



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Arquitectura

Sistema automático de control térmico para viviendas unifamiliares
aprovechando techos de masa térmica

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Arquitectura

Presenta:

Dovile Kukukaite

Dirigido por:

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa
Presidente

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz
Secretario

M.C. Verónica Leyva Picazo
Vocal

Dr. Avatar Flores Gutiérrez
Suplente

M. Guillermo Iván López Domínguez
Suplente



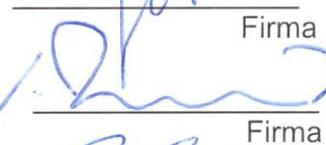
Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad



Firma



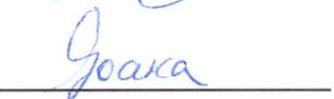
Firma



Firma



Firma



Firma

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Diciembre de 2017

RESUMEN

El sol es la fuente de energía más grande del mundo. En México el nivel de la radiación solar es muy alto y en Querétaro los techos son los que reciben la mayor cantidad de ella. El objetivo de esta investigación es realizar un proceso de diseño de un sistema pasivo de techo con masa térmica, con adecuada absorción de radiación solar y un sistema de control de flujo de aire que mejore el confort térmico de los espacios de una vivienda unifamiliar de Santiago de Querétaro. La falta de confort térmico o el uso del aire acondicionado causan efectos negativos para la salud, el segundo consume mucha energía eléctrica y contamina. Para mantener la temperatura óptima de 23° C dentro de los espacios de una vivienda, se analizan las propiedades térmicas de los materiales para absorber, acumular y aislar el calor. Se seleccionan los materiales y se calculan sus espesores requeridos en base a las ecuaciones termodinámicas. Con base en las ecuaciones de sensación térmica se calculan las velocidades de la circulación del flujo de aire óptimas tanto para el periodo de frío como el de calor. Finalmente se realizan simulaciones con el programa ANSYS para comprobar el funcionamiento del sistema de techo. Se define el material, el espesor y el acabado de la capa exterior para controlar la absorción de la radiación solar de tal manera que en invierno se absorba la cantidad necesaria para remplazar la energía calorífica que se pierde por la convección, y en verano se reflejen la mayoría de los rayos solares. Se elige el material y el espesor más adecuado para acumular el calor dentro del sistema de techo y el material y el espesor de la capa interior para aislar el calor hacia el interior. La circulación del flujo de aire implementa un sistema de tubo Venturi y un ventilador para su control. Todo el sistema de techo y los mecanismos adicionales son alimentados por la energía solar.

(Palabras clave: techos, masa térmica, confort térmico)

SUMMARY

Sun is the major energy source in the world. The level of solar radiation in Mexico is very high and the roofs are the ones that receive the most of it. The purpose of this research is to carry out a design process of a passive roof system which contains thermal mass, adequate solar absorption and an air flow control system that improves the thermal comfort of the spaces inside a single-family home in Santiago de Querétaro. A thermal discomfort or use of air conditioning cause negative health effects, the latter also consumes large amounts of electricity and pollutes. To maintain the optimal temperature of 23° C inside the spaces of a dwelling, the thermal properties of the materials to absorb, accumulate and isolate the heat are analyzed. The materials are selected, and their required thickness are calculated based on the thermodynamic equations. Usage of the thermal sensitivity equations allows to calculate optimal air flow's velocities during the cold period as well as during the hot one. At the end, simulations are carried out on ANSYS to verify the performance of the roof system. The material, thickness and finishes of the outer layer are defined to control the absorption of solar radiation in such way that it absorbs the exact amount of solar energy during cold periods to replace the heat energy lost by the convection to the outside and it reflects almost all the solar rays during the hot period. The most suitable material and thickness is chosen to accumulate the heat inside the roof system and the material and thickness of the inner layer is selected to isolate the heat, so it does not transfer to the interior. Circulation of the airflow employs a Venturi tube system and a fan for its control. The entire roof system and additional mechanisms are powered by solar energy.

(Key words: roof, thermal mass, thermal comfort)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco cordialmente a la Universidad Autónoma de Querétaro por la oportunidad de participar en este curso de maestría.

Gracias a mis sinodales por la aportación de su importante conocimiento en el proceso y el resultado de esta tesis, a la M.C. Verónica Leyva Picazo por guiarme realizando mi primera investigación científica, al Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz, al M. Guillermo Iván López Domínguez por sus valiosos consejos para realizar esta investigación en una manera profesional y al Dr. Avatar Flores Gutiérrez, que además de ser mi sinodal, fue un excelente coordinador de estudios y un inspirador en la búsqueda de conocimiento.

Un agradecimiento especial es para el Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa por aceptar ser el director de mi tesis, por creer en mí, fomentarme e inspirar con sus ideas y conocimiento.

Finalmente, quiero agradecer a mi esposo Alberto y a su familia que por su apoyo en general tuve la oportunidad de estudiar el posgrado. Gracias a los estímulos personales y a los consejos académicos que él brindó, pude terminar el curso de la maestría y esta tesis.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	14
1.1	Falta de confort térmico en las viviendas de Querétaro.....	14
1.1.1	Efectos del estrés térmico en el cuerpo humano	14
1.2	Esquema térmico de una vivienda.....	15
1.3	Radiación solar en Santiago de Querétaro.....	16
2	REVISIÓN DE LITERATURA.....	20
2.1	Antecedentes.....	20
2.1.1	Uso de aire acondicionado.....	20
2.1.2	Techo verde	21
2.1.3	Techo verde activo.....	24
2.1.4	Techo con tina de agua.....	26
2.1.5	Materiales de cambio de fase	28
2.2	Patentes	31
2.2.1	Techo energético de A. Lincoln Pittinger (1976)	32
2.2.2	Material de techo de Naotatsu Yano (2000).....	33
3	HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	35
3.1	Hipótesis.....	35
3.2	Objetivo	35
3.3	Objetivos particulares	35
3.4	Alcances	36
4	METODOLOGÍA	37
4.1	Concepto del sistema de techo	37
4.1.1	Propiedades de los materiales	38
4.1.2	Circulación del flujo del aire	40
4.2	Temperatura óptima del sistema de techo.....	43

4.2.1	Confort térmico.....	43
4.2.2	Renovaciones del aire.....	44
4.2.3	Temperatura óptima del sistema.....	46
4.3	Datos climáticos de Santiago de Querétaro	47
4.3.1	Días de temperaturas extremas	47
4.3.2	Radiación solar incidente	47
4.4	Absorción de la radiación solar.....	51
4.4.1	Material	55
4.4.2	Espesor de la capa.....	56
4.4.3	Superficie	57
4.4.4	Temperatura horaria de la capa	63
4.5	Acumulación del calor.....	64
4.5.1	Masa térmica.....	64
4.5.2	Materiales de cambio de fase	70
4.6	Aislamiento térmico	73
4.6.1	Material	74
4.6.2	Espesor de la capa.....	74
4.7	Circulación del flujo de aire.....	76
4.7.1	Circulación del flujo de aire en modo de calefacción	77
4.7.2	Circulación del flujo de aire en modo de ventilación	78
5	RESULTADOS.....	80
5.1	Temperatura óptima del sistema de techo.....	80
5.2	Absorción de la radiación solar.....	80
5.2.1	Material	81
5.2.2	Espesor	81
5.2.3	Superficie	81
5.2.4	Temperatura de la capa	82

5.2.5	Capa reversible	83
5.3	Acumulación del calor.....	85
5.3.1	Masa térmica.....	85
5.3.2	Materiales de cambio de fase	91
5.4	Aislamiento térmico	96
5.4.1	Material	96
5.4.2	Espesor de la capa.....	97
5.5	Circulación del flujo de aire.....	97
5.5.1	Circulación del flujo de aire en modo de calefacción	97
5.5.2	Circulación del flujo de aire en modo de ventilación	99
6	VALIDACIÓN Y DISCUSIÓN	100
6.1	Simulaciones	100
6.1.1	Análisis térmico	100
6.1.2	Análisis del flujo	111
6.2	Discusión de los resultados	117
7	PROPUESTA DEL DISEÑO	121
7.1	Mecanismos de ventilación.....	124
7.2	Sistema de control.....	126
8	CONCLUSIONES	128
9	REFERENCIAS	129
10	APÉNDICE I	136
11	APÉNDICE II.....	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema térmico de una vivienda en un día frío y en un día caliente. Fuente: (AliceSolarCity, 2017) modificado.	16
Figura 1.2. Potencial de la energía global total. Fuente: (JOM Energy, 2017) modificado.	17
Figura 1.3. Mapa mundial de la irradiación horizontal global. Fuente: GeoSun Africa, 2016.	18
Figura 1.4. Carta estereográfica de Santiago de Querétaro. Fuente: Matti Tukiainen, 2016.	19
Figura 2.1. Techo verde en Noruega. Fuente: Jardines verticales y cubiertas vegetales, 2011.	22
Figura 2.2. Modo del trabajo en verano del Techo Verde Activo. Fuente: Roche, 2013.	24
Figura 2.3. Modo del trabajo en invierno del Techo Verde Activo. Fuente: Roche, 2013.	25
Figura 2.4. Calentamiento en invierno usando el sistema del techo con el tanque de agua. Fuente: USC, 2016.	26
Figura 2.5. Modo de enfriamiento usando el sistema de techo con el tanque de agua. Fuente: USC, 2016.	27
Figura 2.6. Relación entre la temperatura y calor de fusión para los PCM disponibles según IEA.	29
Figura 4.1. Concepto de la investigación sobre las capas de materiales de diferentes propiedades térmicas.	38
Figura 4.2. Circulación del flujo de aire en el modo de calefacción.	41
Figura 4.3. Circulación del flujo de aire en el modo de ventilación.	42
Figura 4.4. Radiación solar sobre una superficie horizontal plana el 8 de enero en Santiago de Querétaro. Fuente: Neila, s.f.	48
Figura 4.5. Radiación solar sobre una superficie horizontal plana el 9 de mayo en Santiago de Querétaro. Fuente: Neila, s.f.	50

Figura 4.6. Las variaciones térmicas exteriores resultan en un promedio estable dentro del sistema.	52
Figura 4.7. Cantidad de calor que recibe una superficie expuesta al exterior en 8 de enero y en 9 de mayo.....	52
Figura 4.8. Absortancia térmica. Fuente: Kreider (2002) modificado.	57
Figura 4.9. Desfase de la onda térmica.....	65
Figura 4.10. Amortiguación de la onda térmica. Fuente: Neila (2004) modificado.	75
Figura 4.11. Efecto Venturi.....	79
Figura 5.1. Temperatura de la capa de absorción térmica durante los días extremos.	83
Figura 5.2. Aplicación de la capa reversible en diferentes temporadas.	84
Figura 5.3. Temperatura horaria de la capa de absorción durante el 9 de mayo utilizando una superficie reflejante.	85
Figura 5.4. Temperatura de la masa térmica durante el 8 de enero.....	89
Figura 5.5. Temperatura de la masa térmica durante el 8 de enero.....	90
Figura 5.6. Temperatura de la masa térmica durante el 9 de mayo.	90
Figura 5.7. Temperatura promedio de aluminio cuando sobrepasa los 27° C durante el 8 de enero.	93
Figura 5.8. Temperatura promedio de aluminio cuando sobrepasa los 27° C durante el 9 de mayo.....	94
Figura 5.9. Temperatura de los PCM durante el 8 de enero.	95
Figura 5.10. Temperatura de los PCM durante el 9 de mayo.....	96
Figura 5.11. Calentamiento de los espacios con el sistema del techo.	98
Figura 5.12. Ventilación de los espacios con el sistema del techo.....	99
Figura 6.1. Modelo 3D de un cuarto de una vivienda creado con el programa Rhinoceros.....	101
Figura 6.2. Las partes del modelo 3D en Rhinoceros de un cuarto con el sistema de techo.	103
Figura 6.3. Puntos de referencia de análisis térmico de las simulaciones.	105
Figura 6.4. Temperatura del sistema con linóleo o caucho como masa térmica después del día más frío del año.	106

Figura 6.5. Temperatura del sistema con fibra de madera como masa térmica después del día más frío del año.	107
Figura 6.6. Temperatura del sistema con corcho comprimido como masa térmica después del día más frío del año.	108
Figura 6.7. Temperatura del sistema con linóleo o caucho como masa térmica después del día más caliente del año.	109
Figura 6.8. Temperatura del sistema con fibra de madera como masa térmica después del día más caliente del año.	110
Figura 6.9. Temperatura del sistema con corcho comprimido como masa térmica después del día más caliente del año.	111
Figura 6.10. Modelo 3D del volumen de aire de un cuarto creado con el programa Rhinoceros.	112
Figura 6.11. Velocidad del aire dentro de un cuarto con un muro sobrepuesto en el modo de calefacción.	113
Figura 6.12. Velocidad del aire dentro de un cuarto sin el muro sobrepuesto en el modo de calefacción.	114
Figura 6.13. Velocidad del aire dentro de un cuarto con un muro sobrepuesto en el modo de ventilación.	115
Figura 6.14. Velocidad del aire dentro de un cuarto sin el muro sobrepuesto en el modo de ventilación.	116
Figura 7.1. Colocación del sistema de techo.	121
Figura 7.2. Sección media transversal de la pieza del sistema de techo.	122
Figura 7.3. Capa reversible de aluminio por ambos lados.	123
Figura 7.4. Prototipo 1 de la pieza del sistema de techo.	123
Figura 7.5. Diseño de posición del tubo Venturi.	124
Figura 7.6. Propuesta de las piezas adicionales del sistema de techo.	125
Figura 7.7. Sección de un cuarto con el sistema de control del sistema de techo.	126
Figura 11.1. Fachada frontal 1:150	141
Figura 11.2. Sección transversal 1:150	141
Figura 11.3. Sección longitudinal 1:150	142

Figura 11.4. Planta baja 1:150.	143
Figura 11.5. Planta alta 1:150.	144
Figura 11.6. Planta de azotea 1:150.	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Consumo de energía de aparatos eléctricos básicos.....	21
Tabla 2.2. Ventajas y desventajas del techo verde.....	23
Tabla 2.3. Ventajas y desventajas de un techo verde activo.	25
Tabla 2.4. Ventajas y desventajas del techo con tanque de agua.	28
Tabla 2.5. Ventajas y desventajas de las sales hidratadas.....	30
Tabla 2.6. Ventajas y desventajas del techo energético.	33
Tabla 2.7. Ventajas y desventajas del material de techo.	34
Tabla 4.1. Irradiancia media horaria sobre una superficie horizontal en Querétaro durante el 8 de enero.	49
Tabla 4.2. Irradiancia media horaria sobre una superficie horizontal en Querétaro durante el 9 de mayo.....	51
Tabla 4.3. Resistencia térmica de una superficie según el sentido de circulación del flujo de calor.	54
Tabla 4.4. Materiales con más alta conductividad térmica.....	55
Tabla 4.5. Precios de los materiales de alta conductividad térmica.....	56
Tabla 4.6. Absortancia aproximada de los acabados.	58
Tabla 4.7. Materiales constructivos adecuados para un desfase de la onda térmica por 12 horas.	67
Tabla 4.8. Aislantes térmicos adecuados para un desfase de la onda térmica por 12 horas.	68
Tabla 4.9. Aislantes térmicos y sus propiedades.	74
Tabla 5.1. Valor porcentual de efectividad de los materiales.....	81
Tabla 5.2. Absortancia térmica requerida para mantener el promedio de 27°C en un metro cuadrado de la capa de aluminio durante el día más frío de año en Santiago de Querétaro.	82
Tabla 5.3. Materiales constructivos adecuados para un desfase de la onda térmica.	86
Tabla 5.4. Aislantes térmicos adecuados para un desfase de la onda térmica. ...	86

Tabla 5.5. Espesor necesario de los materiales seleccionados para un desfase de la onda térmica por 12 horas.....	87
Tabla 5.6. Temperatura de la capa de acumulación a las 8:00 horas en 8 de enero.	88
Tabla 5.7. Temperatura de la capa de acumulación a las 8:00 horas en 9 de mayo.	88
Tabla 5.8. CM que se funden alrededor de los 29° C y sus propiedades.	92
Tabla 5.9. Espesor de la capa de PCM.	94
Tabla 5.10. Espesor de la capa de aislamiento con materiales seleccionados para amortiguar 50% de la onda térmica.....	97
Tabla 6.1. Valor horario del flujo de calor que recibe la lámina de aluminio.	104
Tabla 10.1. Propiedades del aire del día 8 de enero en Querétaro.	138
Tabla 10.2. Propiedades del aire del día 9 de mayo en Querétaro.....	138

1 INTRODUCCIÓN

Querétaro es el estado que más ha crecido en los últimos años (IMCO, 2016) y su capital es la ciudad con el mejor desempeño inmobiliario del país. “Este desempeño se debe, principalmente, por el crecimiento demográfico en esta metrópoli, lo cual, consecuentemente, origina demanda de viviendas” (Forbes Staff, 2016).

La construcción intensiva de las viviendas no siempre cumple con las normas de eficiencia energética para asegurar el confort de sus usuarios. Aunque el clima de Querétaro es bastante templado comparado con otras zonas climáticas, el cambio térmico entre verano e invierno es suficiente para que las viviendas se enfríen o se calienten a niveles fuera del rango de confort.

Algunas personas, de mayor ingreso económico, climatizan sus viviendas con sistemas insostenibles como sistemas de aire acondicionado, ventiladores o radiadores. Los demás sufren la falta de confort.

1.1 Falta de confort térmico en las viviendas de Querétaro

Con base en la información de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2016) la temperatura promedio del día puede llegar a ser de sólo 3.2° C. Por ejemplo, si un cerramiento es de 16 cm de espesor de ladrillo o de concreto (lo que es un muro común en la edificación en la zona de Querétaro), esta temperatura traspasa al interior en aproximadamente 5 horas.

1.1.1 Efectos del estrés térmico en el cuerpo humano

Aun con un arropamiento adecuado es difícil de calentar el cuerpo hasta la temperatura necesaria. Cuando un cuerpo humano sufre frío, el primer mecanismo de defensa es la reducción del flujo de sangre para reducir la temperatura de la piel, asimismo la sensación en ella. De esta manera la temperatura interna del cuerpo se mantiene (Kreider, 2002), pero la escasa circulación de flujo de sangre deja las

partes de cuerpo más alejadas vulnerables a la congelación (Harvard Health Letter, 2010).

El siguiente mecanismo que un cuerpo humano aplica para calentarse es el temblor. Un movimiento inconsciente de los músculos ayuda a generar más calor metabólico (Kreider, 2002). A cierto nivel de temblor una persona puede llegar a sentir una gran molestia.

Además de la incomodidad que sufre un cuerpo humano en condiciones de frío, existen algunas amenazas a la salud. Un ambiente frío puede causar incremento en la presión sanguínea, disminución de defensas inmunes y enfermedades relacionadas (Harvard Health Letter, 2010).

Por otra parte, un ambiente demasiado caliente también puede causar malestar y enfermedades, ya que el flujo de sangre aumenta para mantener el nivel requerido de la sangre en el cerebro y la piel. Si la temperatura del ambiente es realmente alta, puede no llegar suficiente sangre a la piel o más importante al cerebro por un nivel de pulso demasiado alto (Kreider, 2002).

Otro peligro para la salud es la deshidratación en las condiciones cálidas. El mecanismo de evaporación de un cuerpo humano incluye emisión de agua para refrescar la superficie. Cuando la cantidad de agua interior disminuye, la persona puede sentir boca seca, falta de lágrimas, sudor, calambres de músculos, náusea y vómito, palpitaciones de corazón, aturdimiento, debilidad y disminución de producción de orina (Wedro, 2016). Y cuando el nivel de agua corporal no es suficiente para mantener la temperatura del cuerpo, éste empieza a calentarse con el peligro de daños serios a la salud.

1.2 Esquema térmico de una vivienda

Una vivienda pierde o gana calor por el techo, las ventanas, los muros, el piso y las fisuras. La Figura 1.1 muestra que por el techo es donde más calor se pierde o se gana igual en los periodos del frío que en los de calor.

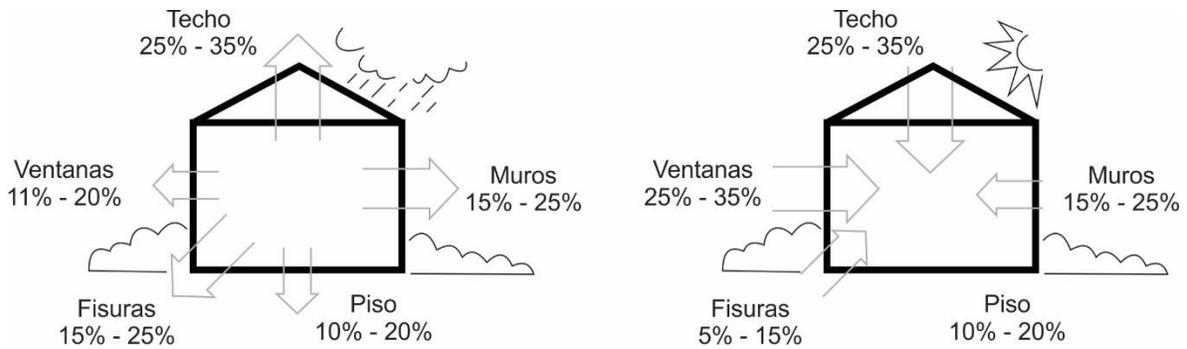


Figura 1.1. Esquema térmico de una vivienda en un día frío y en un día caliente. Fuente: (AliceSolarCity, 2017) modificado.

En un día frío el calor se pierde principalmente por la diferencia térmica entre el interior y el exterior. Pero durante un día caliente la radiación solar aumenta las ganancias caloríficas.

1.3 Radiación solar en Santiago de Querétaro

La radiación solar es el recurso energético más grande del mundo (Quaschning, 2016) (Figura 1.2). Esta energía se puede aprovechar en las plantas de energía solar térmica, los sistemas de fotólisis para la producción de combustibles, los colectores solares, las celdas fotovoltaicas que convierten la energía solar en energía eléctrica y los sistemas pasivos de calefacción (Quaschning, 2016). Además, la energía solar, también como la planetaria y la geotérmica, es un recurso de energía que se renueva naturalmente y es infinito por el periodo de tiempo relevante a la humanidad (Quaschning, 2016).

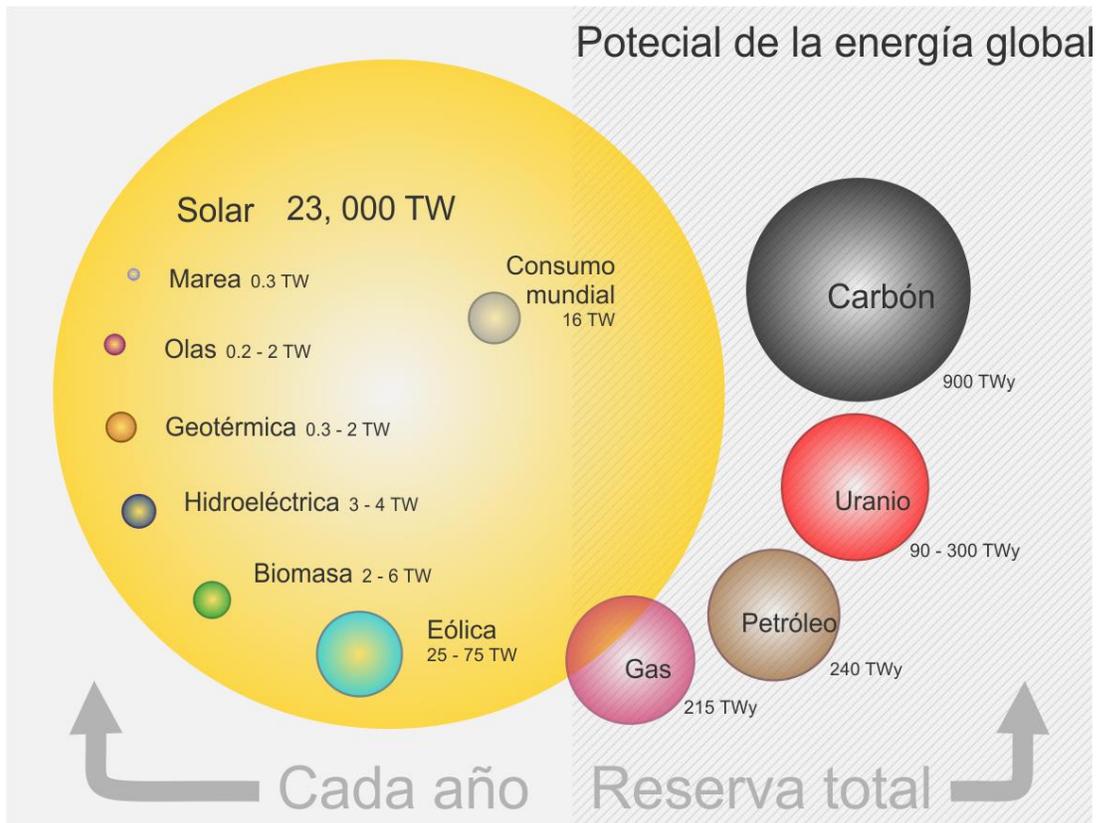


Figura 1.2. Potencial de la energía global total. Fuente: (JOM Energy, 2017) modificado.

Desafortunadamente, México no aprovecha suficientemente este recurso. Otros países del mundo ya entendieron los beneficios de la energía solar. Según las investigaciones de Matthew Wheeland los cinco países que usan más energía solar son Alemania, China, Italia, Japón y Estados Unidos (Wheeland, 2014), dichos países se encuentran sometidos a una radiación solar mucho menor que México.

En México el Promedio Global Horizontal de Irradiación (GHI) es de aproximadamente 5 kW h/m²/día que equivale a 50 veces la generación anual de electricidad en México (Osegura, 2010). En el siguiente mapa se puede observar que el nivel de irradiación solar en México es uno de los más altos del mundo:

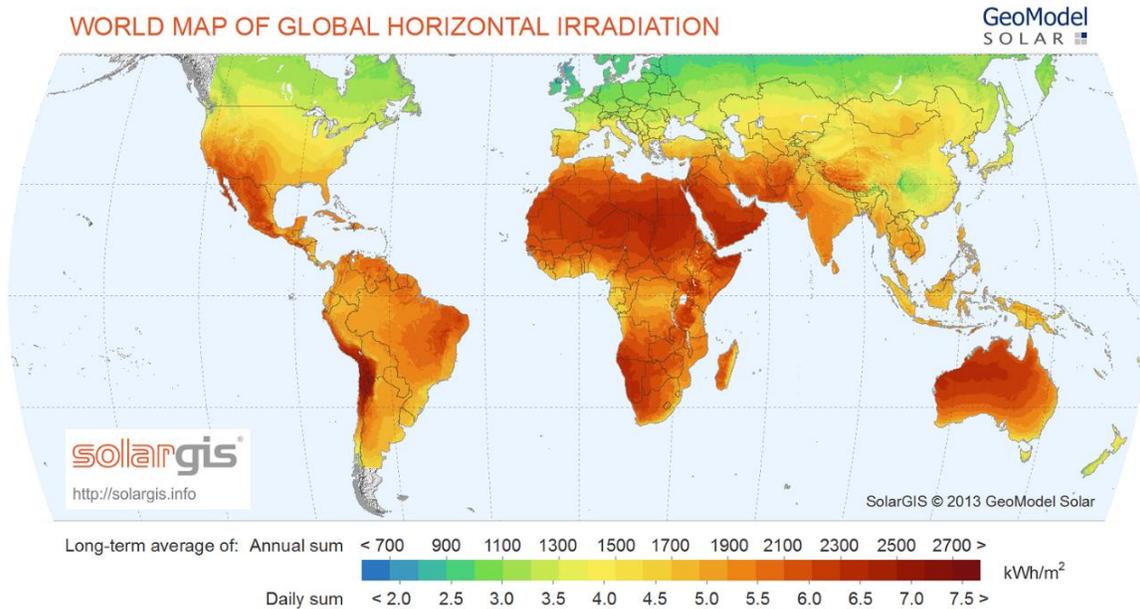


Figura 1.3. Mapa mundial de la irradiación horizontal global. Fuente: GeoSun Africa, 2016.

La irradiación solar en Querétaro alcanza hasta 6.9 kWh/m² por día y tiene un promedio de 5.9 kWh/m² por día mensuales, lo que es por arriba del promedio del país (Rivas, 2007).

Además, por la posición geográfica en la zona de la ciudad de Santiago de Querétaro, las superficies horizontales son las que reciben más rayos del sol. En la carta estereográfica de la ciudad, se aprecia que los ángulos del sol van desde los 46° en invierno hasta los 92° en verano:

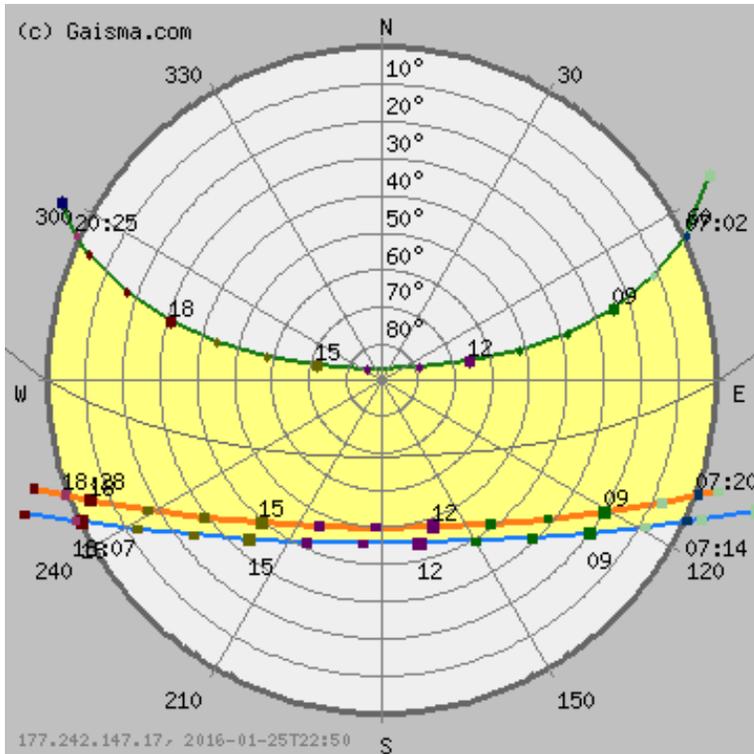


Figura 1.4. Carta estereográfica de Santiago de Querétaro. Fuente: Matti Tukiainen, 2016.

En verano los techos se sobrecalientan y este calor incrementa la temperatura en el interior de la vivienda. En el invierno, el calor recibido en los techos se desperdicia ya que las viviendas no alcanzan a calentarse por el frío de la noche.

Hoy en día la mayoría de las casas habitación reciben directamente en los techos gran parte de la radiación solar y debido a que no tienen un aislamiento adecuado, ocasionan una alta transferencia de energía térmica al interior de las casas. Esto da como resultado un aumento considerable de calor dentro de casas y edificios.

La presente investigación busca una solución a la problemática de la falta de confort térmico dentro de las viviendas para mejorar la calidad de vida de los habitantes de Santiago de Querétaro mediante el aprovechamiento de las condiciones solares en esta ciudad.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

A continuación, se presentan varios ejemplos de tratamiento del efecto de la radiación solar sobre un techo para obtener el confort térmico dentro de las viviendas.

2.1 Antecedentes

Existen mecanismos que ayudan a climatizar los espacios independientemente de las ganancias o pérdidas de calor por la construcción, también existen ejemplos de cómo los materiales ayudan a reducir el traslado de calor y, con el propósito de mantener las viviendas más cómodas térmicamente, han surgido nuevas tecnologías amigables con el ambiente como los techos verdes, tinajas de agua y combinaciones automatizadas.

2.1.1 Uso de aire acondicionado

Con el propósito de evitar las molestias térmicas, normalmente se emplean mecanismos activos como aire acondicionado, ventilador o calentador. Estos medios de mantener el ambiente en las condiciones de bienestar usualmente son contaminantes, costosos y en ocasiones nocivos para la salud.

El uso inadecuado de aire acondicionado y su falta de mantenimiento puede causar enfermedades como faringitis, neumonía, asma o dolor de cabeza. “Además, el contacto directo del aire acondicionado con el cuerpo, especialmente con la espalda o la cara, puede provocar distintas contracturas musculares, lumbalgia y cervicalgia” (Colegio profesional de fisioterapeutas de la comunidad de Madrid, 2012). Y finalmente, un cuerpo humano acostumbrado a las condiciones artificiales resulta teniendo problemas para adaptarse a las condiciones climáticas naturales (Colegio profesional de fisioterapeutas de la comunidad de Madrid, 2012).

No sólo la salud sufre por el uso de aires acondicionados. Una pérdida importante se encuentra en la sección económica y ambiental. Además del costo inicial de un equipo, el uso de energía eléctrica de un aire acondicionado es muy

elevado. Es el aparato que consume más energía eléctrica de todos los aparatos domésticos básicos:

Tabla 2.1. Consumo de energía de aparatos eléctricos básicos.

Electrodoméstico	Potencia (W)	Uso estimado (h)	Watts
Computadora de Escritorio	250	5	1250
Computadora Portátil	60	5	300
Televisión de Cinescopio	100	5	500
Televisión de Plasma	150	5	750
Televisión de Led	50	5	250
Radio	15	3	45
Estéreo	75	3	225
Reproductor de DVD	25	2	50
Lavadora	450	1	450
Refrigerador (11-12 Pies)	250	5 a 6	1250
Refrigerador (14-16 Pies)	300	5 a 6	1500
Refrigerador (18-22 Pies)	375	5 a 6	1875
Plancha	1000	1	1000
Secador de Ropa	250	1	250
Aire acondicionado	1500	4	6000
Ventilador	90	5	450
Cerca eléctrica	5	24	120
Hidroneumático	1200	2	2400
Puerta eléctrica	100	0.5	50

Fuente: Chávez (2014)

Como se puede observar en la Tabla 2.1, un aire acondicionado básico consume más del doble de energía que un hidroneumático o refrigerador, lo que resulta en emisión de 718.6 kg de CO₂ contaminante al año (CTE, 2017).

2.1.2 Techo verde

Techos verdes es una alternativa arquitectónica que brinda un efecto de aislamiento térmico, regulando la humedad y temperatura al interior de las casas y permitiendo una reducción en el consumo de energía eléctrica por el uso de aires acondicionados y ventiladores (Melgarejo y Vargas, 2012).

Cuando hace mucho frío, los techos verdes evitan que la temperatura descienda mucho al interior de una vivienda, gracias a la inercia térmica de su capa vegetal. Por el contrario, en caso de calor, se logra evitar un alza de la temperatura. Gracias a esto se logra una reducción importante en el consumo energético provocado por la calefacción o el aire acondicionado. (Burotto, 2014)

Por muchos siglos, en los países escandinavos se han usado techos de pasto, pero la tendencia moderna comenzó cuando en Alemania se desarrollaron las primeras azoteas verdes en la década de los 60. En un contexto de cambio climático, en varios países se ha alentado su instalación mediante políticas públicas por sus beneficios sociales, ambientales y ecológicos. (Secretaría del Medio Ambiente, 2016)

Se muestra un ejemplo de los techos verdes en Escandinavia en la Figura

2.1.



Figura 2.1. Techo verde en Noruega. Fuente: Jardines verticales y cubiertas vegetales, 2011.

A continuación, se presentan ventajas y desventajas del uso de techos verdes en la construcción:

Tabla 2.2. Ventajas y desventajas del techo verde.

Ventajas	Desventajas
<p>Los techos verdes absorben el calor y actúan como aislantes por lo que se ayuda a ahorrar energía en calefacción y aire acondicionado.</p>	<p>Se añade peso al techo de la casa.</p>
<p>Ayudan a reducir la contaminación del aire.</p>	<p>En algunas ocasiones, instalar techos verdes resulta demasiado costoso.</p>
<p>Al disminuir el consumo de energía, los techos verdes ayudan a evitar emisiones de gases de efecto invernadero.</p>	<p>Los techos verdes requieren de mantenimiento constante.</p>
<p>Agregan un valor estético al hogar.</p>	<p>Algunos edificios existentes no se pueden adaptar para construir techos verdes.</p>
<p>Ayudan a reducir el calor de las zonas urbanas.</p>	<p>De no ser bien instalado, el techo verde puede retener agua y hacer que las raíces penetren en las paredes.</p>
<p>Las plantas de los techos verdes absorben partículas de polvo y gases contaminantes que por lo general están en el aire.</p>	<p>Incrementa el consumo de agua en épocas de sequía.</p>
<p>Se puede utilizar el espacio para cultivar algunos vegetales.</p>	
<p>Absorben el agua de la lluvia.</p>	
<p>En caso de incendio, la humedad del techo evita que el fuego se propague.</p>	

Fuente: Sandy, 2013.

2.1.3 Techo verde activo

Roche en 2013 propuso los “Techos Verdes Activos” (Active Green Roofs) adaptando sistemas de ventiladores para aprovechar el aire fresco que se queda debajo del techo verde. En la Figura 2.2 se explica el funcionamiento del sistema cuando los espacios necesitan ser refrescados.

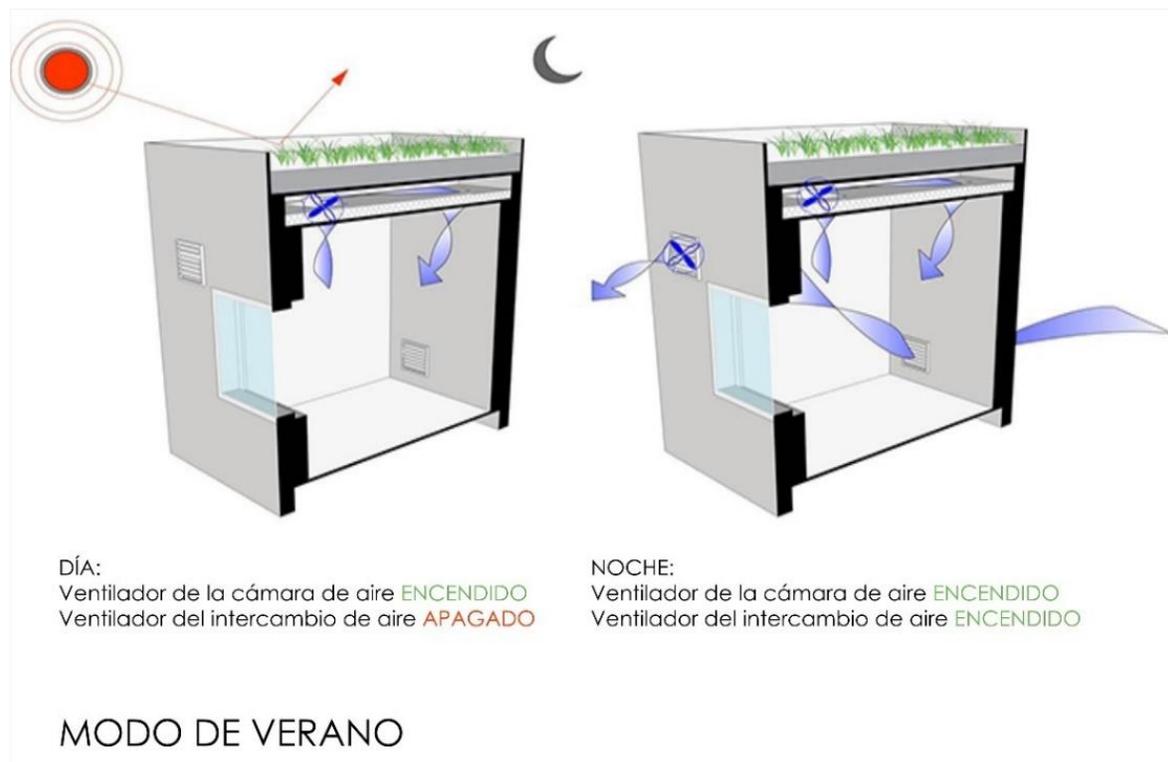


Figura 2.2. Modo del trabajo en verano del Techo Verde Activo. Fuente: Roche, 2013.

El modo de trabajo del techo verde activo en invierno aprovecha la radiación solar absorbida durante el día y la buena resistencia térmica del techo verde para mantener los espacios calientes:

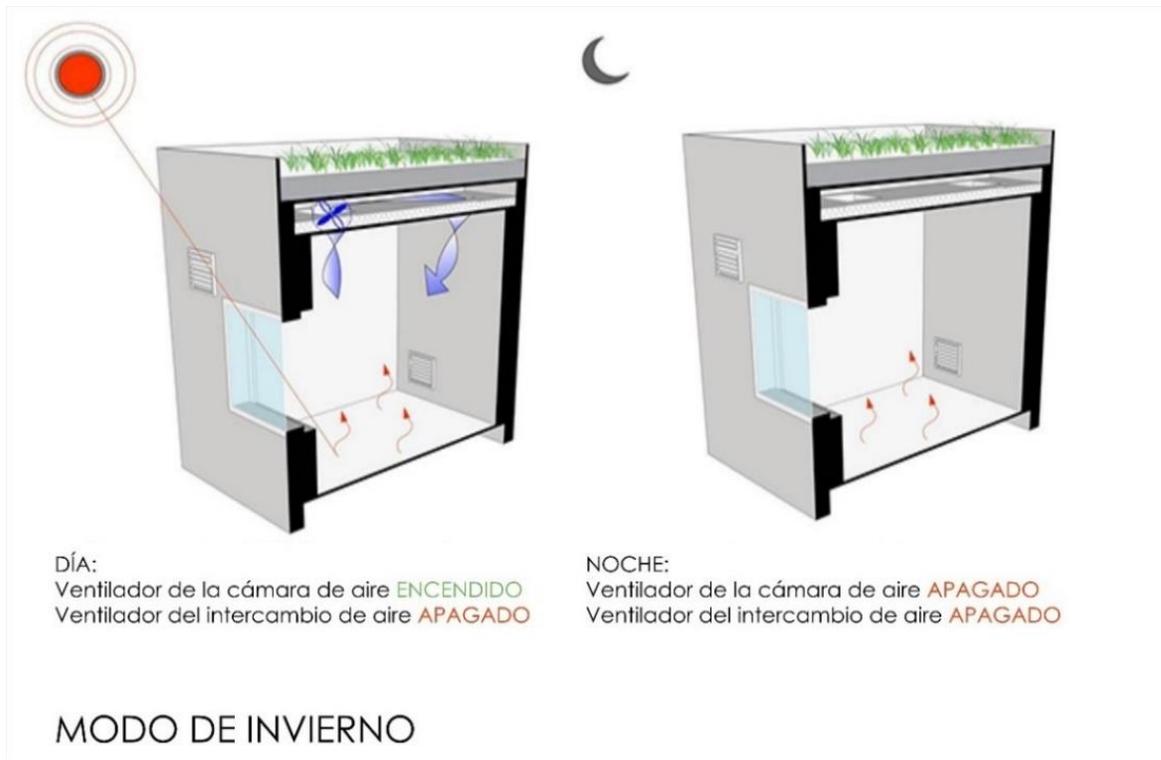


Figura 2.3. Modo del trabajo en invierno del Techo Verde Activo. Fuente: Roche, 2013.

El techo verde activo, además de las ventajas y desventajas de un techo verde tradicional, posee las siguientes propiedades:

Tabla 2.3. Ventajas y desventajas de un techo verde activo.

Ventajas	Desventajas
Climatización activa de los espacios de un edificio.	Más costoso y complicado. Requiere de conocimientos técnicos. Incluye partes mecánicas las cuales requieren mantenimiento.

Fuente: Roche, 2013.

2.1.4 Techo con tina de agua

Otra manera de proteger los espacios interiores de los cambios térmicos es utilizando contenedores de agua. El agua es un buen material para acumular el calor dentro de él mismo y retener la transferencia de calor. Una implementación de unas capas de aislamiento térmico y acristalamiento movibles ayuda a calentar o refrescar los espacios interiores según las necesidades.

Cuando se necesita el calentamiento, los rayos del sol entran por el cristal que cubre la tina con agua y lo calienta. En el momento en el que la temperatura exterior es menor a la del interior, sucede un intercambio de calor el cual produce un efecto de aislamiento (Figura 2.4). Así, el calor acumulado en el agua se irradia a los espacios interiores y el aislamiento evita que éste escape (USC, 2016).

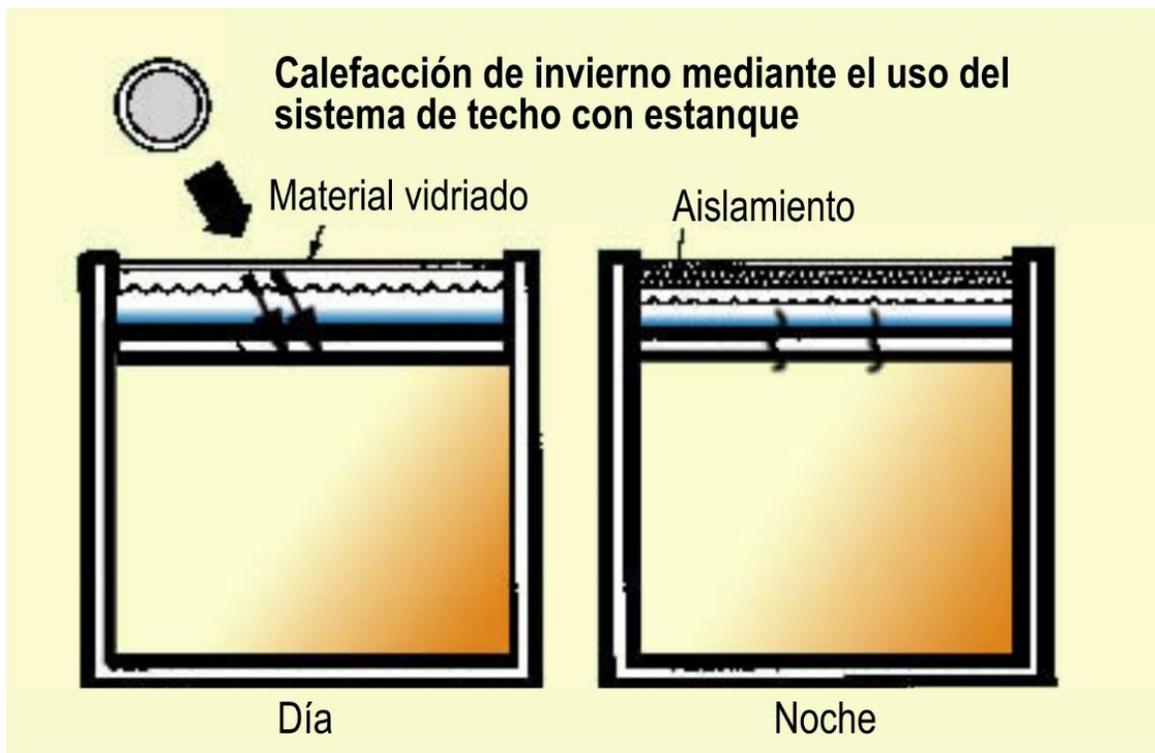


Figura 2.4. Calentamiento en invierno usando el sistema del techo con el tanque de agua. Fuente: USC, 2016.

En modo de enfriamiento, durante el día se utilizan las dos capas de aislamiento térmico y el acristalamiento, cuidando que no se calienten ni el agua ni los espacios interiores. En la noche las capas exteriores se remueven para que el agua pierda calor y refresque los espacios durante el día (USC, 2016) (Figura 2.5).

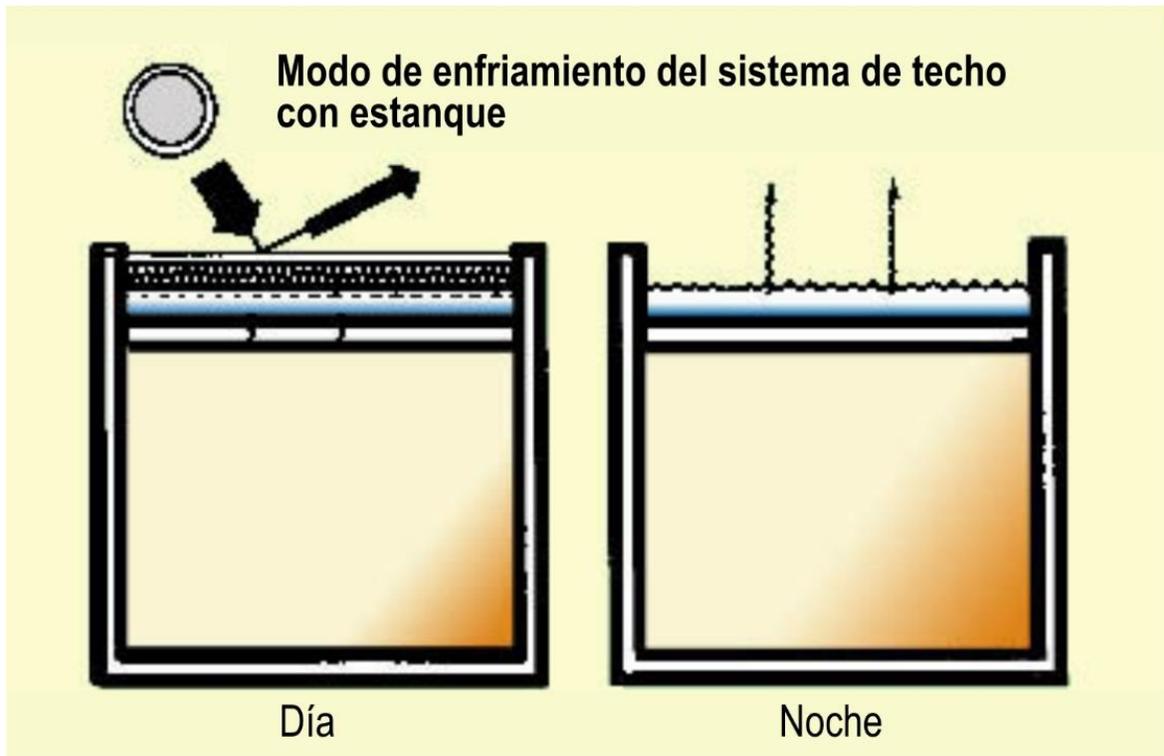


Figura 2.5. Modo de enfriamiento usando el sistema de techo con el tanque de agua. Fuente: USC, 2016.

Las principales ventajas y desventajas del uso de un techo con tanque de agua están proporcionadas en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Ventajas y desventajas del techo con tanque de agua.

Ventajas	Desventajas
Funciona muy bien para refrescar los espacios en las regiones donde hay grandes cambios de temperatura solar Entrega de la energía a los espacios es controlable. Variación de la temperatura interna es mínima.	Perdida de calor en el camino. Requerimientos especiales para el diseño del edificio.

Fuente: USC, 2016

2.1.5 Materiales de cambio de fase

Recientemente se está implementando el uso de materiales de cambio de fase como un material constructivo para acumular la energía calorífica. Un material cambia su fase (por ejemplo, de sólido a líquido) a cierta temperatura y en este proceso absorbe una cantidad de energía térmica. Después, cuando la temperatura baja a cierto nivel, regresando el material a su estado previo, se libera la energía guardada (Beatens, Gustavsen y Jelle, 2010). Esta energía, necesaria para los procesos de cambio de estado, se denomina calor latente (Neila, 2004).

Los materiales, que cambian su estado a temperaturas ambientales, se llaman materiales de cambio de fase o PCM (de inglés "Phase Change Material"). Para poder usar un PCM como material constructivo, se tienen que tomar en cuenta los siguientes puntos (Beatens, Gustavsen y Jelle, 2010):

- a) La elección del material depende de la temperatura que el recibe y tiene que tener buena transmitancia térmica hacia él;
- b) Se prefiere un material que no tenga grandes cambios de densidad y volumen en los procesos de cambio de fase con la finalidad de una incorporación sencilla en la construcción;
- c) Para prevenir la cristalización de los materiales y, en sucesión, pérdida de sus posibilidades térmicas, no se puede utilizar un ambiente de cambios drásticos de temperatura;

d) Se tiene que verificar la estabilidad química de los materiales.

Los tipos de PCM comunes y sus temperaturas de fusión:

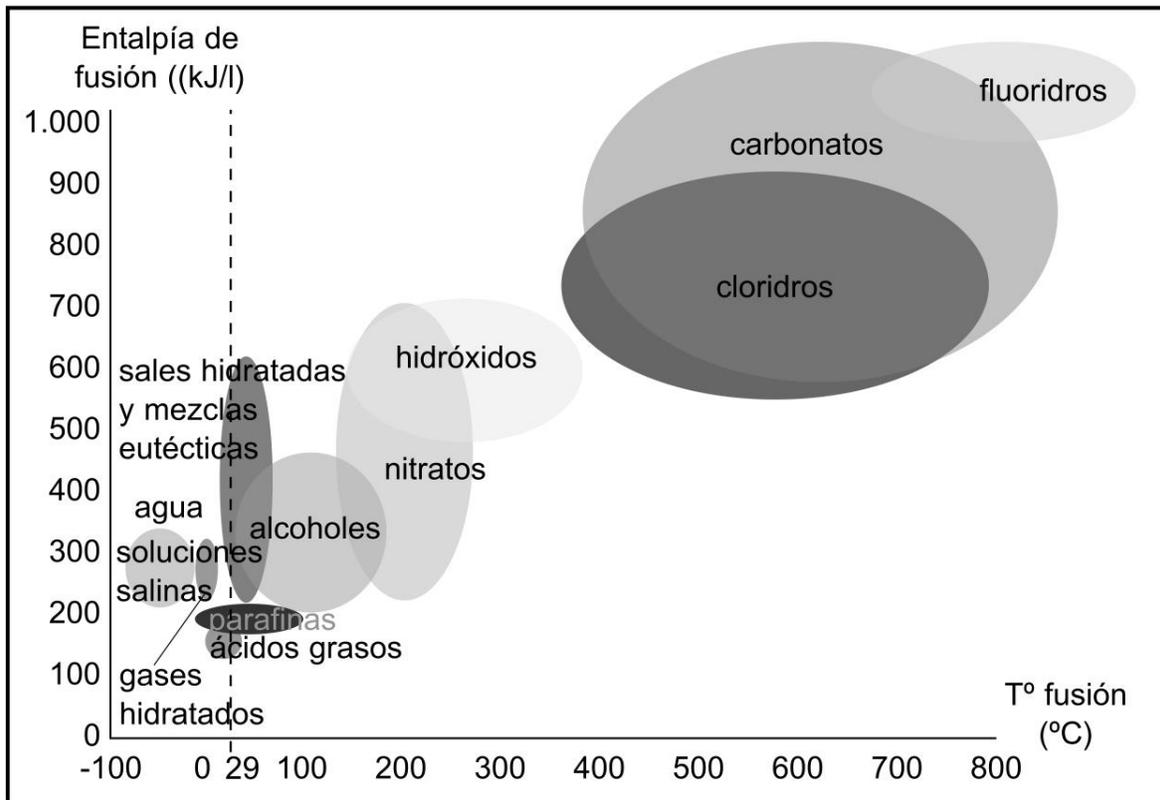


Figura 2.6. Relación entre la temperatura y calor de fusión para los PCM disponibles según IEA

Analizando la Figura 2.6, se puede afirmar que los PCM, con la temperatura de fusión de alrededor de las temperaturas ambientales, son las sales hidratadas, las parafinas y los ácidos grasos. También se puede observar que, los ácidos grasos son los que menos calor latente generan y, en cambio, las sales hidratadas pueden ofrecer hasta tres veces más de la energía calorífica que las parafinas.

2.1.5.1 Sales hidratadas

Las sales hidratadas fueron de las primeras PCM investigadas, principalmente por su alta cantidad de calor por unidad volumétrica y por su bajo costo. Lamentablemente, las sales hidratadas tienen problemas en cristalizarse, no se solidifican completamente aún en temperaturas mucho menores que su punto de congelación si no tienen un núcleo cristalino dentro de su masa (García-Santos, Neila y Oliver, 2012).

Se han aplicado varios sistemas de encapsulado y uso de aditivos para adaptar este material en las aplicaciones constructivas, aun que los métodos de tratamiento de las sales hidratadas todavía aportan algunas desventajas. Las ventajas y desventajas del uso de sales hidratadas en construcción se pueden percibir en la tabla de García-Santos, Neila y Oliver (2012).

Tabla 2.5. Ventajas y desventajas de las sales hidratadas.

Ventajas	Inconvenientes
Generalmente baratos	El encapsulado y preparación para su uso ocasionan algunos problemas
Densidad de almacenamiento térmico elevada	Su uso prolongado necesita de aditivos
Elevada conductividad térmica	Son susceptibles de subenfriamiento
Temperatura de cambio de fase claramente definida	Los aditivos utilizados para evitar una fusión incongruente reducen su capacidad de almacenamiento latente por unidad de volumen más de un 25%
No inflamables	Potencialmente corrosivos con algunos metales
Reciclables y biodegradables	

Fuente: García-Santos, Neila y Oliver (2012).

2.1.5.2 Parafinas

Las parafinas son materiales orgánicos y ofrecen una gran variedad de rangos de temperatura de cambio de estado. Por lo mismo, este tipo de PCM se

puede usar en procesos de periodos cortos y para largos periodos de tiempo (García-Santos, Neila y Oliver, 2012). Además, las parafinas, cómo otros materiales de cambio de fase orgánicos no son tóxicos, son más estables y no tienen problemas de sobreenfriamiento, ni corrosión (Beatens, Gustavsen y Jelle, 2010).

Las parafinas poseen algunas desventajas, cómo su gran cambio de volumen en procesos de cambio de estado y baja conductividad térmica, lo cual complica el aprovechamiento de los beneficios del material. En la práctica se usan aditivos metálicos para mejorar la conductividad térmica de las parafinas y se almacenan en contenedores plásticos de diferentes geometrías para su gran volumen de fusión (Beatens, Gustavsen y Jelle, 2010).

2.1.5.3 Ácidos grasos

Ácidos grasos es un grupo de materiales orgánicos que puede ofrecer muchos beneficios en construcciones con PCM. Además de que, como las parafinas, son estables, no tóxicos y no corrosivos, los ácidos grasos también tienen mucha capacidad calorífica y muy poca variación de volumen en los procesos de cambio de estado (Beatens, Gustavsen y Jelle, 2010). Su única desventaja es que, al ser derivados de productos animales y vegetales, su costo es muy elevado. (García-Santos, Neila y Oliver, 2012).

2.2 Patentes

Además de los ejemplos mencionados anteriormente, existen sistemas automatizados de techo ya patentados que mejoran el confort térmico dentro de una vivienda. Después de analizar las patentes en México, Estados Unidos y la Unión Europea, se encontraron algunos diseños similares dentro de la “European Patent Office”. A pesar de que los diseños patentados encontrados no están diseñados para el clima de México, se pueden analizar los métodos que utilizaron sus autores.

2.2.1 Techo energético de A. Lincoln Pittinger (1976)

A. Lincoln Pittinger patentó en 1976 un techo energético (“Energy roof”), lo que es “un sistema de calentamiento y enfriamiento que utiliza radiación solar como fuente de energía y un cuerpo fluido para almacenar el calor” (USA Patent No. US4082080A, 1976). El objetivo de este diseño es absorber una adecuada cantidad de la energía solar, almacenarla en la masa de un material y distribuirla propiamente para regular la temperatura de los cuartos de una vivienda (USA Patent No. US4082080A, 1976).

El techo energético funciona en base a la circulación de un líquido que está dentro de éste. Durante el periodo de radiación solar éste se encuentra en la parte superior del techo dentro de una charola de un material flotante (por ejemplo, un plástico celular espumado). El líquido se calienta durante el día. Cuando se necesita calentar los cuartos de una vivienda, éste se baja con ayuda de unas válvulas y se coloca en contacto con la superficie de un metal corrugado expuesto hacia el interior de la vivienda, al hacer esto transmite la energía calorífica a los espacios habitados mediante radiación y convección (USA Patent No. US4082080A, 1976).

Para refrescar los cuartos durante el periodo de calor, el proceso sucede inversamente. Durante las horas de sol, el líquido se encuentra por debajo de la charola flotante y evita el calentamiento. En la noche, el agua se sube por fuerza de una bomba de agua a la parte superior del techo y se refresca por la radiación hacia el ambiente (USA Patent No. US4082080A, 1976).

Además de las válvulas y la bomba de agua, se necesita una implementación de un sistema de control con sensores de temperatura del fluido, del exterior y del interior y un sensor de luz solar. La radiación solar se absorbe gracias a un colector plano conformado por un metal color oscuro y una capa transparente por encima (USA Patent No. US4082080A, 1976).

Las ventajas y desventajas del diseño propuesto por A. Lincoln Pittinger en 1976 están expuestas en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Ventajas y desventajas del techo energético.

Ventajas	Desventajas
Un sistema sustentable	Falta de propuesta de una fuente de energía sustentable para el sistema de control, sensores y actuadores
Materiales accesibles	Material líquido posibilita filtraciones
Sistema de calentamiento y de enfriamiento	La distribución de calor hacia el interior es ineficiente (procesos de convección natural)

2.2.2 Material de techo de Naotatsu Yano (2000)

Naotatsu Yano en 2000 patentó “un sistema de techo de un material capaz de acumular la energía solar efectivamente y acondicionar los espacios habitados inmediatamente cuando se requiere” (Japón Patent No. JP2000017749A, 2000).

Para absorber la energía solar se implementa una placa colectora de calor que puede ser de algún metal, piedra, cerámico o algún otro material con propiedades térmicas parecidas. Es preferible que la placa sea de color negro y corrugada para mejorar la eficiencia de colección de calor (Japón Patent No. JP2000017749A, 2000).

Las mezclas de cloruro de hidrato de calcio con agua o algunos plásticos o parafinas de un punto de fusión bajo son preferibles como materiales para acumular el calor gracias a su calor latente. También algunos tipos piedra o metal pueden ser adaptados para acumular el calor por su calor sensible (Japón Patent No. JP2000017749A, 2000).

Durante el periodo de frío, el calor acumulado en el techo llega a los espacios habitados por la fuerza de un ventilador alimentado por una batería solar. Cuando se necesita refrescar los espacios se emplea una bomba de calor, la cual saca el aire caliente del techo hacia el exterior y el interior de una vivienda puede ser refrescado con el mismo ventilador, pero ya empujando un aire fresco (Japón Patent No. JP2000017749A, 2000).

Las ventajas y desventajas del diseño propuesto por Naotatsu Yano en 2000 están expuestas en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Ventajas y desventajas del material de techo.

Ventajas	Desventajas
Las partes de control son alimentadas por energía solar	El enfriamiento del techo necesita energía eléctrica
Propone posibles materiales	No define materiales ni sus espesores óptimos

3 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Después de revisar la literatura mundial se busca implementar una solución específica para la región de interés y definir los alcances y objetivos de esta investigación.

3.1 Hipótesis

De acuerdo con el estado del arte, se asume que la capacidad de almacenamiento de calor de un techo está en función de su masa térmica: existe una relación óptima entre su capacidad calorífica, su masa y el flujo natural del aire en el interior de una vivienda mejora el confort térmico de sus habitantes en Santiago de Querétaro.

3.2 Objetivo

Desarrollar un proceso de diseño de un sistema de techo pasivo con masa térmica, con adecuada absorción de radiación solar y un sistema de control de flujo de aire que mejore el confort térmico de los espacios de una vivienda unifamiliar de Santiago de Querétaro.

3.3 Objetivos particulares

1. Analizar y seleccionar los materiales para el techo propuesto y calcular su espesor óptimo.
2. Diseñar el modelo de flujo natural de aire entre la masa en el techo y el interior.
3. Realizar una propuesta de diseño de un sistema de techo de masa térmica que se adapte a edificaciones nuevas o ya existentes.

3.4 Alcances

En esta investigación se busca diseñar un sistema pasivo que regule la temperatura interior de una vivienda unifamiliar utilizando los conceptos de masa térmica y circulación del flujo de aire.

Se debe definir la mejor combinación de materiales ecológicos en el techo para obtener energía solar de una manera óptima y el posicionamiento de las aperturas y mecanismos de ventilación dentro de un cuarto que provoquen un flujo de aire controlado, el cual regule la temperatura interior.

La comprobación de los resultados se lleva a cabo de manera teórica y simulada computacionalmente, un prototipo funcional se encuentra fuera de los alcances de este trabajo.

4 METODOLOGÍA

Para desarrollar el diseño del techo sostenible se analiza como la energía solar puede ser aprovechada para climatizar los espacios de una vivienda unifamiliar en Santiago de Querétaro.

A continuación, se propone un concepto del sistema de techo, se definen las condiciones de la investigación y se resaltan los variables de encontrar.

4.1 Concepto del sistema de techo

La propuesta de esta investigación es un sistema de techo sostenible que en su desarrollo emplea la energía solar para obtener confort térmico en las viviendas. La energía calorífica obtenida del sol se almacena en la masa del techo y llega al interior de la vivienda con un flujo de aire controlado.

La idea es dividir el techo en varias capas y asignar cierta función a cada una de tal manera que la capa exterior absorba la energía solar, que ésta se almacene dentro de la masa térmica, la cual está en contacto con una cámara de aire. Se realizan varias ecuaciones termodinámicas y se relacionan ponderadamente las propiedades físicas, estéticas y económicas de algunos materiales con la finalidad de definir los materiales y los espesores óptimos de las capas del sistema de techo.

Posteriormente, se investiga de que manera el calor almacenado puede mejorar el confort térmico dentro de una vivienda. Se asume que una circulación de flujo de aire entre los cuartos de una vivienda y el sistema de techo eleva la temperatura interior a la de confort en época de frío. Además, se analiza cómo la circulación de flujo de aire puede disminuir la sensación térmica cuando la temperatura dentro de los cuartos es mayor a la de confort.

El diseño del sistema involucra varios conceptos físicos. Uno se basa en la explotación de la radiación solar mediante las propiedades de los materiales y el otro en la circulación de flujo de aire entre el sistema y los espacios interiores y

cómo controlándolo se puede aumentar o disminuir la temperatura interior. La investigación finaliza aprobando el funcionamiento térmico de los materiales seleccionados mediante el uso de simulaciones digitales.

4.1.1 Propiedades de los materiales

El primer elemento del diseño está enfocado en cómo obtener y mantener la energía solar dentro del sistema. El sistema del techo se divide en capas, de las cuales cada una realiza cierta función:

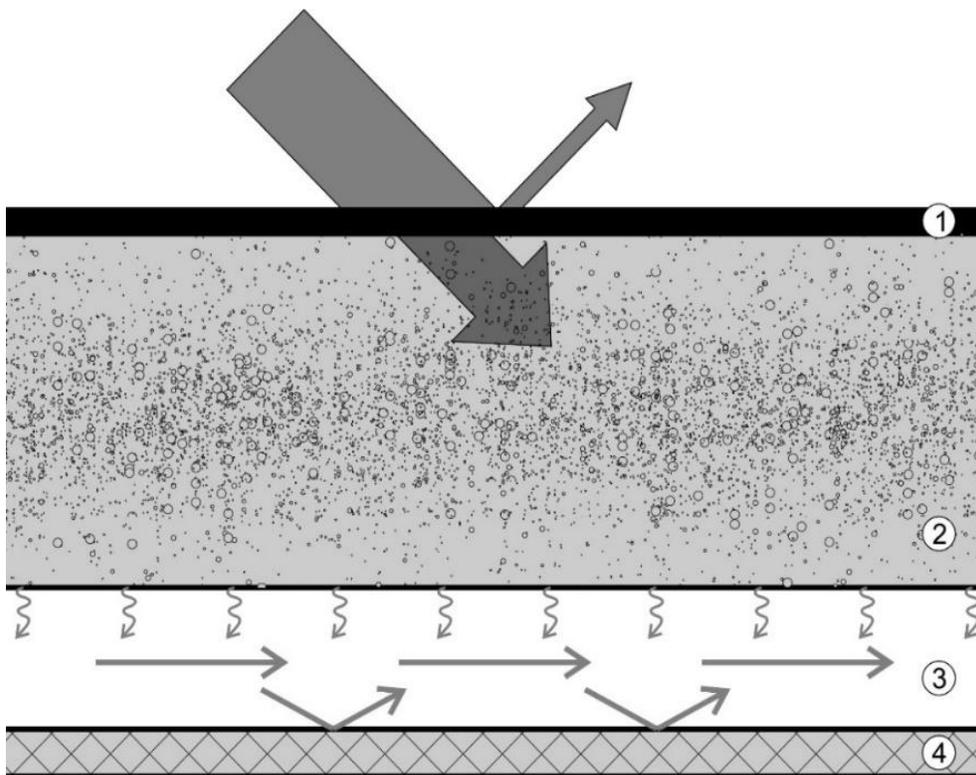


Figura 4.1. Concepto de la investigación sobre las capas de materiales de diferentes propiedades térmicas.

La primera capa, la que se encuentra expuesta hacia el exterior, es responsable por la absorción de la radiación solar (1). El diseño de ella depende de las posibilidades de un material de absorber y conducir la mayor cantidad de energía

solar. La mayor cantidad de radiación solar significa mayores posibilidades energéticas del sistema. Con el propósito de definir las propiedades de la capa de absorción se comparan materiales que mejor transmiten el calor y se calcula la absorción térmica óptima de la superficie expuesta hacia el exterior basándose en la cantidad de la energía que se obtiene y se pierde por los procesos de convección y radiación durante los días extremos térmicamente.

El siguiente factor importante es la acumulación del calor obtenido de la radiación solar (2). Esta capa debe de tener la mayor inercia térmica posible lo que es la capacidad de un material a mantener el calor en su cuerpo. Materiales de alta inercia térmica se denominan masa térmica. En este tipo de materiales el calor traspase más lento, en otras palabras – tiene un desfase de la onda térmica más grande. Como posibles materiales de la capa de acumulación se comparan materiales constructivos y materiales de cambio de fase. La definición del espesor óptimo de la capa, utilizando un material de construcción como masa térmica, se basa en sus propiedades para desfasear la onda térmica. El tipo de material de cambio de fase adecuado para el sistema del techo está en su función de alcanzar el punto de fusión durante el día más frío del año. Y su espesor óptimo debe de ser suficiente para absorber toda la energía calorífica durante el día más caliente del año.

Para que se pueda aprovechar el calor de la capa de acumulación de calor, se necesita que ésta tenga contacto con una cámara de aire (3), de la cual el aire fluye a los espacios habitados.

Y para disminuir las pérdidas de calor en el funcionamiento del sistema, la capa interior del techo tiene que ser aislada térmicamente (4). La definición del material de aislamiento térmico depende de su resistencia térmica y el espesor se encuentra según la ecuación de amortiguación de la onda térmica.

4.1.2 Circulación del flujo del aire

Si la temperatura del aire que está dentro del sistema se mantiene constante, éste puede ser circulado por los espacios interiores para climatizarlos. Si el sistema, mediante el uso de los sensores de temperatura, detecta que la temperatura interior está fuera del rango de confort, automáticamente se activa la circulación del flujo de aire entre los espacios habitados y el sistema. Éste debe de aumentar o disminuir la temperatura según la necesidad, aprovechando la energía calorífica y la velocidad del aire.

Con base en las ecuaciones de sensación térmica se calculan las velocidades de aire óptimas para el periodo de frío como el de calor. Las ecuaciones de caudal de aire ayudan a definir las velocidades de aire necesarias de los mecanismos de ventilación.

4.1.2.1 Funcionamiento de calefacción

Si se necesita calentar los espacios, el control de circulación del flujo de aire utiliza directamente el calor acumulado en el techo. El aire se calienta dentro del techo y mediante los conductos de aire llega al interior de la vivienda.

Por el proceso de convección natural, que es un fenómeno por el cual se transfiere calor de las zonas más calientes a las más frías, el aire caliente no baja naturalmente. Las zonas a mayor temperatura son menos densas y tienden a desplazarse siempre hacia arriba en el seno fluido (Nottoli, 2007). Para resistir el efecto de la convección natural, este aire caliente del techo debe de bajar con la fuerza mecánica de un ventilador. Este ventilador, evitando utilizar las energías no renovables, puede ser alimentado, al igual que todo el techo, con la energía solar.

Si el aire caliente baja con la ayuda del ventilador y entra a un espacio habitado por la zona inferior, vuelve a subir por la misma convección natural asegurando un calentamiento uniforme del espacio:

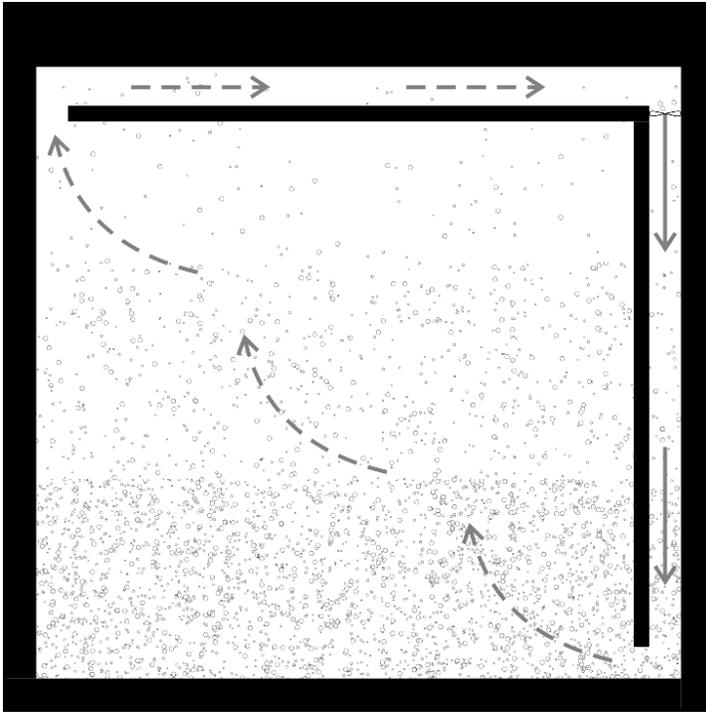


Figura 4.2. Circulación del flujo de aire en el modo de calefacción.

Debe de existir una entrada de aire en la parte inferior del espacio y una salida en la parte superior del espacio para que el aire entre por los conductos del sistema y se caliente nuevamente.

4.1.2.2 Funcionamiento de ventilación

En el modo de enfriamiento el sistema emplea la velocidad del flujo de aire para reducir la sensación térmica. Cuando la temperatura interior y exterior son más altas que la temperatura de confort, el movimiento de aire puede considerablemente refrescar el cuerpo humano incrementando la pérdida de calor por convección y evaporación (Bradshaw, 2006).

El aumento de la velocidad del aire se puede causar naturalmente por convección o mecánicamente. En el diseño del sistema de techo con masa térmica se puede utilizar una combinación de los dos métodos.

Primero, aprovechando que el sistema requiere una implementación de un ventilador para el modo de invierno, éste mismo puede ser utilizado también para ventilar los espacios en verano. En este caso el ventilador empuja el aire con mayor fuerza y causa un movimiento de flujo de aire con mayor velocidad lo que disminuye la sensación térmica.

Segundo, ya que el aire entra a los espacios con la ayuda de un ventilador, con la mayor rapidez se tiende a subir por la diferencia de las densidades dentro del espacio. La convección natural ayuda a circular el aire con mayor velocidad.

Al final, la implementación de una salida hacia el exterior en la parte de techo aumenta más la velocidad de intercambio de las masas de aire. El calor, absorbido en el techo calienta el aire en la zona de salida y aumenta la diferencia de presiones.

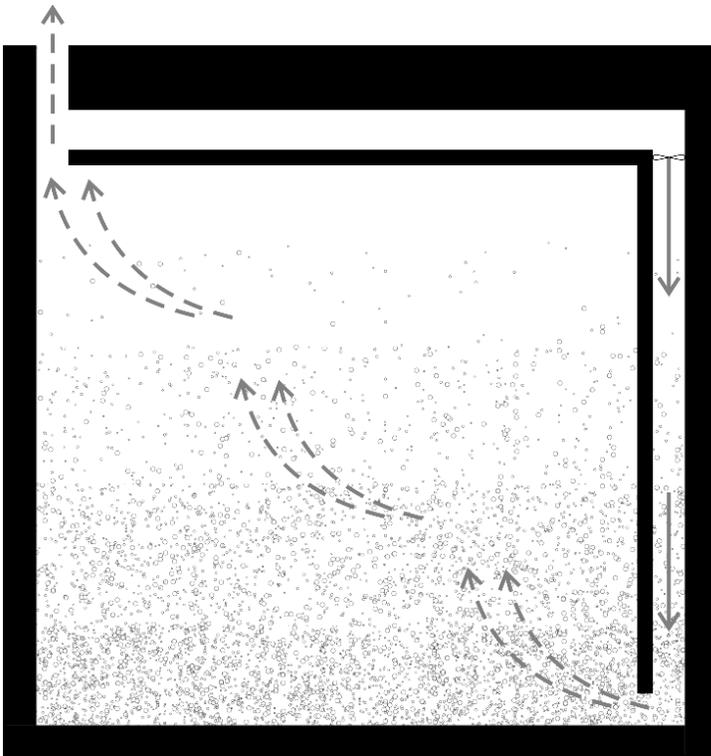


Figura 4.3. Circulación del flujo de aire en el modo de ventilación.

Figura 4.3 representa el concepto de movimiento de aire durante los días calientes. Un ventilador impulsa el aire hacia dentro y luego éste sale con mayor fuerza hacia el exterior por convección natural.

4.2 Temperatura óptima del sistema de techo

La definición de los variables mencionados anteriormente depende del objetivo del sistema, el cual es mantener los espacios de una vivienda unifamiliar a temperatura de confort. A continuación, se proporciona un método para definir la temperatura de confort térmico para cualquier región y, a su consecuencia, cómo encontrar la temperatura óptima del sistema de techo.

4.2.1 Confort térmico

El confort térmico depende de los siguientes factores (Freixanet, s.f.):

- Temperatura del aire
- Temperatura radiante
- Humedad del aire
- Velocidad del aire

Y factores que dependen de la persona (Freixanet, s.f.):

- Arropamiento
- Actividad
- Metabolismo

El modelo del techo con masa térmica no puede afectar los variables que dependen de la misma persona. El sistema se enfoca en los parámetros de la temperatura y la velocidad del aire para lograr el confort térmico.

La temperatura óptima representa un punto en la escala térmica en el cual el individuo expresa satisfacción térmica con el ambiente. Mantener esta temperatura dentro de los espacios es el objetivo del sistema.

Aplicando la fórmula de Auliciems (1981) se puede calcular la temperatura óptima para la región:

$$T_o = 17.6 + 0.31 \cdot T_m \quad [1]$$

Temperatura optima

Donde:

T_o - Temperatura optima

T_m - Temperatura media anual o mensual, en el caso de Santiago de Querétaro es 18°C (INEGI, 2017).

4.2.2 Renovaciones del aire

El sistema de techo siempre debe de tener suficiente energía para calentar los espacios a la temperatura de confort. Lamentablemente, una parte de la energía se pierde por las renovaciones de aire. Un espacio habitable no puede ser completamente hermético, no sólo porque es una misión muy difícil de lograr, pero principalmente porque se recomienda mantener el nivel de CO₂ por debajo del 0.1% por cuestiones de salud y bienestar (Neila, 2004).

Por esta razón existen unos caudales de aire necesarios fijos. Un caudal es un valor de relación volumétrica necesaria entre el anhídrido carbónico y el oxígeno consumido en el proceso respiratorio. (Neila, 2004) F. Javier Neila en 2004 define que el mínimo volumen necesario para una persona es:

- dormitorios - 1 l/s· m²;
- estancias - 1 l/s· m²;
- cocinas - 2 l/s· m².

El mismo autor (Neila, 2004) provea la siguiente ecuación para encontrar el volumen de aire necesario de renovar:

$$V_R = \text{caudal} \cdot \text{nr. de personas} \cdot A \quad [2]$$

Volumen de renovaciones de aire

Donde:

V_R – volumen de renovaciones de aire (m³);

nr. de personas – cantidad de los usuarios, que comúnmente en una vivienda unifamiliar en Querétaro es 4 (INEGI, 2016);

A – área del espacio (m²).

Sabiendo la cantidad de las renovaciones de aire, se puede encontrar la cantidad de calor que se recibe o se pierde para el metro cuadrado del espacio aplicando las ecuaciones de Neila (2004):

$$\frac{\Delta Q_{RI}}{\Delta t} = 1.29 \cdot V_R \cdot \Delta T \quad [3]$$

Cantidad de calor por renovaciones de aire en invierno

$$\frac{\Delta Q_{RV}}{\Delta t} = 1.14 \cdot V_R \cdot \Delta T \quad [4]$$

Cantidad de calor por renovaciones de aire en verano

Donde:

$\frac{\Delta Q_{RI}}{\Delta t}$ – cantidad de calor por renovaciones de aire en invierno (W);

$\frac{\Delta Q_{RV}}{\Delta t}$ – cantidad de calor por renovaciones de aire en verano (W);

ΔT – diferencia entre la temperatura interior y la óptima (°C). Se propone que la variación de la temperatura interior permitida por el sistema es $\Delta T = \pm 5^\circ \text{C}$.

4.2.3 Temperatura óptima del sistema

“Las cargas térmicas por renovación de aire responden a la cantidad de energía necesaria para calentar el aire hasta que alcance la temperatura de bienestar” (Neila, 2004). La cantidad de calor que se pierde por renovación equivale a la cantidad de calor que se tiene que obtener del sistema de techo. Este calor llega al usuario por convección $\frac{Q_{conv}}{t}$. Basándose en la ley del enfriamiento de Newton (1701), la temperatura óptima del sistema se encuentra aplicando la siguiente ecuación:

$$T_{sistema} = \frac{\frac{\Delta Q_{conv}}{\Delta t}}{h \cdot A} + T_o \quad [5]$$

Cantidad de calor por convección

Donde:

$T_{sistema}$ – temperatura dentro del sistema de techo (°C);

$\frac{\Delta Q_{conv}}{\Delta t}$ – ganancias de calor por convección (W);

h – coeficiente de película, la cual, cómo Kreider (2002) conservativamente usa, es $17 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ \text{C}$.

4.3 Datos climáticos de Santiago de Querétaro

El diseño del sistema de techo se basa en las condiciones climáticas de la zona. Se calculan los parámetros necesarios del sistema de tal manera que éste funcione adecuadamente durante el día más caliente y más frío del año en Santiago de Querétaro. Se asume que el sistema de techo funciona sin dificultades durante todo el año si satisface los requeridos térmicos durante los días extremos.

4.3.1 Días de temperaturas extremas

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) proporciona que la temperatura promedio anual en el estado de Querétaro es de 18° C con precipitación media estatal de 570 mm anuales. La capital se encuentra en una zona con clima seco y semiseco (INEGI, 2017), lo que usualmente significa grandes cambios de temperatura entre día y noche.

Según el análisis de los datos climatológicos de Conagua, se pudo observar que el día más frío del año en Santiago de Querétaro es el 8 de enero con un promedio de temperatura de 3.2° C. El día más caliente del año, según la misma referencia, es el 9 de mayo con una temperatura media de 32.8° C (Conagua, 2016).

4.3.2 Radiación solar incidente

En la introducción se presentó un mapa con la irradiación solar incidente en todo el mundo y se pudo apreciar la gran cantidad de sol que recibe México (Figura 1.3.2). Santiago de Querétaro está sometido en una zona donde la irradiación es aún más alta que el promedio y durante un día recibe alrededor de 5.9 kWh/m² (R. Almanza S., 1997) (Southwest Technology Development Institute, 1999).

4.3.2.1 Radiación solar incidente horaria en el día más frío del año

En el día más frío del año, lo que es el 8 de enero, la temperatura exterior promedio es de 3.2° C. Toda la energía calorífica que el techo puede obtener durante este día es la de la radiación solar. Por esto es muy importante calcular

exactamente cuanta radiación solar incidente recibe una superficie horizontal plana en Santiago de Querétaro.

La calculadora de radiación solar creada por Javier Neila (s.f.) permite obtener datos de la cantidad de la radiación solar media horaria sobre una superficie en cualquier localidad. Santiago de Querétaro, que se encuentra en una latitud de $20^{\circ} 35' 17''$ y una altitud media de 1820 m, durante el día de 8 de enero sobre una superficie horizontal plana obtiene 17285 kJ totales diarios:

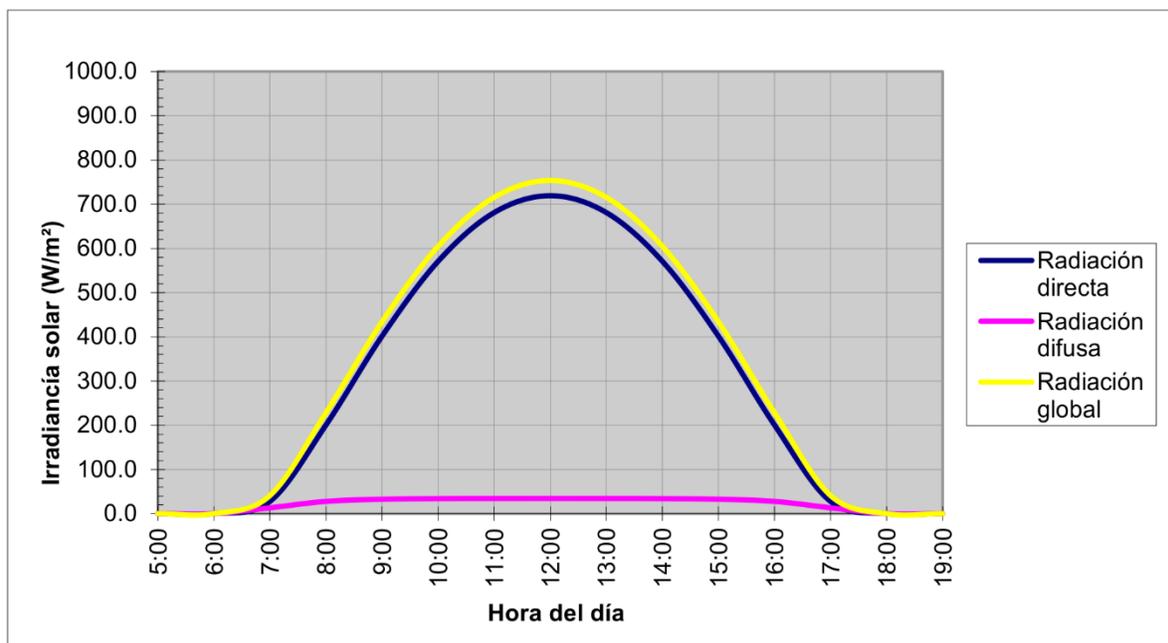


Figura 4.4. Radiación solar sobre una superficie horizontal plana el 8 de enero en Santiago de Querétaro. Fuente: Neila, s.f.

La figura 4.4 muestra los resultados de la calculadora de Javier Neila para el día 8 de enero en Querétaro. Se recibe alguna cantidad de radiación solar durante casi todo el día sobre una superficie horizontal plana y alcanza a recibir hasta 754 W/m^2 durante el mediodía. Los resultados también se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 4.1. Irradiancia media horaria sobre una superficie horizontal en Querétaro durante el 8 de enero.

Hora	Irradiancia media horaria sobre superficie (W/m ²)
06:00	0
07:00	41
08:00	229
09:00	434
10:00	605
11:00	715
12:00	754
13:00	715
14:00	605
15:00	434
16:00	229
17:00	41
18:00	0

Fuente: Neila, s.f.

4.3.2.2 Radiación solar incidente horaria en el día más caliente del año

Para la misma localidad de Santiago de Querétaro y para la misma superficie horizontal plana se encuentra la radiación solar del día 9 de mayo usando la calculadora de Neila. Insertando los datos requeridos en la tabla se encuentra que se obtienen 28441 kJ durante el día más caliente de año sobre una superficie horizontal:

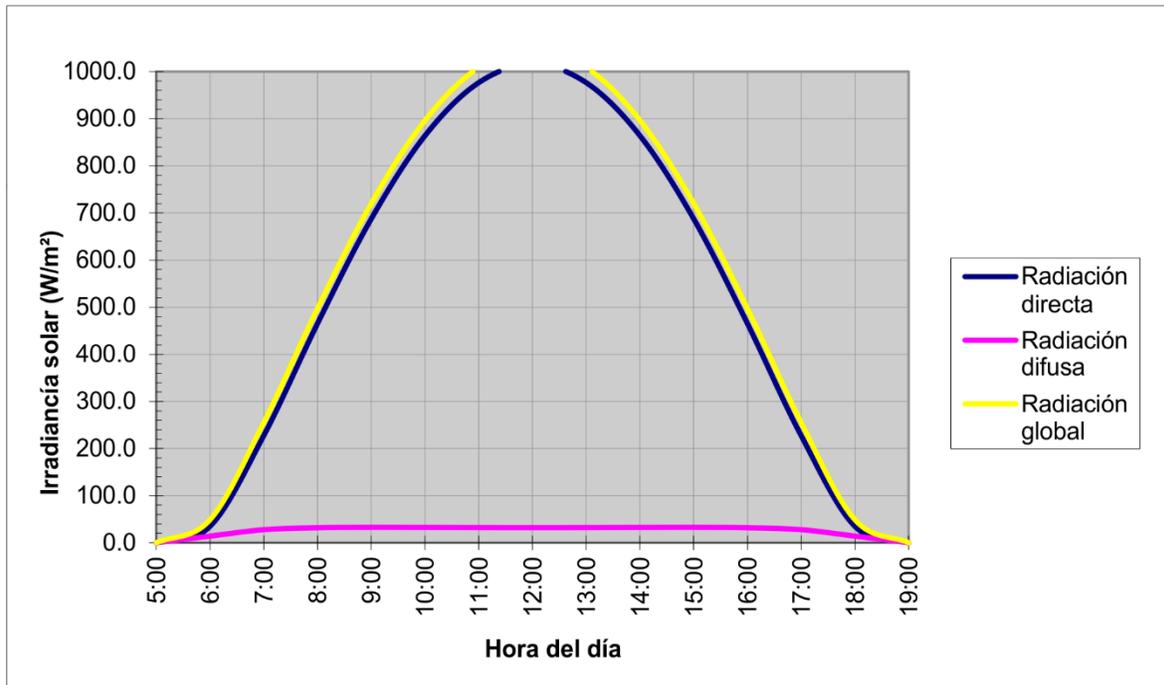


Figura 4.5. Radiación solar sobre una superficie horizontal plana el 9 de mayo en Santiago de Querétaro. Fuente: Neila, s.f.

En la Figura 4.5 se aprecia que en el día 9 de mayo la mayor cantidad de la radiación solar sobre una superficie horizontal se recibe alrededor del mediodía. Y en la siguiente tabla se aprecia que el promedio horario de la irradiancia alcanza hasta los 1047 W/m^2 .

Tabla 4.2. Irradiancia media horaria sobre una superficie horizontal en Querétaro durante el 9 de mayo.

Hora	Irradiancia media horaria sobre superficie (W/m ²)
06:00	49
07:00	255
08:00	497
09:00	720
10:00	896
11:00	1009
12:00	1047
13:00	1009
14:00	896
15:00	720
16:00	497
17:00	255
18:00	49

Fuente: Neila, s.f.

4.4 Absorción de la radiación solar

La capa exterior del sistema de techo es la responsable de absorber la energía calorífica del ambiente. En los periodos de frío la temperatura exterior es menor que la interior y que la temperatura interna necesaria del sistema. En estos periodos de frío el techo pierde el calor por convección hacia el ambiente y tiene que recuperarlo del sol con el propósito de calentarse a una temperatura que permita que el promedio de las temperaturas sea la temperatura óptima del sistema. De esta manera el sistema del techo no se enfría y el aire dentro del sistema se mantiene siempre a la temperatura necesaria.

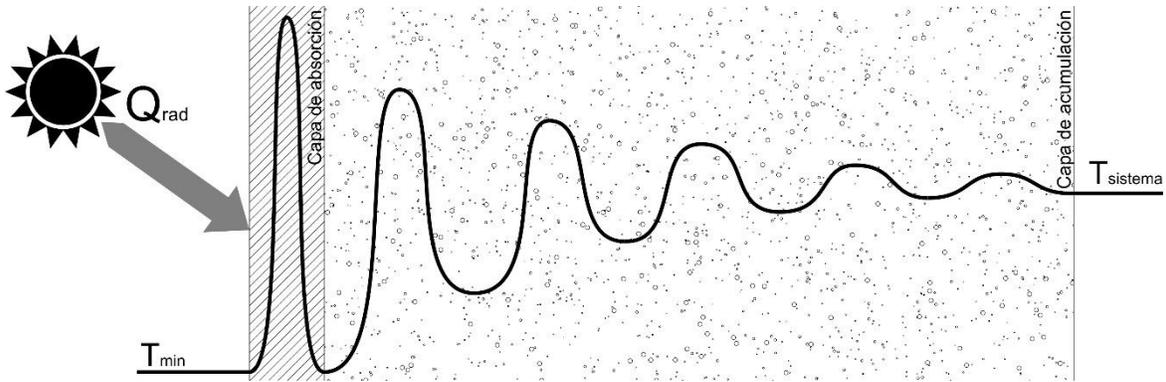


Figura 4.6. Las variaciones térmicas exteriores resultan en un promedio estable dentro del sistema.

Las ganancias de calor que recibe la capa exterior durante los días extremos dependen de los datos climáticos de la zona. En verano una superficie expuesta al exterior en Santiago de Querétaro gana calor por radiación y por convección, ya que la temperatura exterior es mayor a la interior. En invierno, esta superficie se calienta por los rayos solares, pero pierde grandes cantidades de calor por convección.

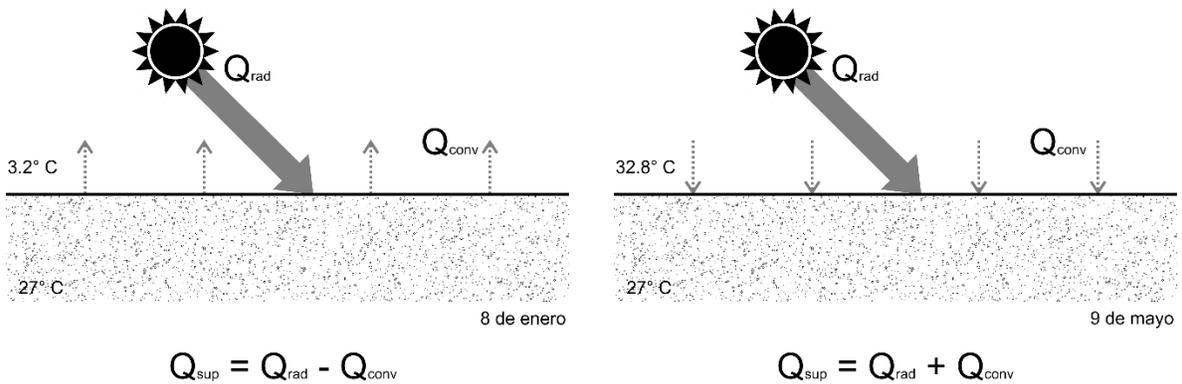


Figura 4.7. Cantidad de calor que recibe una superficie expuesta al exterior en 8 de enero y en 9 de mayo.

El día crítico para el sistema es el 8 de enero, porque la temperatura del ambiente es de sólo 3.2° C y se tiene que absorber suficiente energía solar para poder mantener el promedio térmico requerido. Cada material se calienta a diferentes niveles de temperatura con la misma cantidad de calor recibida, los materiales que más se calientan son los que tienen altos niveles de transmitancia térmica. La transmitancia térmica define la cantidad de calor que se conduce por el material (Kern, 1965):

$$\frac{\Delta Q_{sup}}{\Delta t} = U \cdot A \cdot \Delta T \quad [6]$$

Cantidad de calor por conducción

Donde:

$\frac{\Delta Q_{sup}}{\Delta t}$ – ganancias de calor por conducción (W);

U – transmitancia térmica (W/m²·°C);

A – área de la superficie (m²);

ΔT – diferencia térmica entre las superficies (°C).

La transmitancia térmica indica la cantidad de calor que se trasfiere por un metro cuadrado de material por cada grado centígrado y es inversamente proporcional a la suma de las resistencias térmicas (Kern, 1965):

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

Transmitancia térmica

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

Resistencia térmica

Donde:

R_t – resistencia total ($m^2\text{C}/W$);

R_{se}, R_{si} – resistencia térmica superficial ($m^2\text{C}/W$) que dependiendo del sentido de circulación de flujo de aire son iguales a:

Tabla 4.3. Resistencia térmica de una superficie según el sentido de circulación del flujo de calor.

Sentido de circulación del flujo de calor	Separación con ambiente exterior R_{se} ($m^2\text{C}/W$)	Separación con ambiente interior R_{si} ($m^2\text{C}/W$)
Horizontal (0° a 30°)	0.04	0.13
Ascendente (30° a 90°)	0.04	0.10
Descendente (30° a 90°)	0.04	0.17

Fuente: Neila (2004)

e – espesor del material (m);

λ - conductividad térmica del material ($W/m \cdot ^\circ\text{C}$).

La conductividad térmica define la capacidad de un material de conducir el calor. Los materiales de baja conductividad térmica sirven como aislantes cuando se necesita que el calor no se transfiera. Y los buenos conductores de calor, los que tienen altos valores del mismo, ayudan a que el calor fluya sin dificultades (Kern, 1965).

4.4.1 Material

En el caso del sistema de techo con masa térmica es muy importante tener altos valores de conductividad térmica con la finalidad de que la capa de absorción alcance temperaturas más altas que las del ambiente durante los días de frío. Los materiales constructivos que mejor conducen el calor según el catálogo de CTE (Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción, 2006) son:

Tabla 4.4. Materiales con más alta conductividad térmica.

Material	λ (W/m· °C)
Acero	50
Aluminio	230
Bronce	65
Cobre	380
Cromo	93.7
Estaño	66.6
Hierro	72
Latón	120
Níquel	90.7
Titanio	21.9
Zinc	110

Fuente: Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción (2006).

De la tabla anterior se puede observar que los materiales de valores más altos de conductividad térmica son metales, especialmente el aluminio, cobre, latón y zinc. Precisamente estos materiales pueden ser aprovechados en el sistema de techo para que el calor de la radiación solar pase sin dificultades hasta la masa térmica y ésta se caliente.

La elección del material de la capa de absorción, además de sus propiedades térmicas, también depende de la accesibilidad del material. La accesibilidad de los cuatro materiales, anteriormente mencionados, pueden ser comparados ya que sus precios son proporcionados de la Secretaría de Economía de México (2016):

Tabla 4.5. Precios de los materiales de alta conductividad térmica.

Material	λ (W/m· °C)	Precio (\$/lb)
Aluminio	230	14.63
Cobre	380	42.62
Latón	120	48.27
Zinc	110	20.83

Fuente: Secretaría de Economía de México (2016).

Se puede observar que el cobre, el material de mejor conductividad térmica de todos, es el más caro. Por esta razón se hace una evaluación de la efectividad de los cuatro materiales (una relación entre su conductividad térmica y su precio).

Al valor real de cada variable se le asigna un valor porcentual, cuyo valor más alto es 1. Un valor alto de conductividad térmica es positivo para el diseño del sistema y un valor alto de precio es negativo, porque significa un alto costo de producción. Esta relación se expresa en la siguiente manera:

$$Valor = \frac{\lambda}{\$} \quad [7]$$

Evaluación de la efectividad de material

4.4.2 Espesor de la capa

Gracias a las propiedades físicas de los metales, la capa de la absorción puede tener un espesor muy delgado en relación con otros materiales. Cuando el espesor del material seleccionado está definido, se puede calcular la transmitancia térmica de esta capa. Adaptando las ecuaciones termodinámicas de Kern (1965) y tomando en cuenta que la capa está expuesta solo hacia el exterior, la transmitancia térmica de ella se puede calcular aplicando la siguiente ecuación:

$$U = \frac{1}{R_{se} + \frac{e}{\lambda}} \quad [8]$$

Transmitancia térmica

4.4.3 Superficie

Debido a las características de una superficie, la energía solar no se absorbe en su totalidad. La cantidad de calor que se absorbe por un material depende del coeficiente de absorción térmica de la superficie (Kreider, 2002):

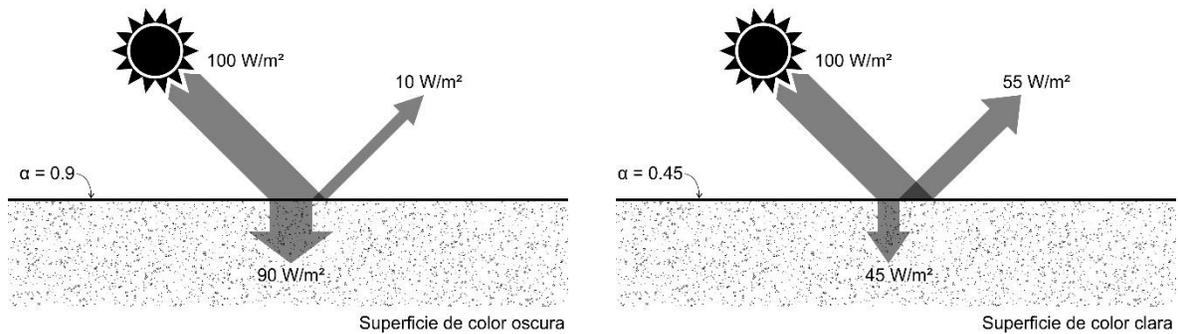


Figura 4.8. Absortancia térmica. Fuente: Kreider (2002) modificado.

Como se puede observar en la Figura 4.8, las superficies oscuras absorben más calor que las claras. En la siguiente tabla se muestra cómo la absorción depende del color de acabado de una superficie.

Tabla 4.6. Absortancia aproximada de los acabados.

	Color del acabado	Absortancia para onda corta
No metálicos	Muy claro (encalado)	< 0.20
	Claro	0.50
	Medio (ladrillo claro)	0.80
	Oscuro (ladrillo oscuro)	0.90
	Muy oscuro (pizarra)	> 0.90
Metálicos	Pulidos	< 0.05
	No pulidos	Según color

Fuente: Susana García-San Román (2015).

El acabado de la superficie afecta directamente a las ganancias de calor. Se necesita definir el valor del coeficiente de la absortancia térmica con el cual las ganancias de calor son suficientes para que el promedio de las temperaturas horarias de la capa sea la temperatura óptima del sistema $T_{sistema}$. Un metro cuadrado de la superficie se calienta por conducción:

$$T_i + \frac{Q_{sup}}{U \Delta t} = T_{sistema}$$

Donde:

T_i – temperatura inicial horaria de la capa de aluminio (° C).

Superficie de la capa de absorción expuesta hacia el exterior recibe la energía calorífica por radiación y por convección:

$$\frac{Q_{sup}}{\Delta t} = \frac{Q_{rad}}{\Delta t} + \frac{Q_{conv}}{\Delta t}$$

Donde:

$\frac{\Delta Q_{rad}}{\Delta t}$ – ganancias de calor por radiación (W);

$\frac{\Delta Q_{conv}}{\Delta t}$ – ganancias de calor por convección (W).

Las ganancias de calor de una superficie por radiación son iguales al múltiplo de su absortancia térmica, área y la radiación solar (Kreider, 2002):

$$\frac{\Delta Q_{rad}}{\Delta t} = \alpha \cdot I_W \cdot A$$

Ganancias de calor por radiación

Donde:

α – absortancia térmica;

I_W – radiación solar (W/m²);

A – área de la superficie expuesta a la radiación solar (m²).

Y la cantidad de calor que se gana en verano o se pierde en invierno por convección es igual a (Kern, 1965):

$$\frac{\Delta Q_{conv}}{\Delta t} = h \cdot A \cdot (T_{sa} - T_{sup})$$

Ganancias de calor por convección

Donde:

$\frac{\Delta Q_{conv}}{\Delta t}$ – ganancias de calor por convección (W);

h – coeficiente de convección (W/m²°C);

A – área de la superficie expuesta al ambiente (m²);

T_{sa} - temperatura sol-aire (°C);

T_{sup} - temperatura de la superficie expuesta al ambiente (°C).

Durante las horas del sol el aire superficial también se calienta con la energía solar. Gracias a éste, en invierno no se pierden tan grandes cantidades de calor al ambiente. Esta temperatura, que incluye las ganancias de calor por radiación solar, se denomina temperatura sol-aire.

La temperatura sol-aire sobre una superficie horizontal según Kreider (2002) es igual a:

$$T_{sa} = T_{ext} + \frac{\alpha \cdot I_W}{h_0} - 4$$

Temperatura sol-aire para una superficie horizontal

Donde:

T_{ext} – temperatura exterior (°C);

α – coeficiente de absorción térmica de la superficie;

I_W – radiación solar incidente a una superficie (W/m²);

h_0 - coeficiente combinado de la convección y la radiación, que es 17 W/m², según el ejemplo de Kreider (2002) en su libro “Heating and Cooling of Buildings”.

Para poder calcular la cantidad de calor que una superficie horizontal obtiene por convección en Querétaro durante los días extremos se necesita saber el valor del coeficiente de convección que es diferente para cada caso de convección. Según los métodos de cálculo, que se encuentran en el apéndice 1, el coeficiente de convección en Santiago de Querétaro para los días de frío es 5.4 W/m²°C y para los días de calor es 1.13 W/m²°C.

Entonces, las pérdidas de calor por convección el 8 de enero son iguales a:

$$\frac{\Delta Q_{conv}}{\Delta t}_{invierno} = 0.3 \cdot \alpha \cdot I_W - 4.32 - 5.4 \cdot T_i$$

Cantidad de calor por convección en Querétaro durante 8 de enero

Y las ganancias por convección el 9 de mayo se encuentran en la siguiente manera:

$$\frac{\Delta Q_{conv}}{\Delta t_{verano}} = 0.09 \cdot \alpha \cdot I_W + 37.44 - 1.3 \cdot T_i$$

Cantidad de calor por convección en Querétaro durante 9 de mayo

En resumen, el calentamiento de un metro cuadrado de la superficie exterior durante el día más frío y más caliente del año respectivamente es igual a:

$$T_i + \frac{1.3 \cdot \alpha \cdot I_W - 4.32 - 5.4 \cdot T_i}{U} = T_{sistema}$$

Calentamiento de un metro cuadrado de una superficie expuesta al exterior en Querétaro durante 8 de enero

$$T_i + \frac{1.09 \cdot \alpha \cdot I_W + 37.44 - 1.3 \cdot T_i}{U} = T_{sistema}$$

Calentamiento de un metro cuadrado de una superficie expuesta al exterior en Querétaro durante 9 de mayo

Como se sabe, durante el periodo de calor el objetivo es reflejar la mayor parte de los rayos solares a propósito de evitar el sobrecalentamiento. Por otra parte, durante el frío se necesita absorber cierta cantidad de calor de la radiación solar para poder calentar el sistema de techo a la temperatura necesaria. Para poder controlar este valor se encuentra la absortancia térmica requerida de la superficie exterior.

Primero de todo, se calcula la absorptancia térmica necesaria horaria durante el 8 de enero. Los valores de la radiación solar horaria durante este día se encuentran en la tabla 4.1 y se aplica la ecuación derivada:

$$\alpha = \frac{(T_{sistema} - T_i) \cdot U + 4.32 + 5.4 \cdot T_i}{1.3 \cdot I_W} \quad [9]$$

Absortancia térmica requerida en Querétaro durante el 8 de enero

Se toma en cuenta que la temperatura inicial del sistema antes de que se reciban los rayos solares es igual a la temperatura del ambiente. Los promedios de las temperaturas ambientales de los días extremos térmicamente se encuentran en el subcapítulo 5.3. Después de cada hora la temperatura inicial se cambia. La T_i de la hora siguiente es igual a $T_{sistema}$ de la hora anterior.

Como no se sabe si durante la primera hora la superficie alcanza a calentarse a la temperatura del sistema requerida, $T_{sistema}$ se sustituye por T_{sup} y se verifica aplicando la ecuación [10]:

$$T_{sup_{invierno}} = T_i + \frac{1.3 \cdot \alpha \cdot I_W - 4.32 - 5.4 \cdot T_i}{U} \quad [10]$$

Temperatura de la superficie horaria en Querétaro durante el 8 de enero

Se calcula la absorptancia térmica requerida para cada hora durante el día más frío del año y se saca el promedio requerido diario.

4.4.4 Temperatura horaria de la capa

Posteriormente, con la absorptancia térmica definida, se puede calcular la temperatura que el sistema alcanza después de cada hora durante los días

extremos térmicamente aplicando la ecuación [10] para el día más frío del año y la ecuación [11] para el día más caliente del año:

$$T_{sup_{verano}} = T_i + \frac{1.09 \cdot \alpha \cdot I_W + 37.44 - 1.3 \cdot T_i}{U} \quad [11]$$

Temperatura de la superficie horaria en Querétaro durante el 9 de mayo

4.5 Acumulación del calor

La energía calorífica absorbida se debe de almacenar de alguna manera con el propósito de disponer su uso en los momentos cuando se necesita. “Esto, no sólo permitirá repartir adecuadamente la energía a lo largo de los periodos de consumo, sino que evitará el golpe térmico que se produce en los momentos de captación” (Neila, 2004).

4.5.1 Masa térmica

La posibilidad de un material de acumular la energía calorífica en él mismo se denomina masa térmica. Este material de mucha masa y capacidad calorífica provee alta inercia térmica y dificulta el cambio de temperatura de su masa (Neila, 2004). La onda de calor la traspasa lentamente.

“Una vez que la capa exterior del cerramiento se ha calentado, por la acción conjunta de la radiación solar y de la temperatura exterior, comienza un lento proceso de paso del calor por conducción desde esta capa hacia el interior.” (Neila, 2004). La idea de la capa de acumulación del calor es que la onda calorífica se tarde en traspasarla y alcance el interior en los momentos más fríos del día. “El tiempo en que el calor tarda en atravesar el cerramiento se denomina desfase de la onda térmica (Neila, 2004).

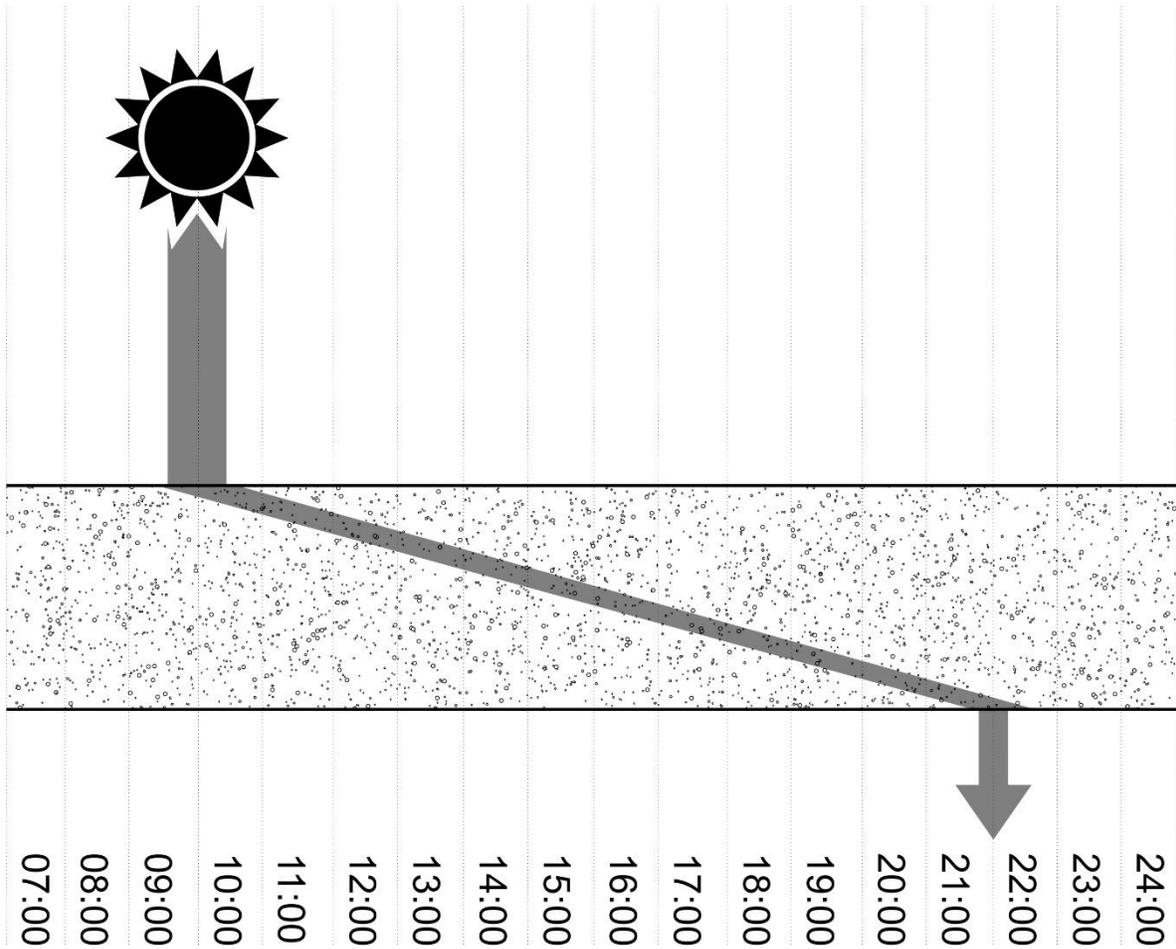


Figura 4.9. Desfase de la onda térmica.

Entre más grande es el desfase, más tiempo tarda la transferencia de calor. Un desfase depende principalmente de las propiedades del material (Neila, 2004):

$$d = 0.0167 \cdot \frac{t}{2} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot C_e}{\pi \cdot \lambda \cdot t}} \cdot e$$

Desfase de la onda térmica

Donde:

d – desfase de la onda térmica (h);

t – el periodo de fenómeno, que por el movimiento del sol es 24h;

ρ – densidad del material (kg/m^3);

C_e – calor específico del material ($\text{kJ/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$);

λ – conductividad térmica del material ($\text{W/ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$);

e – espesor del material.

Se necesita que el pico de las ganancias de calor traspase al interior en los momentos más fríos del día, y la energía se aproveche para calentar los espacios habitados. Cuando la temperatura exterior es máxima – adentro se debe recibir la mínima cantidad de calor. Esto significa que la onda térmica tiene que desfasarse medio periodo. Para tener un desfase de la onda térmica de 12 horas, las propiedades de un material tienen que cumplir con la siguiente ecuación:

$$\sqrt{\frac{\rho \cdot C_e}{\pi \cdot \lambda \cdot 24}} \cdot e = 60$$

Variables de un material para un desfase de 12 h

4.5.1.1 Materiales

Es preferible que la capa de acumulación tenga el menor espesor posible, esto significa menores costos de producción, una estructura constructiva más simple y menos impacto a la estética de la vivienda. Cuanto más grande es el valor

de las propiedades de los materiales de la variable $\frac{\rho \cdot C_e}{\lambda}$, menor es el espesor de la capa que se necesita para desfase la onda térmica. En consecuencia, el material debería de tener altos valores de densidad y calor específico, y baja conductividad térmica. Los materiales constructivos de mayor coincidencia según el catálogo CTE (Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción, 2006) son:

Tabla 4.7. Materiales constructivos adecuados para un desfase de la onda térmica por 12 horas.

Material	ρ (kg/m ³)	λ (W/m· °C)	C_e (J/kg· °C)
Madera conífera	520	0.15	1600
Corcho comprimido	500	0.10	1560
Linóleo natural	1200	0.17	1400
Caucho natural	1200	0.17	1400
Neopreno	1240	0.23	2140

El catálogo CTE (2006) no provee algunos parámetros de los aislantes térmicos, los cuales también podrían ser adecuados para desfase la onda térmica por más tiempo, ya que se sabe que su conductividad térmica es baja. Los aislantes térmicos que tienen altos valores de densidad térmica y calor específico (Willems & Wolfgang, 2011) son:

Tabla 4.8. Aislantes térmicos adecuados para un desfase de la onda térmica por 12 horas.

Material	ρ (kg/m ³)	λ (W/m· °C)	C_e (J/kg· °C)
Arlita	550	0.08	1100
Cáñamo raspado	150	0.06	1500
Fibra de madera	250	0.05	1850
Lana de madera	300	0.10	2100
Cocos	90	0.05	1500
Algas	75	0.05	2000

4.5.1.2 Espesor de la capa

Con base en las propiedades de los materiales se calcula el espesor de la capa necesario para tener un desfase de la onda térmica por medio periodo. Adaptando la ecuación de desfase de onda térmica por 12 horas, el espesor se encuentra en la siguiente manera:

$$e = \frac{60}{\sqrt{\frac{\rho \cdot C_e}{\pi \cdot \lambda \cdot 24}}} \quad [12]$$

Espesor necesario de la capa para un desfase de 12 h

4.5.1.3 Temperatura de la capa

La capa de la masa térmica se encuentra en contacto con la capa de aluminio de la cual recibe las grandes variaciones térmicas. Como se ha mencionado anteriormente, por las propiedades térmicas de los materiales, la variación de la temperatura en conducción por su medio es mínima. La cantidad de calor que se transfiere por el material depende de su transmitancia térmica (Kern, 1965):

$$\frac{\Delta Q_{cond}}{\Delta t} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

Cantidad de calor por conducción

Y la energía calorífica que se acumula en un material depende de su calor específico C_e (J/kg·°C) y su masa m (kg) (Neila, 2004):

$$Q = C_e \cdot m \cdot (T_{final} - T_{inicial})$$

Energía calorífica interna

Cuando masa m (kg) de un metro cuadrado de material es igual a (Valera, 2005):

$$m = \rho \cdot e$$

Masa de un metro cuadrado de material

La temperatura final de un metro cuadrado de un material después de una hora se puede calcular aplicando la siguiente ecuación:

$$T_{final} = \frac{U \cdot \Delta T \cdot 3600}{C_e \cdot \rho \cdot e} + T_{inicial} \quad [13]$$

Temperatura final de un metro cuadrado de un material después de una hora

4.5.2 Materiales de cambio de fase

Existe otro método para acumular la energía calorífica aplicando materiales de cambio de fase (PCM). Como se ha mencionado anteriormente, estos materiales acumulan energía térmica al cambiar su estado físico y la liberan al regresar al estado previo. La selección de estos materiales y sus espesores óptimos emplean una metodología distinta a la utilizada para los materiales tradicionales.

4.5.2.1 Materiales

Con el objetivo de elegir un PCM adecuado para el sistema, se analizan las temperaturas que éste obtiene durante los días extremos térmicamente del año. Según el diseño del sistema, la energía térmica se recibe de la lámina de aluminio. Como todavía no se conoce el material requerido, ni sus propiedades, se aproxima la temperatura de fusión basándose en las propiedades de los materiales de la masa térmica.

Se toma el promedio de la temperatura horaria de la capa de acumulación durante el día más frío del año de los materiales de construcción como el punto de fusión del material de cambio de fase como referencia de que el material alcanza a fundirse aun durante los días de frío. Entonces, el material se escoge basándose en el punto de fusión requerido.

4.5.2.2 Espesor de la capa

En el caso de los materiales de cambio de fase, el espesor de la capa depende de la cantidad de calor latente. Idealmente el material absorbe toda la energía solar para derretirse y mantenerse a temperatura constante. La mayor cantidad de energía calorífica se recibe durante el día más caliente del año y toda la energía recibida debería de ser utilizada en el proceso de fusión. De otra manera, una vez derretido el material éste se calienta relativamente rápido.

Se necesita un espesor de PCM que permita absorber toda la energía sin aumentar la temperatura. Esto significa que toda la energía calorífica recibida

durante el día más caliente del año debe de ser absorbida por el material de cambio de fase para su fusión:

$$Q_{cond} = Q_{fusión}$$

Donde:

Q_{cond} – energía calorífica recibida durante en día más caliente del año (J);

$Q_{fusión}$ – energía calorífica de fusión de un material para su cambio se estado (J).

Como el material de cambio de fase debe de ser ubicado en un contenedor, la energía se obtiene por conducción de éste. En el proceso de fusión se calculan sólo las ganancias de calor por conducción por el tiempo que esto sucede:

$$Q_{cond} = U \cdot (T_{cont} - T_{PCM}) \cdot t$$

Energía que obtiene un PCM de la capa exterior en proceso de conducción

Donde:

U – transmitancia térmica del material ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

T_{cont} – temperatura promedio del contenedor cuando está superior a la temperatura del PCM ($^\circ C$);

T_{PCM} – temperatura inicial del material ($^\circ C$);

t – tiempo en el cual la temperatura del contenedor está superior a la del PCM (s).

Energía de fusión de un material depende de su calor latente, densidad y el espesor:

$$Q_{fusión} = C_L \cdot \rho \cdot e$$

energía de fusión de un material

Donde:

C_L – calor latente del material (kJ/kg);

ρ – densidad del material (kg/m³);

e – espesor del material (m).

Entonces:

$$U \cdot (T_{cont} - T_{PCM}) \cdot t = C_L \cdot \rho \cdot e$$

Energía de fusión de un material equivalente a la energía que él recibe durante el 9 de mayo

Cuando

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

El espesor necesario de un material de cambio de fase es:

$$e = \sqrt{\frac{\lambda \cdot (T_{cont} - T_{PCM}) \cdot t}{C_L \cdot \rho}} \quad [14]$$

Espesor necesario de la capa de PCM

4.5.2.3 Temperatura de la capa

Para calcular las temperaturas horarias de los PCM se aplica la misma ecuación [13] como en el caso de los materiales tradicionales, con la diferencia de que cuando la temperatura de un PCM alcanza la temperatura de su fusión, deja de aumentar su temperatura y la energía que se recibe se consume por el material para derretirse. Se toma en cuenta que los parámetros de los materiales en el estado líquido y en el estado sólido son diferentes.

4.6 Aislamiento térmico

La gran cantidad de energía térmica se acumula en la masa térmica por sus propiedades, las cuales dificultan la difusión del calor. Aun así, el calor sigue transmitiéndose de un material caliente hacia las masas frías. Como el sistema de techo se mantiene en una temperatura mayor que los espacios interiores de la vivienda, se tiene que procurar que este calor se quede dentro del sistema.

Para cuidar los espacios habitados del sobrecalentamiento, se añade una capa de aislante térmico en la parte inferior del sistema de techo. Como se mencionó anteriormente, un aislante térmico es aquel material que se resiste a transmitir la energía calorífica, o más bien, el que tiene baja conductividad térmica:

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

Resistencia térmica

4.6.1 Material

Existe una gran variedad de aislantes térmicos, desde materiales naturales hasta fabricados especialmente para este propósito.

Tabla 4.9. Aislantes térmicos y sus propiedades.

Material	ρ (kg/m ³)	λ (W/m·°C)	C_e (J/kg·°C)
Poliestireno Expandido		0.039 - 0.029	
Poliestireno Extruido		0.039 - 0.029	
Lana mineral	30 - 160	0.050 - 0.031	840
Arcilla Expandida	325 - 750	0.148 - 0.095	
Panel de perlita expandida	140 - 240	0.062	
Panel de vidrio celular	100 - 150	0.050	
Corcho	150	0.039	1560
Algodón	25 - 60	0.040	840
Arlita	300 - 800	0.080	1100
Vermiculita	60 - 140	0.053	
Cáscaras de trigo	90	0.060	
Lino	20 - 50	0.040 - 0.050	1500
Pellas de cereales	1050 - 115	0.050	
Cáñamo	20 - 150	0.040 - 0.080	1500
Virutas de madera	70	0.045	
Celulosa	30 - 60	0.039	1900
Fibra de madera	30 - 250	0.040 - 0.060	1600 - 2100
Lana de madera	350 - 600	0.090 - 0.100	2100
Cocos	70 - 110	0.045 - 0.050	1500
Cañas	190 - 220	0.045 - 0.065	1300
Algas	70 - 80	0.045	2000
Paja	80 - 600	0.045 - 0.130	
Hierba	25 - 65	0.040	2100
Lana de oveja	20 - 80	0.043	1000

Fuente: Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción (2006) y Willems & Wolfgang (2011).

4.6.2 Espesor de la capa

Finalmente, para escoger el espesor óptimo para la capa de aislamiento térmico del sistema del techo, se comparan las propiedades de los materiales seleccionados para rebotar la onda térmica. El más adecuado es aquel que rebota

la mayor parte del calor. Esto significa que el aire se guarda dónde debe y fluye mejor por los espacios definidos (la tubería para bajar el aire caliente y entradas de éste definidas).

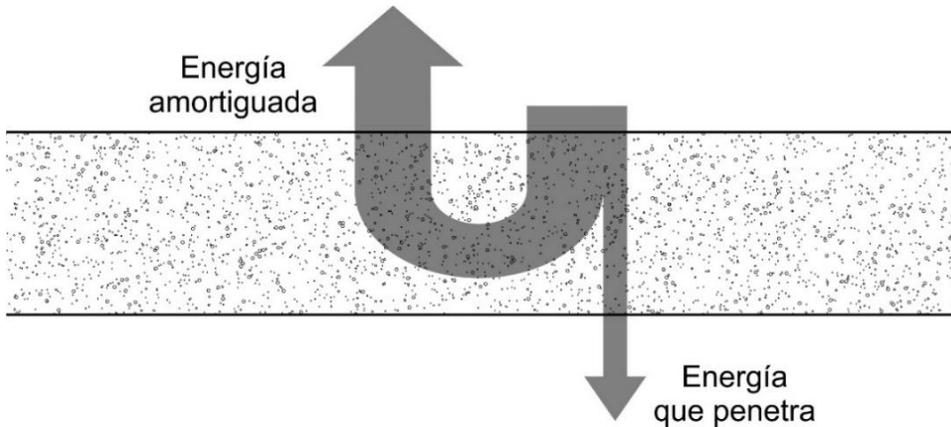


Figura 4.10. Amortiguación de la onda térmica. Fuente: Neila (2004) modificado.

El proceso de rebote de esta energía se llama amortiguación de la onda térmica (Neila, 2004) y se expresa de la siguiente manera:

$$f_a = 1 - e^{(-0.0167 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot C_e}{t \cdot \lambda}} \cdot d)}$$

Amortiguación de la onda térmica

Donde:

f_a – amortiguación de la onda térmica;

e – número de Euler $\approx 2,71828$;

t – tiempo de periodo en horas;

d – espesor de la capa (m).

f_a expresa la parte de la onda térmica que se rebota, en un caso ideal, este valor estaría igual a 1, lo que representa el 100% de la cantidad de calor que se recibe. En práctica se busca que el valor $e^{(-0.0167 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot C_e}{t \cdot \lambda}} \cdot d)}$ sea lo más cercano posible a 0. En el caso del sistema del techo con masa térmica se requiere que al menos se amortigüe el 50% del calor. Para lograrlo se debe de cumplir la siguiente ecuación:

$$e^{(-0.0167 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot C_e}{t \cdot \lambda}} \cdot d)} = 0.5$$

$$d = \frac{41.9}{\sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot C_e}{t \cdot \lambda}}} \quad [15]$$

4.7 Circulación del flujo de aire

La climatización de una vivienda está en la función de la circulación del flujo de aire entre sus espacios y el sistema de techo. Se aprovechan los procesos naturales de convección y se implementa una ayuda mecánica para ventilar los espacios en base a las necesidades. Este tipo de ventilación se denomina ventilación natural forzada (Neila, 2004).

El sistema de techo se beneficia del proceso de convección natural de tal manera que el aire caliente acumulado en el techo no desciende. Gracias a este fenómeno, el aire caliente no se mezcla con el aire de los espacios habitados y permanece en su lugar de almacenamiento.

Por otra parte, cuando la temperatura interior es menor que la temperatura de confort, el aire caliente acumulado en el techo debe de circular por los espacios interiores con el propósito de calentarlos.

4.7.1 Circulación del flujo de aire en modo de calefacción

Se emplea una fuerza mecánica para combatir el desplazamiento del aire caliente hacia arriba. Un ventilador puede forzar el movimiento del aire caliente desde el techo hasta el piso. Idealmente, este aire entra al espacio por la parte inferior y sale naturalmente por la parte superior. De esta manera todo el espacio recibe el calor uniformemente.

El movimiento del aire sucede a cierta velocidad y de ella depende que tan rápido se calientan los espacios. Se debe de tomar en cuenta que, el movimiento del aire afecta a la sensación térmica, después de los 0.15 m/s cada aumento de velocidad por 0.075 m/s baja la sensación térmica por 1° C (Bradshaw, 1985). La manera de encontrar la velocidad de aire que se necesita para disminuir la sensación térmica por T_{sens} ° C se puede expresar en la siguiente ecuación:

$$v = 0.15 + 0.075 \cdot T_{sens} \quad [16]$$

Dependencia de la sensación térmica de la velocidad de aire

Donde:

v – velocidad de aire (m/s);

T_{sens} – sensación térmica (° C).

Con el propósito de no desperdiciar el calor almacenado y calentar los espacios más rápido posible, la velocidad del aire dentro del espacio habitado debe de ser igual o menor a la velocidad con la cual sensación térmica disminuya 1° C. Esta es la velocidad de aire que se necesita que traspase dentro del espacio habitado. Pero no es la misma velocidad que sale del ventilador, porque esta se

modifica según el área por el cual pasa el flujo de aire, debido a que el caudal de aire siempre es igual (Valera, 2005):

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad [17]$$

Caudal de aire

Donde:

v_1 – velocidad de aire en el espacio 1 (m/s);

A_1 – área del espacio 1 (m²);

v_2 – velocidad de aire en el espacio 2 (m/s);

A_2 – área del espacio 2 (m²).

4.7.2 Circulación del flujo de aire en modo de ventilación

Como se ha mencionado anteriormente, durante los periodos de calor, el aire caliente que se almacena en el techo no desciende. Pero los espacios habitados pueden calentarse por radiación. Con la finalidad de evitar el sobrecalentamiento de los espacios de una vivienda por radiación en verano, el sistema del techo tiene un modo de ventilación empleando el efecto Venturi.

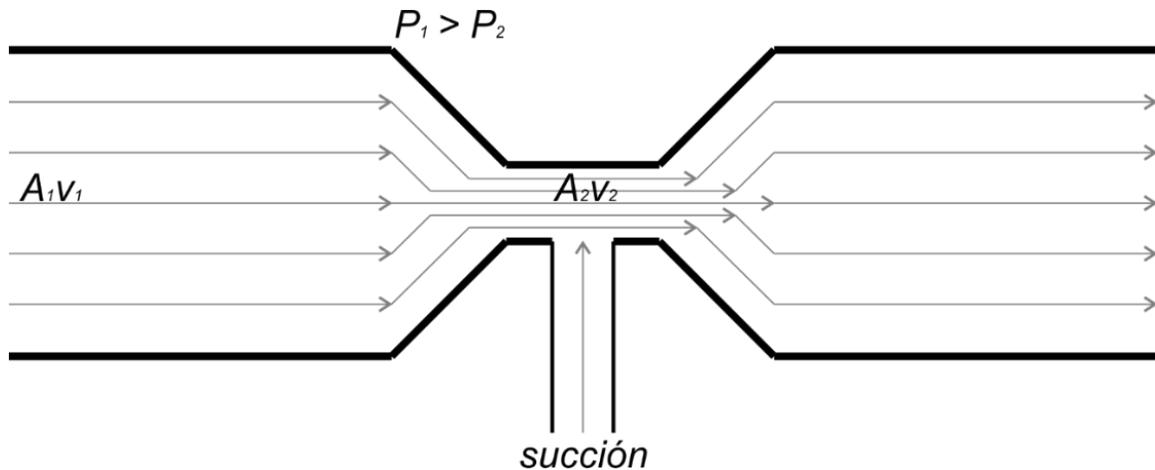


Figura 4.11. Efecto Venturi.

El caudal de aire siempre es constante a lo largo de su camino. Si el área de espacio se reduce, se aumenta la velocidad. El cambio de velocidad afecta a la presión del fluido. En el espacio donde el área se reduce y la velocidad del aire se incrementa, la presión baja. La caída de presión en este espacio causa succión de los fluidos hacia él (Figura 4.11).

La implementación de un tubo, el cual capta el viento y tiene una reducción del área en el camino de flujo de aire, ayuda a succionar el aire caliente de dentro del techo y de los espacios interiores. En el caso de que la temperatura interior continúe incrementándose a pesar de la implementación del efecto Venturi, se adapta el ventilador mencionado anteriormente para ventilar los espacios durante el verano.

Se calcula la velocidad óptima dentro de los espacios habitados para reducir la sensación térmica por 5° C aplicando la ecuación [16] y luego se encuentra la velocidad necesaria a la salida del ventilador a base de la ecuación [17].

5 RESULTADOS

Aplicando la metodología descrita anteriormente se obtiene como resultado una selección adecuada de las propiedades del sistema para lograr el objetivo.

5.1 Temperatura óptima del sistema de techo

La meta del sistema de techo es mantener la temperatura de confort dentro de una vivienda unifamiliar. Esta temperatura en Santiago de Querétaro es igual a 23° C, la cual se encuentra aplicando la ecuación [1].

Como el sistema no es hermético y una parte de la energía calorífica se pierde por las renovaciones de aire, se calcula esta cantidad de energía para compensar. Primero, aplicando la ecuación [2] se encuentra que se tiene que renovar 8 l/s de aire en un metro cuadrado para todos los espacios de una vivienda unifamiliar en Santiago de Querétaro. Luego, aplicando las ecuaciones [3] y [4] se calcula que en invierno se pierden 51.6 W de energía calorífica por cada metro cuadrado y en verano se obtienen 45.6 W.

Se necesitan hasta 51.6 W de energía térmica para recuperar el calor que se pierde por las renovaciones de aire. Esta cantidad de calor equivale a la cantidad de calor que se obtiene de la masa térmica por convección $\frac{Q_{conv}}{t}$. Entonces, la temperatura dentro del sistema de techo para calentar un metro cuadrado de aire hasta los 23° C tiene que ser igual a 26.04° C (se aplica ecuación [5]). Con la finalidad de simplificar los cálculos y agregar un valor al sistema en continuación se utiliza 27° C como la temperatura óptima del sistema.

5.2 Absorción de la radiación solar

Para alcanzar la temperatura necesaria dentro del sistema se necesita absorber cierta cantidad de la radiación solar. A continuación, se definen los parámetros de la capa de absorción, como el material, el espesor y el acabado, con el propósito de mantener 27° C en promedio dentro de la capa durante el día más frío del año.

5.2.1 Material

Aplicando la ecuación [7] y utilizando los datos proporcionados en la Tabla 5.1 se obtienen los valores porcentuales de efectividad de los materiales en relación de su conductividad térmica y precio:

Tabla 5.1. Valor porcentual de efectividad de los materiales.

Material	λ (W/m· °C)	Precio (\$/lb)	Valor
Aluminio	0.6	0.3	2.0
Cobre	1	0.9	1.1
Latón	0.3	1	0.3
Zinc	0.3	0.4	0.8

El valor más alto indica el material más adecuado para el sistema del techo con masa térmica, ya que es eficiente y económico. En este caso el aluminio es el material que proporciona mejores resultados.

5.2.2 Espesor

Una lámina de aluminio de 1 mm de grosor (calibre 19) es común en el mercado y es un valor simple para realizar los cálculos.

De esta manera, la capa de aluminio de 1 mm de grosor expuesta hacia el exterior tiene una transmitancia térmica de 25 W/m²·°C, la cual se encuentra aplicando la ecuación [8] y tomando los datos de las resistencias superficiales de un flujo de calor descendiente de la tabla 4.3.

5.2.3 Superficie

Con la finalidad de definir el acabado de la superficie expuesta hacia el exterior, primero se calcula la absorción térmica necesaria horaria durante el 8 de enero aplicando la ecuación [10]. Se asume que la temperatura inicial de la capa es igual a la del ambiente antes de que se reciban los primeros rayos del sol y, a las

7:00 horas, es igual a 3.2° C. A esta hora la radiación solar es de 41 W/m² (Tabla 4.1).

Para tener la temperatura del sistema $T_{sistema}$ en 27° C, con transmitancia térmica de la capa de $U = 25 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$, la absortancia térmica necesaria a las 7:00 horas el 8 de enero es 11.6 (se aplica la ecuación [9]).

Como el valor calculado se encuentra fuera del rango, se utiliza el valor máximo posible de la absortancia térmica $\alpha = 1$. Este valor porcentual significa que se absorbe toda la radiación solar y que la superficie alcanza a calentarse hasta los 4.5° C después de la primera hora del sol en día más frío del año (se aplica la ecuación [10]). Los valores de la absortancia térmica requerida horaria durante el 8 de enero están presentados en la siguiente tabla:

Tabla 5.2. Absortancia térmica requerida para mantener el promedio de 27°C en un metro cuadrado de la capa de aluminio durante el día más frío de año en Santiago de Querétaro.

8 de enero	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Tsup	4.5	15.4	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0
a	1.0	1.0	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	2.8

El promedio requerido de la absortancia térmica para mantener la temperatura de la capa alrededor de los 27° C en un metro cuadrado de la capa de aluminio durante el día más frío del año en Santiago de Querétaro es $\bar{\alpha} = 0.6$, lo que equivale a un color claro según la Tabla 4.6.

5.2.4 Temperatura de la capa

Se puede calcular la cantidad de calor que absorbe la capa de aluminio después de cada hora y la temperatura que esta alcanza. Tomando el valor de absortancia térmica $\alpha = 0.6$ y los datos climáticos de Querétaro presentados en el subcapítulo 5.3, se aplican las ecuaciones [10] y [11] para calcular las temperaturas

horarias de la capa de aluminio durante los días extremos, que se presentan en el siguiente diagrama:

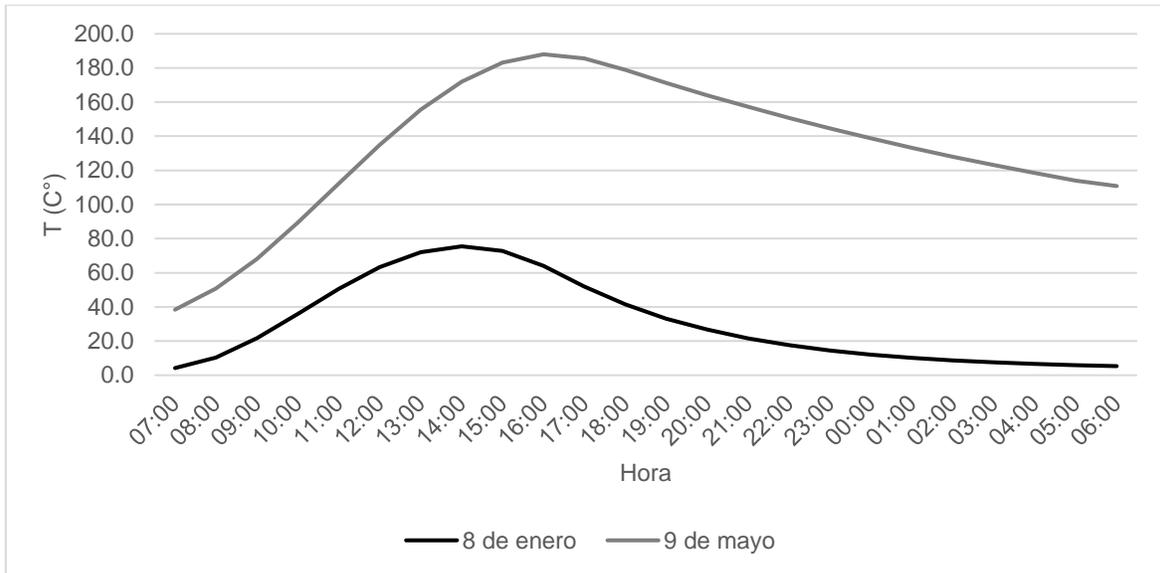


Figura 5.1. Temperatura de la capa de absorción térmica durante los días extremos.

Como se puede observar en la Figura 5.1, una lámina de aluminio durante el 8 de enero se calienta hasta 75.5°C a las 14:00 horas. Durante el día más caliente de año ésta alcanza 188°C a las 16:00 horas, lo que causa preocupaciones por el sobrecalentamiento en las épocas de calor.

5.2.5 Capa reversible

Una posible solución para absorber suficiente energía solar en invierno y evitar el sobrecalentamiento en las épocas de calor es aplicar una capa reversible. Durante los días de pocas ganancias caloríficas se puede usar una superficie clara y durante los días calientes se puede usar el otro lado de la capa con una superficie que refleje más los rayos solares. Figura 5.2 muestra posible aplicación de la capa reversible en diferentes temporadas.

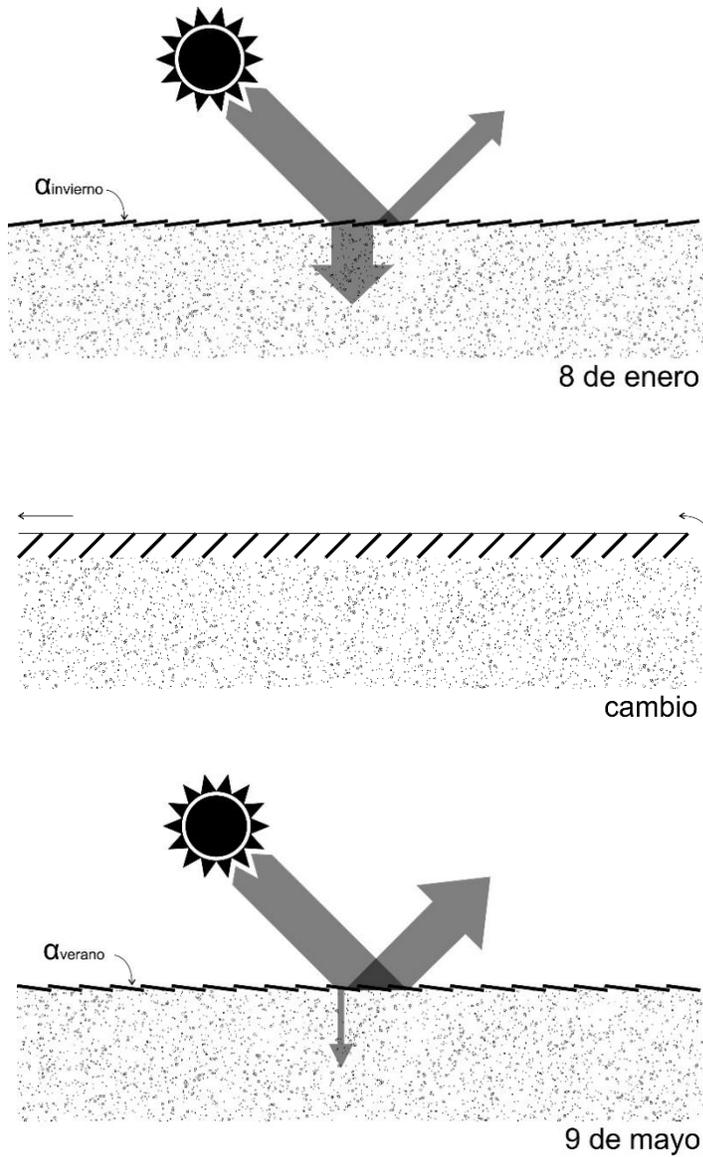


Figura 5.2. Aplicación de la capa reversible en diferentes temporadas.

La superficie que absorbe menos radiación solar es el metal pulido con un valor de absortancia térmica de 0.05 (Tabla 4.6). Nuevamente se calcula la temperatura horaria de la capa durante el 9 de mayo aplicando la ecuación [11] con un valor de absortancia térmica de 0.05 con el propósito de verificar la teoría de utilizar el reverso de la placa para disminuir las ganancias de calor en verano.

Se obtienen los siguientes resultados de la temperatura de la capa de absorción durante el 9 de mayo:

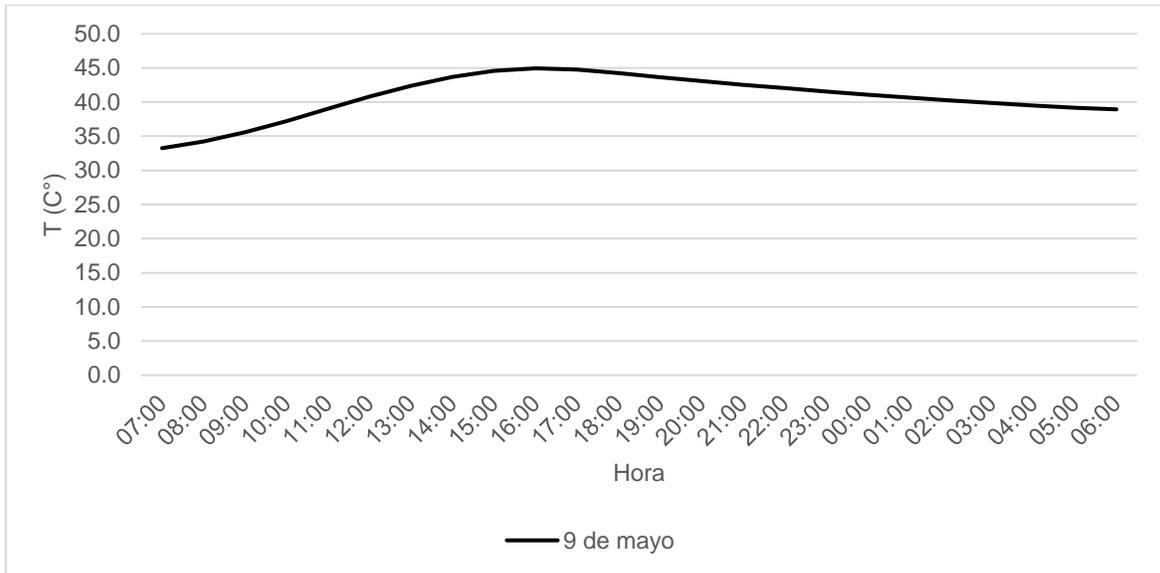


Figura 5.3. Temperatura horaria de la capa de absorción durante el 9 de mayo utilizando una superficie reflejante.

La Figura 5.3 muestra que el uso de una superficie con valor de absorción térmica de 0.05 reduce las ganancias de calor durante el 9 de mayo y la capa se calienta sólo hasta los 44.9° C a las 16:00 horas.

5.3 Acumulación del calor

La masa térmica del sistema del techo recibe calor de la capa de absorción térmica. Ésta suaviza y desfasa los picos térmicos debido a la inercia térmica de los materiales constructivos o a la fusión de los materiales de cambio de fase.

5.3.1 Masa térmica

Se relaciona la capacidad calorífica y el espesor de un material para desfasar la onda térmica por 12 horas.

5.3.1.1 Material

Como se ha mencionado anteriormente, cuanto más grande es el valor de las propiedades de los materiales de la variable $\frac{\rho \cdot C_e}{\lambda}$, menor es el espesor de la capa que se necesita para desfasear la onda térmica por 12 horas. Para comparar los materiales se calcula este valor y se presenta en las siguientes tablas:

Tabla 5.3. Materiales constructivos adecuados para un desfase de la onda térmica.

Material	ρ (kg/m ³)	λ (W/m· °C)	C_e (J/kg· °C)	$\frac{\rho \cdot C_e}{\lambda}$
Madera conífera	520	0.15	1600	5546666
Corcho comprimido	500	0.10	1560	7800000
Linóleo natural	1200	0.17	1400	9882353
Caucho natural	1200	0.17	1400	9882353
Neopreno	1240	0.23	2140	11537391

Tabla 5.4. Aislantes térmicos adecuados para un desfase de la onda térmica.

Material	ρ (kg/m ³)	λ (W/m· °C)	C_e (J/kg· °C)	$\frac{\rho \cdot C_e}{\lambda}$
Arlita	550	0.08	1100	7562500
Cáñamo raspado	150	0.06	1500	3750000
Fibra de madera	250	0.05	1850	9250000
Lana de madera	300	0.10	2100	6300000
Cocos	90	0.05	1500	2700000
Algas	75	0.05	2000	3000000

De todos los materiales proporcionados, el neopreno es el que ofrece los mejores resultados. Lamentablemente, este material no puede ser considerado como parte del sistema porque está en la lista roja de los materiales constructivos hecha por “The International Living Future Institute”. “Los materiales constructivos de la lista roja son nocivos para las criaturas vivas incluyendo el humano o el ambiente” (Kesavan, 2016)

Entonces, los materiales que son ecológicos y buenos para desfazar la onda térmica son el linóleo natural, el caucho natural, la fibra de madera y el corcho comprimido.

5.3.1.2 Espesor de la capa

Usando los parámetros de los materiales de las Tablas 5.3 y 5.4 y aplicando la ecuación [12], se encuentran los espesores óptimos de los materiales seleccionados para desfazar la onda térmica por 12 horas:

Tabla 5.5. Espesor necesario de los materiales seleccionados para un desfase de la onda térmica por 12 horas.

Material	ρ (kg/m ³)	λ (W/m· °C)	C_e (J/kg· °C)	e (m)
Linóleo o caucho	1200	0.17	1400	0.17
Fibra de madera	250	0.05	1850	0.17
Corcho comprimido	500	0.10	1560	0.19

De la Tabla 5.5 se puede observar que una capa de linóleo, caucho o de fibra de madera necesita tener 17 cm de grosor y una capa de corcho necesita tener 19 cm de grosor con la finalidad de desfazar la onda térmica por medio periodo.

5.3.1.3 Temperatura de la capa

Se sabe que la temperatura de la capa de absorción tiene que ser igual a 27° C, y que la temperatura del aluminio a las 8:00 en 8 de enero es igual a 4.2° C (Figura 5.1) y el 9 de mayo es de 33.3° C (Figura 5.3). Se puede aplicar la ecuación [13] y encontrar la temperatura de la capa de masa térmica después de la primera hora de sol, que está en contacto con la capa de absorción.

Tabla 5.6. Temperatura de la capa de acumulación a las 8:00 horas en 8 de enero.

Material	e (m)	λ (W/m· °C)	C_e (J/kg· °C)	ρ (kg/m ³)	$T_{inicial}$ (°C)	T_{final} (°C)
Linóleo o caucho	0.17	0.17	1400	1200	27	26.7
Fibra de madera	0.17	0.05	1850	250	27	26.7
Corcho	0.19	0.10	1560	500	27	26.7

Tabla 5.7. Temperatura de la capa de acumulación a las 8:00 horas en 9 de mayo.

Material	e (m)	λ (W/m· °C)	C_e (J/kg· °C)	ρ (kg/m ³)	$T_{inicial}$ (°C)	T_{final} (°C)
Linóleo o caucho	0.17	0.17	1400	1200	27	27.1
Fibra de madera	0.17	0.05	1850	250	27	27.1
Corcho	0.19	0.10	1560	500	27	27.1

Las Tablas 5.6 y 5.7 representan las temperaturas de los materiales seleccionados después de las primeras horas del sol en los días extremos utilizando la ecuación [13].

Tomando en cuenta que la temperatura inicial de la siguiente hora es igual a la temperatura final de la hora anterior, se encuentran las temperaturas horarias de la capa de acumulación durante los días extremos:

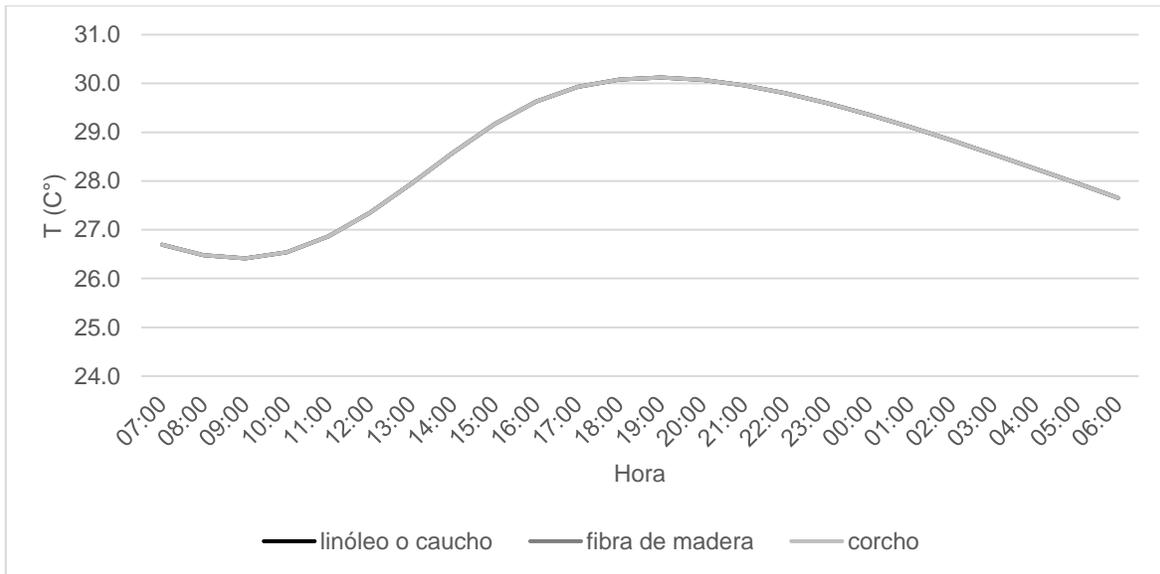


Figura 5.4. Temperatura de la masa térmica durante el 8 de enero.

La Figura 5.4 representa la curva térmica horaria de los materiales seleccionados durante el 8 de enero. El diagrama muestra que una capa de masa térmica se enfría durante primeras horas de la radiación solar, pero a las 10:00 horas comienza a calentarse y alcanza los 30.1° C a las 19:00 horas. Al final del periodo, a las 6:00 horas, la temperatura de la capa de acumulación está a 27.7° C.

Como la capa de acumulación empieza a recibir el calor tres horas más tarde que la capa exterior, se recorre el periodo de tal manera que a las 9:00 horas la temperatura es mínima, de 27° C. Para apreciar la temperatura final del periodo podemos ver la siguiente gráfica:

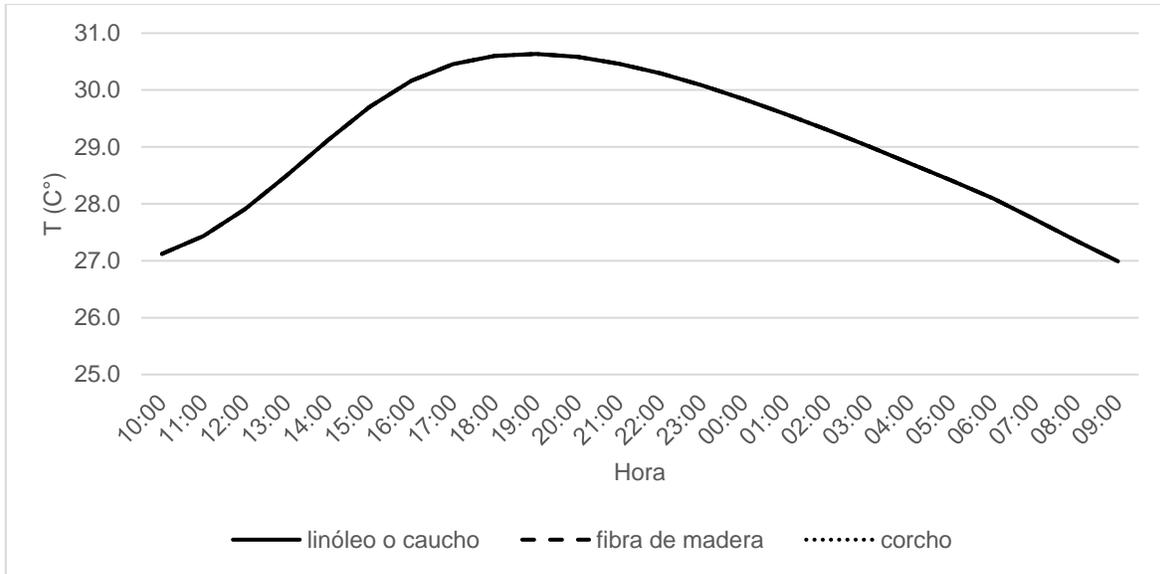


Figura 5.5. Temperatura de la masa térmica durante el 8 de enero.

En la figura 5.5 se puede apreciar que la temperatura de la capa al final del periodo es igual a los 27° C. Esto comprueba que aun durante el día más frío del año el sistema tiene suficiente energía para climatizar los espacios.

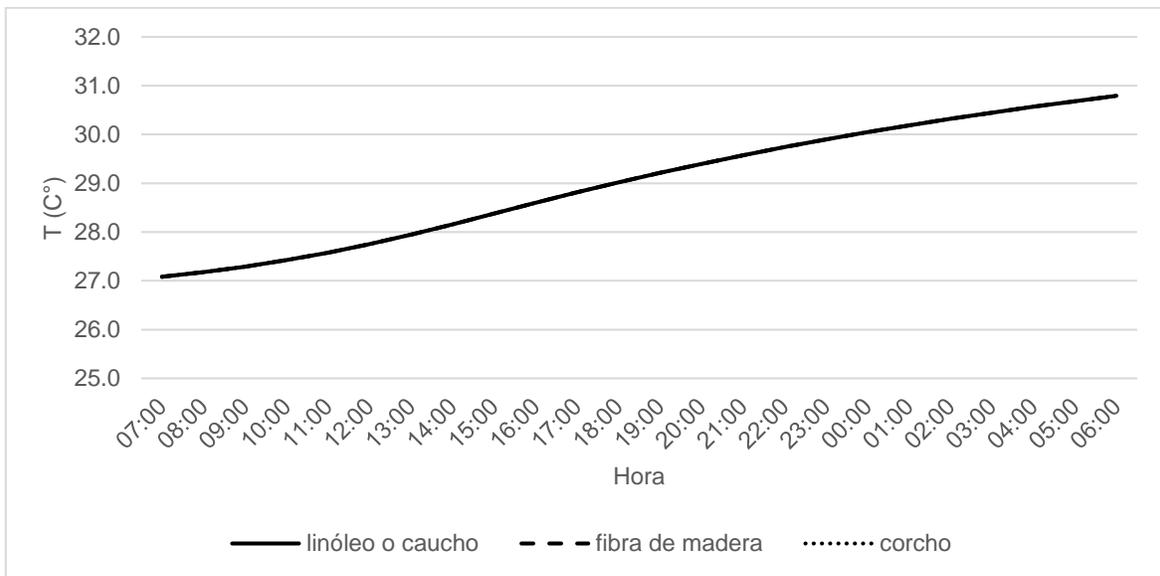


Figura 5.6. Temperatura de la masa térmica durante el 9 de mayo.

Figura 5.6 muestra la curva térmica horaria de la masa térmica con los materiales seleccionados durante el 9 de mayo. Como se puede notar en el diagrama, los materiales nunca pierden el calor durante el día más caliente del año y se alcanza una temperatura de 30.8° C al final del periodo.

5.3.2 Materiales de cambio de fase

Anteriormente se comprobó que los materiales de alta inercia térmica acumulan el calor de la radiación solar en su masa por un día completo. A continuación, se aplica metodología investigada para averiguar el funcionamiento de la misma capa utilizando materiales de cambio de fase como masa térmica.

5.3.2.1 Material

Se toma el promedio de la temperatura horaria de la masa térmica (linóleo, caucho, fibra de madera o corcho) para definir el punto de fusión necesario de los PCM. La figura 5.3.2.1.1 representa la curva y el promedio de la temperatura horaria de la capa de acumulación de calor durante el 8 de enero. Se obtiene que una temperatura de alrededor 29° C es óptima como el punto de fusión de un material de cambio de fase para el sistema de techo en Santiago de Querétaro:

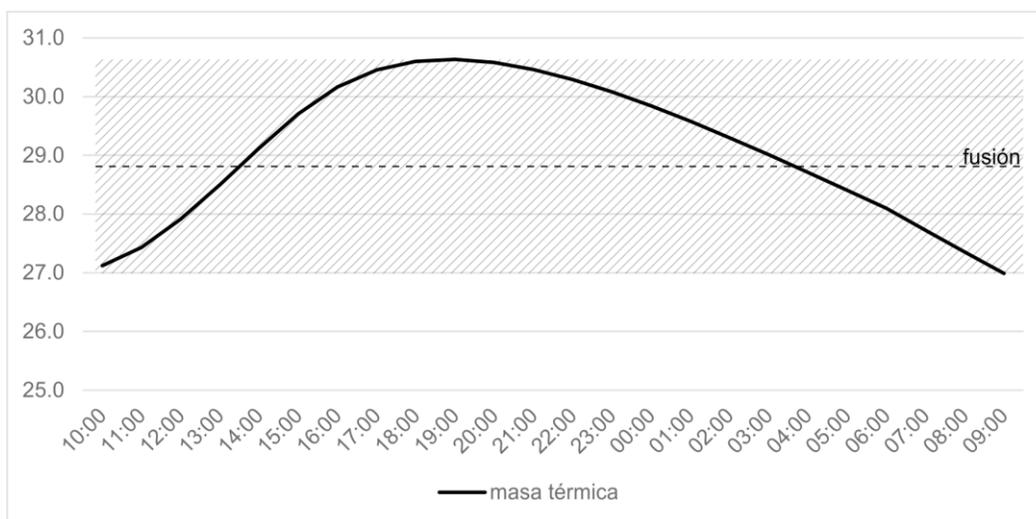


Figura 5.3.2.1.1. Temperatura óptima de fusión de la capa de acumulación de calor.

Los materiales de cambio de fase que se funden alrededor de los 29° están presentados en la siguiente tabla:

Tabla 5.8. CM que se funden alrededor de los 29° C y sus propiedades.

Material	$T_{fusión}$ (° C)	C_L (kJ/kg)	C_e (kJ/kg·°C)	ρ (kg/m ³)	λ (W/m·°C)
CaCl ₂ ·6H ₂ O	29	125	1.4-2.1	1470	1.9-0.54
Octadecano	29	243	1.9-2.25	775	0.28
Ácido cáprico	31.5	153	2.09	1004-886	0.152
Galio	30	80	0.34-0.38	6094	33

Fuente: Datos basados en investigación de Hale, Hoovers, & O'Neil (1971), Griggs & Humphries (1977), Kaushik, Pandey, Tyagi, & Tyagi (2011), Chuah, Rozanna, Sa'ari, Salmiah, & Thomas Choong (2006), García-Santos, Neila, & Oliver (2012) y Vélez, Khayet, & Zárate (2015).

Los materiales de la Tabla 5.8 tienen temperaturas de fusión alrededor de los 29° C y tienen definidas las propiedades necesarias para calcular su funcionamiento en el sistema. La CaCl₂·6H₂O, o mejor conocido como cloruro de calcio hexahidratado, es una sal hidratada, el octadecano es una parafina, el ácido cáprico pertenece en el grupo de ácidos grasos y el galio es un metal que también se funde a la temperatura cercana.

5.3.2.2 Espesor de la capa

La temperatura inicial del material de cambio de fase es 27° C como la temperatura mínima tolerable del sistema. Según los resultados calculados de la temperatura del aluminio durante el 8 de enero y el 9 de mayo en el capítulo 6, se sabe que su temperatura es superior a los 27° C por 10 horas durante el día más frío de año con un promedio de 56.1° C:

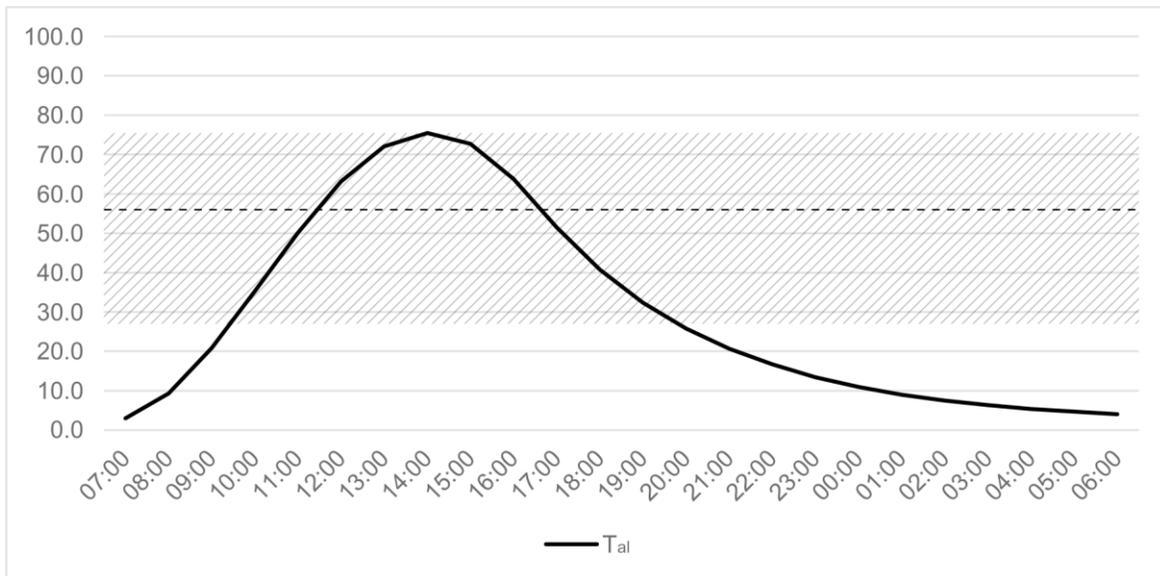


Figura 5.7. Temperatura promedio de aluminio cuando sobrepasa los 27° C durante el 8 de enero.

Como se puede observar en la figura 5.7, la superficie del PCM recibe temperaturas más altas que la temperatura de fusión aun en el día más frío de año. Es suficiente para que el material empiece a fundirse para que su temperatura se mantenga constante.

Se considera que la superficie expuesta al exterior es de color claro y que absorbe el 60% como ya se ha calculado anteriormente. Lamentablemente con el uso de los materiales de cambio de fase no se puede aplicar el diseño de la capa exterior reversible por su estado líquido. En este caso también durante el día más caliente del año se mantiene el mismo acabado de aluminio con la absorción térmica de 0.6.

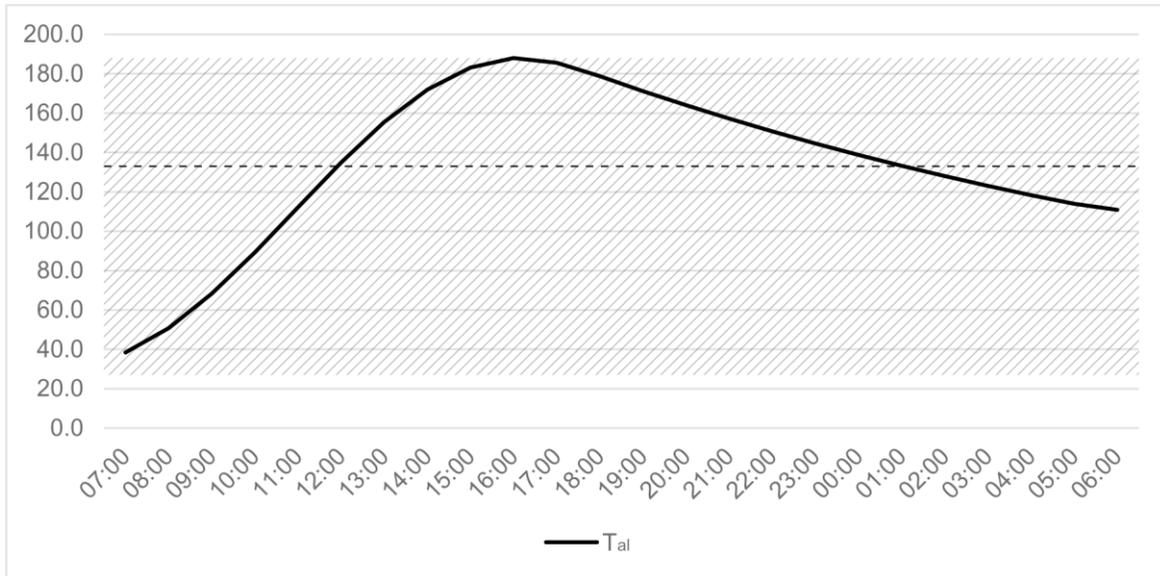


Figura 5.8. Temperatura promedio de aluminio cuando sobrepasa los 27° C durante el 9 de mayo.

La Figura 5.8 muestra que el 9 de mayo durante todo el día la temperatura del aluminio es mayor a los 27° C con un promedio de 133.8° C. Se aplica la ecuación [14] y se encuentran los espesores necesarios de los PCM seleccionados para funcionar en una zona con el nivel de radiación solar como el de Santiago de Querétaro.

Tabla 5.9. Espesor de la capa de PCM.

Material	C_L (kJ/kg)	ρ (kg/m ³)	λ (W/m·°C)	e (m)
CaCl ₂ ·6H ₂ O	125	1470	1.9	0.25
Octadecano	243	775	0.28	0.12
Ácido cáprico	153	1004	0.15	0.10
Galio	80	6094	33	0.79

5.3.2.3 Temperatura de la capa

Se aplica la ecuación [13] para calcular las temperaturas horarias de los PCM seleccionados durante los días extremos térmicamente. La Figura 5.9 muestra que todos los materiales de cambio de fase seleccionados alcanzan la temperatura de su fusión y se mantienen a esta temperatura durante casi todo el día el 8 de enero. El único material que baja el límite de la temperatura mínima requerida del sistema es el galio. Su temperatura al final de periodo es de 26.6° C:

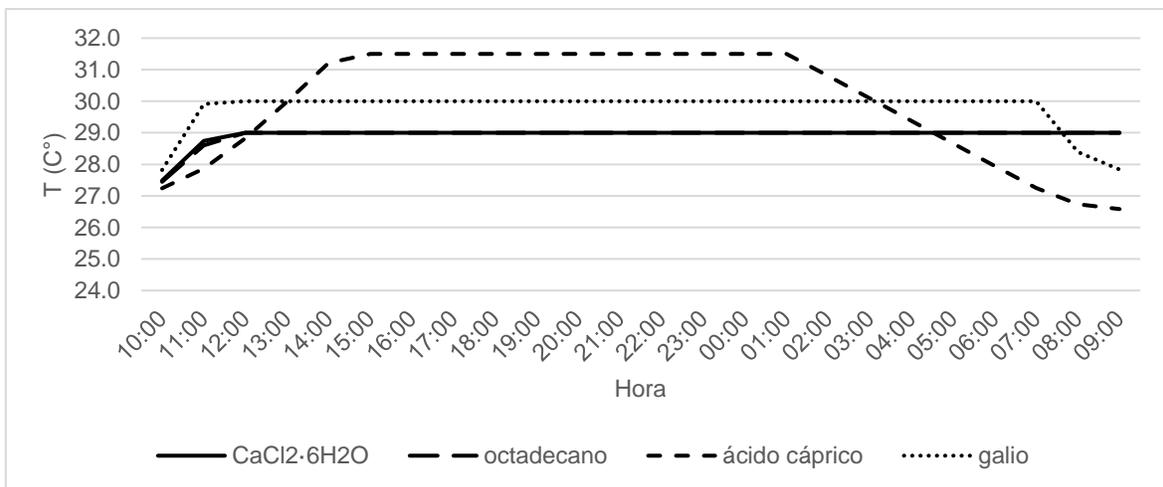


Figura 5.9. Temperatura de los PCM durante el 8 de enero.

Por otra parte, el 9 de mayo, el material que proporciona peores resultados es la sal hidratada (Figura 5.10). Esta alcanza a derretirse completamente a las 0:00 horas y continua calentandose hasta que a las 9:00 horas alcanza una temperatura de 37.7° C. El resto de los materiales se mantienen a la temperatura de su fusión:

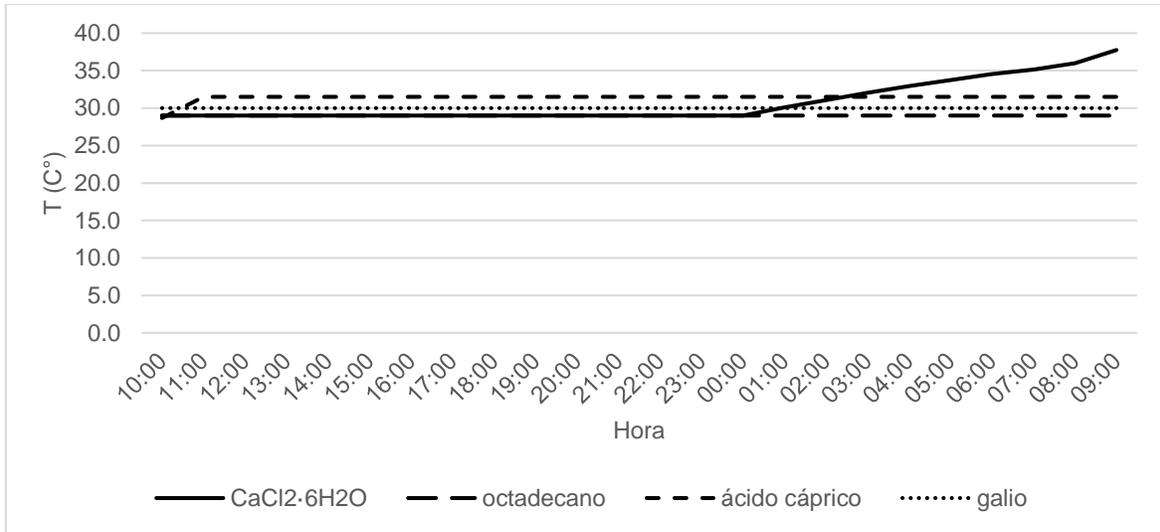


Figura 5.10. Temperatura de los PCM durante el 9 de mayo.

5.4 Aislamiento térmico

Aunque los diagramas anteriores nos indican que la temperatura dentro de la masa térmica se mantiene estable y el uso de una cámara de aire debajo de ésta suaviza los picos térmicos aún más, se recomienda la implementación de una capa de aislamiento térmico debajo de la cámara de aire para reducir la transmitancia térmica hacia los espacios habitados.

5.4.1 Material

De acuerdo a la Tabla 4.9 la menor conductividad térmica la poseen los poliestirenos, pero estos son materiales originarios del petróleo (Quintero Peña, 2013) y sus gases pueden ser tóxicos (Instituto de Desarrollo Experimental de Contrucción, 2016). Con el propósito de evitar el daño ambiental y a la salud de los usuarios, éstos no pueden ser aplicados en el sistema. Un material ecológico, como la lana mineral, el corcho o la celulosa, son las opciones más adecuadas para la capa de aislamiento térmico en el sistema del techo auto sostenible.

5.4.2 Espesor de la capa

Se aplica la ecuación [15] para definir el espesor óptimo de la capa de aislamiento térmico utilizando lana mineral, corcho o celulosa como aislamiento térmico:

Tabla 5.10. Espesor de la capa de aislamiento con materiales seleccionados para amortiguar 50% de la onda térmica.

Material	ρ (kg/m ³)	λ (W/m·°C)	C_e (J/kg·°C)	d (m)
Lana mineral	95	0.040	840	0.06
Corcho	150	0.039	1560	0.03
Celulosa	45	0.039	1900	0.06

Se necesita un capa de 3 cm de espesor de corcho para lograr el mismo resultado que una capa de 6 cm de lana mineral o celulosa.

5.5 Circulación del flujo de aire

Una vez definidas las propiedades de las capas del techo con las cuales la temperatura dentro del sistema se mantiene en alrededor de los 27° C, se buscan las variables de la circulación del flujo del aire para obtener el confort térmico dentro de los espacios de una vivienda.

5.5.1 Circulación del flujo de aire en modo de calefacción

Con base en el esquema de Bradshaw (1985), se sabe que, si la velocidad del aire que entra al espacio es mayor a los 0.225 m/s, los usuarios sienten una disminución de la temperatura (ecuación [16]). Con el propósito de aprovechar el calor almacenado y calentar los espacios más rápido posible, la velocidad máxima del aire debe de ser 0.225 m/s.

Entonces, si se asume que por cada metro cuadrado del espacio se utiliza 0.1 m^2 de conducto de aire, la velocidad del ventilador necesaria es 2.25 m/s (ecuación [17]).

La Figura 5.11 representa las medidas necesarias con el propósito de calentar los espacios adecuadamente.

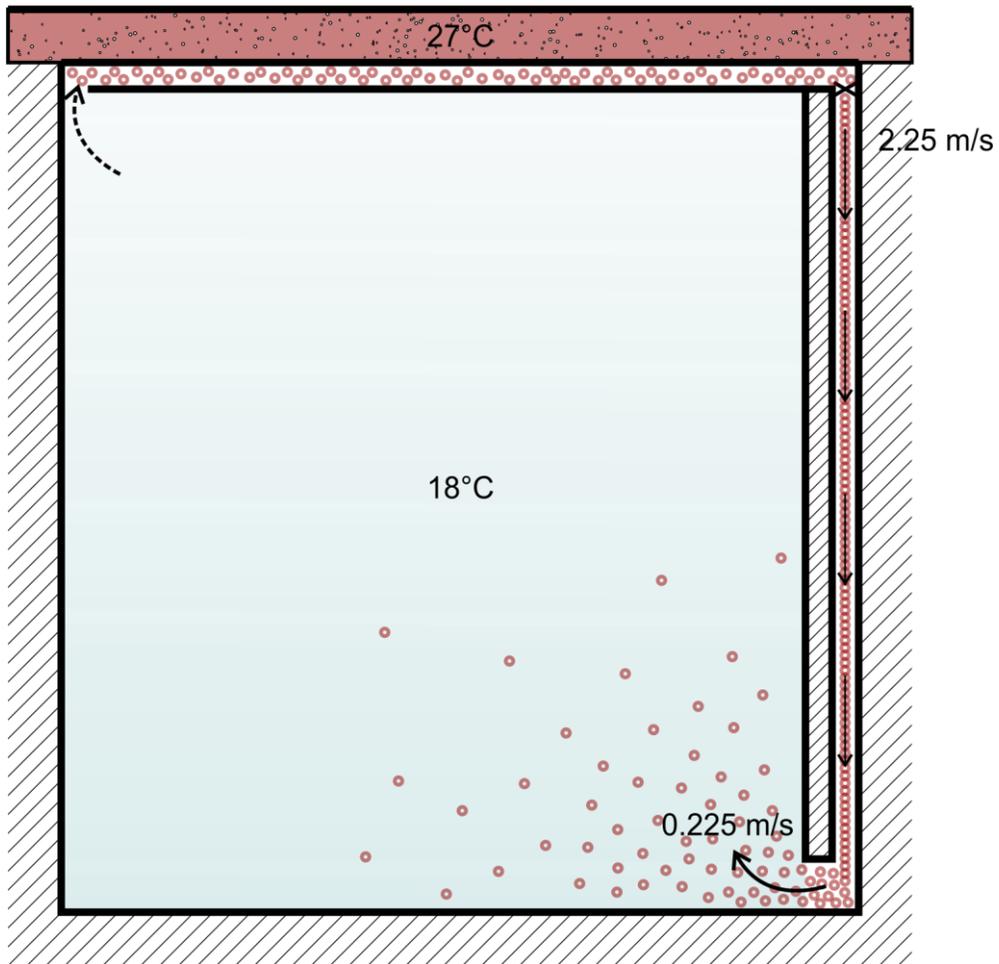


Figura 5.11. Calentamiento de los espacios con el sistema del techo.

5.5.2 Circulación del flujo de aire en modo de ventilación

La velocidad necesaria para refrescar los espacios por 5°C aplicando el esquema de Bradshaw (1985) debe de ser de 0.525 m/s dentro del espacio habitado (ecuación [16]). Para lograrlo la velocidad del aire que sale del ventilador tiene que ser de 5.25 m/s , la cual se calcula aplicando la ecuación [17] y tomando en cuenta la misma relación volumétrica entre el cuarto y los conductos.

La figura 5.12 resume las medidas necesarias del diseño del sistema para su pleno funcionamiento en verano:

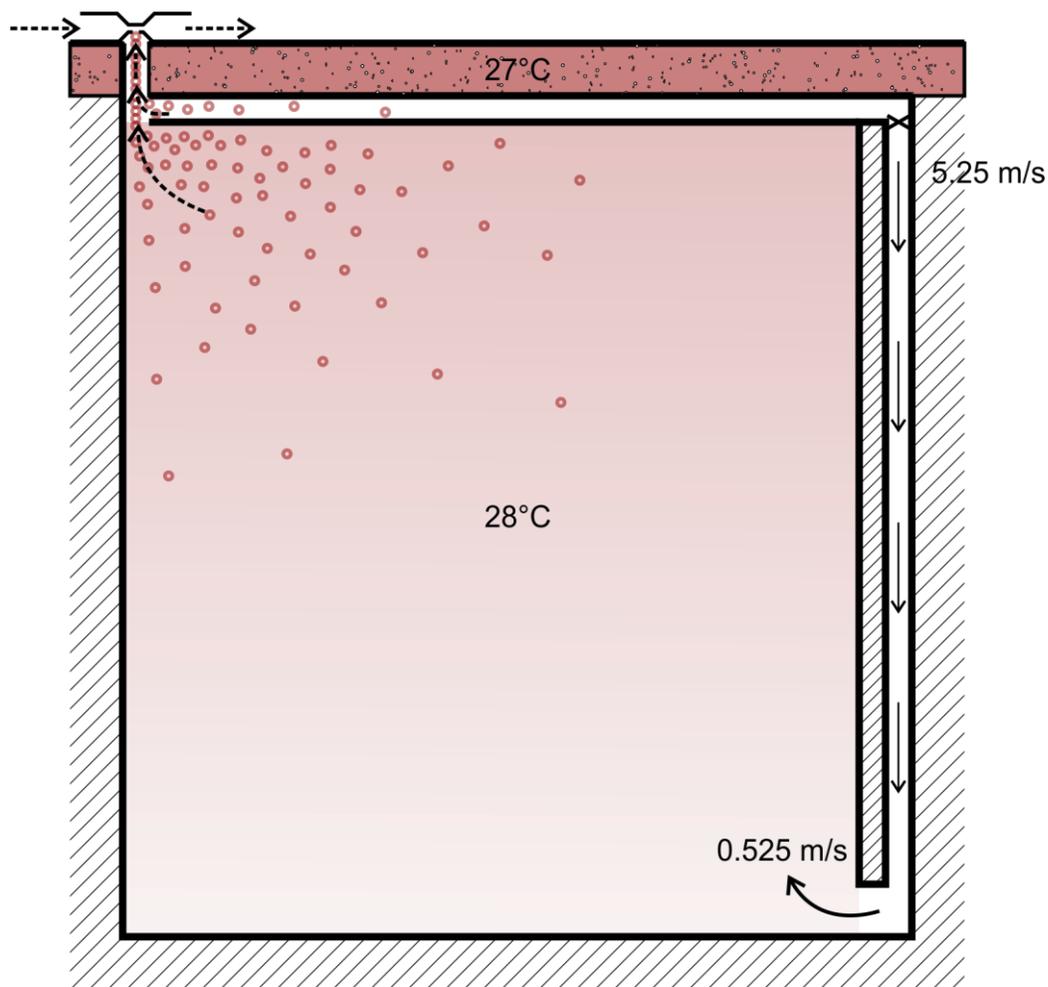


Figura 5.12. Ventilación de los espacios con el sistema del techo.

6 VALIDACIÓN Y DISCUSIÓN

Una vez que se han definido todos los parámetros necesarios del sistema de techo, se pueden comprobar algunos funcionamientos del sistema durante los días extremos térmicamente mediante simulaciones. A continuación, se presentan los procedimientos, resultados y conclusiones de las simulaciones, su comparación con los resultados obtenidos de las ecuaciones y una propuesta del diseño del sistema de techo.

6.1 Simulaciones

Con la finalidad de comprobar los resultados obtenidos de las ecuaciones termodinámicas se realizan simulaciones de elemento finito. El programa de simulaciones ingenieriles ANSYS® provee la posibilidad de verificar el traspaso de calor durante un periodo de tiempo y circulación del flujo de aire bajo un entorno real. Las simulaciones del comportamiento térmico del sistema del techo son realizadas con el análisis Transient Thermal y de la circulación del flujo de aire con el análisis Fluid Flow (CFX) del programa ANSYS.

6.1.1 Análisis térmico

Se analizan los materiales seleccionados para almacenar el calor con sus espesores respectivos durante el 8 de enero (el día más frío del año) y el 9 de mayo (el día más caliente del año). Los materiales constructivos para analizar son el linóleo y el caucho, la fibra de madera y el corcho comprimido. Con estos materiales se puede aplicar el sistema de la capa reversible de aluminio y el valor de la absorción térmica es diferentes para los dos días extremos. Los materiales de cambio de fase (PCM) que se analizan son el cloruro de calcio hexahidratado, el octadecano, el ácido cáprico y el galio. Los PCM no pueden tener una capa reversible por lo que se aplica un único valor de la absorción térmica. En todos los casos se establece una capa exterior de aluminio de 1 mm de espesor.

Además, en base al diseño se utiliza una capa de aire de 10 cm de espesor con separaciones de madera cada 30 cm y una capa interior de aislamiento térmico de 3 cm de corcho.

Se realiza un análisis térmico transitorio durante un día con los puntos de referencia después de cada hora. El análisis se genera dos veces con los parámetros de los dos días extremos. Como se mencionó anteriormente, los procesos de calor que afectan al diseño del sistema de techo son la convección, la radiación y la conducción, la cual sucede entre las capas.

Para generar las simulaciones se diseña un modelo 3D de un cuarto de una vivienda con unas medidas de 3 x 3 x 3 m con el programa Rhinoceros[®] (Figura 6.1).

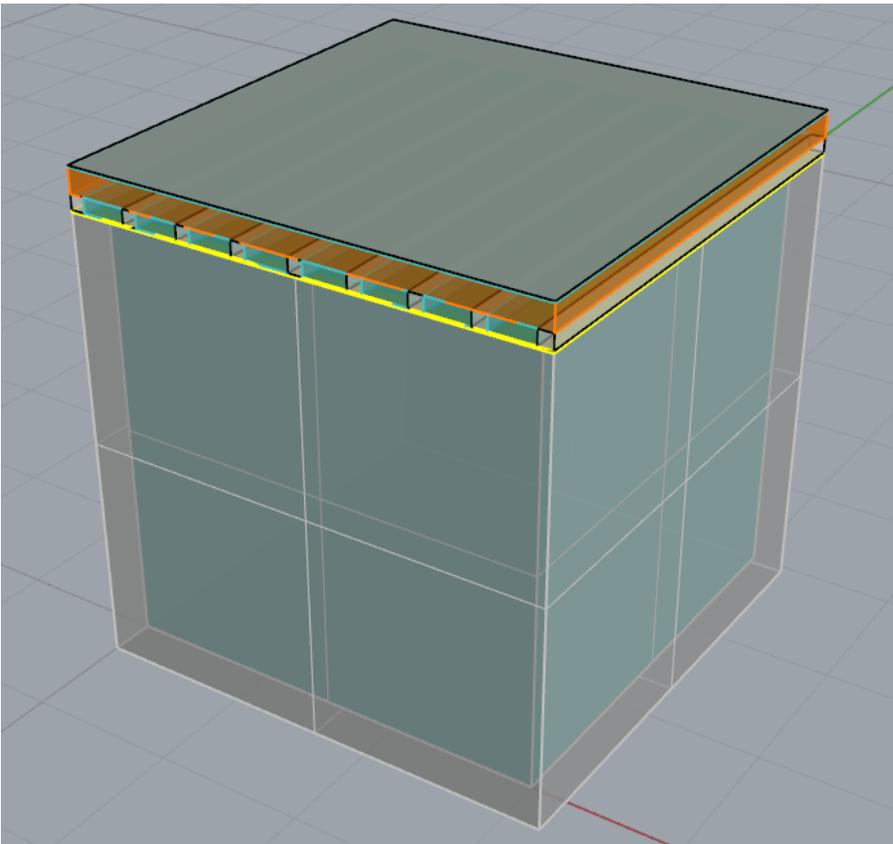


Figura 6.1. Modelo 3D de un cuarto de una vivienda creado con el programa Rhinoceros.

La Figura 6.2 muestra las partes del modelo:

1. Un cubo de aire de 3 x 3 x 3 m;
2. 5 muros de concreto de 20 cm de espesor alrededor;
3. Una capa de 3 cm de corcho.
4. Una capa 10 cm de aire y vigas de madera en cada 30 cm.
5. Una capa de masa térmica:
 - a) Materiales constructivos:
 - 17 cm de linóleo, caucho o fibra de madera;
 - 19 cm de corcho comprimido;
 - b) Materiales de cambio de fase con una capa de aluminio de 1 mm por debajo:
 - 25 cm de cloruro de calcio hexahidratado;
 - 12 cm de octadecano;
 - 10 cm de ácido cáprico;
 - 79 cm de galio.
6. Una capa exterior de 1 mm de aluminio.

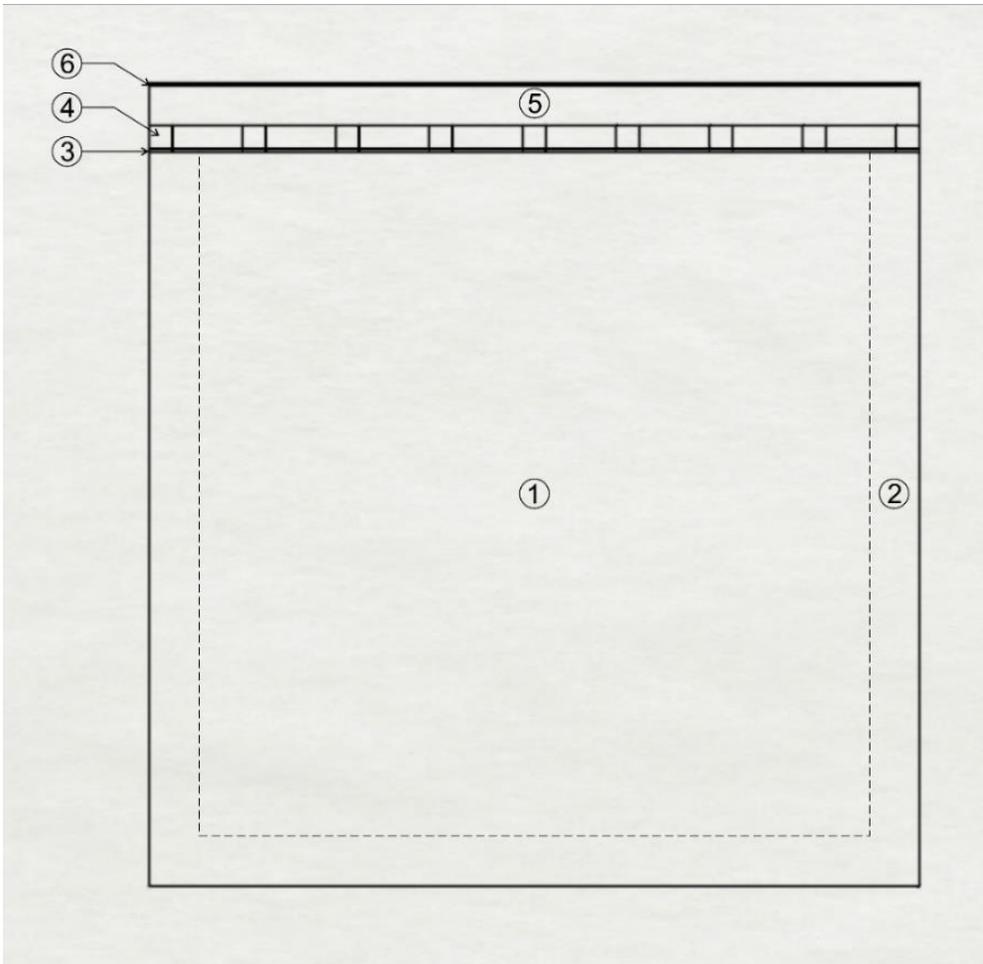


Figura 6.2. Las partes del modelo 3D en Rhinoceros de un cuarto con el sistema de techo.

Se asume que la temperatura mínima permitida del sistema de techo es 27° C y este valor se establece como la temperatura inicial del análisis. Tomando en cuenta que la temperatura interior de la vivienda en teoría siempre es 23° C, se crea una sección nombrada del cubo que representa el cuarto (1) y se asigna una temperatura de 23° C en todo el cuerpo en la primera hora de análisis.

Las condiciones externas afectan al diseño por la parte superior. Suponiendo que el cuarto se encuentra dentro de un sistema cerrado, la convección y la radiación afecta sólo la superficie exterior de la lámina de aluminio (6).

Se asume que la temperatura exterior y el valor del coeficiente de convección es constante todo el día. Entonces, durante el día más frío del año se establece un valor 3.2° C que afecta a la lámina de aluminio con un coeficiente de convección de 5.4 W/m². °C (Apéndice 1). Y para simular el día más caliente de año se utilizan valores de 32.8° C y 1.13 W/m². °C (Apéndice 1) respectivamente.

La radiación solar se representa como flujo de calor hacia la superficie. Los valores de flujo de calor durante los días extremos se encuentran en la Tabla 4.1 y la Tabla 4.2. El traspaso de calor es un valor porcentual del flujo de calor dependiendo de la absorptancia térmica de la superficie. El valor horario del flujo de calor Φ (W/m²) que afecta a la superficie mencionada se encuentra en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Valor horario del flujo de calor que recibe la lámina de aluminio.

Hora	8 de enero		9 de mayo				
	I _w (W/m ²)	Materiales de construcción y PCM	I _w (W/m ²)	Materiales de construcción		PCM	
		α Φ (W/m ²)		α	Φ (W/m ²)	α	Φ (W/m ²)
06:00	0	0	49	2.45		29.4	
07:00	41	24.6	255	11.25		153	
08:00	229	137.4	497	24.85		298.2	
09:00	434	260.4	720	36		432	
10:00	605	363	896	44.8		537.6	
11:00	715	429	1009	50.45		605.4	
12:00	754	452.4	1047	52.35		628.2	
13:00	715	429	1009	50.45		605.4	
14:00	605	363	896	44.8		537.6	
15:00	434	0.6 260.4	720	0.05 36	0.6	432	
16:00	229	137.4	497	24.85		298.2	
17:00	41	24.6	255	11.25		153	
18:00	0	0	49	2.45		29.4	

Utilizando los parámetros descritos se realizan los análisis térmicos del sistema con diferentes materiales como masa térmica. Como resultados de las simulaciones se representan secciones del cuarto con el sistema de techo cortadas en medio, con las temperaturas después de los días extremos representadas en colores. En los resultados de las simulaciones se analiza la temperatura de la superficie de la masa térmica que está en contacto con el conducto de aire y la temperatura del cuarto. Los puntos de referencia del análisis están presentados en la siguiente figura.

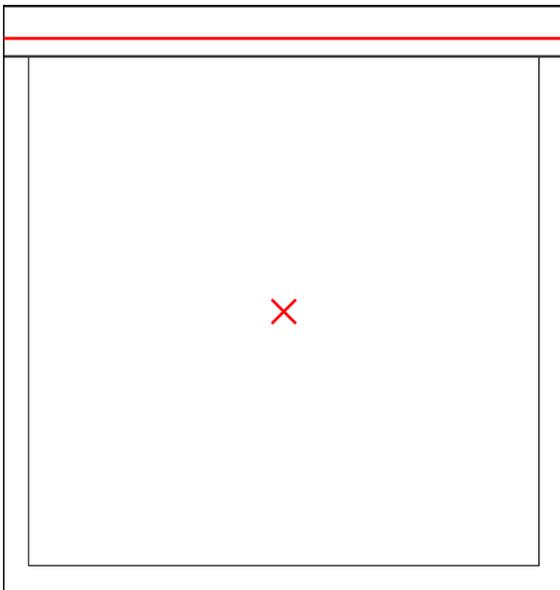


Figura 6.3. Puntos de referencia de análisis térmico de las simulaciones.

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones térmicas del sistema de techo con los materiales constructivos como masa térmica.

B: linóleo o caucho
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 86400
24/02/2017 03:50 p.m.

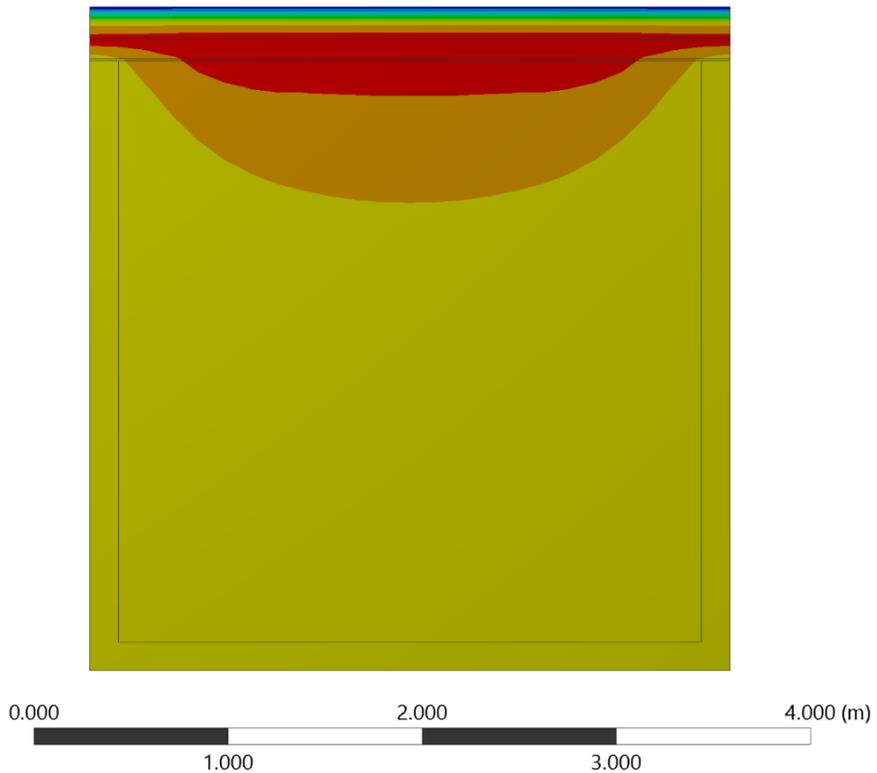
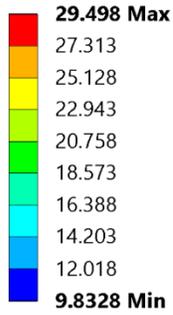


Figura 6.4. Temperatura del sistema con linóleo o caucho como masa térmica después del día más frío del año.

Figura 6.4 muestra la temperatura de un cuarto con el sistema de techo con linóleo o caucho como masa térmica después del día más frío del año. Como se puede observar en ella, la temperatura en la zona del techo se mantiene hasta los 29.5° C. Y la superficie de la masa térmica de linóleo o caucho en contacto con el conducto de aire tiene una temperatura de 27.8° C. La temperatura interior del cuarto se mantiene en 23° C.

C: fibra de madera

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 86400
24/02/2017 04:23 p.m.

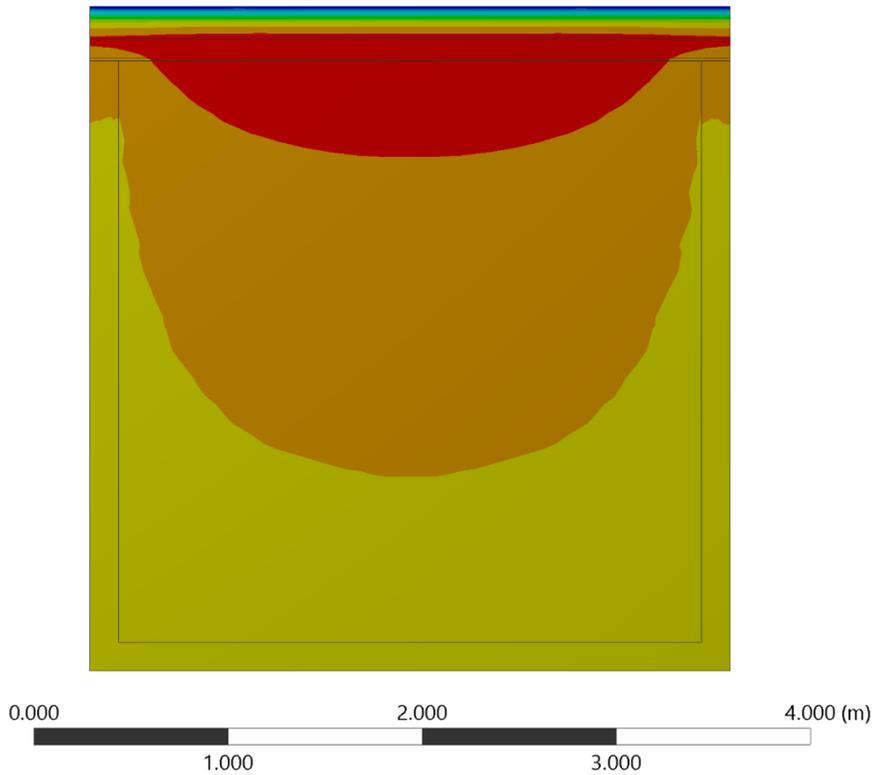
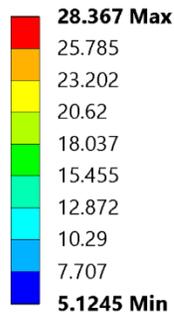


Figura 6.5. Temperatura del sistema con fibra de madera como masa térmica después del día más frío del año.

La temperatura de la superficie inferior de la fibra de madera después del día 8 de enero es de 26° C. Lamentablemente, esta temperatura no es suficiente para asegurar el funcionamiento completo del sistema. Además, la temperatura del cuarto alcanza los 25.2° C después de un día porque el calor traspasa más rápido la capa (Figura 6.5).

A: corcho
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 86400
24/02/2017 03:20 p.m.

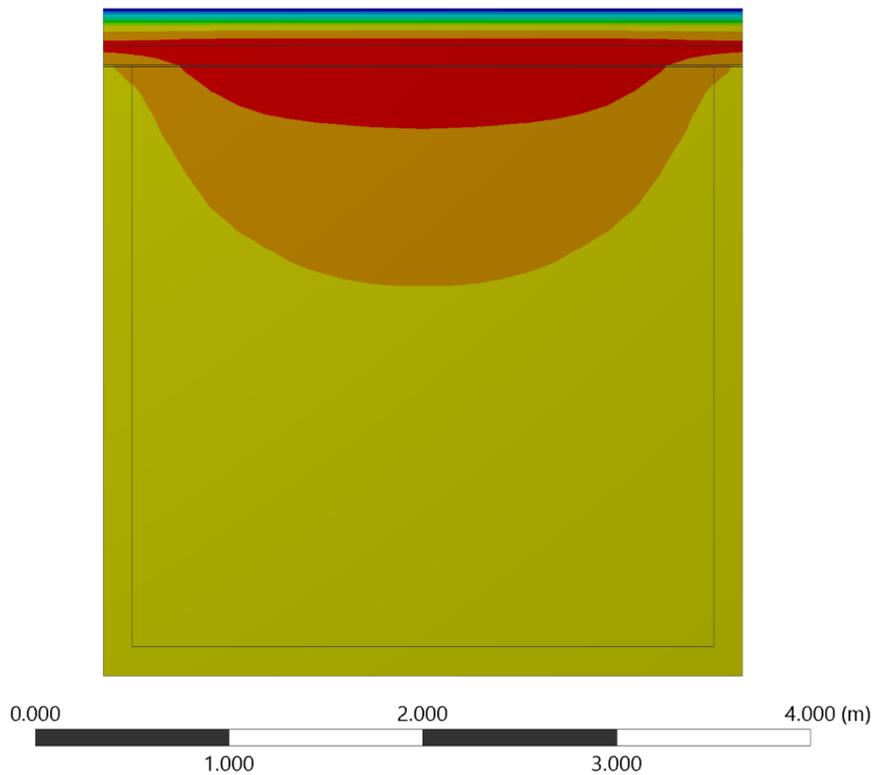
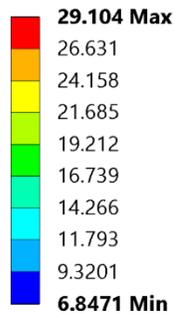


Figura 6.6. Temperatura del sistema con corcho comprimido como masa térmica después del día más frío del año.

La Figura 6.6 muestra que la temperatura de la superficie inferior de la capa de corcho comprimido se mantiene a los 27° C después del día más frío del año. La temperatura en medio del cuarto también se mantiene a su temperatura previa, aunque, como se puede observar de la figura, la zona superior del cuarto se calienta más que cuando se utiliza el linóleo o el caucho como masa térmica.

A continuación, se presentan las secciones de los cuartos con el sistema de techo utilizando materiales de construcción como masa térmica después del día más caliente del año y con una absorción térmica menor (capa exterior revertida). Aquí se analizan los mismos puntos de referencia de las temperaturas, pero con el propósito de averiguar cuáles de los materiales dejan pasar menos calor.

B: linóleo o caucho

Temperature

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 86400

24/02/2017 06:58 p.m.

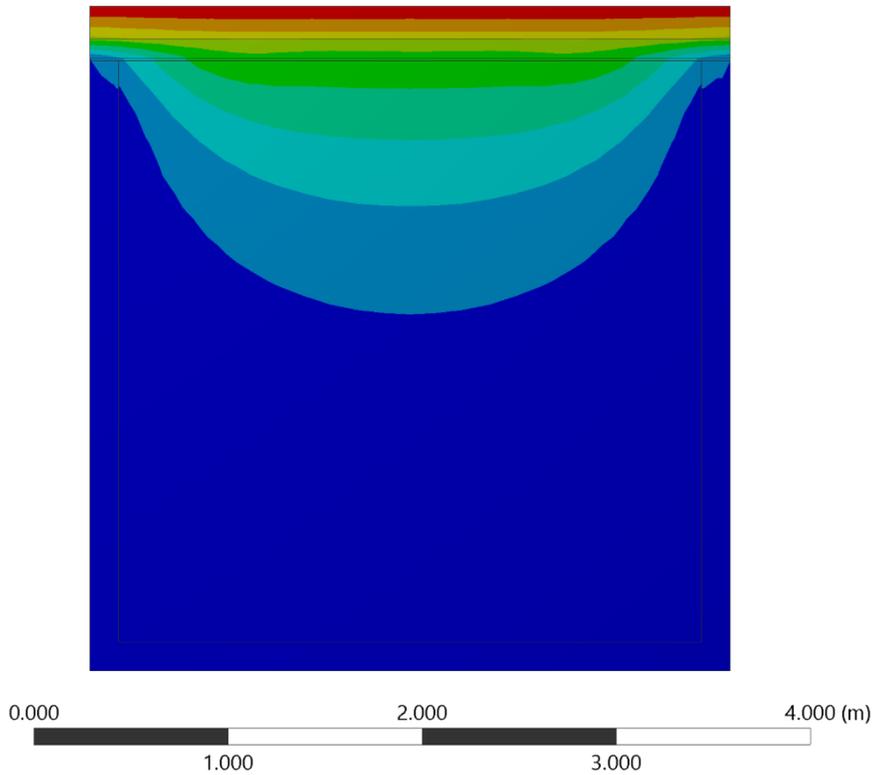
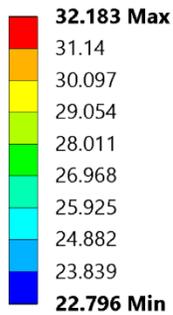


Figura 6.7. Temperatura del sistema con linóleo o caucho como masa térmica después del día más caliente del año.

La Figura 6.7 muestra que la temperatura de la superficie inferior de la capa de linóleo o de caucho de 17 cm se calienta hasta los 29° C después del día más caliente del año. El centro del cuarto se mantiene a la temperatura óptima.

C: fibra de madera
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 86400
27/02/2017 11:53 a.m.

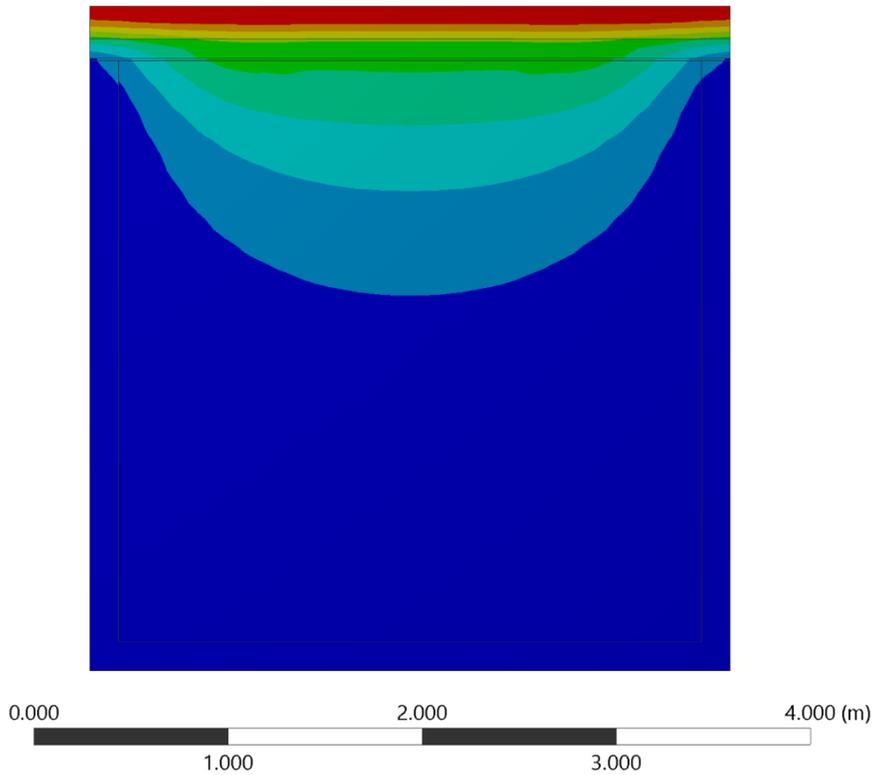
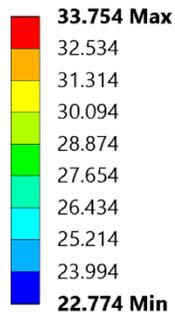


Figura 6.8. Temperatura del sistema con fibra de madera como masa térmica después del día más caliente del año.

La superficie de la fibra de madera que está en contacto con el conducto de aire se calienta hasta los 29.5° C después del día de 9 de mayo y la temperatura en el interior del cuarto se mantiene a los 23° C (Figura 6.8).

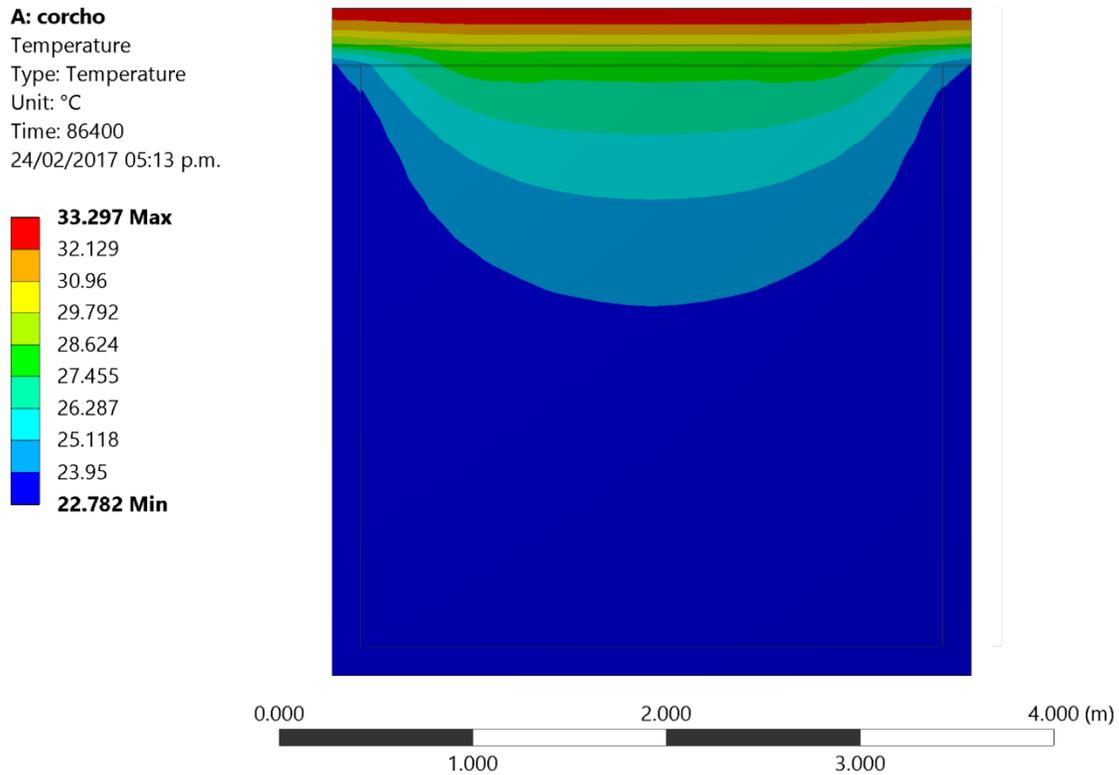


Figura 6.9. Temperatura del sistema con corcho comprimido como masa térmica después del día más caliente del año.

Figura 6.9. representa la sección del cuarto con el sistema de techo utilizando el corcho comprimido como la masa térmica con las temperaturas internas después del día más caliente del año. Se puede observar que la temperatura de la superficie inferior del corcho se calienta hasta los 29.4° C. Igual que utilizando los otros materiales, el cuarto se mantiene a la temperatura de confort.

6.1.2 Análisis del flujo

También se busca comprobar si la supuesta circulación del flujo de aire logra ventilar los espacios interiores de una manera uniforme. Para poder generar las simulaciones, se diseñan dos modelos 3D de dos cuartos idénticos con medidas de 3 x 3 x 3 m con el programa Rhinoceros (Figura 6.10). La diferencia entre ambos modelos volumétricos es que el primero incluye un muro sobrepuesto para la

entrada del aire (1) con la idea de que el aire primero baje hasta la zona inferior del espacio habitado. El espacio entre el muro y el muro sobrepuesto es de 10 cm de tal manera que la relación de las áreas del caudal de aire sea de 1:10. El segundo modelo no contiene el muro sobrepuesto y el aire entra al cuarto directamente (2). La geometría 3D representa el volumen de aire dentro del cuarto y las superficies señaladas son las entradas y las salidas del aire.

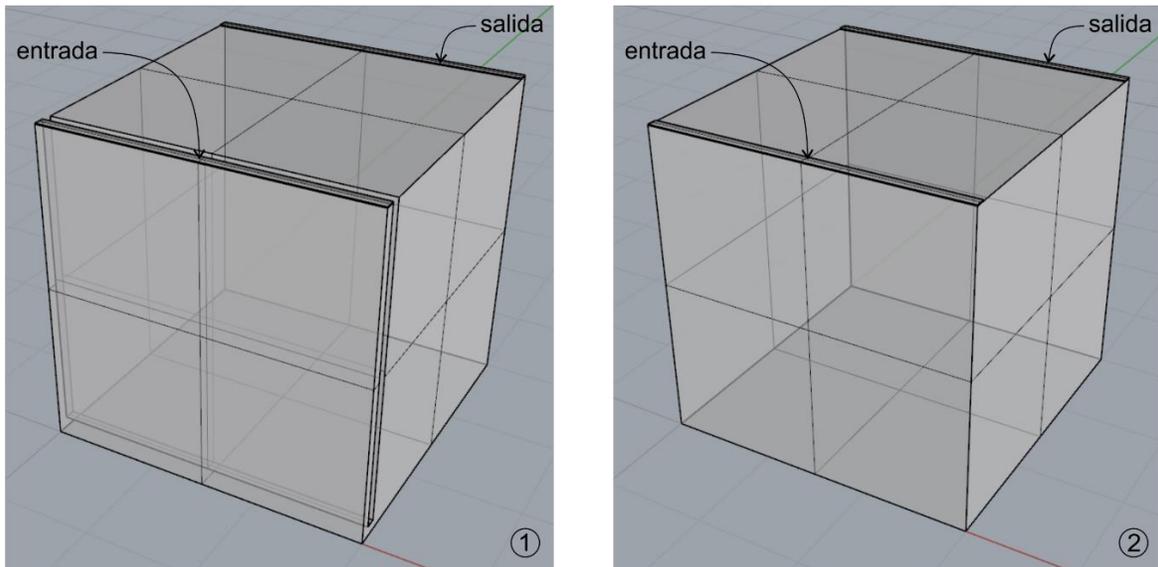


Figura 6.10. Modelo 3D del volumen de aire de un cuarto creado con el programa Rhinoceros.

Se verifica el funcionamiento de los dos modelos bajo las mismas condiciones ambientales. Unos análisis se realizan con una entrada de aire de 2.25 m/s de velocidad simulando la circulación del flujo de aire en el modo de calefacción, y otros con una velocidad entrante de 5.25 m/s de velocidad como sucede en el modo de ventilación.

A continuación, se presentan modelos volumétricos del cuarto señalando la velocidad del aire en colores. Se analizan las velocidades dentro del espacio habitado y la diferencia entre ellas como prueba de uniformidad del movimiento del aire.

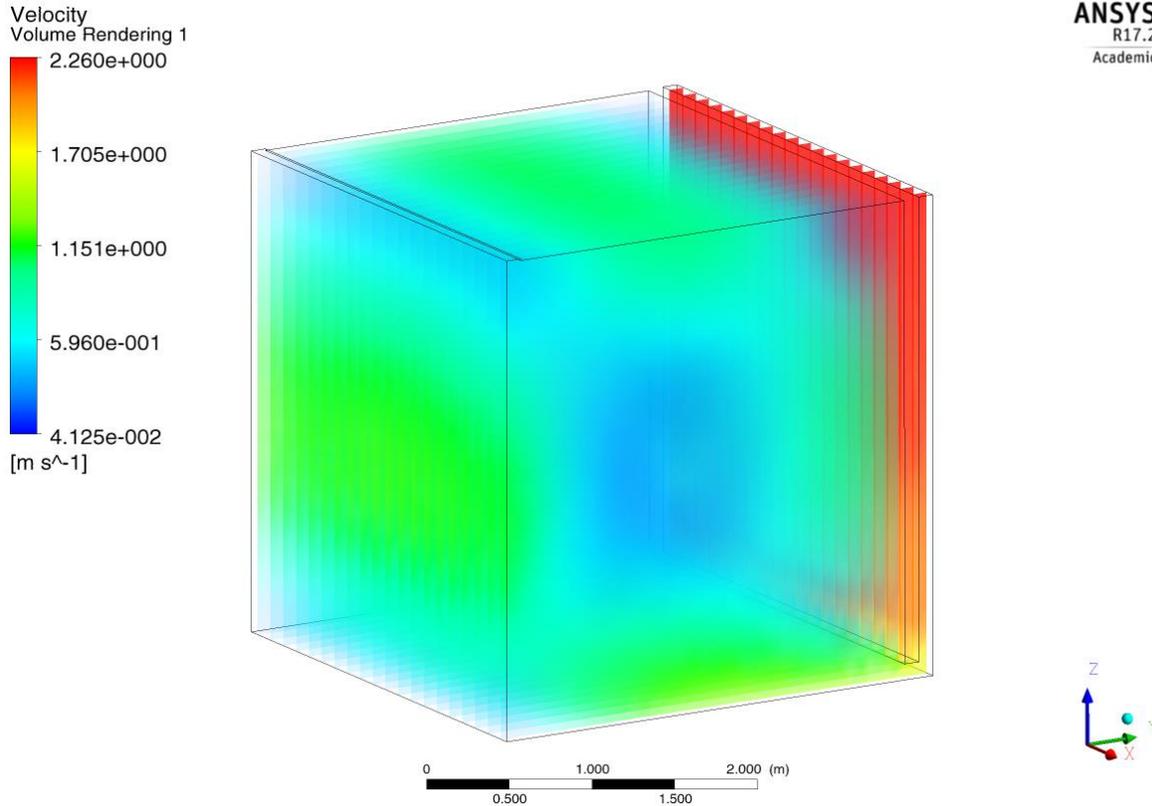


Figura 6.11. Velocidad del aire dentro de un cuarto con un muro sobrepuesto en el modo de calefacción.

Los resultados de los análisis muestran que en el modo de calefacción utilizando el muro sobrepuesto la velocidad del aire se mantiene detrás del muro y disminuye entrando al espacio habitado (Figura 6.11). La mayor velocidad del aire de casi 1.15 m/s dentro del espacio se encuentra en las superficies del cuarto y la menor en el centro del cuarto. El promedio de velocidad del aire, de 0.6 m/s, dentro del espacio es una velocidad alta para el modo de calefacción y es posible que disminuya la sensación térmica.

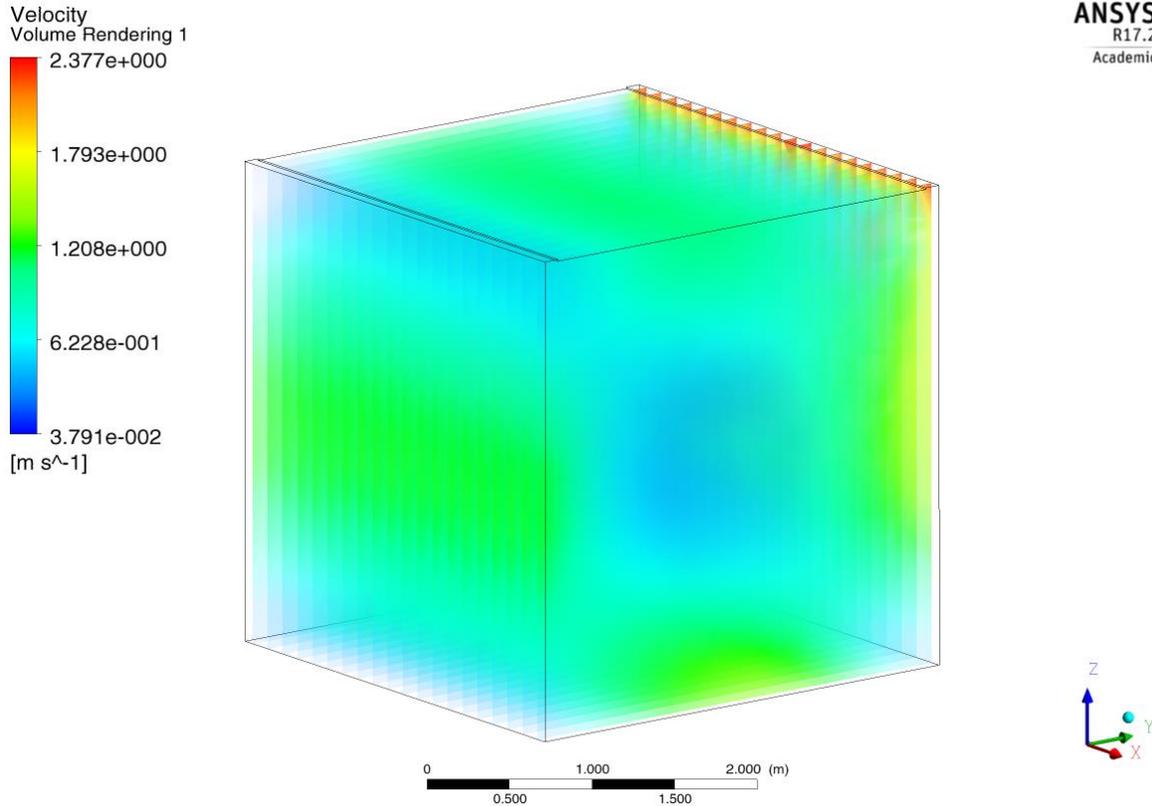


Figura 6.12. Velocidad del aire dentro de un cuarto sin el muro sobrepuesto en el modo de calefacción.

Por otra parte, como se puede notar en la Figura 6.12, dentro de un espacio habitado sin muro sobrepuesto la velocidad del aire disminuye inmediatamente en la zona superior del espacio, pero aun así la velocidad es suficiente para que el aire circule en todo el cuarto. En este caso el mayor movimiento del aire también se encuentra en las superficies del cuarto con una velocidad de hasta 1.21 m/s. La calma se logra en el centro del espacio. La velocidad promedio en un cuarto sin muro sobrepuesto también es alrededor de 0.6 m/s, aunque se nota ligeramente menor diferencia entre las velocidades dentro del espacio habitado, lo cual significa un movimiento del aire más uniforme.

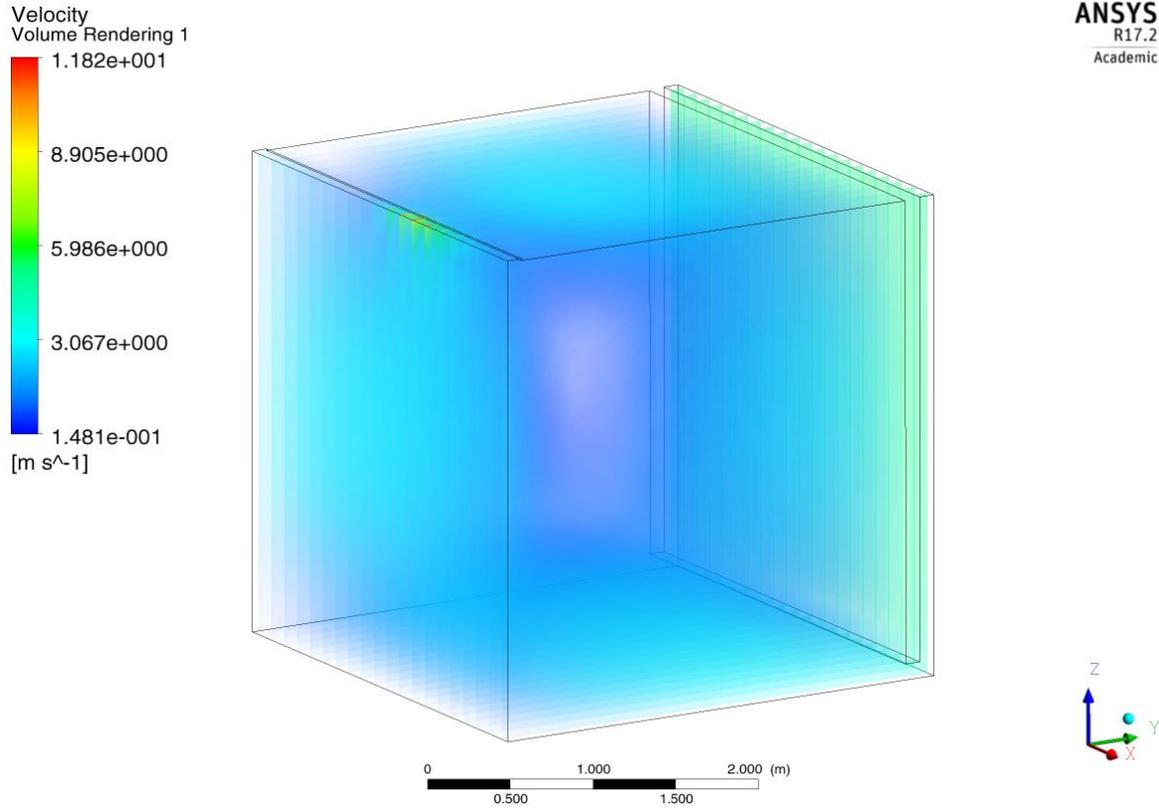


Figura 6.13. Velocidad del aire dentro de un cuarto con un muro sobrepuesto en el modo de ventilación.

La figura 6.13 muestra que durante el modo de ventilación el aire sale del cuarto con mayor fuerza, alcanzando una velocidad de 11.82 m/s, cuando se utiliza el muro sobrepuesto. El promedio de velocidad del movimiento de aire es de 1.6 m/s con el mayor valor en las orillas del cuarto.

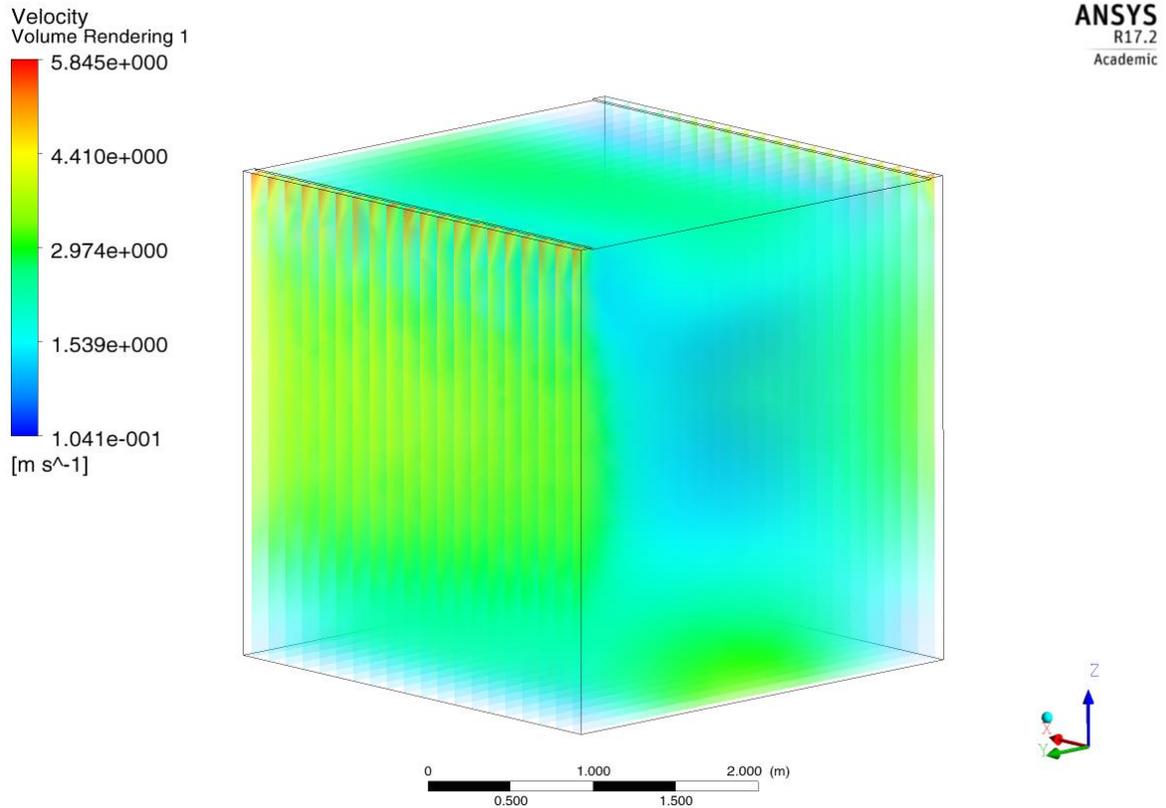


Figura 6.14. Velocidad del aire dentro de un cuarto sin el muro sobrepuesto en el modo de ventilación.

Asimismo, el movimiento del aire es uniforme aun sin el uso del muro sobrepuesto (Figura 6.14). Con la velocidad más alta en las superficies del cuarto, el promedio de velocidad interior es de 1.54 m/s. La velocidad a la salida alcanza los 5.85 m/s. La única diferencia, en comparación con cuando se usa un muro sobrepuesto en el modo de ventilación, es que la velocidad del aire entre las orillas y el centro es mayor en este caso.

6.2 Discusión de los resultados

En resumen, se puede señalar que se logra la selección de materiales ecológicos y accesibles que realicen óptimamente su función dentro del sistema de techo sostenible. Se diseña el posicionamiento de las aperturas y mecanismos de ventilación dentro de un cuarto con el techo pasivo que provoque un flujo de aire con la intención de regular la temperatura interior. Se realiza una propuesta de diseño del sistema de techo de tal manera que la masa térmica seleccionada tenga óptimas condiciones para recibir y almacenar la energía solar, y el control del flujo natural del aire circule la energía calorífica entre el sistema de techo y los espacios habitados según las necesidades de climatización.

Después de la realización de los cálculos y simulaciones, se puede concluir que el material más adecuado para absorber el calor es el aluminio. Sus propiedades térmicas, como la conductividad térmica, determinan la posibilidad de alcanzar temperaturas más elevadas que casi el resto de los materiales recibiendo la misma cantidad de la energía calorífica. Además, es la opción más económica en comparación con otros materiales de alta conductividad térmica. Las propiedades físicas del metal permiten tener un espesor extremadamente delgado de la capa, aproximadamente de 1 mm.

Con la finalidad de que el promedio térmico de la capa de absorción del día más frío del año sea 27°C , se tiene que absorber 60% de la energía solar en Santiago de Querétaro. Entonces, la superficie del aluminio expuesta hacia el exterior debe de tener un acabado color claro, el cual equivale a una absorptancia térmica de 0.6.

La implementación de una capa reversible, con diferente acabado del otro lado de la capa de aluminio, ayuda a controlar la cantidad de la energía solar que se absorbe. Durante el periodo de calor se prefiere una superficie reflejante que absorba solo 0.05 de la radiación solar y se evite así el sobrecalentamiento en el interior de la vivienda. Esta capa puede tener una forma tipo persiana y voltearse

para exponer la superficie adecuada hacia el exterior según las necesidades caloríficas.

Por otra parte, existen dos tipos de materiales adecuados para la capa de acumulación del sistema de techo. Los materiales constructivos más adecuados para ser masa térmica en la zona climática de Querétaro son linóleo, caucho, fibra de madera o corcho comprimido. Con el propósito de desfasar la onda térmica por 12 horas, así el calor traspasa la capa en los momentos más fríos del día, se necesita una capa de 17 cm de linóleo, caucho o fibra de madera, o 19 cm de una capa de corcho comprimido.

Aunque los resultados de los cálculos mostraron que todos estos materiales con sus espesores respectivos funcionan en una manera idéntica durante los días extremos térmicamente, las simulaciones con el programa ANSYS comprobaron que 17 cm de linóleo o caucho desfasan la onda térmica por más tiempo que 17 cm de fibra de madera o 19 cm de corcho comprimido.

En el caso de aplicar un material de cambio de fase para la capa de acumulación de calor se eligen un cloruro de calcio hexahidratado, octadecano, ácido cáprico y galio. Éstos materiales son los que alcanzan a fundirse aun durante el día más frío del año en Querétaro. Con la finalidad de absorber toda la energía calorífica durante el día más caliente del año se define una capa de 25 cm de cloruro de calcio hexahidratado, 12 cm de octadecano, 10 cm de ácido cáprico y 79 cm de galio.

Tomando en cuenta que el cloruro de calcio hexahidratado y el ácido cáprico no cumplen con los objetivos del sistema del techo y el espesor del galio necesario es muy alto (más de 4 veces mayor al de una masa térmica tradicional), el material de cambio de fase más adecuado para el sistema del techo es el octadecano.

Finalmente, para el diseño actual se prefiere el uso de los materiales de construcción en lugar de los de cambio de fase con la finalidad de evitar los problemas posibles relacionados con ellos:

- Cristalización complicada;
- Variación de volumen;
- Filtraciones;
- Estabilidad química;
- Inflamabilidad;
- Ciclo de vida útil (García-Santos, Neila, & Oliver, 2012).

Asimismo, el uso de caucho reciclado como masa térmica es una buena opción tomando en cuenta que la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) aproxima que alrededor de 40 millones de neumáticos desechables se generan anualmente en México (EPA, 2010). Además, en el proceso de vulcanización se mejoran las propiedades del caucho como resistencia al envejecimiento, polaridad, adhesión con otros materiales o vinculación de anti degradantes (Matador rubber , 2007).

Por lo tanto, una capa de caucho reciclado vulcanizado de 17 cm de espesor es la más adecuada para acumular el calor dentro del sistema del techo.

La definición del material de la capa de aislamiento térmico se basa en sus propiedades de resistir la transmisión de la energía calorífica. Los materiales que tienen la conductividad térmica más baja, pero al mismo tiempo son ecológicos, son lana mineral, corcho y celulosa. Se necesita una capa de 6 cm de espesor de lana mineral o celulosa y 3 cm de espesor de una capa de corcho con el propósito de amortiguar al menos 50% de la energía calorífica. Por el espesor más delgado necesario para cumplir el mismo objetivo, el corcho es el material más deseable para aislar el sistema del techo de los espacios interiores.

En los procesos de circulación de flujo de aire entre el techo y los espacios de la vivienda se implementa el uso del ventilador alimentado por una batería solar.

Durante el periodo de frío, se tiene que procurar que la velocidad dentro el espacio habitado no exceda 0.225 m/s, para que el movimiento del aire no disminuya la sensación térmica. En el caso de que la relación de las áreas entre los conductos del aire y el cuarto sea de 1:10, la velocidad del flujo de aire dentro del conducto debe de tener una velocidad de 2.25 m/s. Aunque las simulaciones muestran una velocidad más elevada dentro del espacio y se debe analizar con mayor profundidad la dinámica del aire para obtener una velocidad adecuada. La implementación del muro sobrepuesto es opcional pues las simulaciones muestran resultados semejantes con o sin él.

Durante el periodo de calor se utiliza un tubo Venturi con el propósito de ventilar el techo y los espacios interiores. Si el sobrecalentamiento no se evita de esta manera, se enciende el ventilador con una velocidad de 5.25 m/s. En este caso, si la relación de las áreas entre el conducto y el cuarto es 1:10, la velocidad del aire dentro el espacio habitado es de 0.525 m/s y con esto se reduce la sensación térmica por 5° C. Las simulaciones realizadas con el programa ANSYS muestran una velocidad de alrededor de 1.6 m/s dentro del espacio habitado. Es una velocidad elevada y debe de ser ajustada con el proposito de proporcionar un ambiente agradable dentro de los espacios. Los resultados también muestran que el aire escapa del cuarto con mayor fuerza que cuando entra y que la implementación del muro sobrepuesto influye en un movimiento del aire más uniforme.

7 PROPUESTA DEL DISEÑO

Con base en la investigación realizada y tomando en cuenta sólo los aspectos de sostenibilidad, se puede proponer un diseño del sistema de techo. En un futuro éste deberá de ser probado y adaptado al mercado.

Aquí se propone un sistema de techo en ensamble con la idea de una simple instalación en edificaciones nuevas o ya construidas. Las piezas del techo pueden simplemente colocarse encima de la estructura de un techo, como, por ejemplo, unas vigas (Figura 7.1). Las piezas se diseñan en tamaño de 1 x 1 m, lo que es una medida común en la construcción.



Figura 7.1. Colocación del sistema de techo.

Como se definió anteriormente, una pieza del sistema de techo contiene una capa de caucho reciclado vulcanizado de 17 cm de espesor usado como masa térmica para acumular el calor (2) (Figura 7.2):

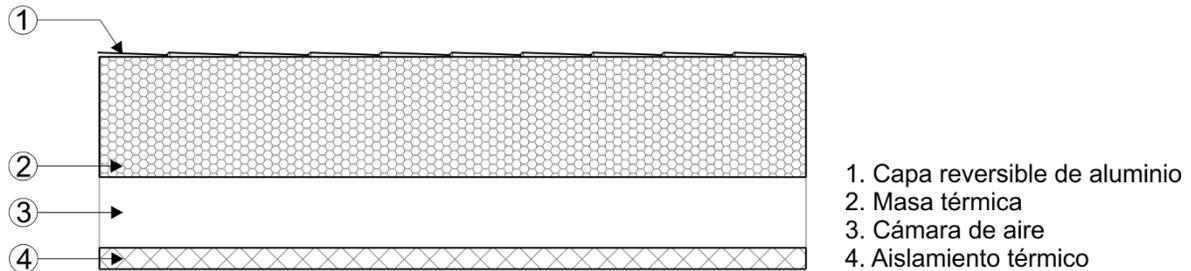


Figura 7.2. Sección media transversal de la pieza del sistema de techo.

Por debajo de la masa térmica se encuentran las cámaras de aire y los soportes entre ellas (3). El diseño de los soportes está basado en la relación entre el tamaño de las cámaras y el peso de las capas superiores. Como punto de partida se utilizan tres tablas de 1" a lo largo de la pieza. La madera es un material con las propiedades térmicas adecuadas (Tabla 4.7) y su uso es amplio en la práctica de construcción. El espesor de la capa de aire es aproximado, pero en base a los resultados de las simulaciones se obtiene que 10 cm de espesor de ella funcionan efectivamente en el sistema.

La parte inferior de la pieza está conformada de una capa de corcho de 3 cm de espesor (4). El acabado de la superficie expuesta hacia el interior de la vivienda puede ser natural o definido y agregado por el usuario.

Por encima de todas las capas se implementa un sistema de persianas de aluminio de 1 mm de espesor (1). En la Figura 7.3 se muestran las láminas de aluminio de un lado pulidas y del otro lado pintadas de color claro. Se conectan entre ellas con un alambre y argollas y tienen la posibilidad de conectarse entre diferentes piezas. De esta manera toda la capa del techo puede ser controlada por una sola fuente.

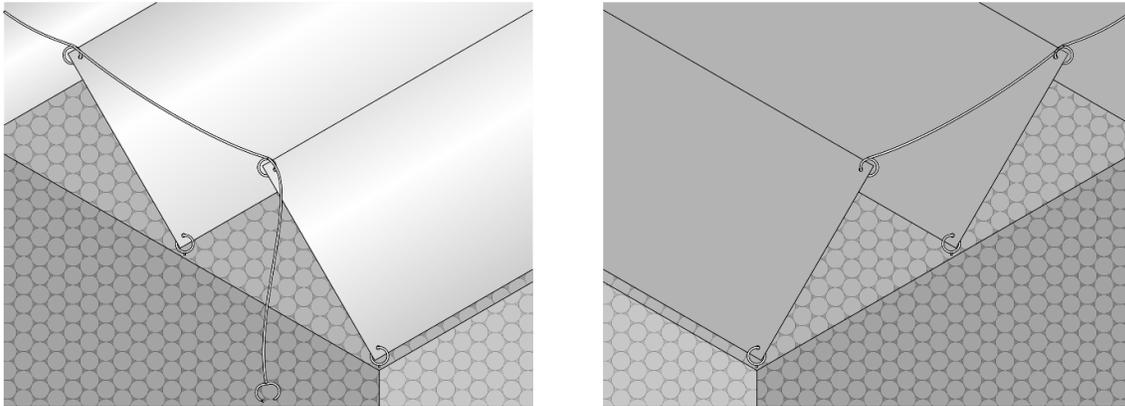


Figura 7.3. Capa reversible de aluminio por ambos lados.

La Figura 7.4 muestra la propuesta de una pieza de 1 x 1 m del sistema de techo. Estas piezas se pegan entre ellas con un pegamento impermeabilizante y la capa de aluminio se conecta con argollas.

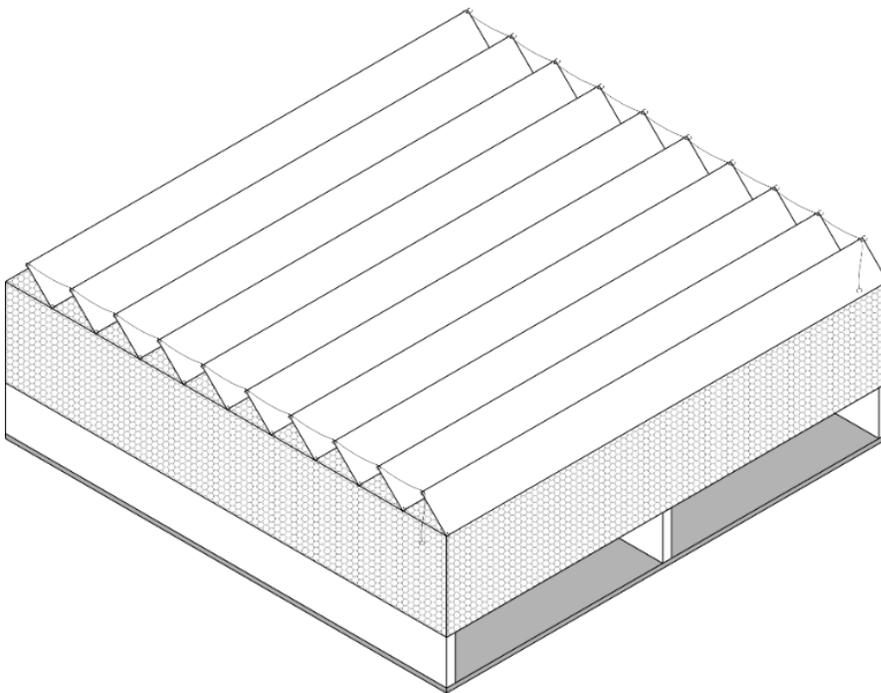


Figura 7.4. Prototipo 1 de la pieza del sistema de techo.

Para el desagüe del techo las piezas tienen que colocarse con una inclinación hacia la colección del agua pluvial. Las superficies que reciben la humedad son partes de aluminio y de caucho, materiales cuyas propiedades no cambian en contacto con el agua. El aluminio y el caucho incluso se utilizan en la práctica en la impermeabilización de otras superficies (Safranez, 1973) y (Arango, 2015).

7.1 Mecanismos de ventilación

Además de las partes mencionadas, dentro del diseño del sistema de techo existen mecanismos de ventilación como el tubo Venturi, el ventilador y los conductos respectivos de la circulación del flujo de aire.

El tubo Venturi debe de adaptarse a la posición geográfica y ser dirigido hacia los vientos dominantes para su mayor eficiencia. Con el propósito de que siempre esté dirigido hacia el viento presente, el tubo Venturi puede girar libremente alrededor de su propio eje, debido a esto, es necesario dejar espacio libre con un diámetro del largo del tubo. El tubo Venturi se coloca levantado sobre la capa de absorción para permitir el movimiento libre de las láminas de aluminio. La figura 7.5 muestra los parámetros necesarios que se deben tomar en cuenta para posicionar el tubo Venturi.

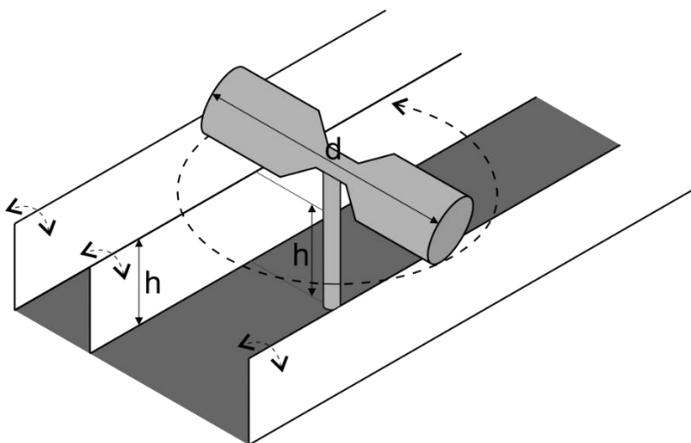


Figura 7.5. Diseño de posición del tubo Venturi.

Ubicar el tubo Venturi en cada pieza del sistema es bastante complicado porque éste genera una sombra sobre la superficie expuesta al sol y necesita una conexión alámbrica, para las válvulas de su operación, con el sistema de control. Por esta razón se diseña una pieza distinta del sistema de techo, la cual incluye el tubo Venturi. El conducto que conecta el espacio interior de la vivienda con la cámara de aire del techo y el tubo Venturi es relativamente delgado. Es suficiente eliminar una lámina de aluminio en este tramo (Figura 7.5).

El ventilador mecánico debe de ser ubicado en la parte opuesta del techo en donde se coloca el tubo Venturi para crear una circulación completa del flujo de aire dentro de los espacios habitados. Por esta razón se necesita otro modelo de pieza del sistema de techo que incluya el ventilador.

La Figura 7.6 muestra las propuestas de las dos piezas adicionales, una con el tubo Venturi (1) y otra con el ventilador (2).

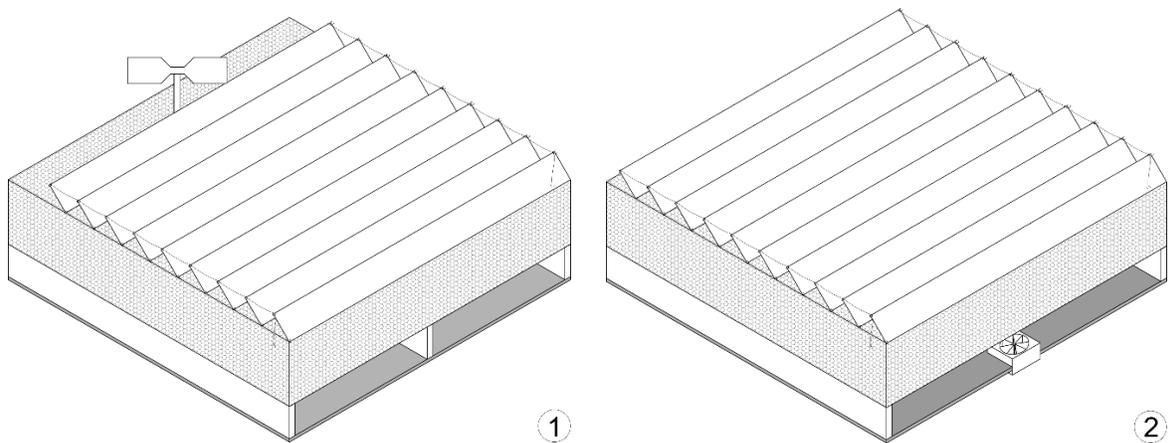


Figura 7.6. Propuesta de las piezas adicionales del sistema de techo.

7.2 Sistema de control

Como se ha mencionado anteriormente, algunas partes del sistema funcionan con energía eléctrica. Todas estas partes se controlan por un solo controlador basándose en los datos del sensor térmico y necesita cierta distribución dentro del sistema. La figura 7.7 muestra el posicionamiento óptimo de las partes activas y la conexión necesaria entre ellas.

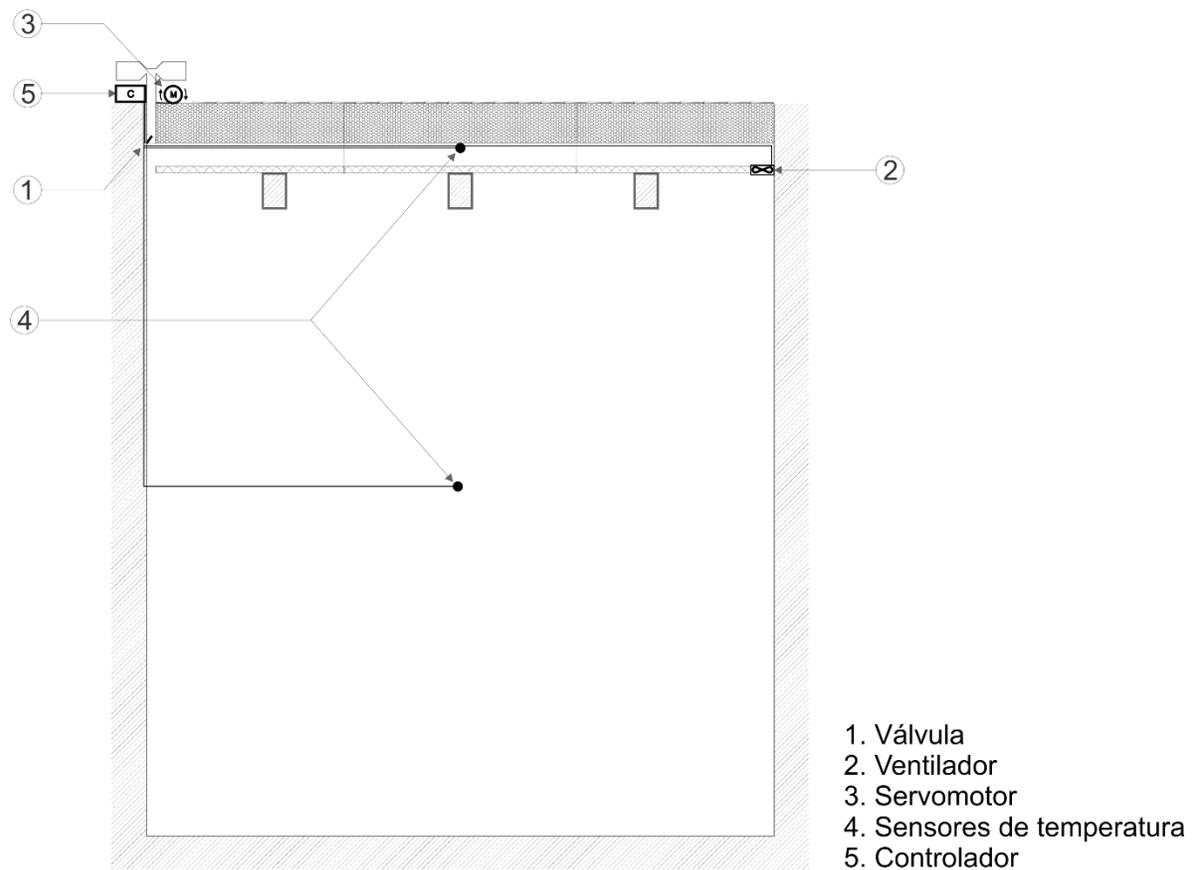


Figura 7.7. Sección de un cuarto con el sistema de control del sistema de techo.

El tubo Venturi funciona sin ninguna fuente alterna, pero la válvula que conecta el conducto de salida de aire (1) funciona por los comandos del controlador. Normalmente ésta está cerrada y se abre sólo cuando se necesita ventilar el techo o el espacio interior de la vivienda.

El ventilador (2) también se enciende con el comando del controlador cuando la temperatura dentro del espacio habitado está fuera del rango $18^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C}$. Cuando la temperatura interior desciende de los 18°C , éste se prende con velocidad v_1 . Y cuando la temperatura interior se encuentra por encima de los 28°C , el ventilador recibe una señal para funcionar con la mayor velocidad v_2 .

El servo motor (3) que mueve la capa reversible de aluminio funciona dependiendo del periodo térmico, posiblemente dos veces al año. Éste podría ser controlado basándose en los datos de un sensor térmico colocado dentro del sistema de techo.

Éstos son los mecanismos activos necesarios para el funcionamiento completo del sistema de techo, todos se controlan en base a los datos de los sensores de temperatura (4). Uno se encuentra colocado dentro del espacio de la vivienda y otro dentro del sistema.

Finalmente, todas partes mencionadas se conectan a un controlador ubicado dentro de una pieza del sistema de techo (5) que está alimentado por energía solar. Una batería conectada a una celda fotovoltaica ubicada en el techo almacena la energía para todo el sistema de control.

8 CONCLUSIONES

Se concluye que se puede diseñar un sistema de techo pasivo que emplea masa térmica y un sistema de control de flujo de aire. Se puede comprobar el funcionamiento positivo térmicamente de los materiales con sus espesores óptimos y la circulación de flujo de aire uniforme dentro de un espacio de una vivienda en Santiago de Querétaro en la manera simulada digitalmente.

Se propone un diseño posible para implementar en viviendas unifamiliares nuevas o ya construidas. Las partes del diseño seleccionadas son accesibles y comunes en la industria, lo que a continuación se debería de ser comprobado en una investigación consecutiva. Además, se necesita una optimización de las partes del producto y verificación de su funcionamiento en práctica.

9 REFERENCIAS

- AliceSolarCity. (13 de Octubre de 2017). <http://www.alicesolarcity.com.au>. Obtenido de <http://www.alicesolarcity.com.au>: <http://www.alicesolarcity.com.au/image/view/244>
- Allocca, C., Chen, Q., & Glicksman, L. R. (2003). Design analysis of single-sided natural ventilation. *Energy and buildings*, 785-795.
- Arango, A. M. (2015). *Estudio de barreras geosintéticas poliméricas (GBR-P) a base de PVC-P, PEAD y EPDM utilizadas en la impermeabilización de embalses*. Madrid.
- Arens, E., Paliaga, G., Turner, S., & Zhang, H. (2009). Moving air for comfort. *ASHRAE*, 18-28.
- Bansal, N. K., Bhandari, M. S., & Mathur, R. (1993). Solar chimney for enhanced stack ventilation. *Building an environment*, 373-377.
- Bradshaw, V. (2006). Human comfort and health requirements. En V. Bradshaw, *The building environment: active and passive control systems* (págs. 3-37).
- Buijs, J. A. (1983). *Thermal conductivity of some low dimensional magnetic systems*. Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven DOI: 10.6100/IR154977.
- Burotto, C. (10 de Septiembre de 2014). *eldefinido.cl*. Recuperado el Marzo de 2016, de [eldefinido.cl](http://www.eldefinido.cl): http://www.eldefinido.cl/actualidad/mundo/2938/Copenhague_hizo_obligatorios_los_techos_verdes_que_pasa_en_Chile/
- Chávez, C. I. (2014). *Ahorro y calidad de la energía en residencias y empresas*. Querétaro.
- Chuah, T., Rozanna, D., Sa'ari, M., Salmiah, A., & Thomas Choong, S. Y. (2006). Fatty acids used as phase change materials (PCMs) for thermal energy storage in building material applications. *Jurutera*, 8-15.

- Colegio profesional de fisioterapeutas de la comunidad de Madrid. (2012). *Las dolencias originadas por el aire acondicionado pueden ser motivo de las bajas laborales y el absentismo en verano*. Madrid.
- Conagua. (2016).
- CONUEE. (2011). *NOM-020-ENER-2011*.
- David, A., & John, P. (2011). Designing for comfort. *ASHRAE*, 38-46.
- EPA. (2010). *Scrap tires: handbook on recycling applications and management for the U.S. and Mexico*. Washington DC.
- Forbes Staff. (26 de Abril de 2016). *Últimas noticias: Forbes México*. Obtenido de Forbes México: <https://www.forbes.com.mx/las-5-ciudades-mayor-crecimiento-inmobiliario-mexico/>
- Freixanet, V. A. (s.f.). Confort. En V. A. Freixanet, *Arquitectura Bioclimática* (págs. 59-74).
- Furbo, S. (1983). *Heat storage with an incongruently melting salt hydrate as storage medium based on the extra water principle*. Brussels, Luxembourg.
- García-Santos, A., Neila, F. J., & Oliver, A. (2012). Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. *Materiales de Construcción*, 131-140.
- GeoSun Africa. (2016). *geosun*. Obtenido de geosun: <http://geosun.co.za/solar-maps/>
- Greenstream Publishing Limited. (2015). *solarelectricityhandbook.com*. Obtenido de solarelectricityhandbook.com: <http://solarelectricityhandbook.com/solar-angle-calculator.html>

- Griggs, E., & Humphries, W. (1977). *A Design Handbook for Phase Change Thermal Control and Energy Storage Devices*.
- Hale, D., Hoovers, M., & O'Neill, M. (1971). *Phase Change Materials Handbook*.
- Hall, M. R. (2010). *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings*.
- Harvard Health Letter. (2010). *Out in the cold*. Harvard Health Publications.
- Hydromx. (17 de Febrero de 2017). *Documents: Hydromx*. Obtenido de Hydromx: <http://www.hydromx.us/>
- IMCO. (2016). Un puente entre dos Méxicos. En IMCO, *Un puente entre dos Méxicos* (pág. 14).
- INEGI. (2017). *Cuentame*. Obtenido de <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/queret/territorio/clima.aspx?tema=me&e=22>
- Instituto de Desarrollo Experimental de Contrucción. (2016). *Sobre el cambio climático*.
- Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción. (2006). *Catálogo de elementos constructivos del CTE*.
- J. Skalyo, C. F. (1964). Thermal behavior of the antiferromagnet $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ant its neel point. En J. G. Daunt, D. O. Edwards, F. J. Milford, & M. Yaqub, *Low Temperature Physics LT9* (págs. 884-886).
- Janbakhsh, S. (2015). *A ventilation strategy based on confluent jets: an experimental and numerical study*.
- Jardines verticales y cubiertas vegetales. (2011). *jardinesverticalesycubiertasvegetales.blogspot.mx*. Obtenido de jardinesverticalesycubiertasvegetales.blogspot.mx:

<http://jardinesverticalesycubiertasvegetales.blogspot.mx/2011/01/tejados-verdes-en-noruega.html>

JOM Energy. (8 de Marzo de 2017). *jomenergy.com*. Obtenido de *jomenergy.com*: <http://jomenergy.com/solar-power/>

Kaushik, S. C., Pandey, A. K., Tyagi, S. K., & Tyagi, V. V. (2011). Experimental study of supercooling and pH behaviour of a typical phase change material for thermal energy storage. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 117-125.

Kenisarin, M., & Mahkamov, K. (2005). *Actual problems in using phase-change materials to store solar energy*.

Kern, D. Q. (1965). *Procesos de transferencia de calor*.

Kesavan, G. T. (2016). Lean, Green and DMADV Tool Based Approach for an Effective Execution of Residential Building Construction Improvement. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 778-783.

Kreider, J. F. (2002). Heating and Cooling of Buildings. En J. F. Kreider, *Heating and Cooling of Buildings (McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering)* (págs. 16-17).

Linden, P. F. (1999). The fluid mechanics of natural ventilation. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 201-238.

Matador rubber . (2007). *Rubber chemistry*.

Matti Tukiainen. (2016). *gaisma*. Obtenido de *gaisma*: <http://www.gaisma.com/en/location/queretaro.html>

MiMorelia. (28 de Diciembre de 2016). *Noticias: MiMorelia*. Obtenido de *MiMorelia.com*: <http://www.mimorelia.com/queretaro-el-estado-que-mas-ha-crecido-en-la-ultima-decada-imco/>

- Neila, F. J. (2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*.
- Nottoli, H. (2007). Conductibilidad térmica y peso específico. En H. Nottoli, *Física aplicada a la Arquitectura* (págs. 72-92). Nobuko.
- Osegura, O. (07 de Julio de 2010). *greentechmedia.com*. Obtenido de greentechmedia.com: <http://www.greentechmedia.com/articles/read/sunny-mexico-an-energy-opportunity>
- Pittinger, A. L. (1976). *USA Patente nº US4082080A*.
- Quaschnig, V. (2016). *Understanding renewable energy systems*. New York: Routledge.
- Quintero Peña, C. H. (2013). *Reciclaje termo - mecánico del poliestireno expandido (Icopor), como una estrategia de mitigación de su impacto ambiental en rellenos sanitarios*.
- R. Almanza S., E. C. (1997). *Actualización de los Mapas de Irradiación Global solar en la Republica Mexicana*.
- Reiter, A.-T. N. (2014). A climate analysis tool for passive heating and cooling strategies in hot humid climate based on Typical Meteorological Year data sets . *Energy and Buildings*, 756–763 .
- Rivas, R. O. (2007). Aprovechamiento de la energía solar térmica en el sector agropecuario. *Claridades agropecuarias*, 3-60.
- Roche, P. L. (20 de Julio de 2013). *climatecolab.org*. Obtenido de climatecolab.org: <http://climatecolab.org:18081/plans/-/plans/contestId/11/planId/1304142/version/459>
- Ruben Beatens, B. P. (2010). Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 1361-1368.

- Safranez, C. (1973). Impermeabilización de cubiertas. *Informes de la Construcción*, 57-68.
- Sandy. (1 de Marzo de 2013). *dforceblog.com*. Obtenido de *dforceblog.com*: <http://www.dforceblog.com/2013/03/01/ventajas-y-desventajas-de-los-techos-verdes/>
- Secretaría de Economía. (27 de Julio de 2016). *portalweb.sgm.gob.mx*. Obtenido de *portalweb.sgm.gob.mx*: <http://portalweb.sgm.gob.mx/economia/es/precio-metales/aluminio.html>
- Secretaría del Medio Ambiente. (13 de 01 de 2016). *excelsior.com.mx*. Obtenido de *excelsior.com.mx*: <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2016/01/13/1068598>
- Southwest Technology Development Institute. (1999). *Reportes de insolación de México*.
- USC. (2016). *www.usc.edu*. Obtenido de *www.usc.edu*: http://www.usc.edu/dept-00/dept/architecture/mbs/tools/thermal/controls_passolar_ind.html
- Valera, J. P. (2005). *Apuntes de Física General*. México, D.F.
- Vélez, C., Khayet, M., & Zárate, J. O. (2015). Temperature-dependent thermal properties of solid/liquid phase change even-numbered n-alkanes: n-Hexadecane, n-octadecane and n-eicosane. *Elsevier*, 383-394.
- Wedro, B. (2016). *Dehydration*.
- Wheeland, M. (15 de Septiembre de 2014). *pureenergies.com*. Obtenido de *pureenergies.com*: <http://pureenergies.com/us/blog/top-10-countries-using-solar-power/>
- Willems, K. S., & Wolfgang, M. (2011). *Wärmeschutz: Grundlagen, Berechnung, Bewertung*.

Wischnewski, B. (2017). *Peace Software*. Obtenido de Peace Software:
http://www.peacesoftware.de/einigewerte/calc_luft.php5

Yano, N. (2000). *Japón Patente nº JP2000017749A*.

ÇENGEL, Y. A. (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*.

10 APÉNDICE I

Basándose en la guía para calcular el coeficiente de convección (Hydromx, 2017) se calcula el coeficiente de convección de una superficie plana horizontal para las temperaturas de Santiago de Querétaro en el día 8 de enero y el 9 de mayo.

El coeficiente de convección es un múltiplo del número de Nusselt \overline{Nu} y la conductividad térmica λ (W/m· °C) dividido entre la longitud característica L (m):

$$\overline{h} = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda}{L} \quad [1]$$

La longitud característica de una superficie horizontal es la proporción entre su área A (m²) y su perímetro P (m):

$$L = \frac{A}{P} \quad [2]$$

Durante el día más frío del año, la temperatura exterior es más baja que la interior por lo que el flujo de calor es hacia arriba y para calcular el número de Nusselt se aplica la ecuación [3]:

$$\overline{Nu} = 0.54 \cdot Ra^{1/4} \quad (10^4 \leq Ra \leq 10^7) \quad [3]$$

$$\overline{Nu} = 0.15 \cdot Ra^{1/3} \quad (10^7 \leq Ra \leq 10^{11})$$

Cuando la temperatura exterior es mayor a la del interior, el flujo de calor es hacia abajo. El número de Nusselt se encuentra aplicando la siguiente ecuación:

$$\overline{Nu} = 0.27 \cdot Ra^{1/4} \quad (10^5 \leq Ra \leq 10^{10}) \quad [4]$$

Donde:

Ra – número de Rayleigh, es un múltiplo de los números de Grashof y Prandtl:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad [5]$$

El número de Grashof se encuentra de la siguiente manera:

$$Gr = \frac{L^3 \cdot g \cdot \rho^2 \cdot \beta \cdot (T_{sup} - T_{ext})}{\mu^2} \quad [6]$$

Donde:

g - gravedad (m/s²);

ρ – densidad del aire (kg/m³);

β – coeficiente de expansión térmica del aire (1/K);

μ – viscosidad dinámica del aire (kg/m· s);

T_{sup} – temperatura de la superficie expuesta hacia el aire (°C);

T_{ext} – temperatura del aire exterior (°C).

Se asume que la temperatura de la placa expuesta del sistema de techo T_{sup} es 27° C. Las temperaturas y las propiedades del aire durante los días extremos térmicamente están presentados en las siguientes tablas:

Tabla 10.1. Propiedades del aire del día 8 de enero en Querétaro.

Temp. T, °C	Densidad ρ , kg/m ³	Calor específico C_e , J/kg· °C	Conductividad térmica λ , W/m· °C	Difusividad térmica α , m ² /s	Expansión térmica β , 1/K	Viscosidad dinámica μ , kg/m· s	Nr. de Prandtl Pr
5	1.269	1006	0.02401	$1.880 \cdot 10^{-5}$	$3.6118 \cdot 10^{-3}$	$1.754 \cdot 10^{-5}$	0.7350

Fuente: (ÇENGEL, 2006) y (Wischnewski, 2017)

Tabla 10.2. Propiedades del aire del día 9 de mayo en Querétaro.

Temp. T, °C	Densidad ρ , kg/m ³	Calor específico C_e , J/kg· °C	Conductividad térmica λ , W/m· °C	Difusividad térmica α , m ² /s	Expansión térmica β , 1/K	Viscosidad dinámica μ , kg/m· s	Nr. de Prandtl Pr
35	1.145	1007	0.02625	$2.277 \cdot 10^{-5}$	$3.2582 \cdot 10^{-3}$	$1.895 \cdot 10^{-5}$	0.7268

Fuente: (ÇENGEL, 2006) y (Wischnewski, 2017)

Si el área que cubre el techo es de 3 x 3 m, entonces la longitud característica, según la ecuación [2] es 0.75 m. Utilizando los datos proporcionados en la Tabla 10.1 y aplicando la ecuación [6] se calcula que el número de Grashof para el 8 de enero, cuando la temperatura exterior 3.2° C es $Gr_{inv} = 1.95 \cdot 10^9$.

De la misma manera, solo ahora utilizando los datos proporcionados en la Tabla 10.2, se encuentra el número Grashof para el día 9 de mayo en Querétaro. Con la temperatura exterior de 32.8° C, el número Grashof es igual a $Gr_{ver} = 2.78 \cdot 10^8$

Sabiendo los valores de los números de Grashof y de Prandtl (Tabla 10.1 y Tabla 10.2) para los dos días, se calcula el número de Rayleigh aplicando la

ecuación [5]. Entonces, en el día más frío del año $Ra_{inv} = 1.43 \cdot 10^9$ y en el día más caliente del año $Ra_{ver} = 2.03 \cdot 10^8$

Como el valor del número de Rayleigh en el 8 de enero es ($10^7 \leq Ra \leq 10^{11}$), entonces el número de Nusselt este día es igual a $\overline{Nu}_{inv} = 168.84$. Y en el 9 de mayo es igual a $\overline{Nu}_{ver} = 32.22$.

Ahora bien, se puede encontrar que el coeficiente de convección para estos días es [1]:

$$\overline{h}_{inv} = \frac{168.84 \cdot 0.02401}{0.75}$$

$$\overline{h}_{inv} = 5.41$$

$$\overline{h}_{ver} = \frac{32.22 \cdot 0.02625}{0.75}$$

$$\overline{h}_{inv} = 1.13$$

11 APÉNDICE II

A continuación, se presenta un proyecto arquitectónico de una vivienda unifamiliar en Santiago de Querétaro con el sistema automático de techo implementado.

El proyecto incluye climatización de los espacios de la sala y el comedor en la planta baja, la sala de televisión, todas las recámaras, el vestidor y el baño de la recámara principal y el baño de los cuartos compartido en la planta alta.

Con la finalidad de climatizar los espacios de la planta baja se agregaron muros dobles con una cámara de aire entre ellos en la zona de la recámara principal y su baño (Figura 11.5) de tal manera que el aire circule por ellos y por el sistema de techo.

En la planta alta se necesitó solamente la realización de unas aperturas en la estructura del techo para la circulación del flujo de aire como se puede observar en la Figura 11.2 y Figura 11.3.

La Figura 11.6 con la planta de la azotea muestra el sistema de techo pasivo colocado sobre el techo de la vivienda. Y la Figura 11.1 con la fachada del proyecto enseña que el impacto a la estética de la vivienda es mínimo con el sistema de techo implementado.

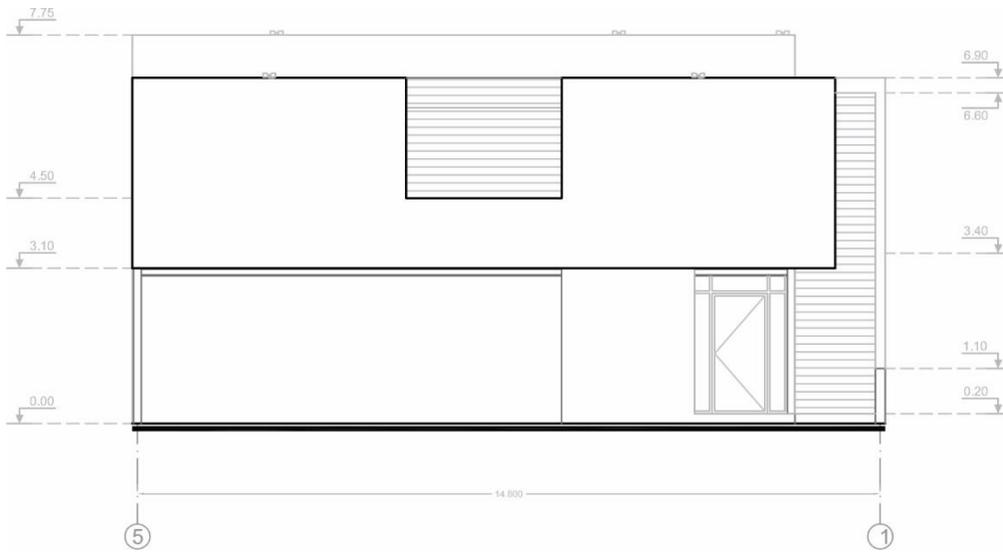


Figura 11.1. Fachada frontal 1:150

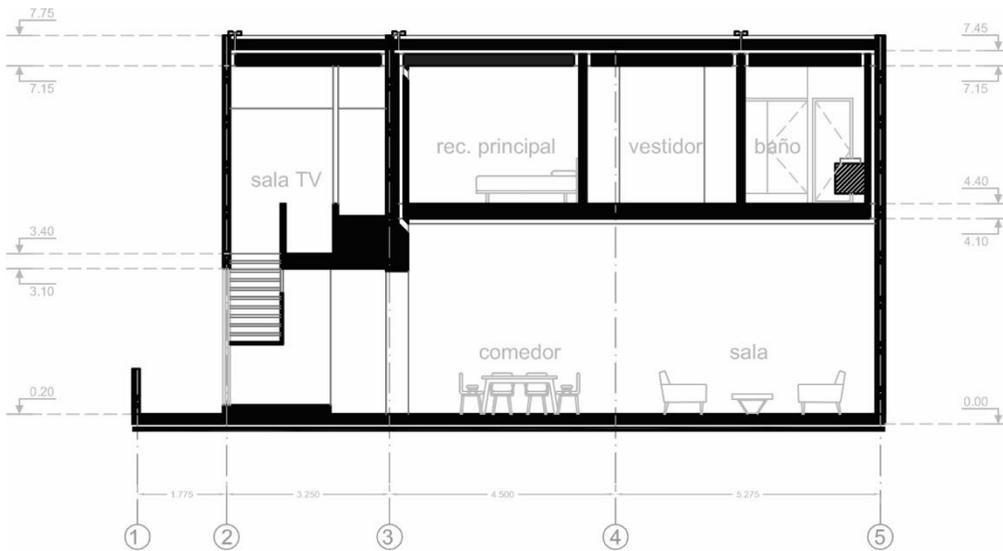


Figura 11.2. Sección transversal 1:150

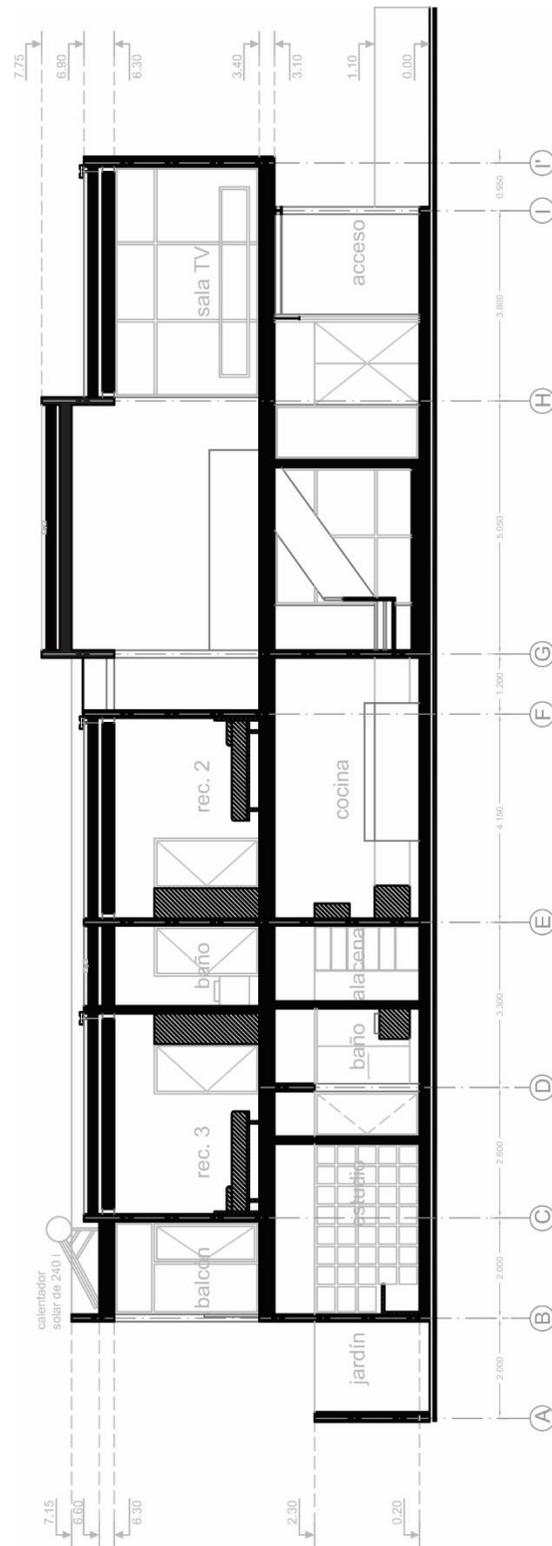


Figura 11.3. Sección longitudinal 1:150

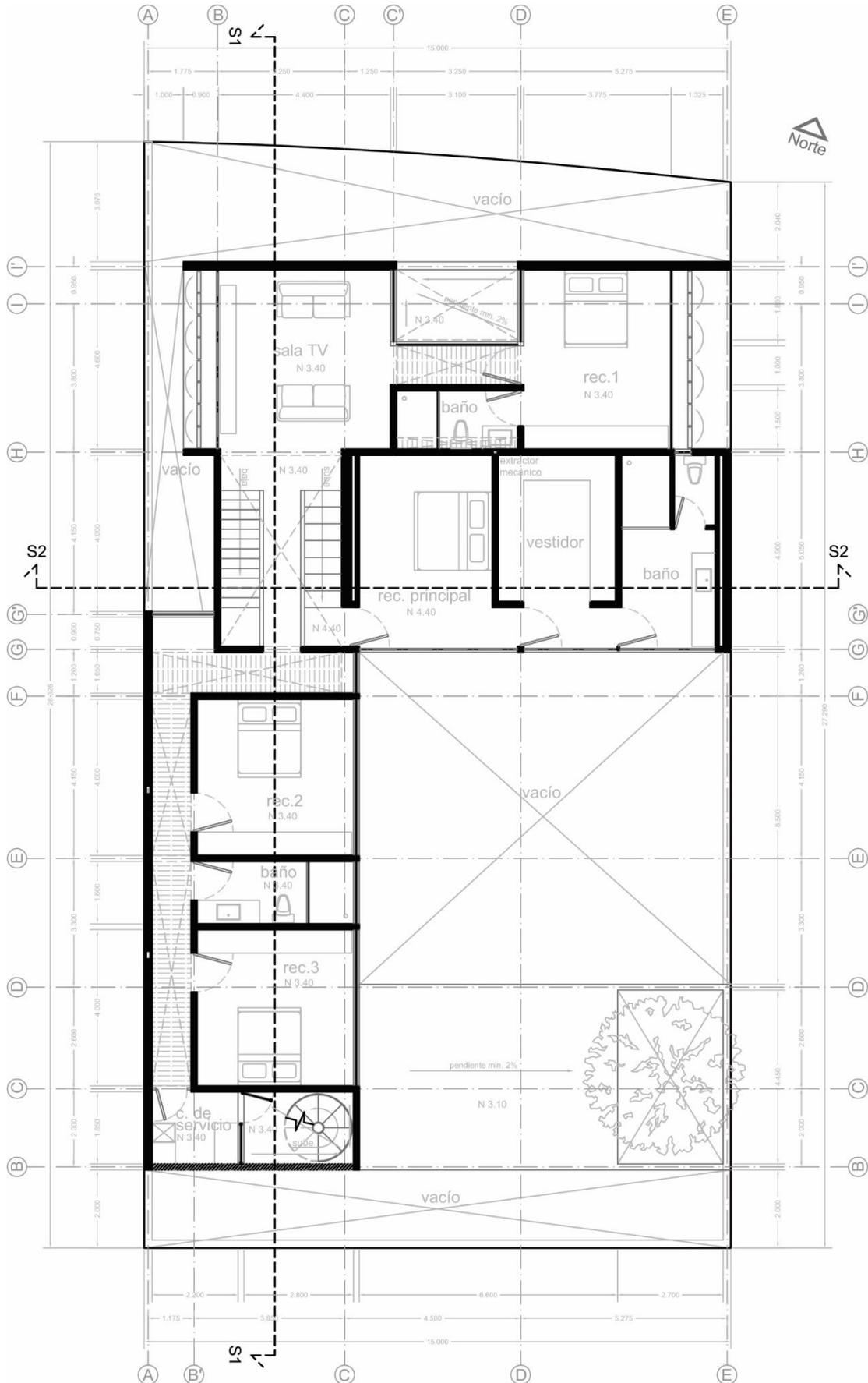


Figura 11.5. Planta alta 1:150.

