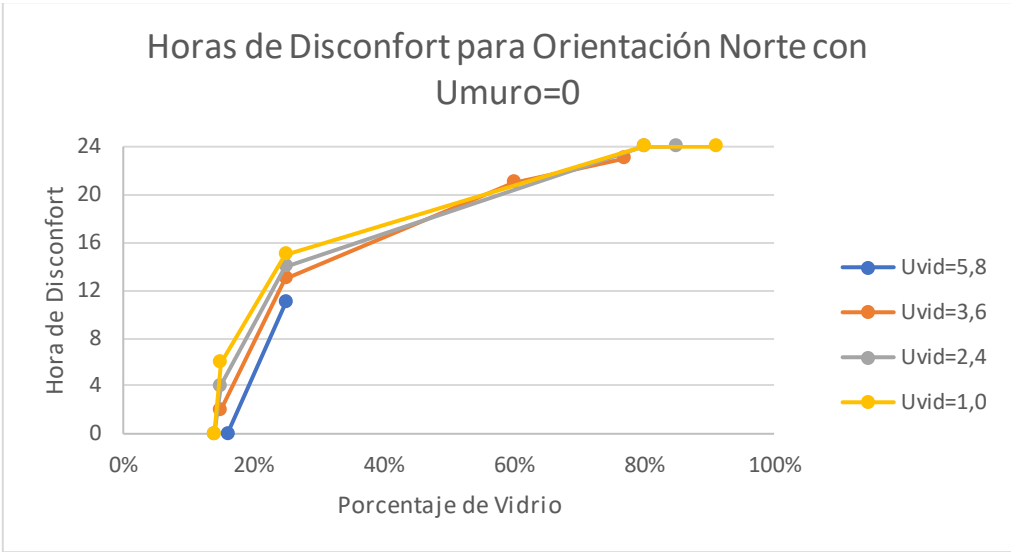
U muro	Orientación	U vidrio	ajuste lineal	R ²	Y	% max
0	Ventanas Norte	5,8	$y = 31,219x + 21,717$	1	26,6	16
		3,6	$y = 33,576x + 21,66$	1	26,6	15
		2,4	$y = 35,069x + 21,623$	1	26,6	14
		1	$y = 37,033x + 21,571$	1	26,6	14
	Ventanas Sur	5,8	$y = 23,242x + 21,725$	1	26,6	21
		3,6	$y = 25,022x + 21,684$	1	26,6	20
		2,4	$y = 26,17x + 21,657$	1	26,6	19
		1	$y = 27,695x + 21,618$	1	26,6	18
	Ventanas Este	5,8	$y = 30,24x + 21,729$	1	26,6	16
		3,6	$y = 32,402x + 21,677$	1	26,6	15
		2,4	$y = 33,779x + 21,642$	1	26,6	15
		1	$y = 35,595x + 21,593$	1	26,6	14

C.3 Horas de Disconfort en el dormitorio con Ventilación Nocturna

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes a las horas de disconfort en el dormitorio en función de la superficie de ventana en la fachada, aplicando ventilación nocturna.



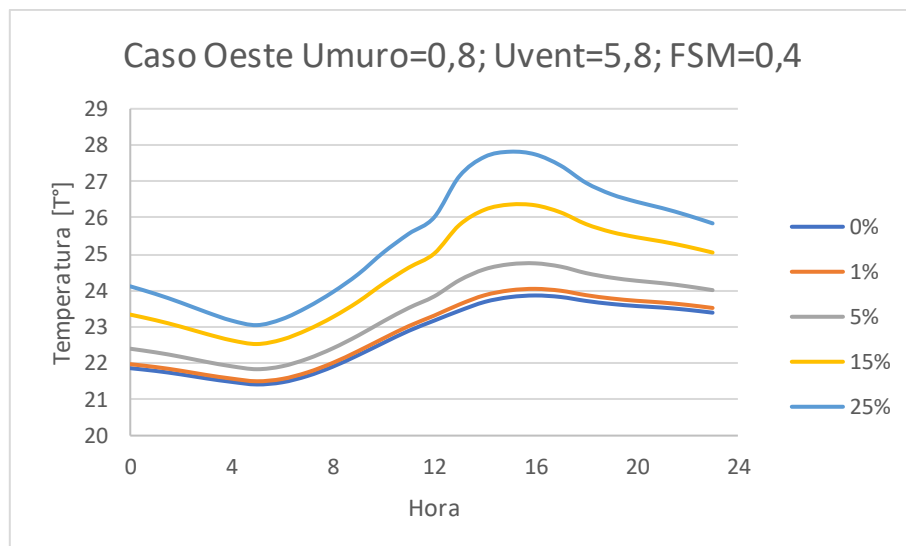
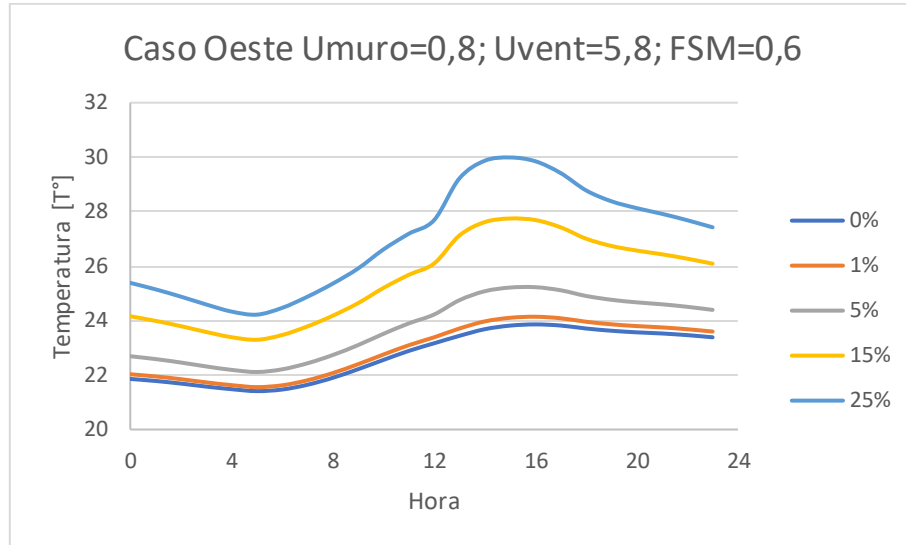


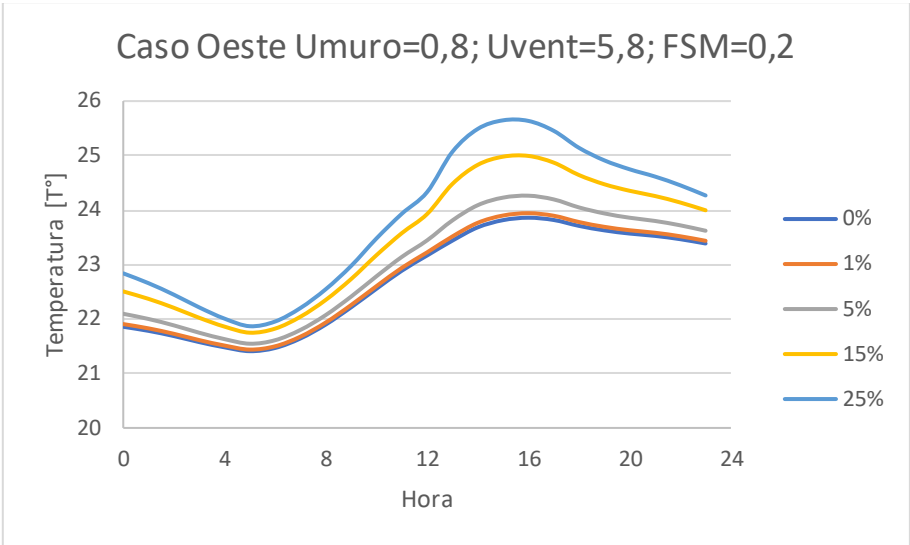


C.4 Gráficos de temperatura interior para modelo con protección solar

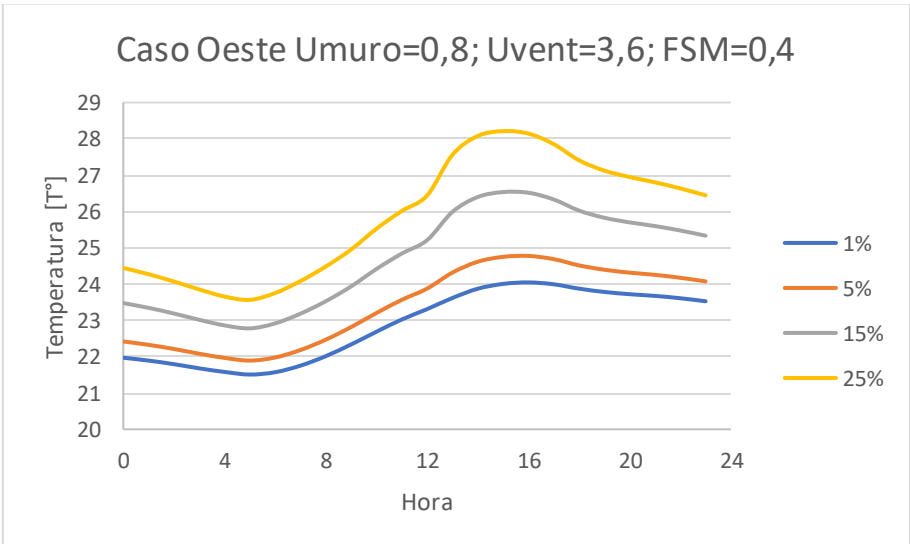
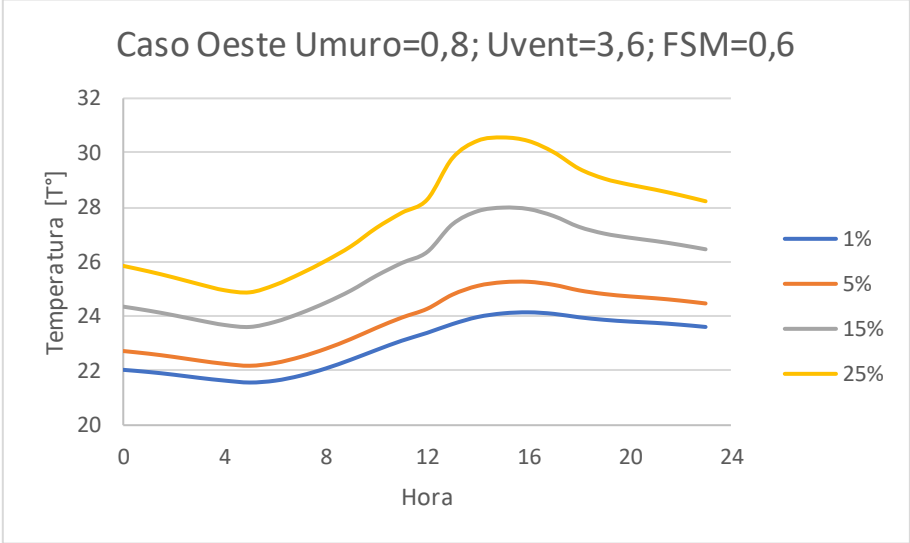
A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la simulación del caso base con protección solar, en particular, la temperatura interior del dormitorio en función de la hora para un día típico de enero.

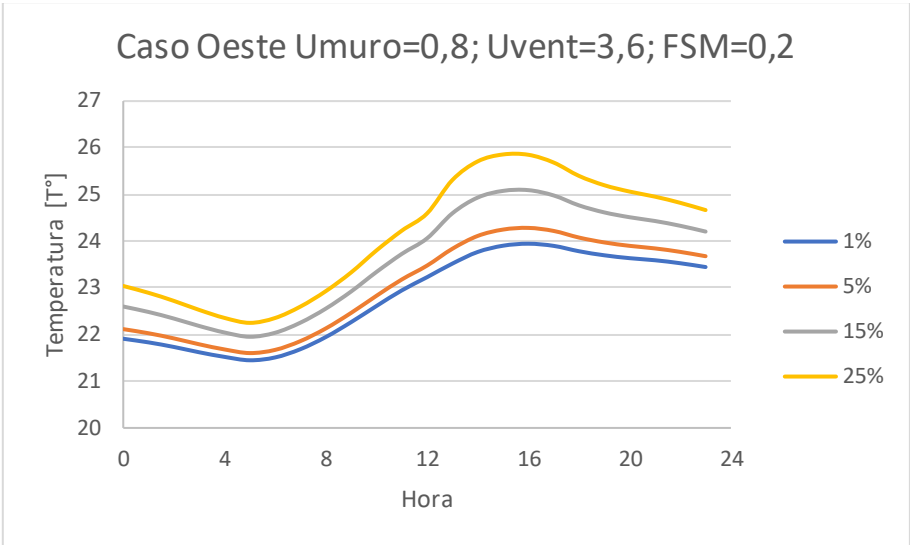
- $U_{muro} = 0,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 5,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



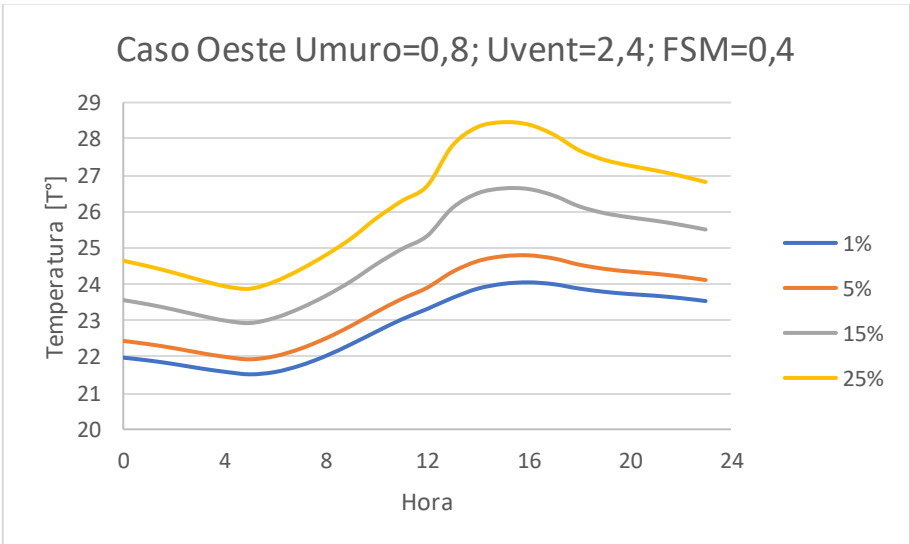
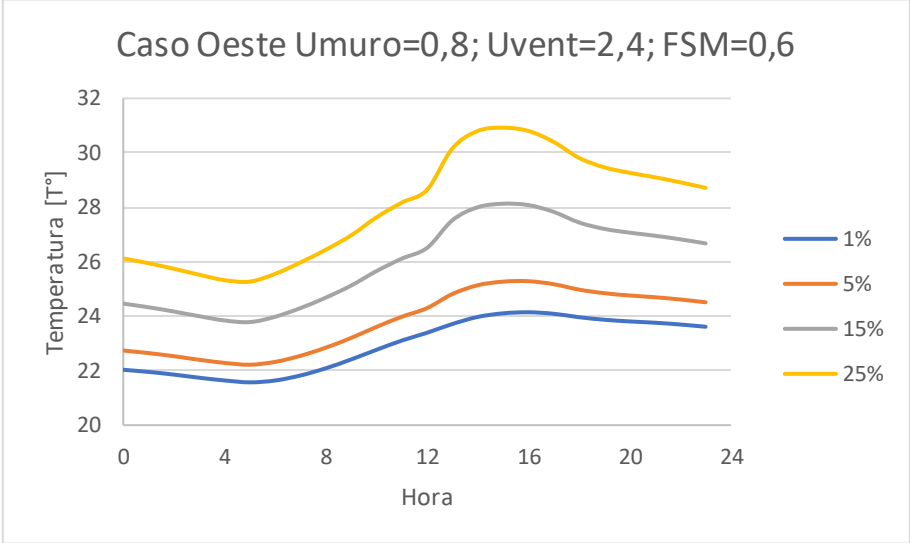


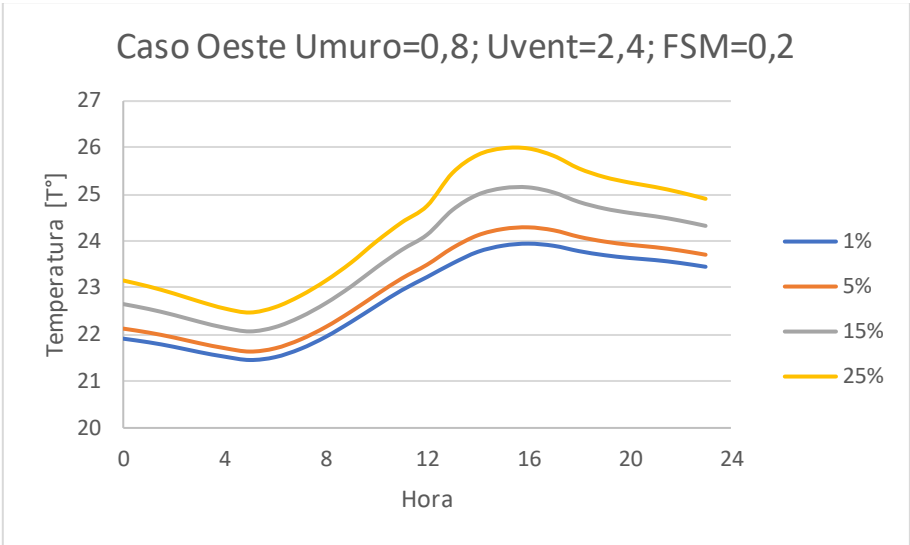
- $U_{muro} = 0,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 3,6 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



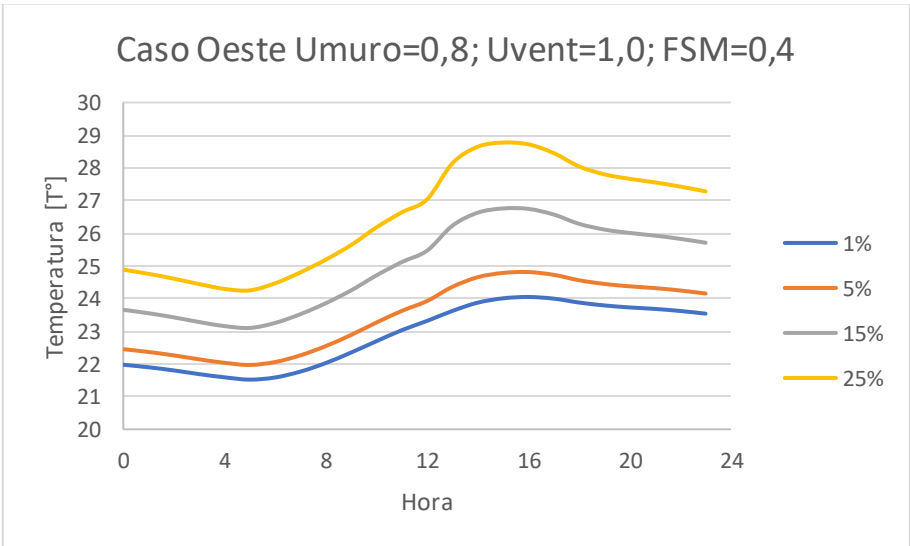
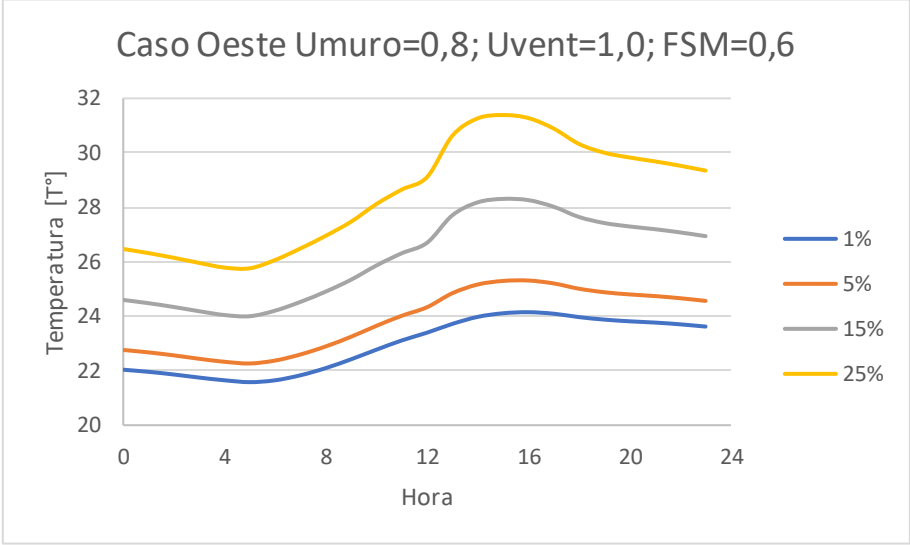


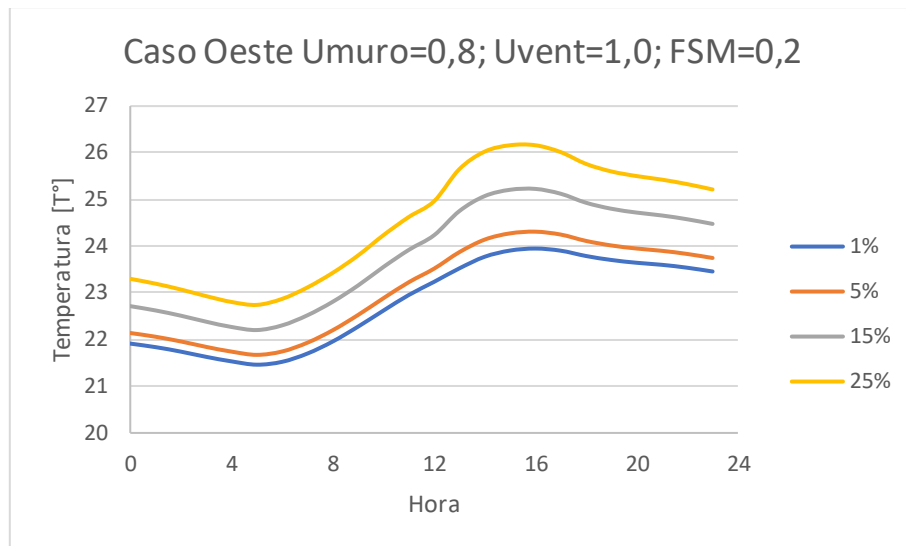
- $U_{muro} = 0,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 2,4 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$





- $U_{muro} = 0,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 1,0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$





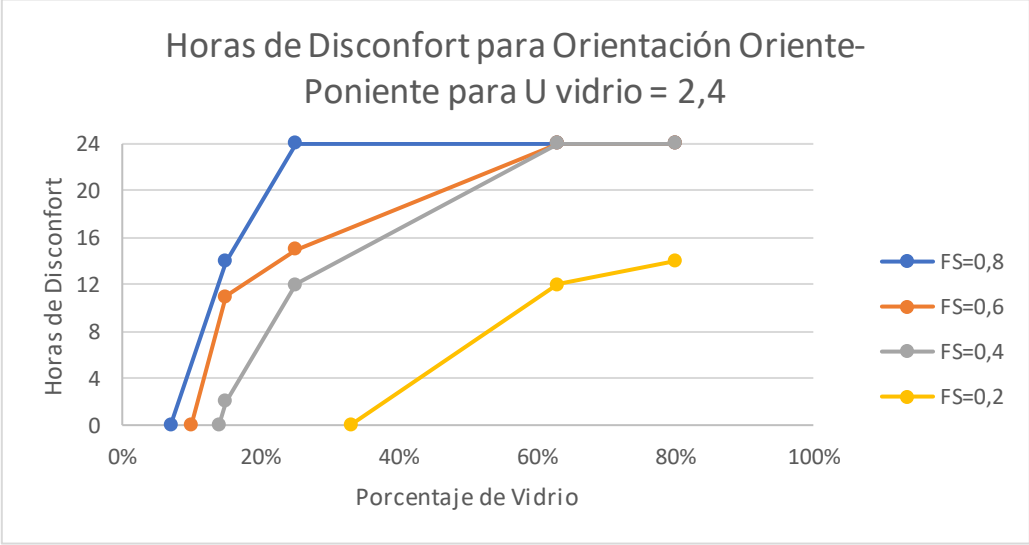
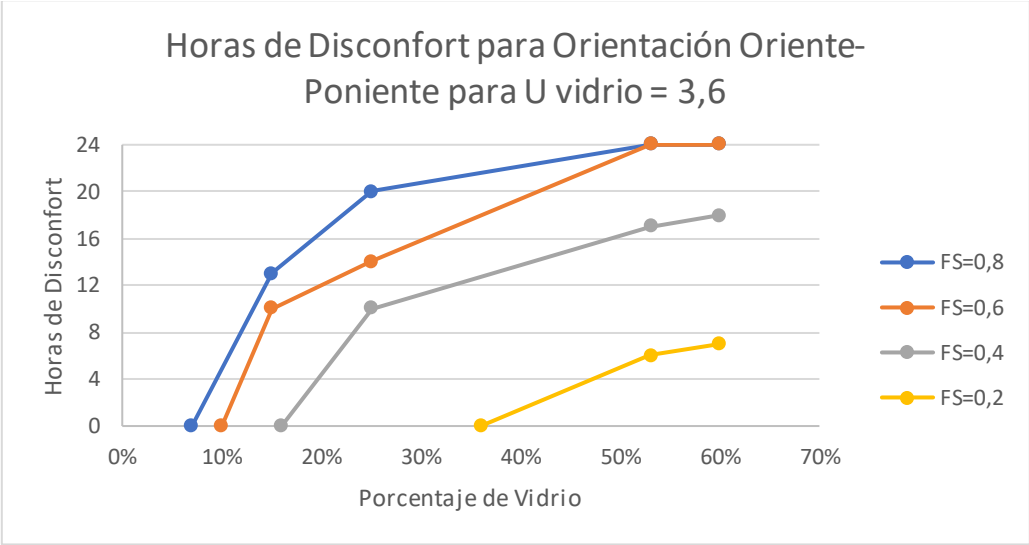
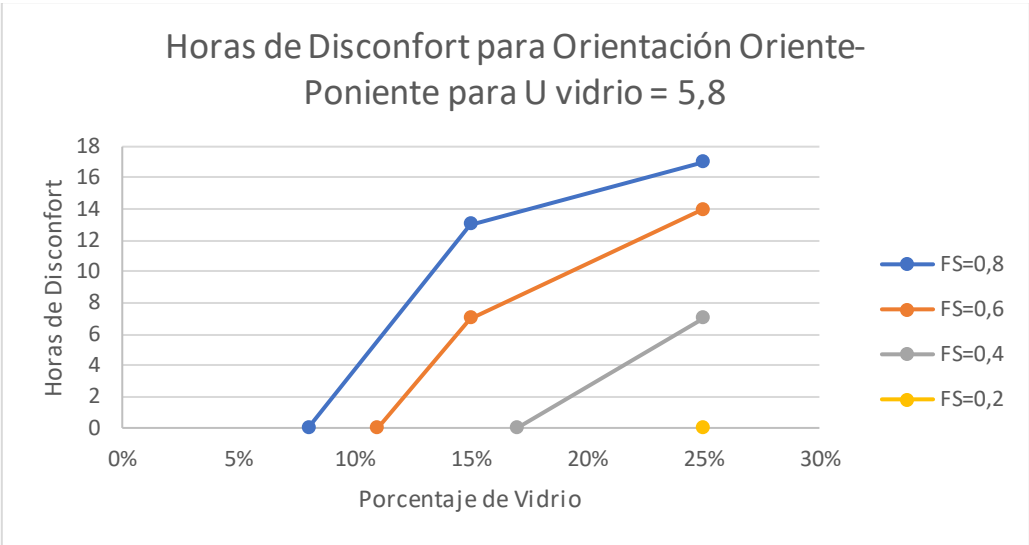
C.5 Ajuste lineal (Protección Solar)

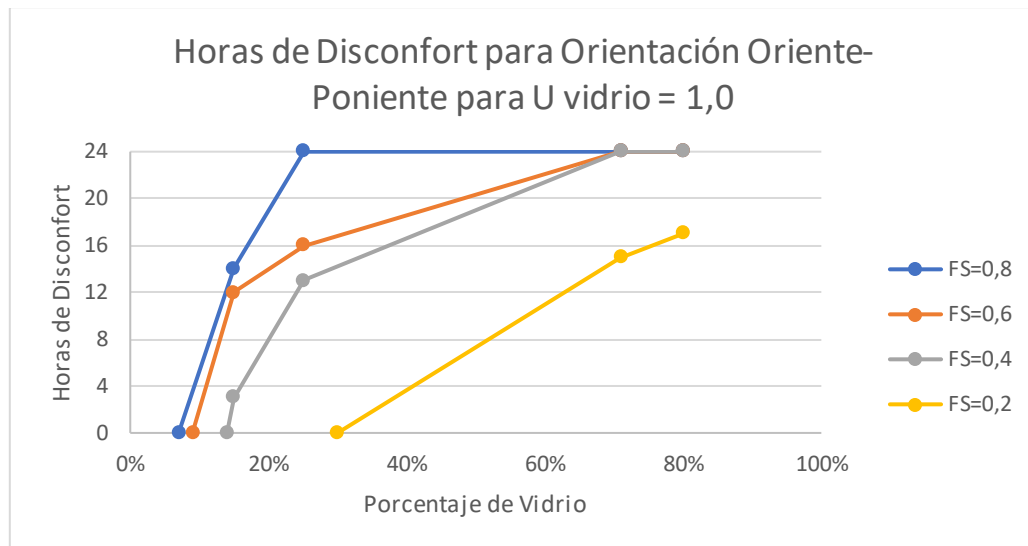
A continuación, se presentan los ajustes lineales para las 36 alternativas con protección solar, con la superficie máxima de vidrio tal que no se superen los 26,6° C, de manera de obtener temperatura de confort en todo momento.

U muro	U vidrio	FSM	ajuste lineal	R^2	Y	% vidrio	
0,8; NTM 11	5,8	0,6	$y = 24,592x + 23,93$	1	26,6	11	
		0,4	$y = 15,871x + 23,905$	1	26,6	17	
		0,2	$y = 7,1672x + 23,882$	1	26,6	38	
	3,6	0,6	$y = 26,759x + 23,913$	1	26,6	10	
		0,4	$y = 17,351x + 23,895$	1	26,6	16	
		0,2	$y = 7,4241x + 23,93$	1	26,6	36	
	2,4	0,6	$y = 28,25x + 23,873$	1	26,6	10	
		0,4	$y = 18,37x + 23,869$	1	26,6	15	
		0,2	$y = 8,2228x + 23,896$	1	26,6	33	
		1	0,6	$y = 30,177x + 23,819$	1	26,6	9
			0,4	$y = 19,689x + 23,834$	1	26,6	14
			0,2	$y = 9,2202x + 23,851$	1	26,6	30

C.6 Horas de Disconfort en el dormitorio con Protección Solar

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes a las horas de disconfort en el dormitorio en función de la superficie de ventana en la fachada, aplicando protección solar.

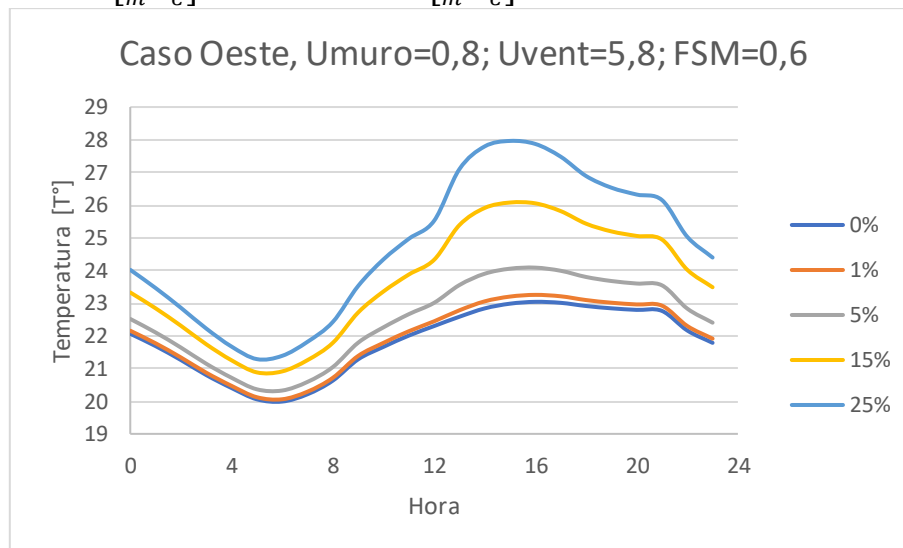


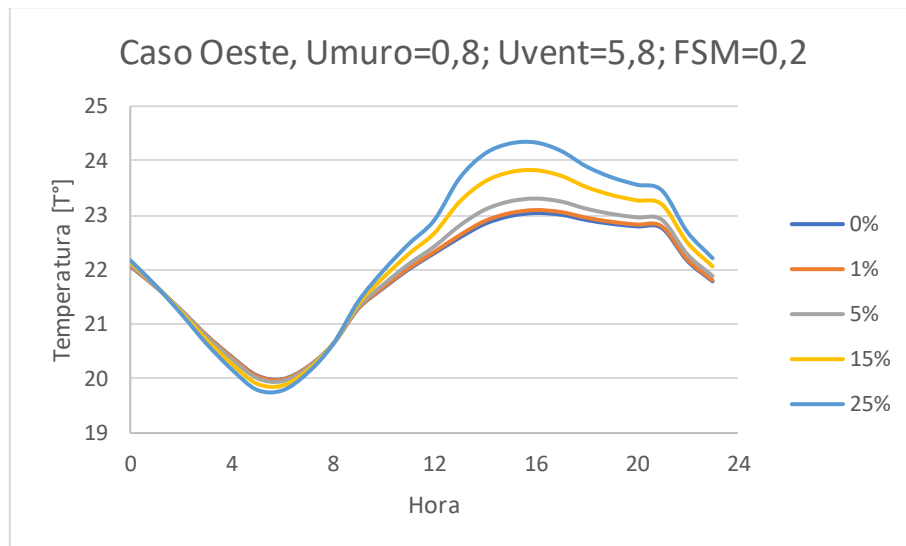
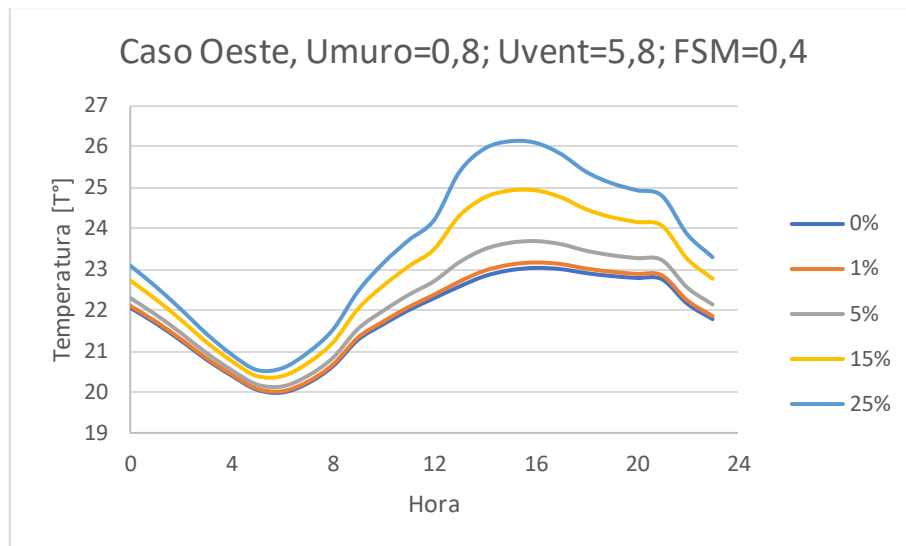


C.7 Gráficos de temperatura interior para modelo con ventilación nocturna y protección solar.

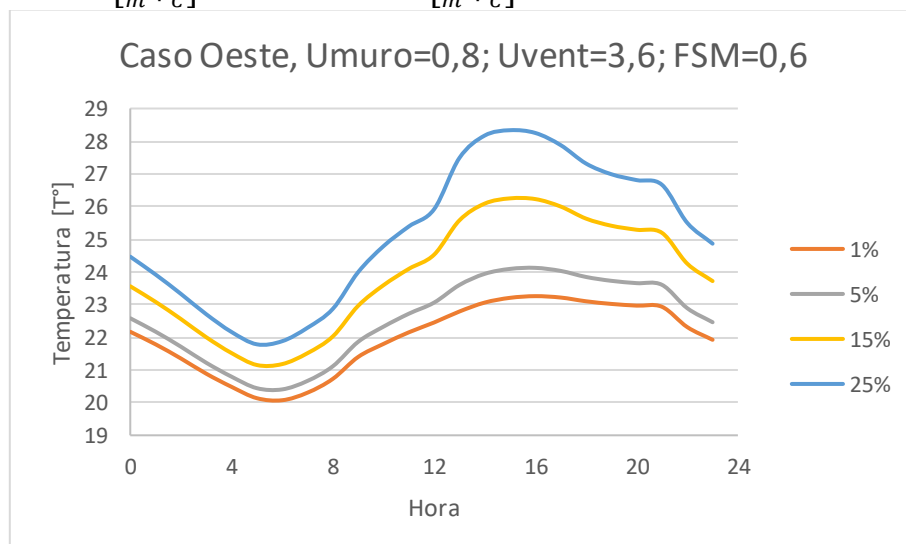
A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la simulación del caso base con ventilación nocturna y protección solar, en particular, la temperatura interior del dormitorio en función de la hora para un día típico de enero.

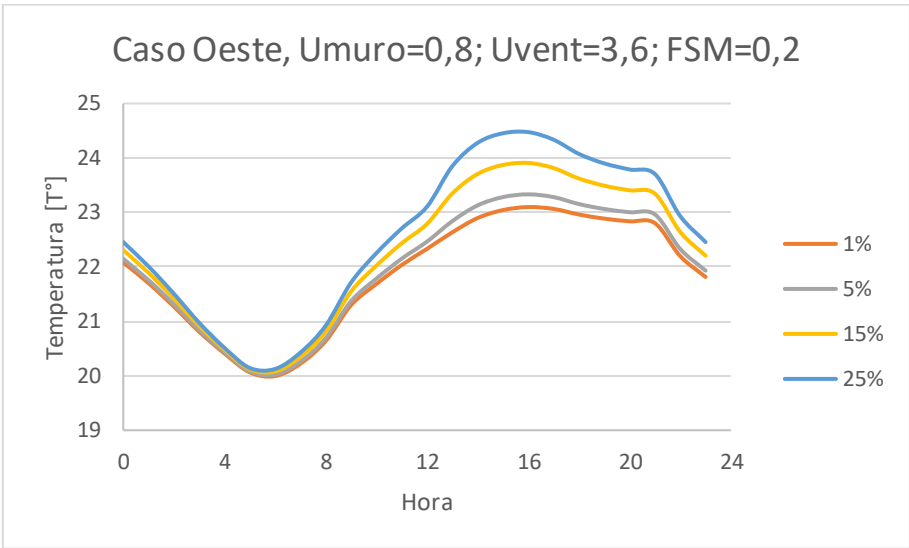
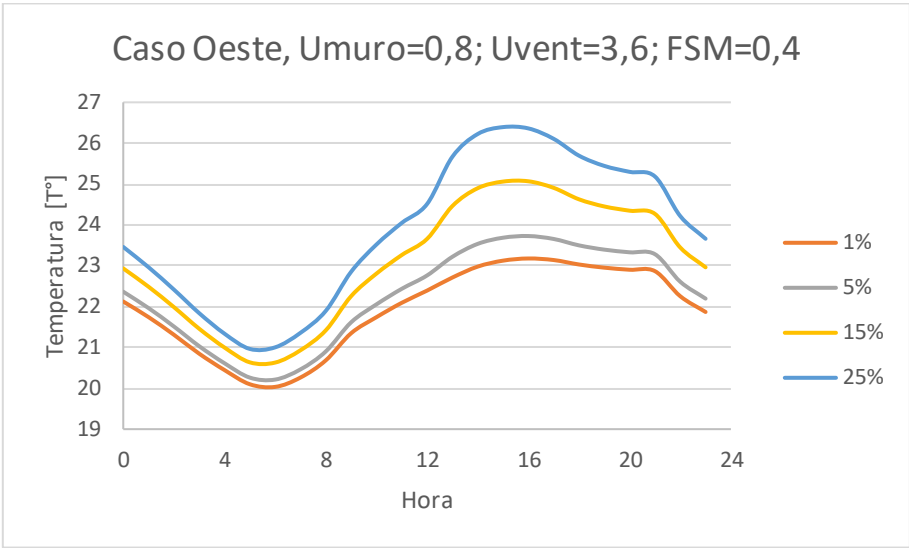
- $U_{muro} = 0,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 5,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



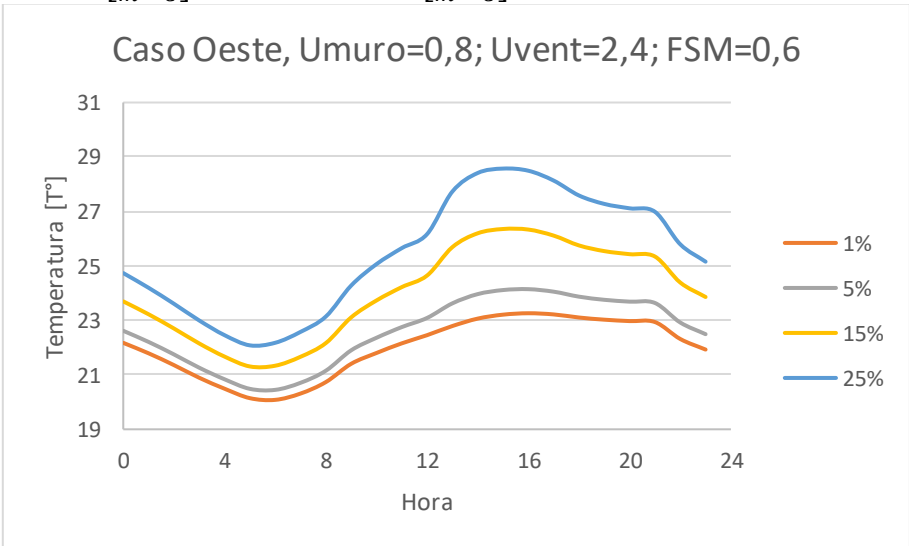


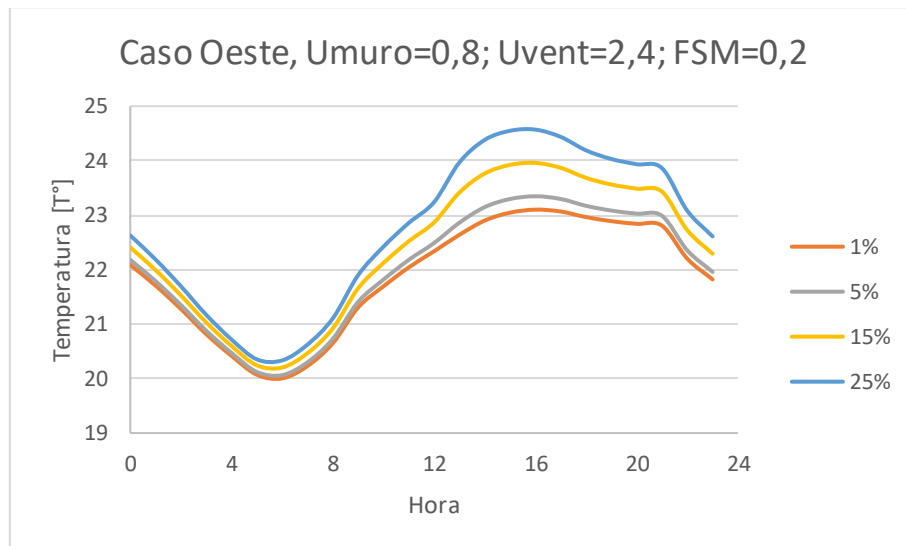
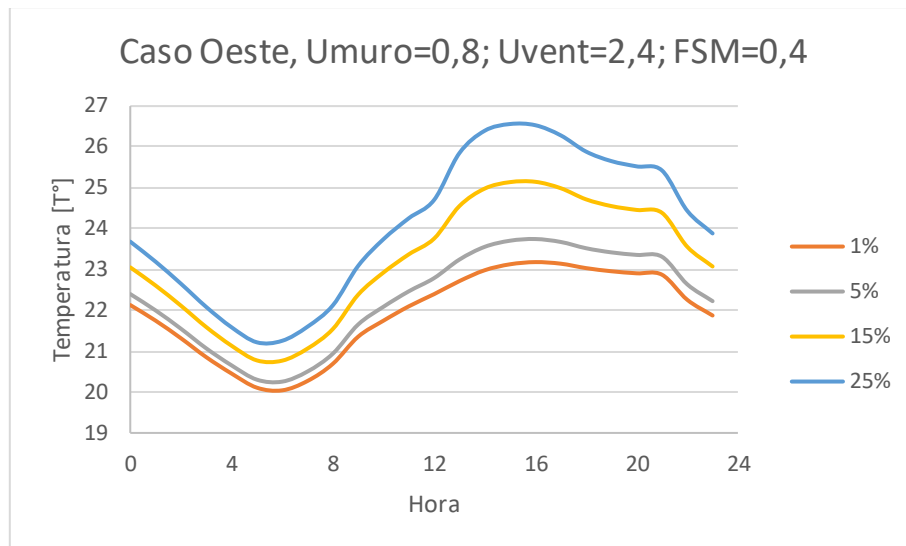
- $U_{muro} = 0,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 3,6 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



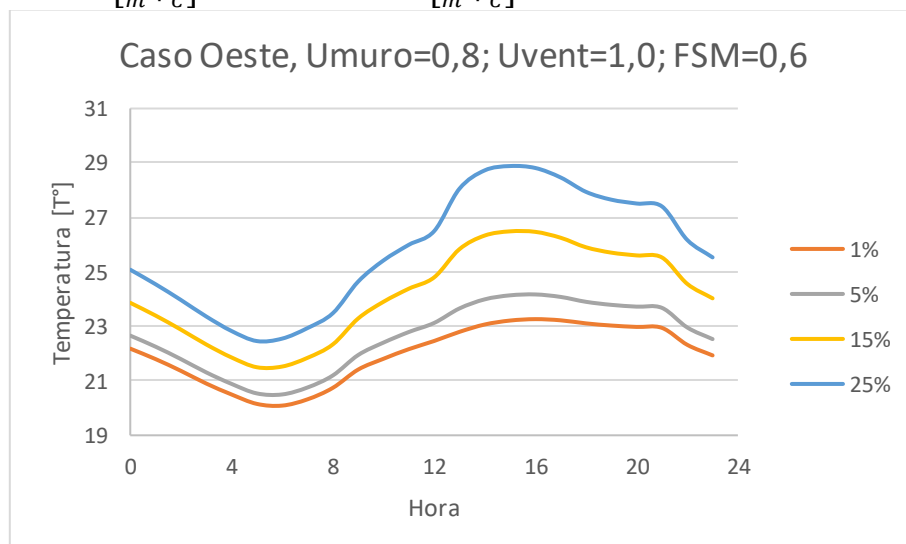


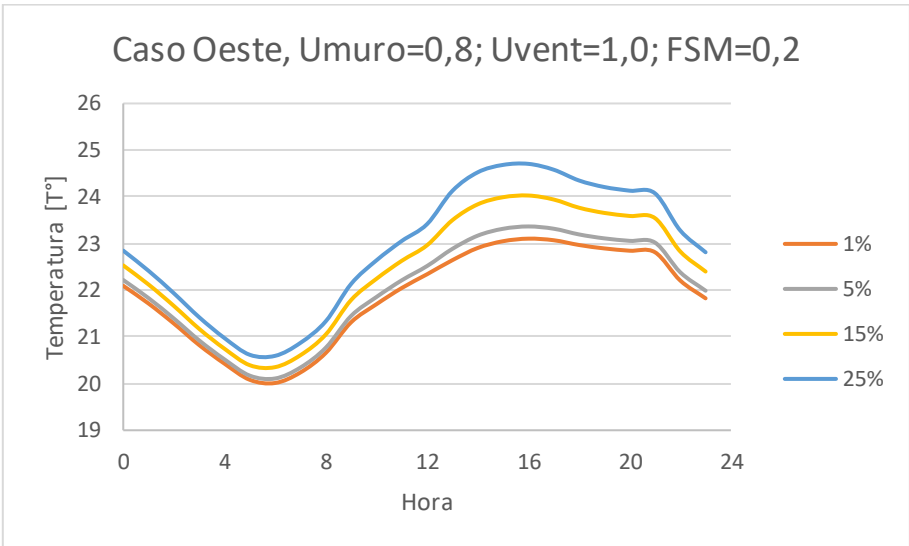
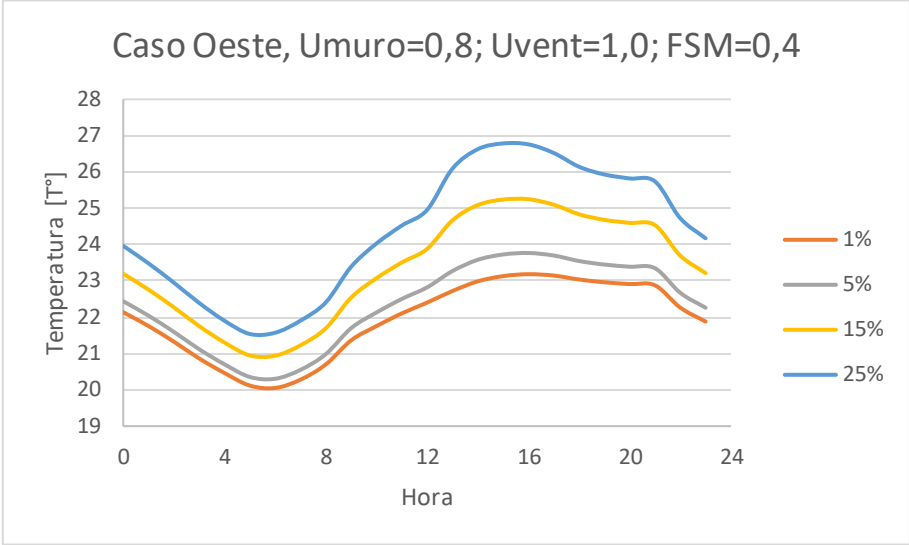
- $U_{muro} = 0,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 2,4 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$





- $U_{muro} = 0,8 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; U_{ventana} = 1,0 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



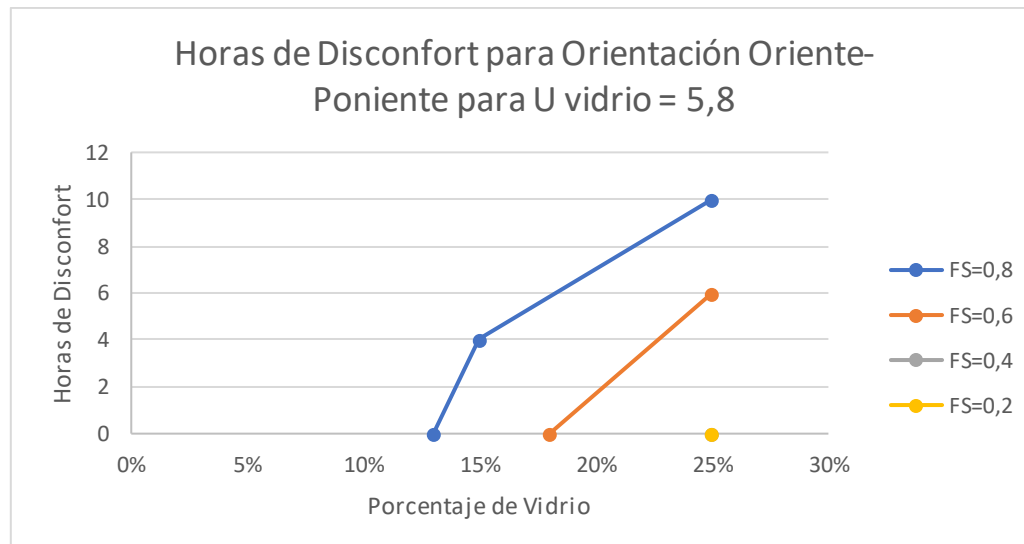


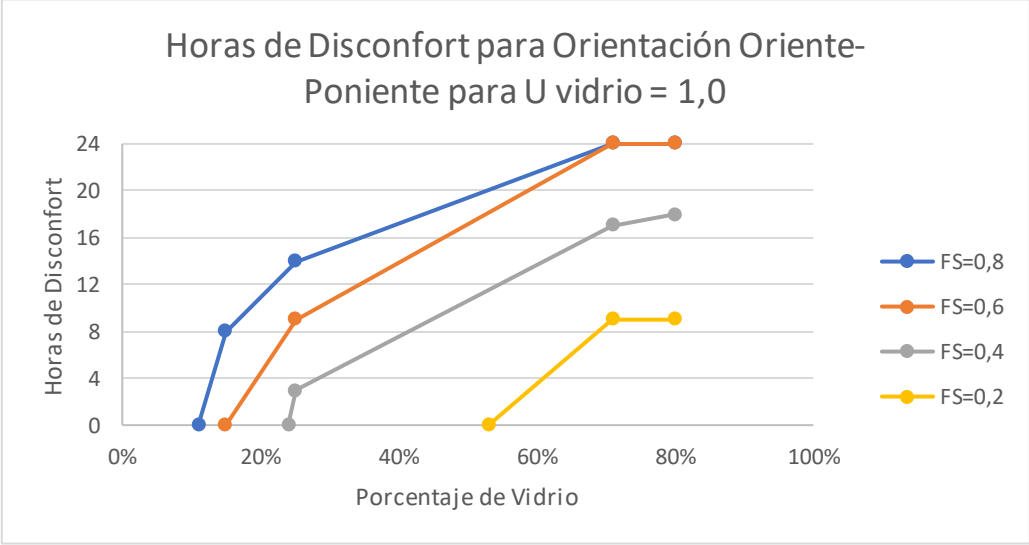
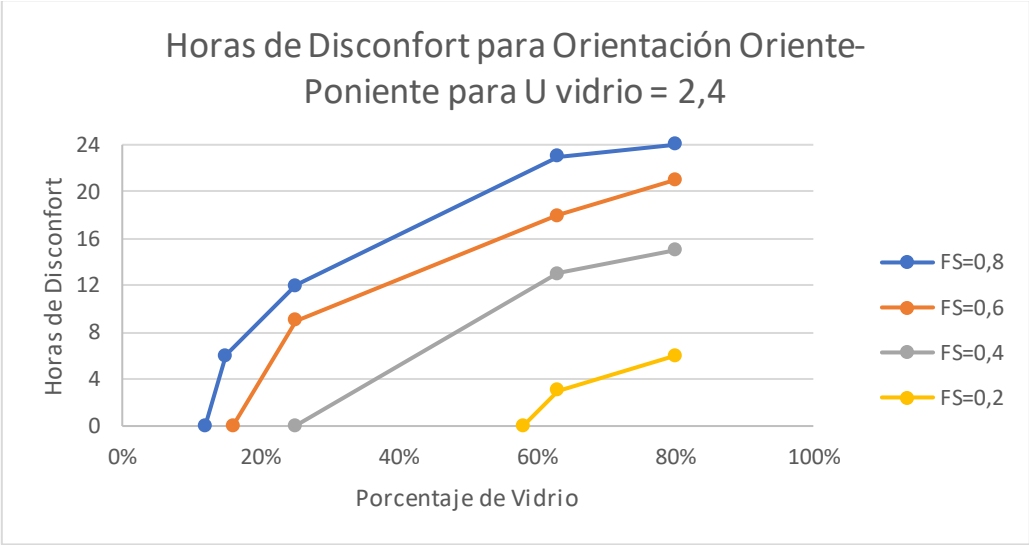
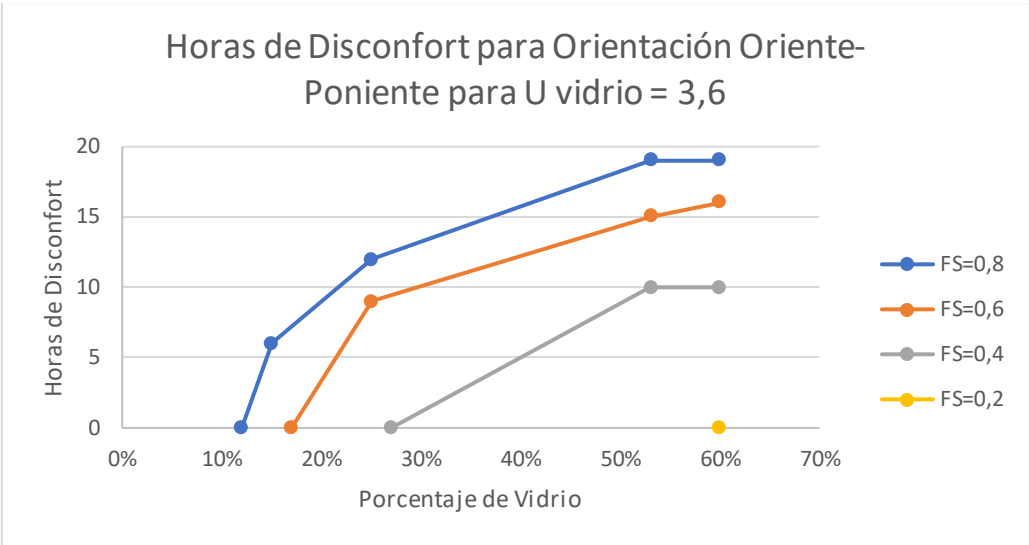
C.8 Ajuste lineal (Ventilación Nocturna y Protección Solar)

U muro	U vidrio	FSM	Y	R ²	% vidrio
0,8; NTM 11	5,8	0,6	26,6	1	18
		0,4	26,6	1	29
		0,2	26,6	1	69
	3,6	0,6	26,6	1	17
		0,4	26,6	1	27
		0,2	26,6	1	63
	2,4	0,6	26,6	1	16
		0,4	26,6	1	25
		0,2	26,6	1	58
	1,0	0,6	26,6	1	15
		0,4	26,6	1	24
		0,2	26,6	1	53

C.9 Horas de Disconfort en el dormitorio con Ventilación Nocturna y Protección Solar

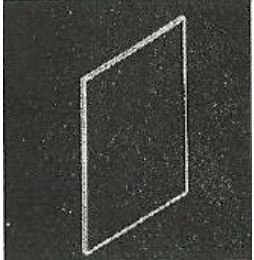
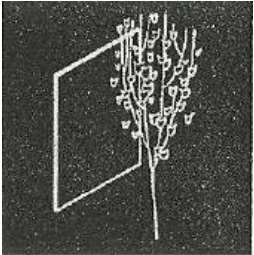
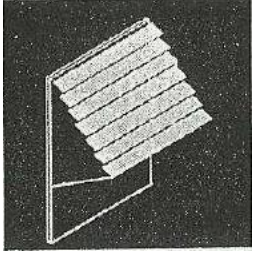
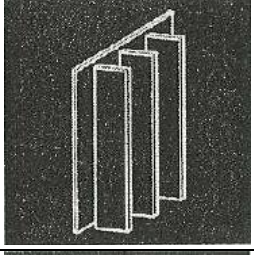
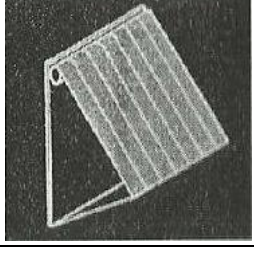
A continuación, se presentan los gráficos correspondientes a las horas de disconfort en el dormitorio en función de la superficie de ventana en la fachada, aplicando ventilación nocturna y protección solar.



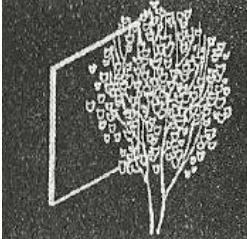
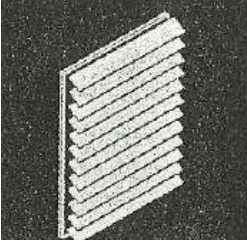
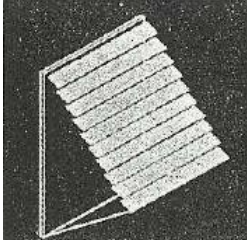
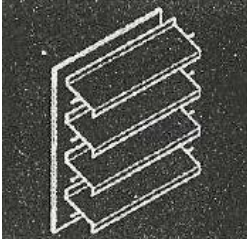



Anexo D

D.1 Factores de Sombra de protecciones solares determinado por Olgyay.

Imagen	Tipo	Factor de Sombra
	Ventana regular acristalada de un solo panel.	1
	Árbol como elemento de protección solar.	0,6-0,5
	Persiana veneciana abatible.	0,43
	Lamas verticales fijas, situadas en el exterior en las fachadas este y oeste.	0,32
	Toldo exterior inclinado, de color intermedio u oscuro.	0,25

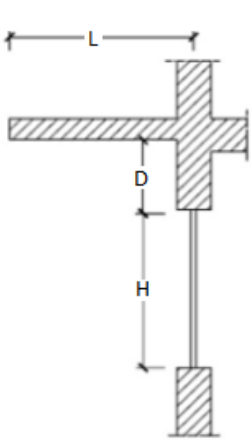
Fuente: Jara, 2013.

Imagen	Tipo	Factor de Sombra
	<p>Masa densa de árboles proporcionando una sombra generosa.</p>	<p>0,25-0,2</p>
	<p>Persiana veneciana exterior de color crema.</p>	<p>0,15</p>
	<p>Persiana veneciana exterior, abatible y de color blanco.</p>	<p>0,15</p>
	<p>Lamas horizontales abatibles, situadas al exterior.</p>	<p>0,15-0,1</p>
	<p>Lamas verticales abatibles, situadas al exterior</p>	<p>0,15-0,1</p>

Fuente: Jara, 2013.

D.2 Factores de sombra según CTE

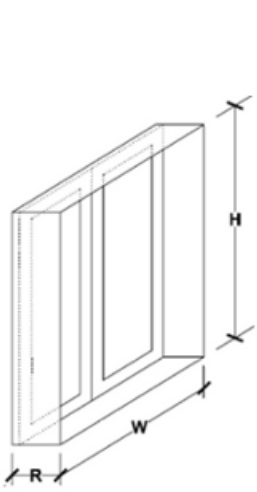
1. Factores de sombra para obstáculos de fachada (voladizos).



ORIENTACION DE LA FACHADA			$0,2 < L/H \leq 0,5$	$0,5 < L/H \leq 1$	$1 < L/H \leq 2$	$L/H > 2$
N	$0 < D/H \leq 0,2$		0,82	0,50	0,28	0,16
	$0,2 < D/H \leq 0,5$		0,87	0,64	0,39	0,22
	$D/H \leq 0,5$		0,93	0,82	0,60	0,39
NE/NO	$0 < D/H \leq 0,2$		0,9	0,71	0,43	0,16
	$0,2 < D/H \leq 0,5$		0,94	0,82	0,6	0,27
	$D/H \leq 0,5$		0,98	0,93	0,84	0,65
E/O	$0 < D/H \leq 0,2$		0,92	0,77	0,55	0,22
	$0,2 < D/H \leq 0,5$		0,96	0,86	0,70	0,43
	$D/H \leq 0,5$		0,99	0,96	0,89	0,75

Fuente: Jara, 2013.

2. Factores de sombra para obstáculos de fachada (retranqueo).



ORIENTACION DE LA FACHADA			$0,05 < R/W \leq 0,1$	$0,1 < R/W \leq 0,2$	$0,2 < R/W \leq 0,5$	$R/W > 0,5$
N	$0,05 < R/H \leq 0,1$		0,82	0,74	0,62	0,39
	$0,1 < R/H \leq 0,2$		0,76	0,67	0,56	0,35
	$0,2 < R/H \leq 0,5$		0,56	0,51	0,39	0,27
	$R/H > 0,5$		0,35	0,32	0,27	0,17
NE/NO	$0,05 < R/H \leq 0,1$		0,86	0,81	0,72	0,51
	$0,1 < R/H \leq 0,2$		0,79	0,74	0,66	0,47
	$0,2 < R/H \leq 0,5$		0,59	0,56	0,47	0,36
	$R/H > 0,5$		0,38	0,36	0,32	0,23
E/O	$0,05 < R/H \leq 0,1$		0,91	0,87	0,81	0,65
	$0,1 < R/H \leq 0,2$		0,86	0,82	0,76	0,61
	$0,2 < R/H \leq 0,5$		0,71	0,68	0,61	0,51
	$R/H > 0,5$		0,53	0,51	0,48	0,39

Fuente: Jara, 2013.

3. Factor de sombra para obstáculos de fachada (lamas).

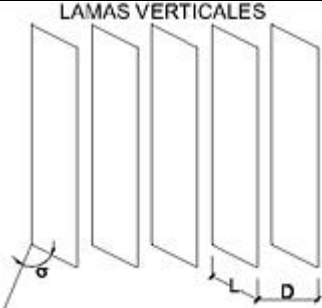
- Los valores de factor de sombra que se indican en estas tablas han sido calculados para una relación D/L igual o inferior a 1.
- El ángulo debe ser medido desde la normal a la fachada hacia el plano de las lamas, considerándose positivo en dirección horario.

		ANGULO DE INCLINACION (β)		
		0°	30°	60°
ORIENTACION	NORTE	0,49	0,42	0,26
	NORESTE/NOROEST E	0,54	0,44	0,26
	ESTE/OESTE	0,57	0,45	0,27



Fuente: Jara, 2013.

		ANGULO DE INCLINACION (σ)						
		60°	45°	30°	0°	30°	45°	60°
ORIENTACION	NORTE	0,37	0,44	0,49	0,53	0,47	0,41	0,32
	NORESTE	0,46	0,53	0,56	0,56	0,47	0,40	0,30
	ESTE	0,39	0,47	0,54	0,63	0,55	0,45	0,32
	OESTE	0,44	0,52	0,58	0,63	0,50	0,41	0,29
	NOROESTE	0,38	0,44	0,50	0,56	0,53	0,48	0,38



Fuente: Jara, 2013.

Anexo E

E.1 Análisis de Costos Directos para construcción de alero de 50 [cm] de largo construido en madera.

A continuación, se entrega el detalle del análisis de costo directo para la construcción de un metro lineal de alero de 50 [cm] de largo, construido en madera.

Unidad	Descripción	Cant.	PU	Total
Materiales				
ud	Can de madera 80x10x15 cm	2,15	6720,71	14450
m2	Tabla de madera machihembrada de 23mm de espesor	0,55	4712,3	2592
m3	Agua	0,008	833,48	7
ton	Arena de cantera, para mortero preparado en obra	0,065	11020,43	716
kg	Cemento gris en saco	10	90,8	908
L	Imprimación selladora para exterior, formulada con resinas alcídicas y pigmentos seleccionados, color blanco, aplicada con brocha, rodillo o pistola	0,33	9629,53	3178
L	Barniz sintético para exterior, a poro cerrado, acabado satinado, a base de resinas alcídicas y filtros ultravioleta, incoloro, de secado rápido aplicado con brocha, rodillo o pistola	0,15	10381,84	1557
Subtotal materiales:				23407
Maquinaria				
hr	Concreteira	0,033	907,36	30
Subtotal maquinaria:				30
Mano de obra				
hr	Maestro 1a construcción	0,621	4823,28	2995
hr	Ayudante construcción	0,976	3551,52	3466
hr	Maestro 1a pintor	0,476	4823,28	2296
Subtotal mano de obra:				8757
Herramientas				
%	Herramientas	2	32194,68	644
Costos directos:				32839

Fuente: CYPE Ingenieros S.A

E.2 Análisis de Costos Directos para compra e instalación de un metro cuadrado de celosía de aluminio.

A continuación, se entrega el detalle del análisis de costo directo para la compra e instalación de un metro cuadrado de celosía de aluminio, marca "CORTIZO", con un ancho de lama de 120 [cm] y perfiles montantes de aluminio.

Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Total
ud	Repercusión, por m2 de reja, de elementos de fijación sobre obra de albañolería: tacos y tornillos de acero	1	1220,57	1221
m2	Celosía fija, marca "CORTIZO", formada por una estructura portante de montantes de aluminio sobre la que se fijan, mediante anclajes especiales, lamas orientables de aluminio, de 120mm de ancho, acabado lacado	1	174089,36	174089
hr	Maestro 1a cerrajero	0,886	4313,71	3822
hr	Ayudante cerrajero	0,886	2989,68	2649
Costos directos				181781

Fuente: CYPE Ingenieros S.A