



UNIVERSIDAD DE CHILE

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**INFLUENCIA DE LA AISLACIÓN TÉRMICA APLICADA POR
EL EXTERIOR EN MUROS DE ALBAÑILERÍA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ERICSON RAFAEL ENCINA ZÚÑIGA

**PROFESOR GUÍA:
MIGUEL BUSTAMANTE SEPÚLVEDA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
GABRIEL RODRÍGUEZ JAQUE
CARLOS AGUILERA GUTIERREZ**

**SANTIAGO DE CHILE
SEPTIEMBRE 2009**

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

**INFLUENCIA DE LA AISLACIÓN TÉRMICA APLICADA POR EL EXTERIOR
EN MUROS DE ALBAÑILERÍA**

ERICSON RAFAEL ENCINA ZUÑIGA

COMISIÓN EXAMINADORA	Nota (nº)	CALIFICACIONES Nota (Letras)	Firma
PROFESOR GUÍA MIGUEL BUSTAMANTE S.	Á Á Á Á	Á Á Á Á Á ÁÁ Á Á Á ...
PROFESOR CO-GUÍA GABRIEL RODRÍGUEZ J.	Á Á Á Á	Á Á Á Á Á ÁÁ Á Á Á ...
PROFESOR INTEGRANTE CARLOS AGUILERA G.	Á Á Á Á	Á Á Á Á Á ÁÁ Á Á Á ...

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**SANTIAGO DE CHILE
SEPTIEMBRE 2009**

**RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: ERICSON ENCINA Z.
FECHA: 25/9/2009
PROF. GUÍA: Sr. MIGUEL BUSTAMANTE S.**

Í INFLUENCIA DE LA AISLACIÓN TÉRMICA APLICADA POR EL EXTERIOR EN MUROS DE ALBAÑILERIA.Î

El presente trabajo de título se desarrolla con el fin de realizar un estudio comparativo y cuantitativo de la respuesta térmica que posee un aislante térmico aplicado por el exterior de un cerramiento de material pesado.

En esta materia se han realizado estudios que estipulan que al aplicar la aislación térmica por el exterior, la demanda energética de climatización será la menor. Uno de ellos, y la base para este trabajo, es el realizado por el Sr. Marcial Salaverry Ramírez, denominado "Inercia Térmica: Influencia de la masa de muro en el comportamiento térmico de viviendas sociales".

La presente memoria consta de una parte experimental y otra teórica. El trabajo experimental es una validación empírica del resultado obtenido en el estudio anteriormente mencionado, cuantificando y comparando el efecto de la aislación aplicada por el exterior en el comportamiento térmico de la caseta, tanto de la respuesta como de los costos de climatización. El trabajo teórico que se realizó consiste en la determinación y comparación de la demanda, consumo y costo de climatización de tres modelos que simulan un edificio, en que la única diferencia radica en la posición de la aislación, así los modelos corresponden a: Sin aislación, con aislación interior y con aislación exterior. El software utilizado para la modelación fue DesignBuilder V2.0.

Como resultado de la parte experimental se obtuvieron respuestas térmicas con menores amplitudes, debido a que la masa efusiva interior contribuyó de buena forma al control de la temperatura; los mejores resultados fueron obtenidos al permitir que la caseta se enfriara durante la noche mediante ventilación nocturna, y gracias a esto hubo una gran incursión dentro del rango de confort, obteniéndose una reducción en los costos de climatización de un 56%.

El desarrollo teórico demostró que la aislación exterior expone las menores demandas de climatización anuales y reveló la importancia de las cargas internas; obteniéndose una reducción del 7.6% de los costos frente al modelo sin aislación y la inversión se recupera en menos de 4 años.

De acuerdo al estudio realizado, puede concluirse que el mejor desempeño energético se logra colocando la aislación por el exterior, ya que de esta forma se evita que el cerramiento sea solicitado directamente por la radiación solar, se agrega masa efusiva interior a la estructura elevando la inercia térmica de absorción y como consecuencia de esto se logra una regulación de la temperatura del medio interno. El promedio interno debe ser minorado por la introducción de la ventilación nocturna, permitiendo la descarga del calor de la masa efusiva interior hacia el medio exterior en las horas de frío.

Con cariño, a mi Padre.

Agradecimientos

Esta memoria no hubiese podido ser llevada a término si mis padres ó Dunia y Rafael ó no hubiesen trabajado con nosotros como lo hicieron, agradezco enormemente la dedicación que ambos pusieron en el desarrollo emocional e intelectual de mis hermanos y mío.

Agradezco a mi familia que siempre ha estado apoyándonos, permitiendo y dándonos espacios para desarrollar nuestros estudios, hobbies e intereses.

Agradezco a mi profesor guía, don Miguel Bustamante, por permitirme realizar mi trabajo de título en este tema tan interesante, por brindarme la ayuda necesaria para desarrollarlo y por sus valiosos consejos.

Gracias a Marcial Salaverry por introducirme en este tema de memoria y a Mauricio Villaseñor por su valiosa ayuda en la modelación computacional.

En forma muy especial doy gracias a las personas más importantes de mi vida, Hannie Vargas y Cristóbal Encina Vargas, pues ustedes son el motivo que me da la fuerza necesaria para poder comenzar cada día, son la razón que me mueve a ser mejor. Gracias preciosa por apoyarme en todo momento, brindarme tu amor, paciencia y entendimiento.

Índice General

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Introducción	2
Capítulo 2: Marco teórico	3
2.1 Calor y temperatura	4
2.2 Transferencia de calor	5
2.2.1 Conducción	5
2.2.2 Convección	6
2.2.3 Radiación	7
2.3 Estados de transferencia térmica	9
2.3.1 Estado estático	10
2.3.2 Estado dinámico	10
2.4 Parámetros de análisis térmicos	11
2.4.1 Resistencia térmica	11
2.4.2 Efusividad térmica	12
2.4.3 Inercia térmica	13
2.4.4 Desfase	14
2.4.5 Factor de reducción de onda	14
2.4.6 Factor de disminución de la temperatura	15
2.4.7 Demanda y consumo	16
2.4.7.1 Análisis del rendimiento	18
Capítulo 3: Trabajo experimental	19
3.1 Introducción	20
3.2 Caseta de prueba y aislación	20
3.2.1 Estructuración	20
3.2.2 Aislación	22
3.3 Ensayos	23
3.3.1 Enfoque	23
3.3.2 Variables influyentes en la respuesta térmica	23
3.3.2.1 Ventilación	23
3.3.2.2 Masa efusiva	24
3.3.2.3 Radiación solar	25
3.3.3 Programación y condiciones de los ensayos	26
3.4 Sensores	27
3.4.1 Validación	28

Capítulo 4: Análisis de resultados experimentales	30
4.1 Análisis de registros	31
4.2 Procesamiento de datos	38
4.2.1 Separación en grupos diarios	38
4.2.2 Determinación de máx., mín., y medias	38
4.2.3 Determinación de horas peaks	39
4.2.4 Determinación de parámetros de análisis térmico	42
4.2.4.1 Determinación del FRO	43
4.2.4.2 Determinación del FDTm	43
4.2.4.3 Determinación del desfase	44
4.2.4.4 Determinación de la demanda	45
4.2.4.5 Determinación del consumo	46
4.2.4.6 Determinación del costo	46
4.3 Análisis de resultados: Influencia de la aislación exterior	47
4.3.1 Temperatura media	48
4.3.2 Temperatura máxima	49
4.3.3 Amplitud	50
4.3.4 FRO y FDTm	51
4.3.5 Desfase	53
4.3.6 Masa efusiva interior	54
4.4 Análisis de resultados: Demanda y consumo energético	55
4.4.1 Refrigeración	55
4.4.2 Calefacción	56
4.5 Análisis de resultados: Costos de climatización	57
Capítulo 5: Modelación Energitérmica de un edificio	58
5.1 Introducción	59
5.1.1 General	59
5.1.2 Descripción	59
5.1.2.1 Ubicación	59
5.1.2.2 Estructura y arquitectura	60
5.1.3 Características del análisis	61
5.1.3.1 Software	61
5.1.3.2 Análisis y ubicación de la aislación	61
5.2 Planos	61
5.2.1 Plantas	62
5.2.2 Fachadas	64

5.3 Modelo	65
5.3.1 Modelación	67
5.3.2 Consideraciones para el análisis	68
5.4 Demanda energética y costos de climatización	69
5.4.1 Demanda energética	69
5.4.2 Consumo energético y costo de climatización	72
5.4.2.1 Tiempo de retorno de la inversión	74
Capítulo 6: Comentarios y conclusiones	75
6.1 Comentarios generales	76
6.1.1 Influencia de la aislación exterior en condición de verano	76
6.1.2 Modelación energitérmica de un edificio	78
6.3 Conclusiones específicas	79
Bibliografía	80

Índice de Imágenes

Imagen 2.1	Espectro Electro-magnético	8
Imagen 2.2	Comportamiento de un receptor	8
Imagen 2.3	Amortiguamiento de la onda térmica	10
Imagen 2.4	Efectos de la inercia térmica	13
Imagen 2.5	Calor extra existente en la caseta	16
Imagen 3.1	Detalle de fundaciones y radier	20
Imagen 3.2	Estructura de planta	21
Imagen 3.3	Elevacion norte	21
Imagen 3.4	Cerchas de techo	22
Imagen 3.5	Caseta de prueba sin aislación	22
Imagen 3.6	Caseta de prueba con aislación exterior	23
Imagen 3.7	Distribución de botellas en planta	24
Imagen 3.8	Fotografía de botellas colgadas	24
Imagen 3.9	Tapa de ventana	25
Imagen 3.1	Sensores	27
Imagen 5.1	Planta de emplazamiento	59
Imagen 5.2	Esquema de aislación exterior	60
Imagen 5.3	Vista frontal 3D	65
Imagen 5.4	Vista posterior 3D	65
Imagen 5.5	Vista frontal renderizada	66
Imagen 5.6	Vista posterior renderizada	66
Imagen 5.7	Zonas primer nivel	67
Imagen 5.8	Zonas segundo nivel	67

Índice de Tablas

Tabla 2.1	Conductividad de materiales	5
Tabla 2.2	Coficiente de película	8
Tabla 2.3	Efusividad de materiales	12
Tabla 3.1	Programación de Ensayos 2009	26
Tabla 3.2	Diferencia térmica sensor-termómetro	28
Tabla 4.1	Formato de datos	31
Tabla 4.2	Grupos diarios de temperatura	38
Tabla 4.3	Determinación de horas Peak	42
Tabla 4.4	Resumen de temperaturas	42
Tabla 4.5	Resumen de horas	42
Tabla 4.6	FRO y FDTm	44
Tabla 4.7	Desfases	44
Tabla 4.8	Tarifas Chilectra	46
Tabla 4.9	Resumen de ensayos 2008	47
Tabla 4.1	Resumen de ensayos 2009	47
Tabla 4.11	Calor absorbido	54
Tabla 4.12	Amplitud interior	54
Tabla 5.1	Demanda mensual de calefacción	69
Tabla 5.2	Demanda mensual de refrigeración	69
Tabla 5.3	Resumen de demandas anuales	69
Tabla 5.4	Consumo y costo anual de climatización	72
Tabla 5.5	Consumos anuales	72
Tabla 5.6	Costos anuales	72
Tabla 5.7	Costo de instalación	74
Tabla 5.8	Cubicación de la superficie de muro	74
Tabla 5.9	Ahorro	74
Tabla 6.1	Costo total de climatización	77

Indice de Gráficos

Gráfico 3.1	Validación del sensor sumergido	29
Gráfico 4.1	2008 ensayo 3	32
Gráfico 4.2	2009 ensayo 1	32
Gráfico 4.3	2009 ensayo 2	32
Gráfico 4.4	2008 ensayo 1	33
Gráfico 4.5	2009 ensayo 3	33
Gráfico 4.6	2008 ensayo 2	34
Gráfico 4.7	2009 ensayo 4	34
Gráfico 4.8	2008 ensayo 7	35
Gráfico 4.9	2009 ensayo 5	35
Gráfico 4.10	2008 ensayo 6	36
Gráfico 4.11	2009 ensayo 6	36
Gráfico 4.12	2008 ensayo 9	37
Gráfico 4.13	2009 ensayo 7	37
Gráfico 4.14	Repetición de Tmax	39
Gráfico 4.15	Ajuste de curvas	40
Gráfico 4.16	Ajuste de curvas	41
Gráfico 4.17	Temperatura promedio	48
Gráfico 4.18	Temperatura máximas	49
Gráfico 4.19	Amplitud térmica	50
Gráfico 4.20	FRO	51
Gráfico 4.21	FDTm	51
Gráfico 4.22	Desfases	53
Gráfico 4.23	Demanda de refrigeración	55
Gráfico 4.24	Demanda de calefacción	56
Gráfico 4.25	Costo de refrigeración	57
Gráfico 4.26	Costo de calefacción	57
Gráfico 5.1	Demanda de calefacción	70
Gráfico 5.2	Demanda de refrigeración	70
Gráfico 5.3	Consumo mensual total	73
Gráfico 6.1	Costo total de climatización	77

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

Hasta la fecha el diseño de edificios se ha realizado básicamente asegurando la integridad estructural, lo que ha significado como consecuencia directa altos costos de mantención en cuanto a habitabilidad¹. Las incomodidades que produce esta situación en construcciones de uso habitacional se pueden asumir, pero en construcciones como hospitales u oficinas, en donde es necesario mantener una temperatura dentro del rango de confort, los costos de climatización son abrumantes.

Al realizar análisis térmicos las normas chilenas consideran, solamente, la conductividad de los materiales, lo que es válido cuando la transmisión de calor en los muros se produce en un estado permanente, pero cuando la transmisión de calor en los muros ocurre en un estado dinámico se vuelve necesaria la incorporación de la inercia térmica en dicho estudio.

En la memoria que desarrolló el señor Marcial Salaverry Ramírez para optar al título de ingeniero civil de esta Facultad y que se denominó "Inercia térmica: Influencia de la masa de muro en el comportamiento térmico de viviendas sociales" se estudió una vivienda sin aislación térmica, una con aislación interior y otra con aislación exterior, utilizando para el modelamiento energitético el software ECOTEC. Las conclusiones de este estudio indican que si a una vivienda se le aplica la aislación térmica por el exterior, la demanda energética será la menor.

En la memoria [3] se estableció la importancia que posee la inercia térmica que aportan los muros interiores en el control de la temperatura, luego en la memoria [2] se realizaron ensayos que cuantificaron este efecto, simulando los muros interiores mediante barriles con agua (masa efusiva interior), pero la introducción de los barriles de agua tiene el inconveniente que la superficie en la que se produce la transmisión de calor es pequeña, para corregir este efecto en la presente memoria se introducirá masa efusiva distribuida dentro de la caseta, aumentando considerablemente la superficie de traspaso.

Por lo expuesto anteriormente, el presente trabajo trata el tema de la influencia que presenta la aislación térmica en el comportamiento energitético de una vivienda con cerramiento de albañilería en condición de verano, cuando ésta se aplica por el exterior.

En la primera parte de este trabajo de título se hará una validación experimental de la conclusión que se obtuvo en la modelación teórica propuesta en [2], y en la segunda parte se realizará la modelación de una construcción obteniendo la demanda energética necesaria para mantenerla climatizada durante el año.

Para lograr los objetivos de la primera parte se medirá la onda térmica interior y exterior a la caseta; se determinará el desfase y el amortiguamiento que sufre la onda térmica exterior en el interior de la vivienda. Luego se determinará la demanda energética necesaria para mantener la vivienda dentro del rango de confort, considerando los costos asociados a tal requerimiento de habitabilidad. Para cumplir los objetivos de la segunda parte se utilizará el software DESINGBUILDER en la simulación del edificio.

¹ Mantener rangos de temperatura y humedad agradables, situados entre 18°C y 23°C y 75% de HR

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Calor y temperatura

El calor es un tipo de energía ó así como la energía eléctrica ó capaz de ser almacenada, transmitida y transformada. Se cataloga como una onda mecánica, pues necesita un medio material para existir. Su unidad de medida es la caloría [cal], la cual se define como la cantidad de calor necesario para elevar en un grado Celsius un gramo de agua. Joule estableció el equivalente mecánico del calor determinando que $1[\text{cal}] = 4.184[\text{J}]$, con esto el calor posee unidades de energía establecidas en el SI.

La cantidad de calor necesaria para producir un incremento de temperatura ΔT en un determinado material se rige por la ecuación 1.

$$Q = M \cdot Ce \cdot \Delta T \quad (1)$$

Donde:

Q : Calor [cal]

M : Masa [kg]

Ce : Calor específico² [cal/kg °C]

ΔT : Diferencia de temperaturas [°C]

La temperatura es una propiedad física relativa a la cinética molecular, es decir, de los movimientos de las moléculas, ya sean estos: rotacionales, traslacionales o vibracionales; dependiendo del estado de la materia en el cual se encuentre determinado material. Así, termodinámicamente, se puede encontrar un cero absoluto, el cual queda determinado por una ausencia de movimiento atómico.

Según las leyes de la termodinámica cuando n sistemas están en equilibrio térmico existe una propiedad común a estos n sistemas, esta propiedad recibe el nombre de temperatura y la forma en la cual se puede determinar es mediante una relación entre la entropía y el calor del sistema.

$$T = \frac{dQ}{dS} \quad (2)$$

La medición de temperatura, en la práctica, se realiza mediante termómetros. La unidad de medida de la temperatura en el SI es el grado Kelvin. Esta corresponde a una escala absoluta de temperatura, pues el 0[K] ocurre cuando no existe calor en el sistema, indicando una ausencia total de movimiento atómico. Otras escalas de temperatura son usadas frecuentemente y corresponden a la escala de grados Celsius y a la de grados Fahrenheit, ambas escalas relativas. Los puntos que usan de referencia son los de fusión y ebullición del agua y de soluciones de cloruro amónico, respectivamente.

La diferencia de temperatura entre sistemas es la indicadora de la dirección del flujo de calor. La temperatura es el equivalente al potencial eléctrico, en donde el calor fluye de zonas de mayor temperatura a zonas de menor temperatura, hasta encontrar un equilibrio térmico. Las formas en que el calor es transmitido se desarrollan en el punto siguiente.

² Cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura en 1°C un gramo de un determinado material

2.2 Transferencia de calor

El calor al ser un tipo de energía es capaz de transmitirse entre sistemas, y además es capaz de transformarse en otras formas de energía, pudiendo transmitir su efecto de variadas formas. Así se presentan las tres formas en que el calor es transmitido entre sistemas en desequilibrio térmico, estas formas son: la conducción, la convección y la radiación.

2.2.1 Conducción

Es un mecanismo de transferencia de energía térmica que se consiste en el traspaso de calor por contacto directo de las partículas adyacentes, sin la presencia de flujo de masa.

Esta forma de transferencia es la que prima en los cuerpos sólidos y depende de una propiedad llamada conductividad térmica, simbolizada por λ . Esta propiedad mide la capacidad que posee un cuerpo de conducir el calor a través de él, o en otras palabras, mide la capacidad que posee un cuerpo para transferir el movimiento cinético de sus moléculas a las moléculas adyacentes.

También es común utilizar la resistencia térmica, que corresponde a la inversa de la conductividad, y que representa la capacidad de los materiales de oponerse al paso de calor.

La conducción de calor está regida por la ley de Fourier, la cual establece que la tasa temporal de transferencia de calor en una dirección x es proporcional al área normal a la dirección, al gradiente de temperatura en dicha dirección y a la conductividad, es decir:

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

Integrando esta expresión se obtiene el flujo de calor que atraviesa un material de espesor e y área unitaria, cuando existe una diferencia de temperatura ΔT entre sus caras.

$$\phi = \frac{\lambda}{e} \cdot \Delta T \quad (4)$$

A continuación se muestran conductividades de materiales para tener una referencia cualitativa y cuantitativa.

Tabla 2.1
Conductividad de materiales

Material	λ [W/m°C]	Material	λ [W/m°C]
Hormigón	1.63	Vidrio	1.2
Ladrillo	0.8	Cobre	380
Madera	0.13	Agua	0.58
Poliestireno exp.	0.043	Aire	0.02

2.2.2 Convección

Es un mecanismo de transferencia de energía térmica que se consiste en el traspaso de calor por contacto directo de las partículas adyacentes, con presencia de flujo de masa.

Debido a que existe flujo de masa, esta sólo está presente en medios fluidos, pues en ellos las diferencias de temperaturas producen variaciones de densidades internas locales, lo que se traduce en un movimiento interno del fluido, llamado convección. Por esta convección las partículas que están más calientes ascienden llevando calor hacia zonas más heladas, en dichas zonas ceden el calor por contacto directo con partículas adyacentes, al ceder calor bajan su temperatura, aumentando su densidad y bajan nuevamente, formando el ciclo convectivo.

El calor transmitido por convección es directamente proporcional a la agitación del fluido, al área del cuerpo en contacto con el fluido y a la diferencia de temperatura.

$$\phi = h \cdot A_s \cdot \Delta T \quad (5)$$

En esta ecuación se observa que la agitación del fluido se mide mediante la constante h , llamada coeficiente de película o de convección. El coeficiente de película depende de la ventilación a la cual es sometido el volumen en estudio. Así se pueden establecer dos estados convectivos: convección natural y convección forzada.

La convección natural corresponde a la circulación que se produce por los cambios de densidades en los fluidos al calentarlos, y la convección forzada ocurre cuando la circulación es inducida por un agente externo, como un ventilador.

A pesar que la agitación en el recinto es variable, se puede establecer que cerca de la cara de los muros existe una película de aire calmo, la cual ofrece una resistencia al traspaso de calor. El valor de esta resistencia es el inverso del coeficiente de película, que según norma, para elementos verticales, corresponden a:

$$R_{si} = 0.12 \left[\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} \right] \Leftrightarrow h_{si} = 8.33 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$$

$$R_{se} = 0.05 \left[\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} \right] \Leftrightarrow h_{se} = 20 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$$

Los rangos de valores para el coeficiente de película para gases y líquidos con convección natural y forzada se muestran en la tabla 2.2

Tabla 2.2
Coeficiente de Película

h [W/m²°C]	Convección Natural	Convección Forzada
Gases	2 a 25	25 a 250
Líquidos	50 a 10000	50 a 20000

2.2.3 Radiación

Como se mencionó en los puntos anteriores el calor es un tipo de energía, y como tal, puede transformarse en otros tipos de energía para poder transmitirse; esta forma de transferencia de calor corresponde al transporte de energía a través de un campo electromagnético, el calor se transforma en esta clase de energía y es transportado entre sistemas sin la necesidad de un medio material.

Cabe destacar que un campo eléctrico variable genera un campo magnético, y viceversa, como lo establecen las ecuaciones de Maxwell, de esta forma se puede visualizar la radiación electromagnética como dos campos que se generan mutuamente, por lo que no necesitan un medio para poder propagarse.

La forma en que esta transformación ocurre responde a las leyes de Kirchoff (6) y de Stefan-Boltzmann (7), como se muestra a continuación:

$$H = \epsilon \cdot H_0 \quad (6)$$

$$H_0 = \sigma \cdot T^4 \quad (7)$$

Donde:

H = Potencia emitida por el cuerpo por unidad de área [W/m^2]

ϵ = Emisividad []

H_0 = Potencia emitida por un cuerpo negro³ por unidad de área [W/m^2]

σ = Constante de Stefan, $5.67 \cdot 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4]$

Luego la relación con la longitud de onda y la frecuencia, para poder establecer dicha energía dentro del espectro electromagnético, está dada por Plank.

$$E = h \cdot \nu \quad (8)$$

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (9)$$

Donde:

E = Energía de la onda electromagnética [J]

h = Constante de Plank, $6.626 \cdot 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$

ν = Frecuencia de la onda [s^{-1}]

c = Velocidad de la luz en el vacío, $3 \cdot 10^8 [\text{m}/\text{s}]$

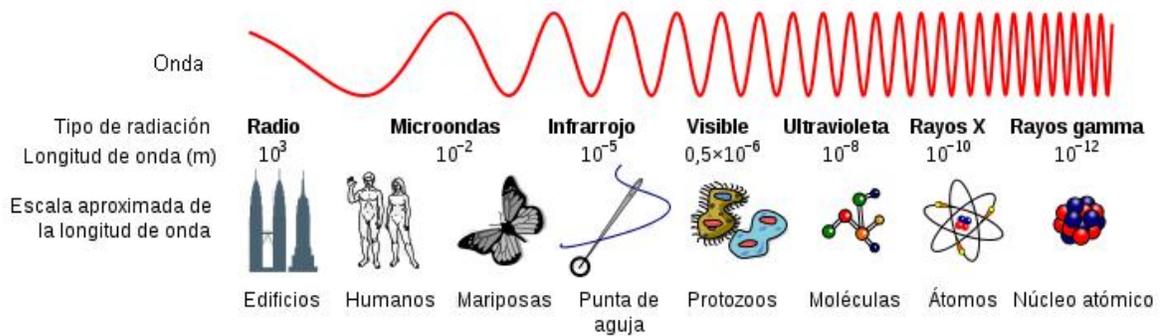
λ = Longitud de onda [m]

Según estas ecuaciones a menor longitud de onda, mayor frecuencia, mayor energía, mayor temperatura y por consiguiente mayor calor, es decir, a mayor temperatura en el cuerpo más importante es la transmisión de calor a través de la radiación electromagnética.

A medida que el cuerpo se calienta comienza a emitir longitudes de onda cada vez más cortas (de mayor energía) comenzando con las ondas de radio, y siguiendo, en orden ascendente, con ondas IR, luz visible, ondas UV, rayos X, rayos γ , por nombrar algunas.

³ Cuerpo negro: es aquel cuerpo que absorbe toda la energía que incide en él, $\alpha = \epsilon = 1$.

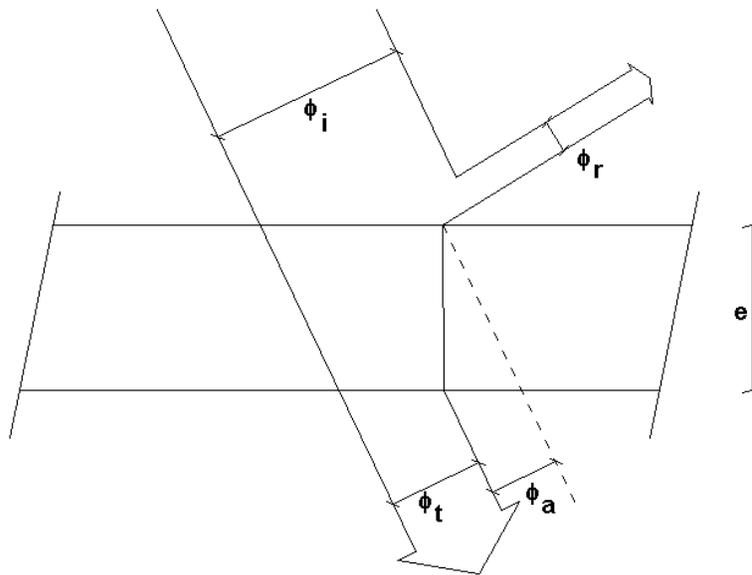
Imagen 2.1
Espectro Electromagnético ó Longitud de onda



En la imagen 2.1 se presenta una comparación de la escala que posee la longitud de onda en relación al tamaño de elementos conocidos.

Ahora es necesario analizar la forma en que los cuerpos reciben la energía que es emitida en forma de radiación, entonces se tendrá un flujo de energía incidente (ϕ_i) al cuerpo receptor, y este puede reaccionar de tres formas: reflejando, absorbiendo y/o transmitiendo la energía, como se muestra en la imagen 2.2.

Imagen 2.2
Comportamiento de un receptor



Donde:

ϕ_i : flujo incidente

ϕ_r : flujo reflejado

ϕ_a : flujo absorbido

ϕ_t : Flujo transmitido

De aquí se obtiene la siguiente relación:

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \quad (10)$$

Se definen los factores de absorción, de reflexión y de transmisión:

$$\alpha = \frac{\phi_a}{\phi_i} \quad (11)$$

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i} \quad (12)$$

$$\tau = \frac{\phi_t}{\phi_i} \quad (13)$$

Por lo tanto los factores definidos cumplen la siguiente ecuación:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (14)$$

Dichos factores dicen cuánto porcentaje de la energía total incidente es destinada a ser reflejada, absorbida y/o transmitida por el material. Así la cantidad de energía que se encargará de elevar la temperatura del elemento es la proporción α de la energía incidente, y la temperatura final del elemento estará dada por la ecuación (1).

Referente a la emisión y recepción de radiación, las propiedades emisividad (ε) y absorptividad (α) cumplen:

$$\alpha = \varepsilon \quad (15)$$

Es decir, la capacidad que tiene un cuerpo de emitir ondas electromagnéticas es la misma que tiene para absorberlas.

Se debe destacar que dentro del espectro electromagnético la radiación que tiene influencia térmica sobre los elementos materiales corresponde a:

- La onda larga de la radiación UV
- El espectro visible, $0.4 [\mu\text{m}] < \lambda < 0.7 [\mu\text{m}]$
- El espectro IR, $0.7 [\mu\text{m}] < \lambda < 1000 [\mu\text{m}]$

2.3 Estados de transferencia térmica

La transferencia de calor, al igual que otros procesos físicos, puede ser variable en el tiempo, es decir, al existir un desequilibrio en el sistema, este tratará de llegar al equilibrio, usualmente al principio el proceso es más bien desordenado con respuestas variables, luego se torna ordenado con respuestas constantes, es por esta razón que se define un estado estático de transferencia de calor y otro dinámico o transiente.

Esta transferencia de calor ocurre a través del muro, entre el interior y el exterior de la vivienda, por lo tanto sucede mediante conducción. La ecuación general que rige el gradiente de temperatura es:

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \nabla^2 T \quad (16)$$

Donde:

ρ = Densidad [kg/m^3]

C = Calor específico [$\text{kcal}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$]

λ = Conductividad [$\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$]

T = Función tiempo-espacial de temperatura, $T=T(x(t), y(t), z(t), t)$ [$^\circ\text{C}$]

Como el caso analizado es el del muro, sólo interesa la transferencia de calor unidireccional perpendicular al plano del muro, modificando la ecuación (16) queda:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot C} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (17)$$

2.3.1 Estado estático

Este estado se produce, idealmente, cuando las temperaturas del interior y exterior del cerramiento permanecen casi constantes, es decir, no existe una variación temporal de temperatura.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad \xrightarrow{\text{Reemplazando en (17)}} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (18)$$

De esta forma el gradiente de temperatura del elemento es lineal a través del espesor, consecuencia de haber alcanzado el equilibrio entre las ganancias y las pérdidas calóricas.

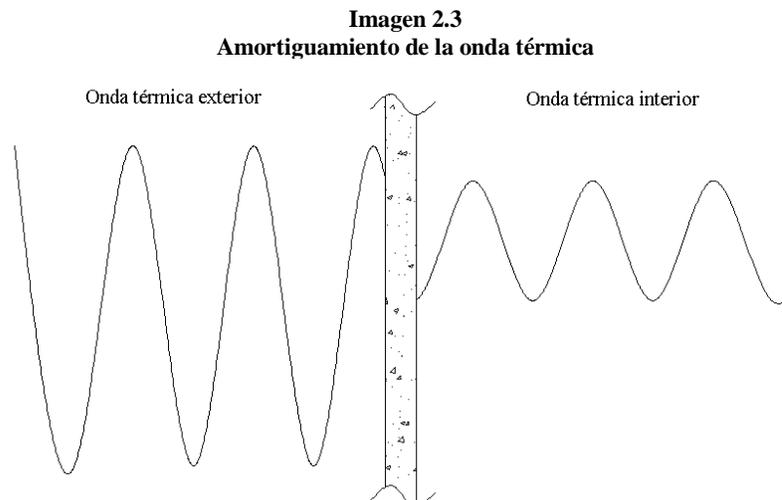
Como se observa en este estado lo único que hace hostil el paso del calor es la resistencia térmica, por lo tanto en un estado estacionario el diseño se puede realizar solamente controlando dicho parámetro.

Este estado de transferencia térmica se considera válido para condiciones climáticas de invierno, debido a la baja amplitud térmica y a la baja radiación que incide en los cerramientos, haciendo que la temperatura ambiente se pueda considerar constante. Por otra parte la temperatura interior de las viviendas se mantiene alrededor de los 22°C (considerando que el 95% de las personas está a gusto entre 18°C y 23°C). Por esto se puede decir que tanto la temperatura interior como exterior permanecen casi constantes, haciendo que el muro se mueva en estados cercanos al equilibrio, estableciendo un estado estático de transferencia de calor.

2.3.2 Estado dinámico

Este estado se produce cuando se presentan variaciones temporales importantes de temperatura entre las caras del cerramiento, por lo tanto la ecuación que rige esta transmisión de calor es la ecuación (17).

De la ecuación (17) se desprende que para el análisis de los cerramientos en régimen dinámico es necesaria la inclusión del calor específico y de la densidad del material, es decir, la inclusión de la inercia térmica. Haciendo preponderante la cantidad de calor que puede guardar el muro, ayudando a un amortiguamiento de la onda como se observa en la imagen 2.3.



Como se puede apreciar, además de existir un amortiguamiento de la onda se presenta una temperatura media más próxima al peak superior que al peak inferior, esto se debe a que en un estado dinámico el muro guarda calor, cediéndolo al interior en las horas frías, se puede decir que el muro es una pila de calor, que se carga durante los periodos de calor y se descarga durante los periodos de frío.

Este estado se logra bajo condiciones de verano, debido a la importante ganancia calórica que presentan los muros perimetrales por radiación solar directa, generando importantes gradientes de temperatura en función del tiempo entre las caras del muro.

El diseño en estado dinámico ó condición de verano ó contempla ganancias calóricas (por radiación solar) diferentes a las pérdidas, es decir, cierta cantidad de energía queda alojada en el muro y se encarga de elevar y mantener el gradiente térmico existente en él. Por otro lado las pérdidas que se producen ocurren tanto hacia el exterior como hacia el interior de la vivienda ($T^{\circ}_{\text{Muro}} > T^{\circ}_{\text{Exterior}}$ y $T^{\circ}_{\text{Muro}} > T^{\circ}_{\text{Interior}}$), produciendo esto que la obtención de la respuesta térmica teórica necesite procesos más complejos en su análisis.

2.4 Parámetros de análisis térmico

Para realizar un análisis térmico es necesario conocer los parámetros que explican el comportamiento y la respuesta de la construcción frente a las variaciones temporales de temperatura, siendo estos de vital importancia al momento de realizar comparaciones cuantitativas de los ensayos realizados.

2.4.1 Resistencia térmica

La resistencia térmica de un elemento se define como la capacidad del elemento para oponerse al paso de calor a través de él. En un elemento homogéneo la resistencia térmica es función del espesor del elemento y de la conductividad térmica del material.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (19)$$

Donde:

e = Espesor del elemento [m]

λ = Conductividad del material [W/m·°C]

El calor en los cerramientos se transmite por convección a través del aire hacia el muro, y luego, por conducción a través del muro en la dirección del gradiente de temperatura.

Por dinámica de fluidos se sabe que la película de fluido que se encuentra en contacto con un sólido posee la misma velocidad que el sólido, por lo tanto, en un cerramiento el aire que está en contacto directo con el muro se considera quieto, esto genera una resistencia adicional a la del muro solo. Por lo tanto es necesario considerar la resistencia térmica del cerramiento como la compuesta por las películas adyacentes de aire al muro más la resistencia de todas las capas que componen el muro.

Para un muro de un cerramiento cualquiera compuesto por varias capas de materiales diferentes y considerando las capas de aire estático adyacente a las caras de muro, la resistencia térmica responde a la ecuación 20.

$$R_{Total} = R_{si} + \sum_i \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{se} \quad (20)$$

Donde:

R_{si} = Resistencia superficial interior [m²·°C/W] (ver 2.2.2)

R_{se} = Resistencia superficial exterior [m²·°C/W] (ver 2.2.2)

Es importante destacar que en la normativa chilena ó OGUC⁴ ó se limita la transmitancia total máxima (U_{Total}) que pueden tener los cerramientos, de esta forma se limita la máxima cantidad de calor que puede atravesar el cerramiento.

$$U_{Total} = \frac{1}{R_{Total}} \quad (21)$$

Donde:

U_{Total} = Transmitancia total [W/m²·°C]

2.4.2 Efusividad térmica

La efusividad térmica, b, se define como la capacidad de un material para absorber o entregar calor por unidad de tiempo, es decir, la capacidad para intercambiar calor con su entorno, y por lo tanto es el parámetro relevante para la calificación de los procesos de intercambio térmico de superficies.

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C} \quad (22)$$

Donde:

λ = Conductividad térmica [W/m·°C]

ρ = Densidad del material [kg/m³]

C = Calor específico del material [J/kg·°C]

Al analizar la ecuación (22) se observa que un material es altamente efusivo cuando posee elevada densidad, elevado calor específico y alta conductividad, lo que se traduce en una buena capacidad para guardar calor elevando mínimamente su temperatura, pudiendo transmitir este calor con facilidad hacia el exterior. Usualmente los materiales más densos poseen mayor calor específico y mayor conductividad, esto usualmente ocurre inversamente con los menos densos.

Tabla 2.3
Efusividad de materiales

Material	λ [W/m·°C]	ρ [kg/m ³]	C [kcal/kg·°C]	b [J/m ² ·°C·√s]
Ladrillo	0.8	1800	0.2	1097
Madera	0.13	800	0.6	511
Fibra de Vidrio	0.05	91	0.19	60
Agua	0.58	1000	1	1557
Acero	58	7850	0.11	14475

⁴ OGUC: Ordenanza General de Urbanismo y Construcción

2.4.3 Inercia térmica

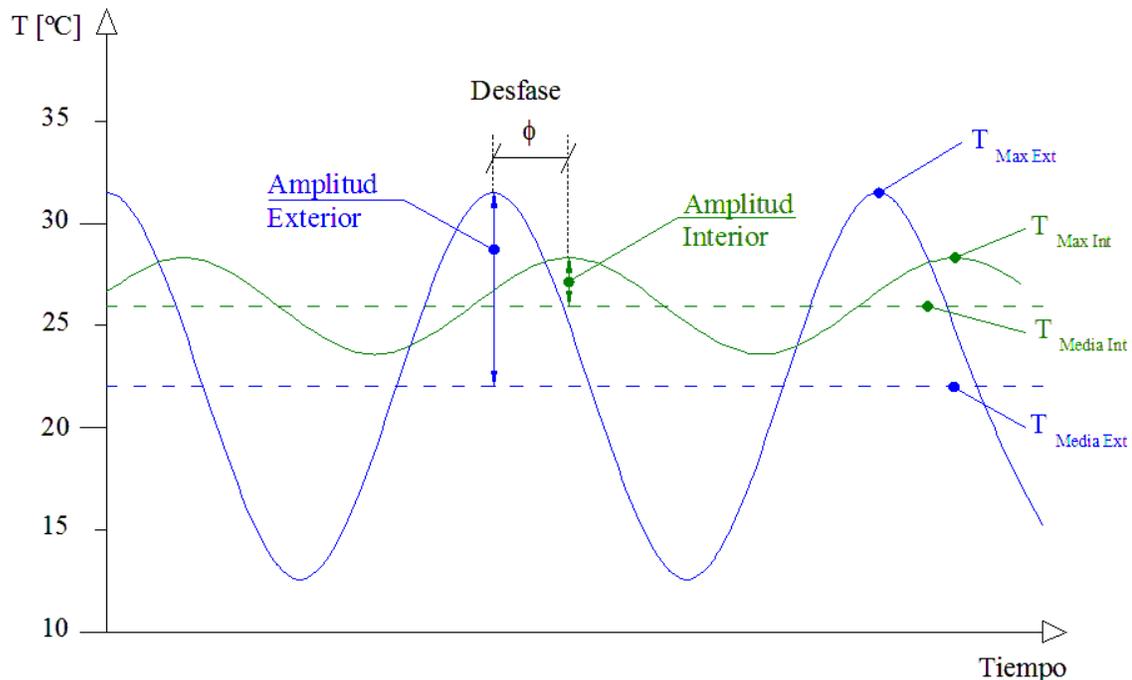
La inercia, en forma general, representa la oposición de un cuerpo para cambiar su estado físico, es decir, mientras mayor sea la inercia de un cuerpo, mayor cantidad de energía se necesitará para ubicarlo en un nuevo estado, sea este de movimiento (velocidad) o térmico (temperatura).

La inercia térmica que posee una vivienda regula las fluctuaciones interiores de temperatura, amortiguando las sollicitaciones térmicas exteriores. Se puede diferenciar entre dos tipos de inercia: de transmisión y de absorción, la primera corresponde a la oposición que generan los muros perimetrales a los cambios térmicos ó produciendo principalmente un desfase de la onda ó y la segunda corresponde a la regulación de temperatura que generan los muros interiores absorbiendo/restituyendo calor del medio interior.

Es importante mencionar que la inercia por absorción posee una relación directa con la efusividad térmica, pues esta es la encargada de regular la temperatura interior mediante la absorción/restitución de calor.

Las consecuencias que presenta la inercia térmica ó transmisión más absorción ó son una reducción en la amplitud de la onda de temperatura interior con respecto a la onda exterior, un desfase temporal entre los peaks interiores y exteriores y un aumento de la temperatura media diaria.

Imagen 2.4
Efectos de la Inercia Térmica



No existe una fórmula que cuantifique la inercia térmica que posee una vivienda, sino que esta es medida por las consecuencias que presenta la oscilación térmica interior frente a una sollicitación exterior. Los parámetros que son usados para realizar una catalogación en términos de mayor o menor inercia térmica son: Desfase temporal, factor de reducción de la onda (FRO) y el factor de disminución de la temperatura (FDT).

2.4.4 Desfase

El desfase es la diferencia temporal entre los peaks de temperatura. A pesar que en la teoría el desfase es único, en la práctica se presentan 2 desfases diarios, pues rara vez concuerda el desfase entre los peaks máximos con el desfase entre los peaks mínimos.

Los dos desfases mencionados corresponden a los calculados con las horas en las que ocurren las temperaturas máximas y las temperaturas mínimas

$$\phi_{\max} = t_{T^{\circ}\text{ext max}} - t_{T^{\circ}\text{int max}} \quad (23)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \phi_{\max} &= \text{Desfase máximas [hh:mm:ss]} \\ t_{T^{\circ}\text{ext max}} &= \text{Hora de la temperatura exterior máxima [hh:mm:ss]} \\ t_{T^{\circ}\text{int max}} &= \text{Hora de la temperatura interior máxima [hh:mm:ss]} \end{aligned}$$

$$\phi_{\min} = t_{T^{\circ}\text{ext min}} - t_{T^{\circ}\text{int min}} \quad (24)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \phi_{\min} &= \text{Desfase mínimas [hh:mm:ss]} \\ t_{T^{\circ}\text{ext min}} &= \text{Hora de la temperatura exterior mínima [hh:mm:ss]} \\ t_{T^{\circ}\text{int min}} &= \text{Hora de la temperatura interior mínima [hh:mm:ss]} \end{aligned}$$

Para el análisis se define:

$$\bar{\phi}_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_{\max i}}{n} \quad (25)$$

$$\bar{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_{\max i} + \sum_{i=1}^n \phi_{\min i}}{2 \cdot n} \quad (26)$$

Donde:

$$\begin{aligned} n &= \text{Cantidad de sensores de temperatura []} \\ \bar{\phi}_{\max} &= \text{Promedio de los desfases máximas [hh:mm:ss]} \\ \bar{\phi} &= \text{Promedio de todos los desfases [hh:mm:ss]} \end{aligned}$$

2.4.5 Factor de Reducción de la onda (FRO)

El factor de reducción de la onda es un ponderador de la oscilación exterior que cuantifica qué porcentaje de la amplitud exterior se hará presente en el interior de la vivienda, es decir, cuán amortiguada se presenta la onda térmica exterior en el interior de la vivienda.

$$FRO = 1 - \frac{A_{\text{int}}}{A_{\text{ext}}} \quad (27)$$

Donde:

$$\begin{aligned} A_{\text{int}} &= \text{Amplitud Interior [}^{\circ}\text{C]} \\ A_{\text{ext}} &= \text{Amplitud Exterior [}^{\circ}\text{C]} \\ FRO &= \text{Factor de reducción de la onda [\%]} \end{aligned}$$

Como referencia se determina el FRO para enero como sigue: la NCh1079 establece que la amplitud corresponde a 16.5[°C], y teniendo en cuenta el rango de confort entre 18[°C] y 23[°C], se obtiene:

$$FRO = 1 - \frac{2.5}{8.25} = 0.7$$

La ecuación anterior establece un valor teórico del FRO que asegura una oscilación en el interior de la vivienda tal que siempre la amplitud interior esté dentro del rango de confort. En este caso se necesita que el 70% de la onda exterior sea reducida, es decir, que la amplitud interior sea solamente un 30% de la amplitud exterior.

2.4.6 Factor de Disminución de la temperatura (modificado)

Es fácil observar que únicamente con el FRO no es posible situar la curva de oscilación térmica interior dentro de un gráfico de temperatura en función del tiempo, por lo que es necesaria la incorporación de un factor que establezca una relación entre la temperatura interior y la exterior, este factor se define como el factor de disminución de la temperatura y corresponde a la razón entre la temperatura máxima interior y la temperatura máxima exterior.

$$FDT = \frac{T_{\max \text{ int}}}{T_{\max \text{ ext}}} \quad (28)$$

Donde:

$$\begin{aligned} T_{\max \text{ int}} &= \text{Temperatura máxima interior [°C]} \\ T_{\max \text{ ext}} &= \text{Temperatura máxima exterior [°C]} \\ FDT &= \text{Factor de disminución de la temperatura []} \end{aligned}$$

Este factor representa una simple relación entre las temperaturas máximas interiores y exteriores, es decir, sin un significado directo ó como el FRO ó, se propone mejorar este factor dándole un significado directo mediante su expresión como un porcentaje.

$$FDT_m = 1 - \frac{T_{\max \text{ int}}}{T_{\max \text{ ext}}} \quad (29)$$

Donde:

$$\begin{aligned} T_{\max \text{ int}} &= \text{Temperatura máxima interior [°C]} \\ T_{\max \text{ ext}} &= \text{Temperatura máxima exterior [°C]} \\ FDT_m &= \text{Factor de disminución de la temperatura [\%]} \end{aligned}$$

Como referencia se determina el FDT_m para enero como sigue: la NCh1079 establece que $T_{\max \text{ ext}}=29.4[°C]$ y del rango de confort $T_{\max \text{ int}}=23[°C]$, entonces:

$$FDT = \frac{23}{29.4} = 0.78 \qquad FDT_m = 1 - \frac{23}{29.4} = 0.22$$

Entonces si una vivienda posee $FRO=70\%$ y $FDT_m=22\%$, no necesitaría utilizar un climatizador, pues estos parámetros aseguran que la temperatura interior siempre estará dentro del rango de confort.

2.4.7 Demanda y Consumo

Entiéndase como demanda la cantidad de energía que es necesaria suministrar o retirar de un determinado sistema para mantener una temperatura deseada, mientras que el consumo depende del rendimiento del dispositivo que se utilice para lograr la demanda requerida.

El rendimiento, η , de un dispositivo se define como la razón entre la cantidad de energía entregada por el dispositivo y la cantidad de energía consumida por él. Esto sitúa la eficiencia entre 1 y 0, siendo 1 un rendimiento del 100%.

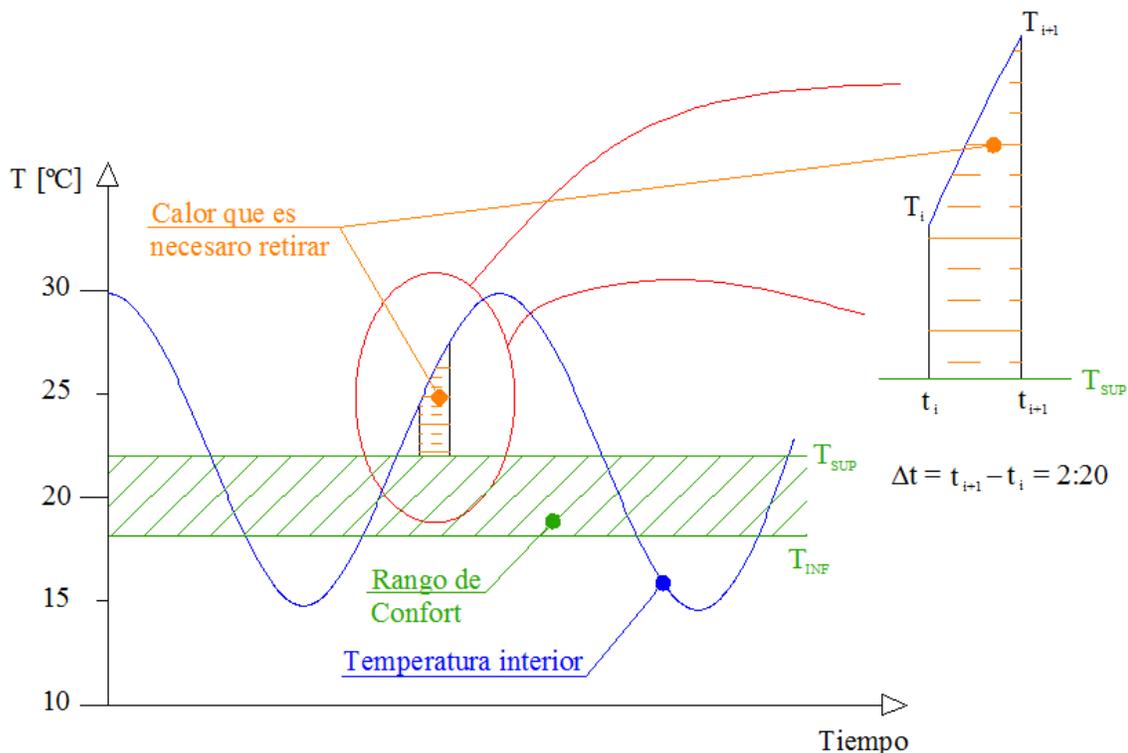
En general los análisis térmicos teóricos consideran la ventilación, ganancias y pérdidas calóricas de un sistema para estimar la energía que es necesaria retirar o suministrar al volumen de control para mantener un estado de confort térmico.

En un análisis térmico empírico se registra la curva de temperatura real, logrando obtener la cantidad de calor existente dentro del volumen de control. Esta medición es la respuesta a las sollicitaciones térmicas, es decir, no se realiza una estimación de la energía, sino que se tiene la certeza de la energía existente dentro del sistema.

La demanda, y como consecuencia el consumo de energía para climatización sólo existe cuando la temperatura del sistema en estudio está fuera del rango de confort.

Sea la temperatura T_i el valor medido en el instante t_i de una curva de temperatura de un volumen de control dado, y sean T_{sup} y T_{inf} las temperaturas extremas del rango de confort establecido (ver imagen 2.5).

Imagen 2.5
Calor extra existente en la caseta



El calor que se debe retirar o suministrar en el instante t_i está dado por la ecuación (1) modificada como sigue:

Refrigeración:

$$Q_i = m \cdot Ce \cdot (T_i - T_{\text{sup}}) \quad (30)$$

Calefacción:

$$Q_i = m \cdot Ce \cdot (T_{\text{inf}} - T_i) \quad (31)$$

La energía que se debe retirar o suministrar en un periodo de tiempo corresponde al promedio ponderado de la curva de temperatura en el tiempo en que es necesaria la climatización, es decir,

Refrigeración:

$$\bar{Q}_R = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i \right)}{t_R} \quad (32)$$

Calefacción:

$$\bar{Q}_C = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i \right)}{t_C} \quad (33)$$

Donde :

t_R = Tiempo en que se necesita refrigerar [seg]

t_C = Tiempo en que se necesita calefaccionar [seg]

Δt_i = Intervalo de tiempo entre el dato i y el $i+1$, $\Delta t_i = t_{i+1}$ ó t_i , [seg]

n = Cantidad de registros diarios

Como se puede apreciar esto corresponde a integrar la curva de temperatura en el tiempo y luego promediarla en el intervalo de tiempo donde es necesaria la climatización. De esta forma se obtiene un promedio de la energía necesaria para la climatización.

Obtenida la demanda de energía necesaria para refrigerar y calefaccionar el volumen de control el consumo está dado por:

Refrigeración:

$$C_R = \frac{\bar{Q}_R}{\eta_R} \quad (34)$$

Calefacción:

$$C_C = \frac{\bar{Q}_C}{\eta_C} \quad (35)$$

Donde:

C_R = Consumo de refrigeración [KWh]

η_R = Rendimiento del dispositivo de refrigeración []

C_C = Consumo de calefacción [KWh]

η_C = Rendimiento del dispositivo de calefacción []

2.4.7.1 Análisis del rendimiento⁵

El rendimiento en aparatos eléctricos de calefacción se mide mediante un factor llamado CoP, acrónimo de su significado en inglés *Coefficient of Performance*, el cual mide la capacidad calorífica por watt consumido del tomacorriente.

Análogamente para aparatos eléctricos de refrigeración se define el EER, acrónimo de su significado en inglés *Energy Efficiency Ratio*.

Ambos, CoP y EER, se definen matemáticamente como la capacidad de ceder o sacar calor medida en BTU/hr dividida por la potencia consumida, es decir:

$$[EER] = \left[\frac{BTU/hr}{W} \right]$$

Según [15] las eficiencias de las unidades de ventana de refrigeración, medida mediante el factor EER, son del orden de 2, es decir, refrigeran 2 BTU por hora por cada watt consumido, esto equivale a un rendimiento del 60% aproximadamente.

Mientras que una estufa eléctrica tiene un CoP cercano a 3.4, lo que equivale a un rendimiento del 100% aproximadamente.

Es importante mencionar que existen aparatos que poseen rendimientos de hasta el 300%, estos son las llamadas bombas de calor las cuales no generan o restan calor por medios propios, si no que mueven o *bombean* calor de un medio hacia otro, es por esto que la cantidad de energía cedida sea mucho mayor que la cantidad de energía consumida.

Para los cálculos sucesivos se tomará un rendimiento de calefacción de $\eta=1$ y un rendimiento de refrigeración de $\eta=0.6$.

⁵ Para mayor información consultar las referencias [15], [16] y [17] especificadas en la bibliografía

Capítulo 3

Trabajo Experimental

3.1 Introducción

El objetivo del trabajo experimental es obtener la respuesta de la caseta de prueba frente a sollicitaciones térmicas externas bajo diferentes condiciones, las cuales mezclan tipos de ventilación, introducción de masa efusiva y radiación solar.

Se dispuso de 4 sensores, los cuales miden temperatura y humedad, estos fueron ubicados dentro y fuera de la caseta, ubicándose en el interior en las zonas aledañas el cielo y al radier, y en el exterior se colocó en una estación meteorológica que lo aisló de la radiación solar.

La distribución de la masa efusiva dentro de la caseta se logró mediante la inclusión de botellas de agua repartidas en altura, como muestran las imágenes 3.7 y 3.8. Dentro de una de las botellas se sumergió un sensor para registrar la temperatura del agua.

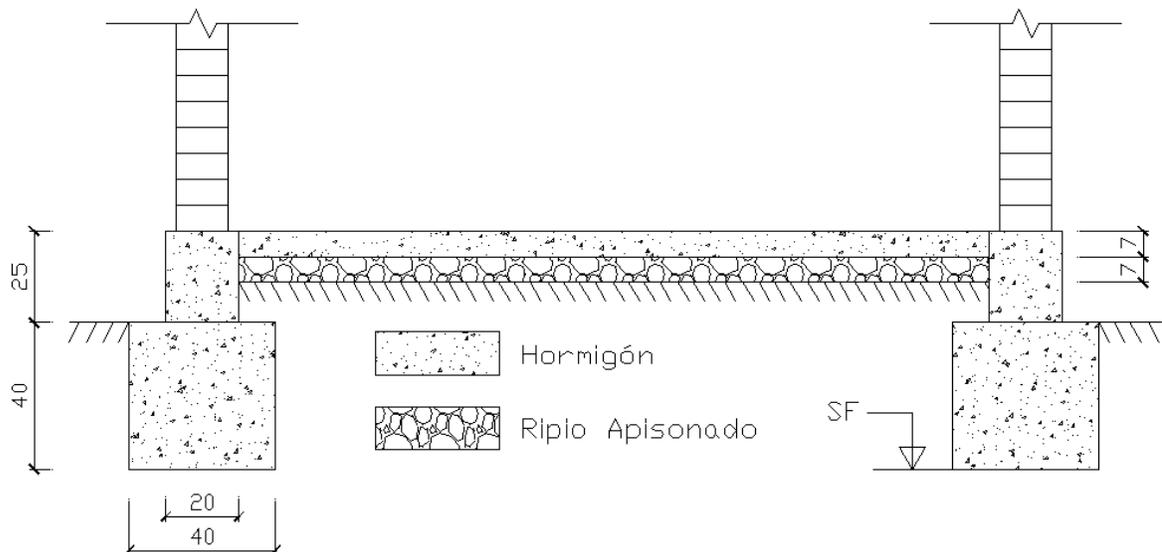
3.2 Caseta de prueba y Aislación

La caseta de prueba se encuentra en los laboratorios de IDIEM ubicados en Salomón Sack 840, Cerrillos, Santiago. Está construida en base a albañilería armada, utilizando ladrillo prensado a máquina, además posee aislación térmica aplicada por el exterior (poliestireno).

3.2.1 Estructuración

Las fundaciones se presentan como fundaciones corridas de 40x40[cm] perimetrales bajo muro, con sobrecimientos corridos de 20x25[cm], ambos de hormigón. La losa de piso está constituida por una cama de ripio apisonado de 7[cm] y sobre ella un radier de hormigón de 7 [cm] de espesor.

Imagen 3.1
Detalle de fundaciones y radier [cm]



Los muros están constituidos por albañilería armada, en base a ladrillo prensado a máquina de 29x14x7.1[cm], con 1,5[cm] de cantería. La armadura vertical corresponde a $\phi 8@61$ y horizontal escalerilla ACMA cada dos hiladas. Los muros poseen un coronamiento con cadenas 15/25[cm] de hormigón armado.

Imagen 3.2
Estructura de Planta [cm]

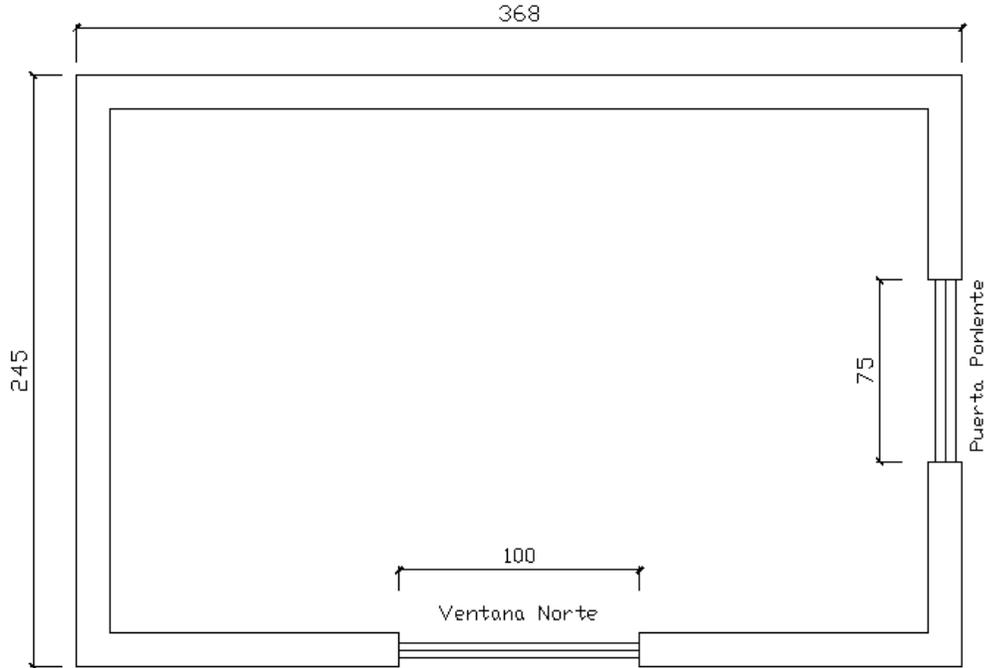
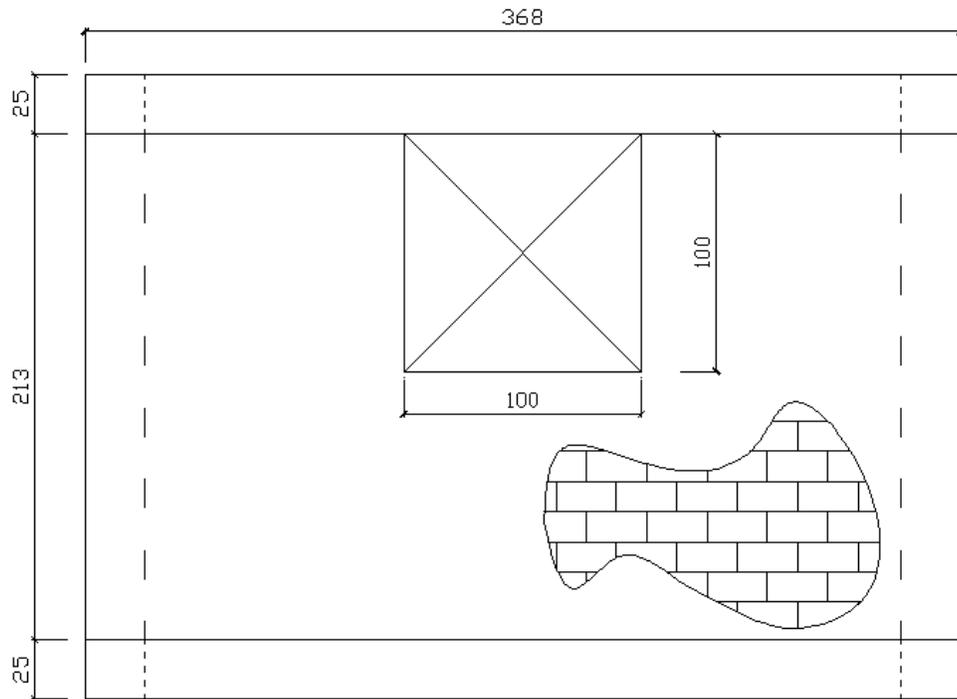
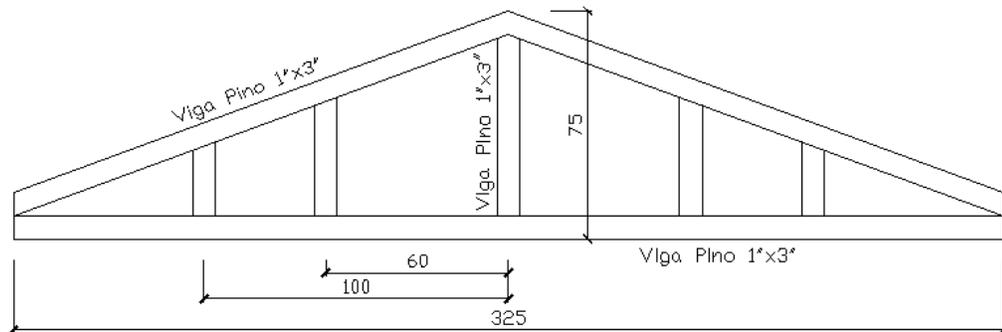


Imagen 3.3
Elevación Norte [cm]



La estructura de techo está formada por cerchas de madera cada 120[cm] fijadas por espárragos a la cadena. Estas están formadas por vigas de pino estructural de 10x30 con contraventaciones de pino estructural de 10x30. El cielo está constituido por vigas de pino de 20x20@60[cm].

Imagen 3.4
Cerchas de techo



Los frontones poseen un entramado de vigas de pino de 20x20 las cuales sostienen las planchas de fibrocemento de $e = 4$ [mm]. La cubierta de techo consiste en planchas de acero zincalum 5V, fijada con clavos de acero galvanizado y golillas de plomo cóncavas.

3.2.2 Aislación

Cabe destacar que los ensayos realizados en el verano del 2008 cuentan con aislación en el cielo y en la puerta, se realizó así para evitar puentes térmicos, pues se deseaba estudiar la influencia de la masa de muro, por lo tanto se debía evitar la entrada o salida de calor a través de superficies no deseadas, como la puerta o el cielo. Esta aislación consiste en 3 colchonetas de lana mineral de 50[mm] de espesor cada una, colocadas sobre el cielo, y la puerta posee 40[mm] de lana mineral en su interior.

Los muros fueron abrigados con 100[mm] de poliestireno expandido de densidad 15[kg/m³], este material fue adherido a la albañilería mediante ðMASTER FIX ALPHA Estuco Adhesivo Cementicio Monocomponente.

Imagen 3.5
Caseta de prueba sin aislación



Imagen 3.6
Caseta de prueba con aislación exterior



3.3 Ensayos

3.3.1 Enfoque

Los ensayos realizados pretenden determinar la respuesta que presenta el conjunto masa de muro/aislación exterior, y comparar esta respuesta con los ensayos realizados en [2] ó verano 2008 ó, y de esta forma poder determinar la influencia que presenta la aislación exterior en la respuesta térmica de la caseta de prueba.

3.3.2 Variables influyentes en la respuesta térmica

Para poder estudiar la respuesta de la caseta de prueba se realizaron 7 ensayos, los cuales tratan diferentes variables influyentes en la respuesta térmica. Dichas variables son:

- Ventilación
- Masa efusiva
- Radiación solar

3.3.2.1 Ventilación

La ventilación afecta mediante un traspaso convectivo de calor, por lo tanto se espera que a mayor ventilación la temperatura interior de la caseta sea más cercana a la exterior. Por este motivo los ensayos realizados utilizan la ventilación de tres formas:

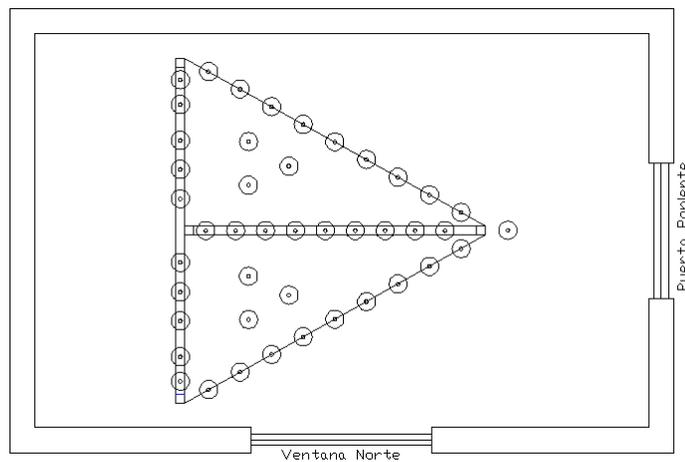
- Ventilación natural: corresponde a mantener la puerta y ventana cerradas las 24 horas.
- Ventilación permanente: corresponde a mantener la puerta y la ventana de la caseta abierta las 24 horas del día.
- Ventilación nocturna: corresponde a mantener la puerta y la ventana abierta, únicamente, entre las 19:30 y las 7:30 horas.
- Ventilación nocturna forzada: corresponde a agregar un ventilador en mínima potencia a la ventilación nocturna.

3.3.2.2 Masa Efusiva

La masa efusiva interior es un regulador de la temperatura, ya que es capaz de absorber calor cuando la temperatura interior de la caseta es mayor que la propia y luego cuando se invierte el estado térmico devuelve dicho calor al medio interior de la caseta, variando muy poco su temperatura y estableciendo una regulación térmica.

Este punto fue tratado en la memoria [2], pero el problema que surgió fue que la superficie de traspaso con la que se contaba era muy reducida, pues se utilizaron tambores llenos de agua, para corregir este hecho se dispuso de botellas llenas de agua, utilizando el mismo volumen que en los ensayos realizados en [2], repartidas en altura y dispuestas en forma triangular dentro de la caseta.

Imagen 3.7
Distribución de botellas en planta



Para los ensayos con agua se dispusieron de 108 botellas de 3[tl], en total 324 [lt] de agua, equivalente a los 325 [lt] utilizados en los ensayos hechos en [2].

Imagen 3.8
Fotografías de las botellas colgadas



Los ensayos realizados con masa efusiva interior tienen el objetivo de cuantificar el aporte que generan las divisiones interiores de material pesado en el control de la temperatura al interior de las viviendas.

Para determinar la influencia que posee el incremento del área de traspaso en el control de la temperatura que genera la masa efusiva, se realizó un ensayo con las botellas en el interior de la caseta sin hacer uso de la aislación exterior. Luego se instaló la aislación exterior y se realizó el mismo ensayo.

3.3.2.3 Radiación Solar

La radiación solar puede elevar las temperaturas de los materiales con mucha facilidad si ellos están expuestos en forma directa, así por ejemplo la temperatura de una habitación puede elevarse rápidamente debido a la radiación que ingresa por una ventana descubierta. Por este motivo se utilizó una tapa para la ventana, que controla el ingreso de radiación solar al interior de la caseta.

Imagen 3.9
Tapa de la ventana - Caseta aislada



Es importante destacar que en pavimentos que están en exposición directa a la radiación solar las temperaturas superficiales son del orden de 60[°C] a 80[°C]. De forma similar ocurre cuando la radiación solar incide sobre cualquier material dentro de una habitación, el material eleva su temperatura traspasando calor al aire que se encuentra a su alrededor, y luego por convección el aire eleva la temperatura de toda la habitación.

La temperatura que puede alcanzar un cuerpo depende de su masa y calor específico, en el caso de la caseta los muros estaban expuestos a radiación directa, por lo tanto durante el día se calientan, generando un importante gradiente de temperatura entre sus caras, traspasando calor al interior y en la noche mantienen la temperatura interior. Con la aislación exterior el muro no estará expuesto a radiación directa y trabajará como un regulador de la temperatura interior.

3.3.3 Programación y Condiciones de los ensayos

A continuación se detallan las condiciones y las fechas en las que se realizaron los ensayos.

Tabla 3.1
Programación de Ensayos 2009

	Ensayo						
	1	2	3	4	5	6	7
Fecha de realización							
Inicio	19/01	02/02	09/02	16/02	23/02	02/03	09/03
Término	25/01	08/02	15/02	22/02	01/03	08/03	15/03
Ventilación							
Natural	///	///	///	///			
Permanente					///		
Nocturna						///	
N. Forzada							///
Masa Efusiva interior [lt de agua]							
0			///	///	///	///	///
325	///	///					
Estado de la Ventana							
Tapada	///	///	///		///	///	///
Des.				///			
Aislación exterior [mm]							
0	///						
100		///	///	///	///	///	///

El ensayo 1 busca determinar el aporte de las divisiones interiores de material pesado simulados como masa efusiva, además este se realizó sin aislación exterior para cuantificar el aporte del aumento del área de traspaso (comparativamente con [2]).

El ensayo 2 busca determinar la influencia que posee la aislación exterior en la respuesta térmica, teniendo como referencia el ensayo 1.

El ensayo 3 busca determinar la respuesta de la caseta sin la ayuda reguladora de la masa efusiva interior, sólo siendo ayudada por la aislación térmica exterior.

El ensayo 4 busca determinar la influencia que tiene la radiación solar al ingresar a la caseta.

El ensayo 5 busca determinar la respuesta de la caseta cuando se encuentra constantemente ventilada.

El ensayo 6 busca determinar lo que sucede cuando la caseta es enfriada durante la noche, para comenzar el día con una temperatura similar a la exterior.

El ensayo 7 busca determinar el aporte de una ventilación ó más eficaz⁶, al incluir un ventilador durante la noche, estableciendo una convección forzada.

⁶ Más eficaz: hace referencia a un aumento en la ventilación por una convección forzada.

3.4 Sensores

Los sensores utilizados fueron data loggers programados por el software Dickson Ware. Estos pueden ser programados para tomar datos a intervalos de tiempo definidos y pueden además comenzar la toma de datos a una hora predefinida. Tienen capacidad para almacenar 4000 datos, correspondiente a fecha, hora, temperatura, humedad y número correlativo por registro.

El intervalo de tiempo definido para la toma de datos fue 2 minutos 20 segundos, comenzando con el registro de datos a las 8:00 del día lunes y terminando el día domingo aproximadamente a las 18:20 horas.

Se dispuso de dos sensores instalados dentro de la caseta, uno cercano al cielo y el otro cercano al radier, para evitar los errores de medición por gradientes térmicos al interior de la caseta.

Para determinar la onda térmica exterior se dispuso de un sensor ubicado en una estación meteorológica a un costado de la caseta de prueba, la estación posee orientación norte y mantiene protegido al sensor de la radiación solar.

En los ensayos realizados con las botellas de agua se sumergió un sensor dentro de una botella para determinar el calor absorbido por la botella.

Imagen 3.10
Sensor Data Logger ó Protección de sensor sumergido



3.4.1 Validación sensor sumergido

Para realizar la validación del sensor sumergido se midió la temperatura durante un día de las botellas de agua con un termómetro digital en forma manual y con el sensor sumergido, estableciendo luego las diferencias de temperatura entre las mediciones.

Tabla 3.2
Diferencia térmica sensor-termómetro

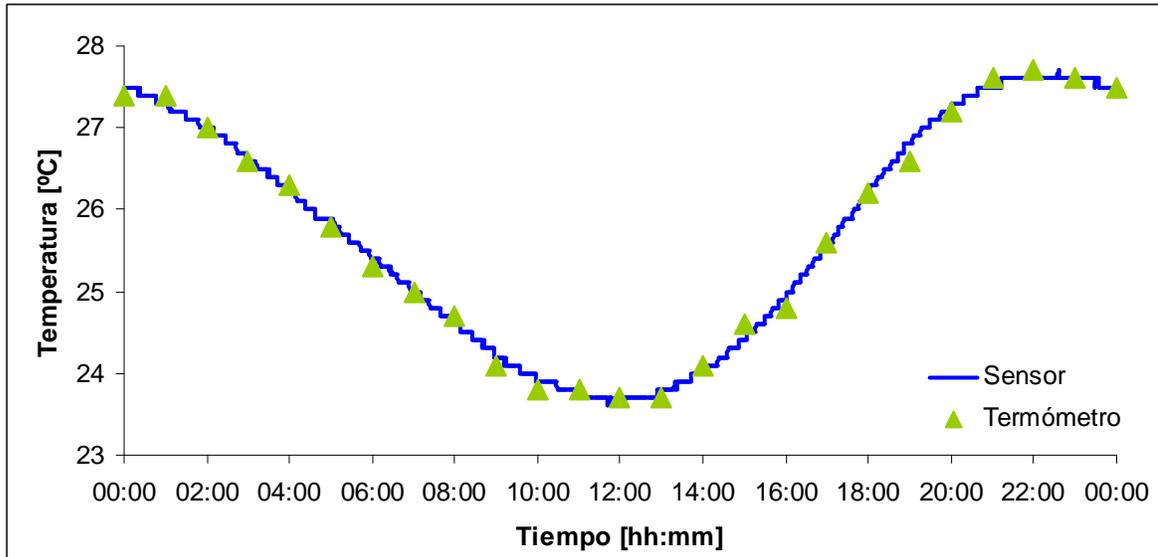
Hora [hh:mm]	T_{Sensor} [°C]	T_{Termómetro} [°C]	 ΔT [°C]
00:00	27.5	27.4	0.1
01:00	27.3	27.4	0.1
02:00	27	27	0
03:00	26.6	26.6	0
04:00	26.2	26.3	0.1
05:00	25.9	25.8	0.1
06:00	25.4	25.3	0.1
07:00	25	25	0
08:00	24.6	24.7	0.1
09:00	24.2	24.1	0.1
10:00	23.9	23.8	0.1
11:00	23.7	23.8	0.1
12:00	23.7	23.7	0
13:00	23.8	23.7	0.1
14:00	24	24.1	0.1
15:00	24.4	24.6	0.2
16:00	24.9	24.8	0.1
17:00	25.5	25.6	0.1
18:00	26.2	26.2	0
19:00	26.8	26.6	0.2
20:00	27.2	27.2	0
21:00	27.5	27.6	0.1
22:00	27.6	27.7	0.1
23:00	27.6	27.6	0
00:00	27.5	27.5	0

Se observan pequeñas diferencias entre los valores medidos por el sensor y los valores obtenidos con el termómetro digital.

El promedio entre los valores absolutos de las diferencias de temperatura entre los datos registrados por el sensor y el termómetro es 0.08°C, es decir, las diferencias registradas entre el termómetro digital y el sensor es tan pequeña que puede considerarse despreciable, validando las mediciones realizadas en los ensayos 1 y 2 del verano 2009.

Los datos de la tabla 3.2 se pueden apreciar gráficamente a continuación:

Gráfico 3.1
Validación del sensor sumergido



Capítulo 4

Análisis de resultados del trabajo experimental

4.1 Análisis de registros

La cantidad de registros entregados por cada sensor son aproximadamente 4000 líneas de datos, y cada línea posee 5 parámetros (día, hora, humedad relativa, temperatura y un número correlativo). Dada la cantidad de datos obtenidos el programa escogido para manejar los datos fue Excel.

Es importante recordar que los registros se realizaron a intervalos regulares de tiempo, con un paso $\Delta T = 20\text{s}$.

Los registros se presentan con el ordenamiento mostrado en la tabla 4.1.

Tabla 4.1
Formato de datos entregados por DicksonWare

Date/Time	Temp °C	RH %	Index
Minimum Value	10.9	20.5	
Average Value	21.5	48	
Maximum Value	31.6	84.4	
19/01/2009 08:03	10.9	84.4	0
19/01/2009 08:05	10.9	84.1	1
19/01/2009 08:08	11	84.1	2
	•		
	•		
	•		
25/01/2009 18:15	30.4	30.4	3965
25/01/2009 18:17	30.5	30.9	3966
25/01/2009 18:19	30.4	30.9	3967

Una vez establecido un formato para la planilla de cálculo se procedió a graficar los registros, y de esta forma obtener una visión global del comportamiento semanal, tanto de la sollicitación como de la respuesta térmica.

Luego de entender cualitativamente el comportamiento de la caseta frente a los ensayos realizados se procesaron los datos para obtener los parámetros que cuantificarán la respuesta.

A continuación se muestran los gráficos obtenidos, mostrando los ensayos realizados el verano 2009 y su equivalente realizado el 2008, de esta forma se puede hacer una comparación cualitativa de la respuesta.

El primer grupo comparativo es el compuesto por los gráficos 4.1, 4.2 y 4.3

Gráfico 4.1
2008 Ensayo 3 ó Caseta cerrada, sin aislación, 2 tambores de agua (325 [lt])

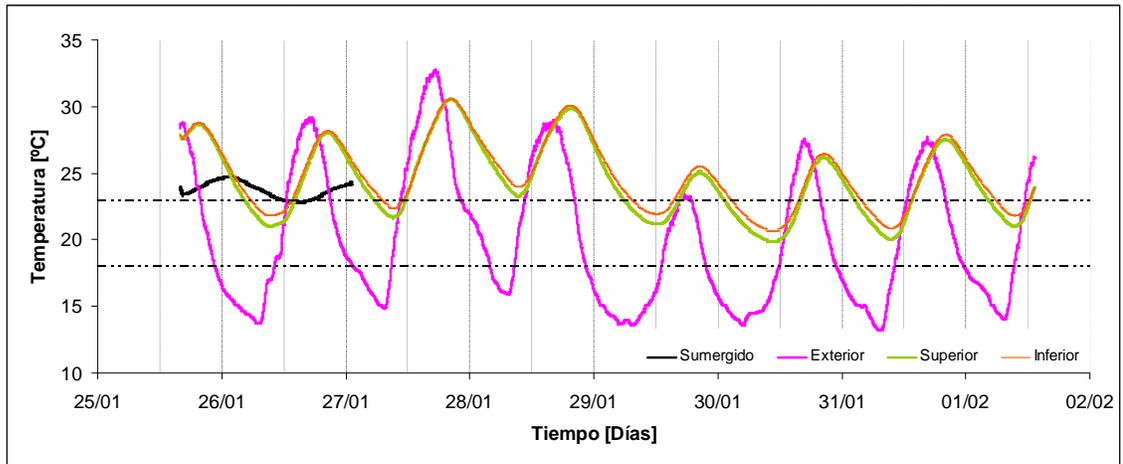


Gráfico 4.2
2009 Ensayo 1 ó Caseta cerrada, sin aislación, 108 botellas (325 [lt])

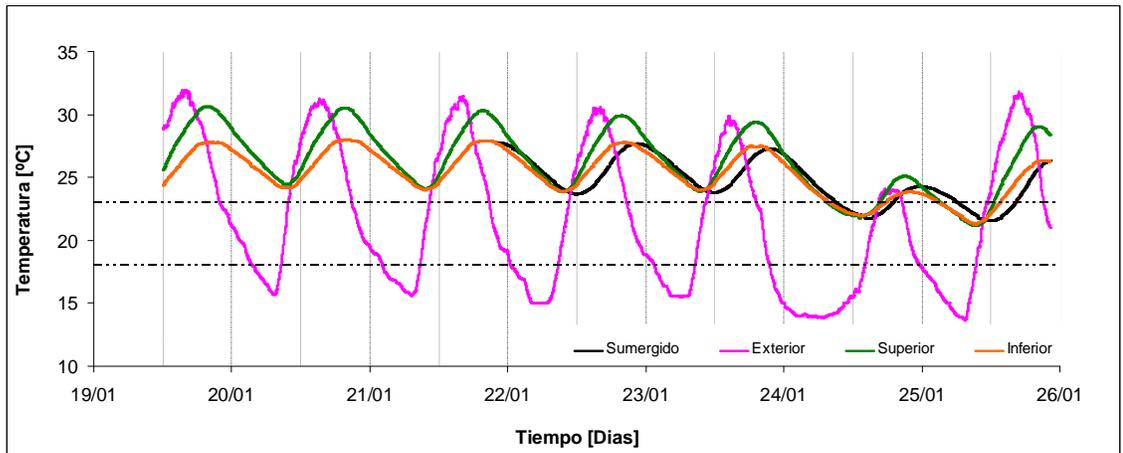
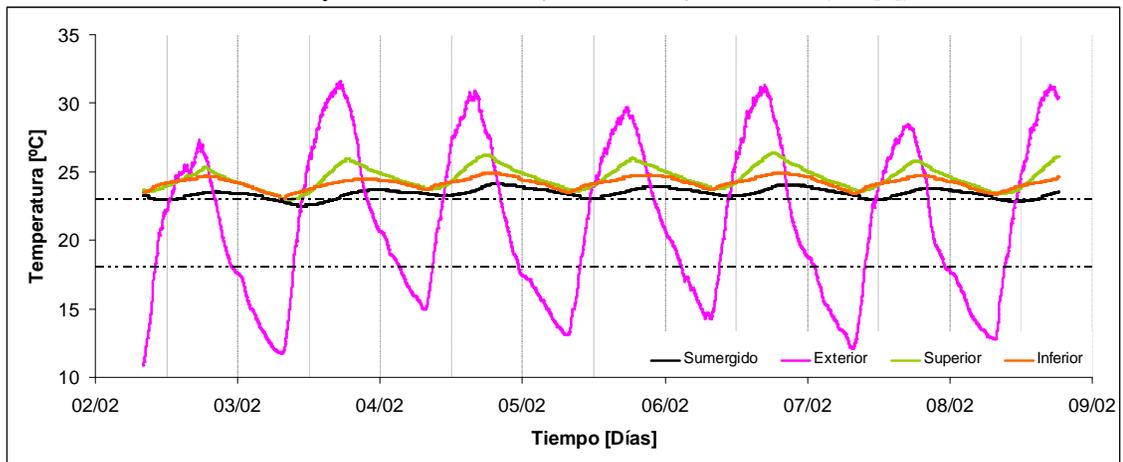


Gráfico 4.3
2009 Ensayo 2 ó Caseta cerrada, con aislación, 108 botellas (325 [lt])



El segundo grupo comparativo es el compuesto por los gráficos 4.4 y 4.5

Gráfico 4.4
2008 Ensayo 1 ó Caseta cerrada, sin aislación

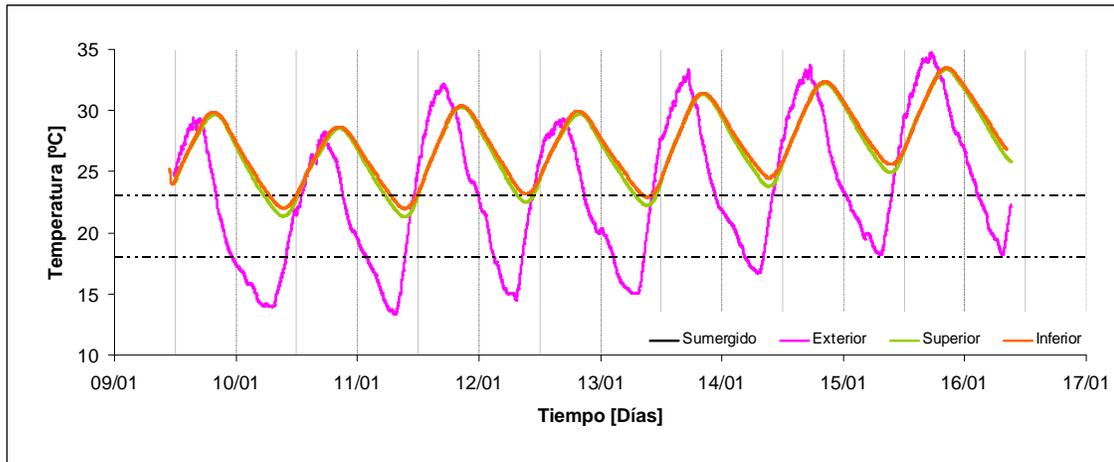
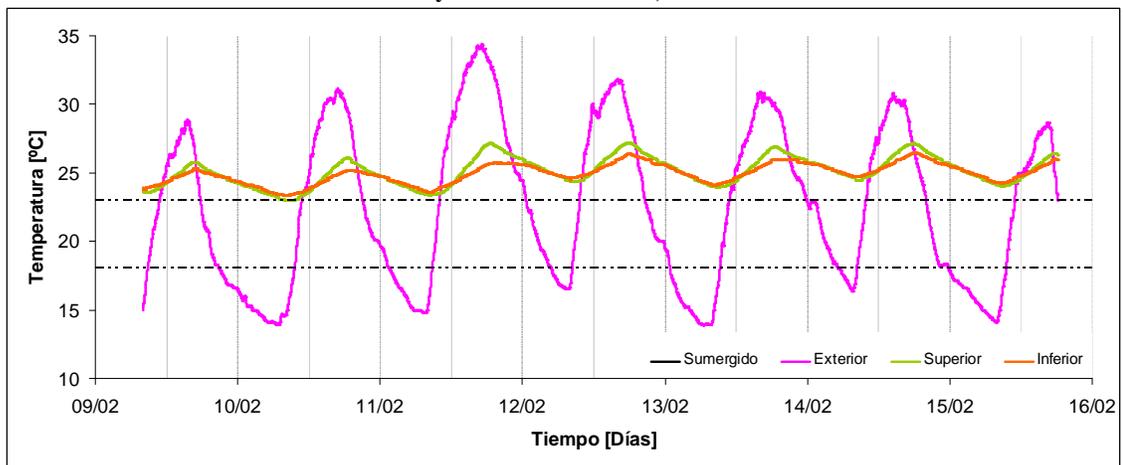


Gráfico 4.5
2009 Ensayo 3 ó Caseta cerrada, con aislación



El tercer grupo comparativo es el compuesto por los gráficos 4.6 y 4.7

Gráfico 4.6
2008 Ensayo 2 ó Caseta cerrada, sin aislación, ventana destapada

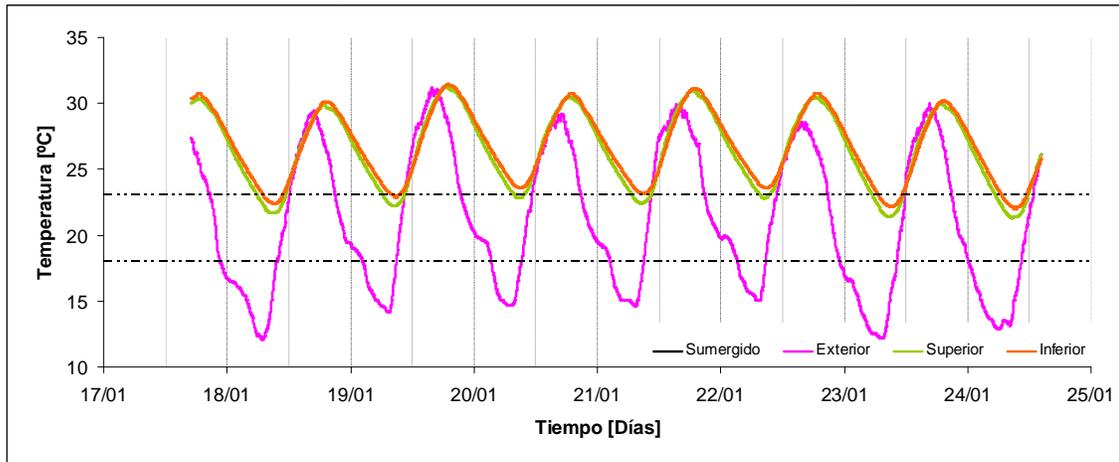
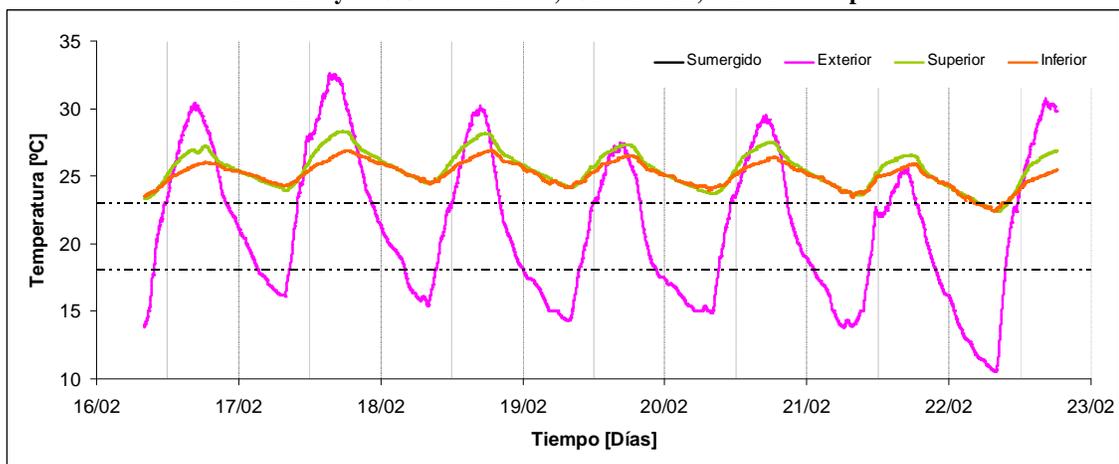


Gráfico 4.7
2009 Ensayo 4 ó Caseta cerrada, con aislación, ventana destapada



El cuarto grupo comparativo es el compuesto por los gráficos 4.8 y 4.9.

Gráfico 4.8
2008 Ensayo 7 ó Caseta abierta⁷, sin aislación

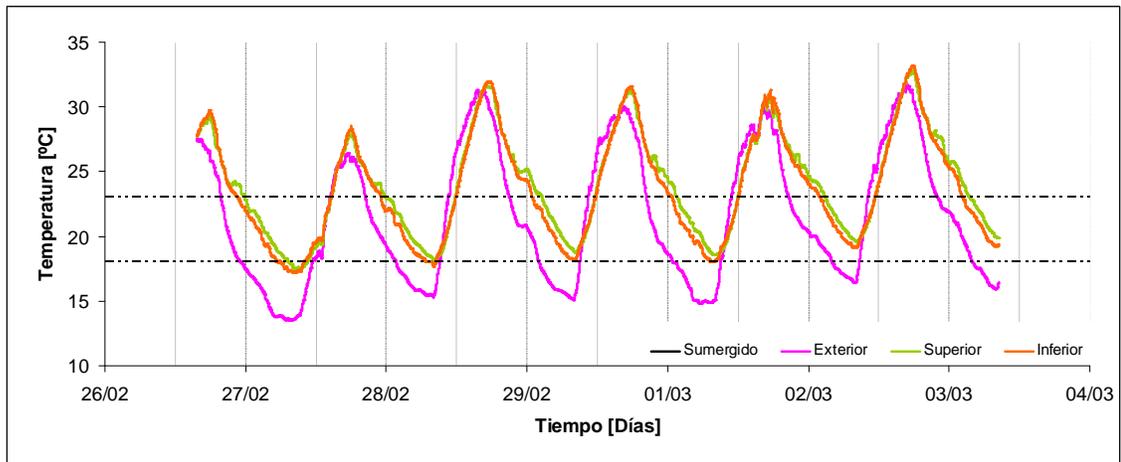
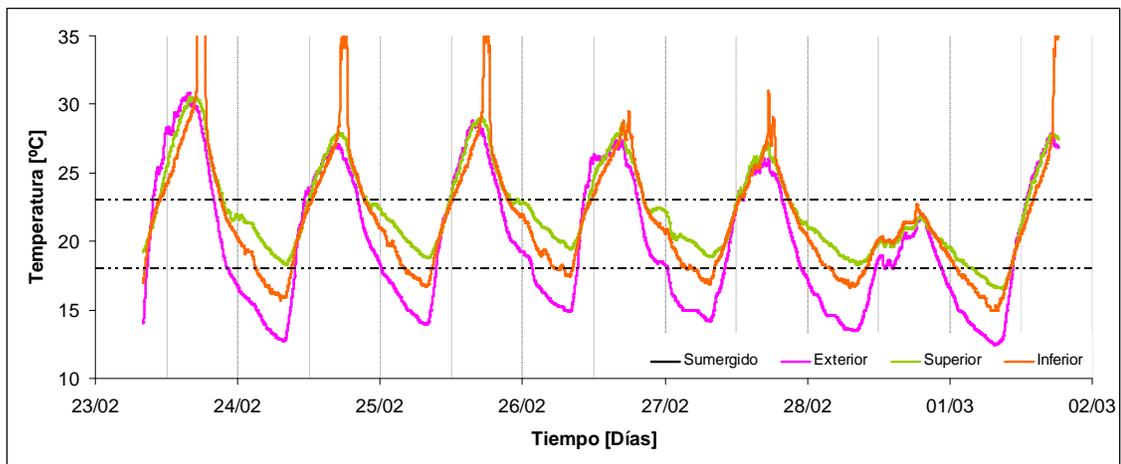


Gráfico 4.9
2009 Ensayo 5 ó Caseta abierta⁷, con aislación



Es importante explicar el comportamiento del sensor inferior en el gráfico 4.9, correspondiente al ensayo 5 de ventilación permanente realizado el 2009, pues posee un comportamiento inesperado para las condiciones del ensayo, la razón que explica dicha anomalía es debido a un haz de radiación solar incidente sobre el sensor inferior, produciendo un incremento en la medición de la temperatura para ese instante. Estos datos fueron filtrados para el análisis numérico del ensayo.

⁷ Caseta abierta: se refiere a la mantención de la ventana y puerta abierta las 24hr, es decir, ventilación permanente.

El quinto grupo comparativo es el compuesto por los gráficos 4.10 y 4.11.

Gráfico 4.10
2008 Ensayo 6 ó Caseta cerrada entre 7:30 y 19:30 y abierta en el complemento, sin aislación

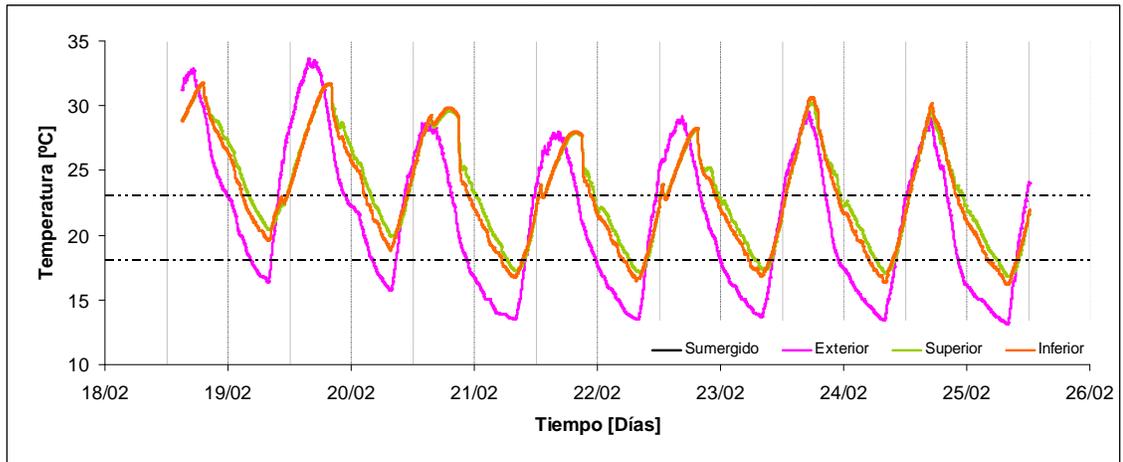
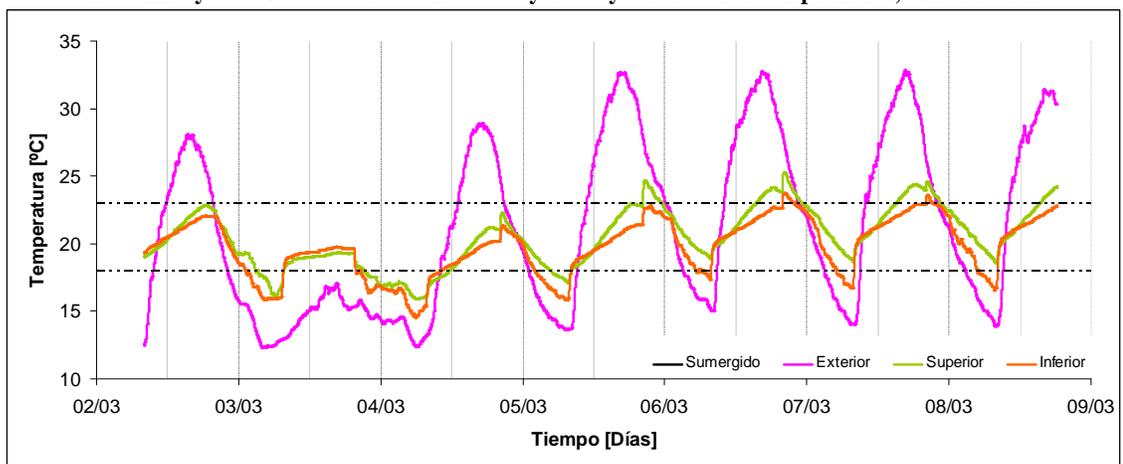


Gráfico 4.11
2009 Ensayo 6 ó Caseta cerrada entre 7:30 y 19:30 y abierta en el complemento, con aislación



El sexto grupo comparativo es el compuesto por los gráficos 4.12 y 4.13.

Gráfico 4.12
2008 Ensayo 9 ó Caseta cerrada entre 7:30 y 19:30,
abierta en el complemento más un ventilador en mínima potencia, sin aislación

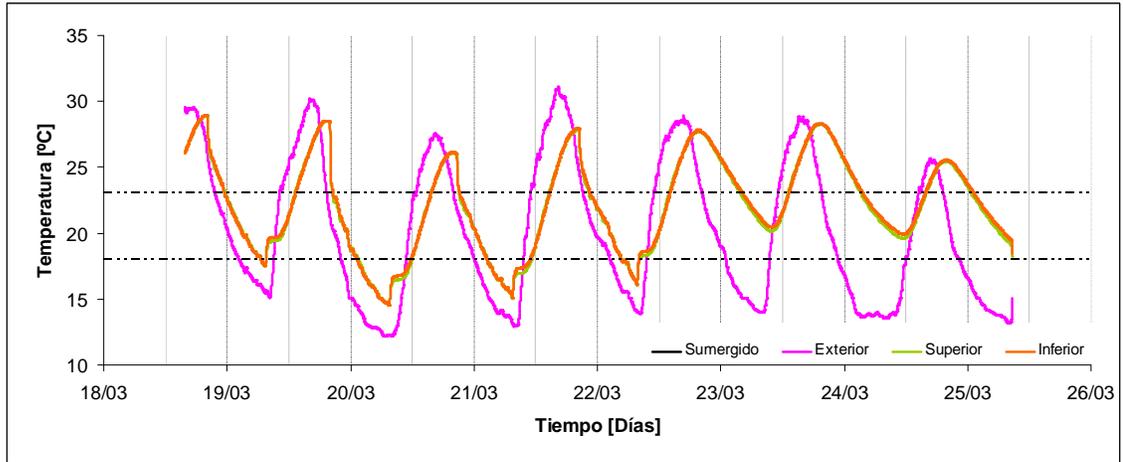
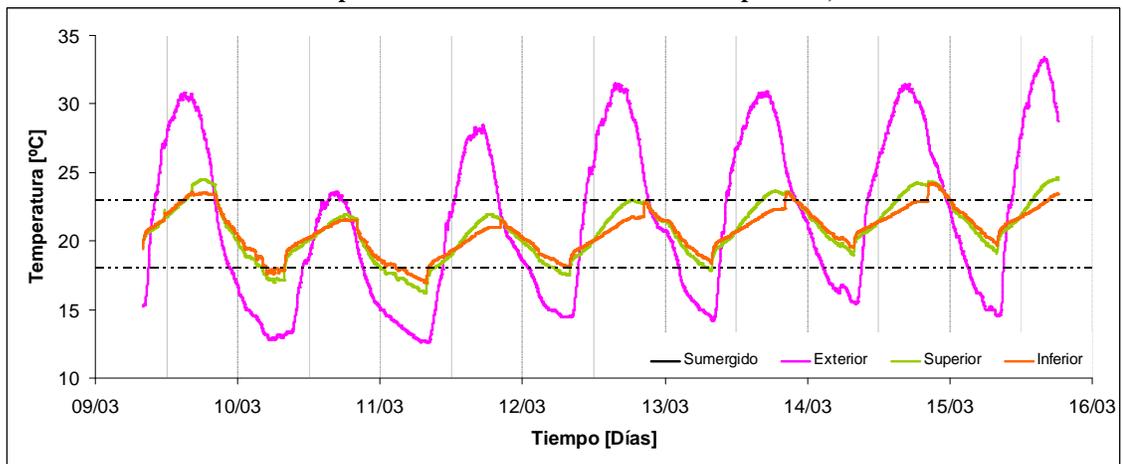


Gráfico 4.13
2009 Ensayo 7 ó Caseta cerrada entre 7:30 y 19:30,
abierta en el complemento más un ventilador en mínima potencia, con aislación



4.2 Procesamiento de datos

4.2.1 Separación en grupos diarios

Los datos se separaron en grupos diarios, dejando una columna de datos por día como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4.2
Grupos diarios de temperaturas

Temperaturas filtradas por día [°C]						
19/01/09	20/01/09	21/01/09	22/01/09	23/01/09	24/01/09	25/01/09
10.9						
11						
			·			
			·			
			·			
	17.6					
	17.5					
			·			
			·			
			·			
						17.7
						17.7

Sean, en la tabla 4.1, los valores de la primera columna ó fecha y hora ó FECHA_j, y los de la tercera columna ó temperatura ó T°_j, donde j indica la línea del registro. Sea, además, DIA_i un día cualquiera perteneciente al grupo de datos analizados, donde i representa el día, en orden correlativo, del cual se quiere obtener el grupo de temperaturas diarias.

Definidos los parámetros anteriores la función que se utilizó para separar los registros en grupos diarios fue la siguiente:

Función 4.1
Separación de datos

$$SI[Y(FECHA_j - DIA_i, FECHA_j @ DIA_{i+1}), T°_j, \emptyset\emptyset]$$

Lo que esta función dice es que si la fecha y la hora de la línea de registro j pertenece al día i, debe devolver el registro de temperatura de la línea j en la celda en la que esta función está, en caso contrario devolver un valor vacío (∅ ∅). Aplicando la función 4.1 a todas las celdas de la tabla 4.2 se obtiene la separación de los registros en grupos diarios.

4.2.2 Determinación del máximo, mínimo y promedio

Una vez obtenidos los registros diarios se obtienen los máximos, mínimos y promedios diarios, para cada sensor, mediante las siguientes funciones:

Función 4.2
Determinación del máximo, mínimo y promedio

MAX(Rango)

MIN(Rango)

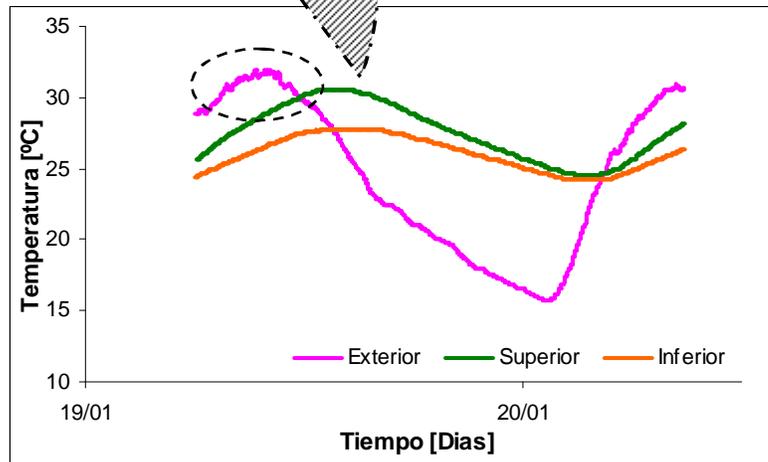
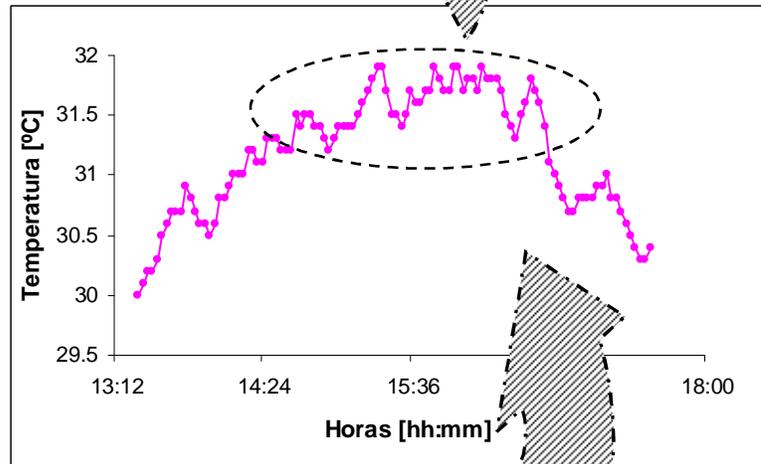
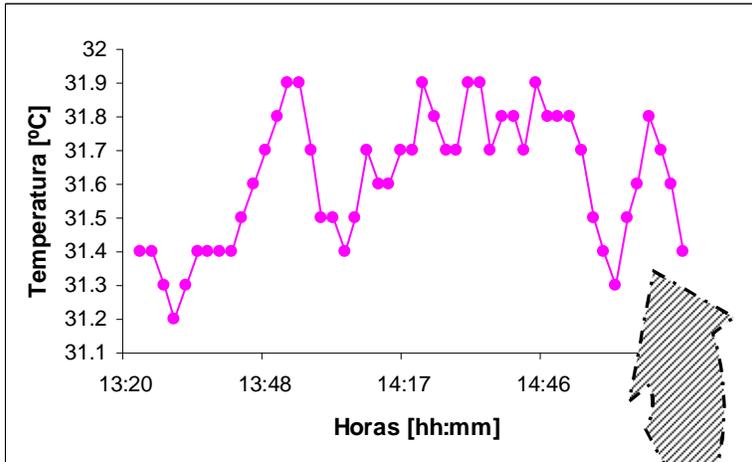
PROMEDIO(Rango)

Donde ∅Rango∅ es el conjunto de datos que se encuentran en las columnas de temperaturas diarias filtradas anteriormente.

4.2.3 Determinación de la hora de los peaks

El problema que se presenta para la determinación de la hora en la que ocurren los peaks diarios de temperatura, radica en que al poseer datos discretos las curvas tienen un comportamiento zigzagueante haciendo que se logre obtener T°_{max} varias veces en un día.

Gráfico 4.14
Repetición de T°_{MAX} en diferentes horas



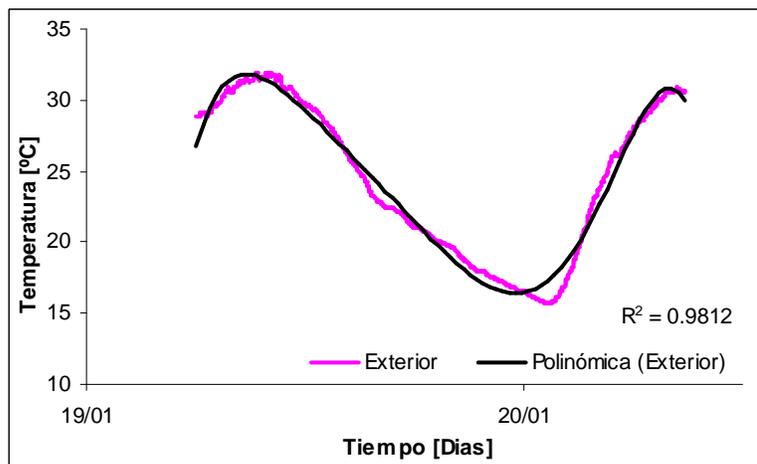
En las memorias anteriores, [2] y [3], para evitar este inconveniente se ajustó ó usando Excel ó una curva polinómica de orden 6 a las curvas diarias de temperatura, y luego las curvas suavizadas fueron procesadas en MathCad.

Este método presenta las siguientes desventajas:

- Graficar cada día en un gráfico independiente
- Casos no ventilados: 7 constantes de ajuste por día por sensor
Casos ventilados : 21 constantes de ajuste por día por sensor
- El traspaso de información entre Excel y Mathcad se realiza a mano, es decir, todas las constantes determinadas por ensayo (7 días y 3 sensores) deben ser ingresadas a mano a matrices para realizar el cálculo en MathCad.
- Gasto exagerado de tiempo
- Diferencias entre la hora peak obtenida por la curva discreta y la suavizada.
(Ver gráfico 4.15)

Los gráficos de los registros de la temperatura exterior presentan formas asimétricas respecto del vértice (ver gráficos 4.1 al 4.13), estando desplazados, usualmente, hacia el lado derecho de la convexidad de la curva, y al realizar el ajuste polinómico se genera un comportamiento simétrico respecto al peak teórico de ajuste.

Gráfico 4.15
Ajuste de curvas ó Gráficos de temperatura exterior



Curva medida

$T^{\circ}_{\max}=31,5[{}^{\circ}\text{C}]$ Hora: 16:18

$T^{\circ}_{\min} = 16 [{}^{\circ}\text{C}]$ Hora: 7:45

Curva suavizada

$T^{\circ}_{\max}= 31 [{}^{\circ}\text{C}]$ Hora: 13:11

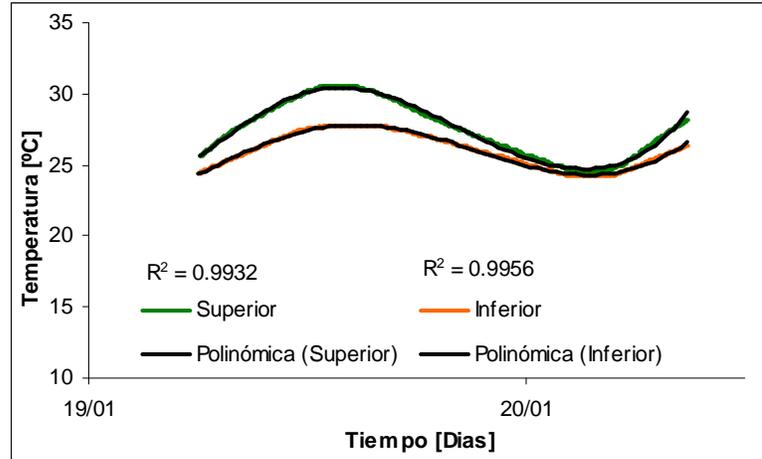
$T^{\circ}_{\min}= 16,5 [{}^{\circ}\text{C}]$ Hora: 5:36

La curva de temperatura exterior medida presenta irregularidades como las que se observan en el gráfico 4.15, por lo que al ajustar una curva se obtiene un comportamiento poco preciso de la onda térmica en estudio. El ajuste presenta diferencias notorias en el peak inferior, tanto de T_{\min} como de hora de ocurrencia; el peak superior está mejor representado, pero se observa claramente una diferencia horaria entre el peak ajustado y el medido (ver gráfico 4.14).

Si se observa el coeficiente de correlación se podría decir que la curva ajustada representa de buena forma la curva medida. El inconveniente de este coeficiente es que pondera los errores de la aproximación, por lo tanto, si existen errores que se anulen mutuamente la correlación será buena. Al observar el gráfico 4.15 se advierte que los valores necesarios para el análisis térmico ó T_{\max} , T_{\min} y hora ó no son entregados con precisión al utilizar una ajuste polinómico.

El comportamiento de las curvas de temperatura interior se presenta en el gráfico 4.16.

Gráfico 4.16
Ajustes de Curvas ó Gráficos de temperatura interior



Debido a la suavidad con que ocurren los registros de la temperatura interior ó sensor superior y sensor inferior ó el ajuste de una curva representa de buena manera los registros discretos, teniendo en cuenta sólo los puntos estipulados anteriormente (cantidad de constantes y gasto de tiempo).

Por las razones dadas la determinación de la hora en la que ocurre el peak de temperatura diario se determinó mediante el promedio aritmético de las horas en las que ocurren los peaks discretos.

Para determinar las horas en las que ocurren los peaks se utilizaron las funciones 4.3 y 4.4.

Función 4.3
Hora de máximos

$$SI[Y(T_j = T_{MAX i}, REDONDEAR.MENOS(FECHA_j, 0)=DIA_i), FECHA_j, \emptyset]$$

Función 4.4
Hora de mínimos

$$SI[Y(T_j = T_{MIN i}, REDONDEAR.MENOS(FECHA_j, 0)=DIA_i), FECHA_j, \emptyset]$$

Estas funciones dicen que si la temperatura de la línea de registro j es igual a la máxima/mínima del día i y si la fecha de la línea de registro j corresponde al día i , devuelve el valor de la hora de la línea de registro j , en caso contrario devuelve un valor vacío (\emptyset).

Estas funciones fueron programadas en columnas que recorren todos los datos de los registros de temperatura devolviendo, en la celda correspondiente, el valor de la hora del peak, como se muestra en la tabla 4.3.

Para establecer un orden y evitar una confusión entre las horas de las temperaturas máximas y mínimas se dispuso de dos tablas idénticas, una para las horas en la que ocurren las temperaturas máximas y otra para las horas en las que ocurren los mínimos (Tabla 4.3).

Tabla 4.3
Determinación de las horas peak

Horas Temperatura máxima/mínima							
19/01/09	20/01/09	21/01/09	22/01/09	23/01/09	24/01/09	25/01/09	
í							
15:20							
15:22							
15:48							
15:57							
í							
	15:15						
		í					
			16:11				
			16:15				
				í			
					16:16		
							Etc.

4.2.4 Determinación de parámetros de análisis térmico

Con los datos obtenidos se realizaron 2 tablas por ensayo, estas corresponden a: tabla de resumen de temperaturas y tabla de resumen de la hora en que ocurren los peaks. Las tablas se muestran a continuación.

Tabla 4.4
Resumen de temperaturas

Temperaturas		Ensayo 1						
		19/1/09	20/1/09	21/1/09	22/1/09	23/1/09	24/1/09	25/1/09
T_{max}	Exterior	31.9	31.3	31.5	30.6	29.9	24.1	31.8
	Superior	30.6	30.5	30.3	30	29.4	26.9	29
	Inferior	27.8	28	27.9	27.8	27.5	26.1	26.3
T_{min}	Exterior	21.1	15.7	15.6	15	15.5	13.8	13.6
	Superior	25.6	24.5	24.1	23.9	23.9	21.8	21.2
	Inferior	24.4	24.2	24	23.9	24	21.9	21.3
T_{Prom}	Exterior	27.90	23.16	22.49	21.88	21.32	17.52	21.91
	Superior	29.10	27.53	27.21	26.92	26.70	23.72	24.41
	Inferior	26.83	26.20	26.10	25.95	25.87	23.39	23.46

Tabla 4.5
Resumen de horas

Horas		Ensayo 1						
		19/1/09	20/1/09	21/1/09	22/1/09	23/1/09	24/1/09	25/1/09
T_{max}	Exterior	15:46	15:15	16:13	16:06	14:24	17:35	16:49
	Superior	19:42	19:38	19:37	19:50	19:03	00:00	20:19
	Inferior	20:27	19:55	20:09	20:18	19:01	00:04	21:12
T_{min}	Exterior	23:57	07:18	07:11	05:30	06:07	06:38	07:28
	Superior	12:04	09:31	09:36	09:29	09:22	13:11	09:15
	Inferior	12:05	09:31	09:32	09:31	09:26	13:32	09:14

4.2.4.1 Determinación de FRO

La determinación del FRO se realiza mediante la fórmula (27). Para esta fórmula es necesario determinar las amplitudes diarias, tanto de la curva de temperatura exterior como de las curvas de temperaturas interiores.

Las amplitudes se determinaron usando el valor absoluto de la resta entre la temperatura promedio y los peaks diarios de temperatura, con esto se obtienen dos amplitudes, que teóricamente deberían ser iguales, pero que en la práctica son diferentes. Se estableció la amplitud diaria como el mayor valor de las amplitudes calculadas.

$$A_{i k}^+ = |T_{i k \text{ Prom}}^o - T_{i k \text{ max}}^o| \quad (36) \quad A_{i k}^- = |T_{i k \text{ Prom}}^o - T_{i k \text{ min}}^o| \quad (37)$$

$$A_{i k} = \max(A_{i k}^+, A_{i k}^-) \quad (38)$$

Donde:

i = índice que representa el día

k = índice que representa al sensor (1 inferior, 2 superior y 3 exterior)

Con este cálculo se determinan 3 amplitudes (1 por sensor): la interior superior, interior inferior y exterior, luego se determinan los FRO para el sensor interior inferior e interior superior. El FRO diario corresponde al promedio de los FRO determinados para el sensor inferior y para el sensor superior.

$$FRO_{i 1} = 1 - \frac{A_{i 1}}{A_{i 3}} \quad (39) \quad FRO_{i 2} = 1 - \frac{A_{i 2}}{A_{i 3}} \quad (40)$$

$$FRO_i = \frac{FRO_{i 1} + FRO_{i 2}}{2} \quad (41)$$

El FRO del ensayo es el promedio de los FRO diarios. Cabe destacar que para la determinación del FRO del ensayo se consideraron solamente los FRO representativos, es decir, en donde las **curvas graficadas tuviesen un comportamiento esperado**, pues por ejemplo cuando el día está nublado el FRO determinado es muy diferente al FRO obtenido del cálculo de un día despejado, siendo no representativo de la condición estudiada.

4.2.4.2 Determinación de FDT_m

La determinación del FDT_m se realiza mediante la fórmula (29). Se determinan 2 FDT_m, uno para en sensor interior inferior y otro para el sensor interior superior, luego el FDT_m del día en estudio corresponde al promedio de los FDT_m inferior y superior.

$$FDT_{m i 1} = 1 - \frac{T_{i 1 \text{ max}}^o}{T_{i 3 \text{ max}}^o} \quad (42) \quad FDT_{m i 2} = 1 - \frac{T_{i 2 \text{ max}}^o}{T_{i 3 \text{ max}}^o} \quad (43)$$

$$FDT_{m i} = \frac{FDT_{m i 1} + FDT_{m i 2}}{2} \quad (44)$$

Análogo al caso anterior el FDT_m del ensayo es el promedio de los FDT_m representativos diarios.

4.2.4.3 Determinación del desfase

La determinación del desfase se realiza mediante las fórmulas (23) y (24). Se determinan 4 desfases, el desfase entre los peak máximos y entre los peak mínimos, y luego los resultados diarios son el promedio de todos los desfases calculados ó $\bar{\phi}$ ó y el promedio de los desfases entre los peak máximos ó $\bar{\phi}_{\max}$ ó, como lo establecen las fórmulas (26) y (25) respectivamente. Finalmente los desfases del ensayo son el promedio de los desfases representativos diarios.

En las tablas 4.6 y 4.7 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en el ensayo 1.

Tabla 4.6
Determinación de FRO y FDT_m

Temperaturas		Ensayo 1						
		19/1/09	20/1/09	21/1/09	22/1/09	23/1/09	24/1/09	25/1/09
T _{max}	Exterior	31.9	31.3	31.5	30.6	29.9	24.1	31.8
	Superior	30.6	30.5	30.3	30	29.4	26.9	29
	Inferior	27.8	28	27.9	27.8	27.5	26.1	26.3
T _{min}	Exterior	21.1	15.7	15.6	15	15.5	13.8	13.6
	Superior	25.6	24.5	24.1	23.9	23.9	21.8	21.2
	Inferior	24.4	24.2	24	23.9	24	21.9	21.3
T _{Prom}	Exterior	27.90	23.16	22.49	21.88	21.32	17.52	21.91
	Superior	29.10	27.53	27.21	26.92	26.70	23.72	24.41
	Inferior	26.83	26.20	26.10	25.95	25.87	23.39	23.46

FRO	0.56	0.69	0.71	0.71	0.73	0.55	0.62
FDT	0.92	0.93	0.92	0.94	0.95	1.10	0.87

$$\text{FRO} = 0.71$$

$$\text{FDT}_m = 0.06$$

Tabla 4.7
Determinación del desfase

Horas		Ensayo 1						
		19/1/09	20/1/09	21/1/09	22/1/09	23/1/09	24/1/09	25/1/09
T _{max}	Exterior	15:46	15:15	16:13	16:06	14:24	17:35	16:49
	Superior	19:42	19:38	19:37	19:50	19:03	00:00	20:19
	Inferior	20:27	19:55	20:09	20:18	19:01	00:04	21:12
T _{min}	Exterior	23:57	07:18	07:11	05:30	06:07	06:38	07:28
	Superior	12:04	09:31	09:36	09:29	09:22	13:11	09:15
	Inferior	12:05	09:31	09:32	09:31	09:26	13:32	09:14

ϕ_{\max}	04:18:28	04:31:15	03:39:52	03:58:18	04:37:28	-1	03:56:16
ϕ_{prom}	-1	03:22:08	03:01:39	03:59:20	03:57:27	-1	02:51:28

$$\bar{\phi}_{\max} = 04:13:04$$

$$\bar{\phi} = 03:35:08$$

El valor -1 en la tabla 4.7 representa un valor fuera de rango dentro del análisis.

4.2.4.4 Determinación de la demanda

Para la determinación de la demanda se considera el rango de confort térmico como la banda entre 18[°C] y 23[°C]. Considerando estos valores se modificaron las ecuaciones (30) y (31).

Los registros se realizaron con un paso $\Delta t=20\ddot{=}140$ [seg], de esta forma el tiempo necesario de refrigeración o calefacción se puede calcular como el número de registros de refrigeración o calefacción por el paso.

Reemplazando en la ecuación (32) y (33) se tiene:

Refrigeración

$$\bar{Q}_R = \frac{m \cdot Ce \cdot \Delta t}{t_R} \cdot \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{T_j + T_{j+1} - 46}{2} \right) \quad , \text{ donde } t_R = n_{>23} \cdot \Delta t$$

$$\Rightarrow \bar{Q}_R = \frac{m \cdot Ce}{n_{>23}} \cdot \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{T_j + T_{j+1} - 46}{2} \right) \quad (45)$$

Calefacción

$$\bar{Q}_C = \frac{m \cdot Ce}{n_{<18}} \cdot \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{36 - (T_j + T_{j+1})}{2} \right) \quad (46)$$

Donde:

- n = Cantidad total de datos diarios
- $n_{>23}$ = Número de registros mayores a 23°C
- $n_{<18}$ = Número de registros menores a 18°C
- j = Índice que indica la línea de registro

Se promediaron las temperaturas medidas de los sensores interiores ó inferior y superior ó para obtener la curva de temperatura interior, luego se calcularon los términos de la sumatoria separándolos en registros diarios.

Función 4.5

Sumandos de la sumatoria - Refrigeración

$$SI[Y(\text{REDONDEAR.MENOS}(\text{FECHA}_j,0)=\text{DIA}_i, T_j > 23), T_j + T_{j+1} - 46, 0] / 2$$

Función 4.6

Sumandos de la sumatoria - Calefacción

$$SI[Y(\text{REDONDEAR.MENOS}(\text{FECHA}_j,0)=\text{DIA}_i, T_j < 18), 36 - (T_j + T_{j+1}), 0] / 2$$

Estas funciones devuelven los términos de la sumatoria separados por día. Las funciones fueron programadas en tablas separadas para no confundir las demandas de refrigeración con las de calefacción.

Evaluando las ecuaciones (45) y (46) se obtienen las demandas diarias. La demanda mensual se determinó mediante el promedio de las demandas diarias representativas multiplicada por treinta⁸.

⁸ Mes estándar de 30 días.

4.2.4.5 Determinación del consumo

La determinación del consumo se realizó mediante la evaluación de las ecuaciones (34) y (35), se consideró como fuente de energía la energía eléctrica, por lo tanto los rendimientos de los aparatos eléctricos, como se mencionó anteriormente, para refrigeración y calefacción son:

Refrigeración

$$\eta_R = 0.6$$

Calefacción

$$\eta_C = 1$$

Es decir el rendimiento de un dispositivo eléctrico de refrigeración es del 60% (Unidad de ventana), mientras que el rendimiento del dispositivo eléctrico de calefacción es un 100% (estufa eléctrica).

Refrigeración

$$C_{refrigeración} = \frac{\bar{Q}_{refrigeración}}{\eta_{refrigeración}} \quad (47)$$

Calefacción

$$C_{calefacción} = \frac{\bar{Q}_{calefacción}}{\eta_{calefacción}} \quad (48)$$

4.2.4.6 Determinación del Costo

Con las ecuaciones (47) y (48) se obtiene el consumo, para obtener el costo de la climatización se consideró la tarifa de suministro de clientes regulados 2009ö de Chilectra.

Tabla 4.8
Tarifa Chilectra

Cliente		AREA 1 A	
		s / iva	c / iva
BT ó 1	Energía Base [\$/KWh]	104.4067	124.244

La determinación del costo de obtiene multiplicando el consumo por el valor de la energía eléctrica con IVA.

Refrigeración

$$Co_{refrigeración} = 124.244 \cdot C_{refrigeración} \quad (49)$$

Calefacción

$$Co_{calefacción} = 124.244 \cdot C_{calefacción} \quad (50)$$

4.3 Análisis de resultados: Influencia de la aislación exterior

Luego de realizar el procesamiento de los datos según los puntos establecidos en 4.2, se obtienen los resultados de los ensayos realizados.

Tabla 4.9
Resumen de resultados ensayos 2008

	Ensayos 2008					
	3 (1 y 2)	1 (3)	2 (4)	7 (5)	6 (6)	9 (7)
$T_{Prom\ Int}$ [°C]	24.63	27.13	26.52	23.84	23.32	22.17
$T_{Prom\ Ext}$ [°C]	20.17	23.42	21.14	21.57	21.25	20.23
$T_{Max\ Int}$ [°C]	30.6	33.5	31.5	33.2	31.8	33.2
$T_{Max\ Ext}$ [°C]	32.8	34.7	31.2	31.8	33.6	31.1
A_{Int} [°C]	4.80	4.68	4.57	8.23	8.04	7.01
A_{Ext} [°C]	9.70	9.70	9.54	8.87	9.23	9.78
FRO	0.55	0.53	0.52	0.12	0.29	0.26
FDT	0.95	0.95	1.04	1.04	0.99	0.93
FDTm	0.05	0.05	-0.04	-0.04	0.01	0.07
ϕ_{max} [h:m:s]	03:16:41	03:00:55	02:29:15	01:11:07	03:47:44	03:30:03
ϕ_{Prom} [h:m:s]	02:38:20	02:31:52	02:03:49	00:48:32	01:58:51	01:36:47
Demanda Refr. [KWh/m²]	0.49	0.76	0.71	0.69	0.59	0.50
Consumo Refr. [KWh/m²]	0.82	1.27	1.18	1.14	0.99	0.83
Costo Refr. [\$]	102.20	157.59	147.15	142.19	122.63	102.94
Demanda Calef. [KWh/m²]	0	0	0	0.06	0.10	0.18
Consumo Calef. [KWh/m²]	0	0	0	0.06	0.10	0.18
Costo Calef. [\$]	0	0	0	7.95	12.83	22.36

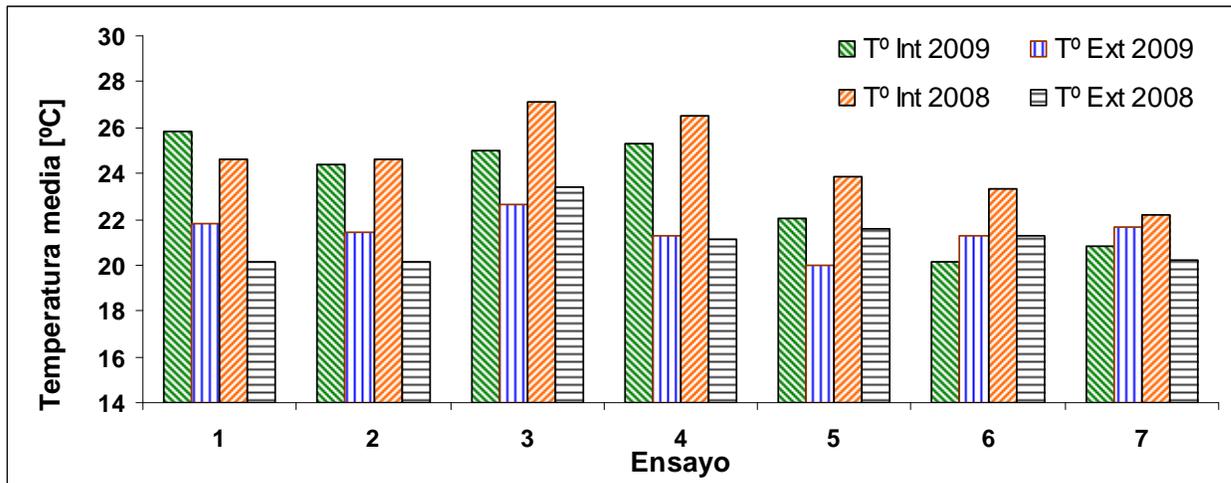
Tabla 4.10
Resumen de resultados ensayos 2009

	Ensayos 2009						
	1	2	3	4	5	6	7
$T_{Prom\ Int}$ [°C]	25.82	24.39	25.03	25.30	22.05	20.12	20.79
$T_{Prom\ Ext}$ [°C]	21.83	21.46	22.62	21.30	20.02	21.24	21.68
$T_{Max\ Int}$ [°C]	30.6	26.4	27.2	28.4	30.6	25.3	24.6
$T_{Max\ Ext}$ [°C]	31.9	31.6	34.4	32.6	30.8	32.9	33.4
A_{Int} [°C]	3.11	1.86	2.21	2.67	7.30	4.29	3.33
A_{Ext} [°C]	9.89	10.84	9.91	11.48	10.61	9.78	10.33
FRO	0.71	0.88	0.85	0.80	0.27	0.60	0.69
FDT	0.94	0.82	0.84	0.89	1.02	0.74	0.76
FDTm	0.06	0.18	0.16	0.11	-0.02	0.26	0.24
ϕ_{max} [h:m:s]	04:13:04	02:16:04	02:30:48	01:34:33	00:46:01	03:52:49	02:50:13
ϕ_{Prom} [h:m:s]	03:35:08	01:30:52	01:54:40	00:51:30	00:24:39	02:02:20	01:33:38
Demanda Refr. [KWh/m²]	0.61	0.23	0.34	0.44	0.51	0.08	0.06
Consumo Refr. [KWh/m²]	1.01	0.39	0.57	0.74	0.86	0.13	0.09
Costo Refr. [\$/m²]	126.01	48.61	71.26	91.67	106.30	16.49	11.47
Demanda Cal. [KWh/m²]	0	0	0	0	0.026	0.062	0.032
Consumo Cal. [KWh/m²]	0	0	0	0	0.026	0.062	0.032
Costo Calef. [\$/m²]	0	0	0	0	3.284	7.641	3.927

En la tabla 4.9, se muestra entre paréntesis, el ensayo equivalente al realizado el 2008. Notar que el ensayo 3 (caseta cerrada con 2 tambores) realizado el 2008 se compara con los ensayos 1 (caseta cerrada con 108 botellas) y 2 (caseta cerrada con 108 botellas con aislamiento) realizados el 2009.

4.3.1 Temperaturas medias

Gráfico 4.17
Temperatura promedio



Se observa que en general la temperatura promedio interior es mayor que la promedio exterior, esto se debe a la regulación que genera la masa interna, absorbiendo calor durante el día y restituyéndolo en la noche, estableciendo una regulación de temperatura, que la mantiene cercana a los máximos. Esto se ve invertido en los ensayos ventilados pues se permite una liberación del calor absorbido hacia el exterior, haciendo que el calor inicial del muro con el que se comienza el ciclo térmico sea menor.

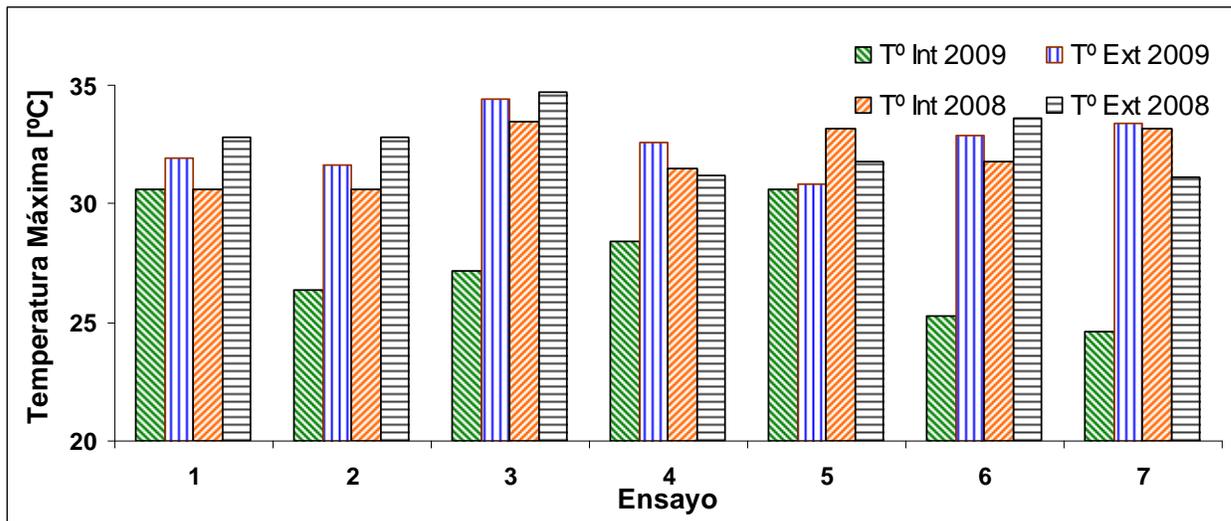
En el ensayo 1 se obtiene, al contrario que los demás, una temperatura interior promedio mayor para el año 2009; esta respuesta térmica es provocada por la acción conjunta de la masa efusiva interior y el aumento de la superficie de traspaso, pues con una mayor superficie de traspaso la tasa con la que el calor es absorbido o restituído al medio interior es mayor, haciendo que se puedan guardar mayores cantidades de calor durante el día y en la noche se restituye el calor al medio, elevando las mínimas diarias; como consecuencia se obtienen temperaturas promedio diarias mayores.

En los ensayos restantes no ventilados (2, 3 y 4) se observa una clara disminución en la temperatura interior, debida al abrigo que proporciona la aislación exterior, haciendo que la inercia del muro ayude al control de temperatura como inercia de absorción.

En los ensayos ventilados (5, 6 y 7) se obtienen valores menores, debido a la disminución de las temperaturas mínimas. Esta disminución que es provocada por la pérdida de calor del medio interior, consecuencia de la ventilación. Las medias de los ensayos 6 y 7 son menores que la del ensayo 5; esta diferencia radica en que el ensayo 5 posee ventilación permanente.

4.3.2 Temperaturas máximas

Gráfico 4.18
Temperaturas máximas

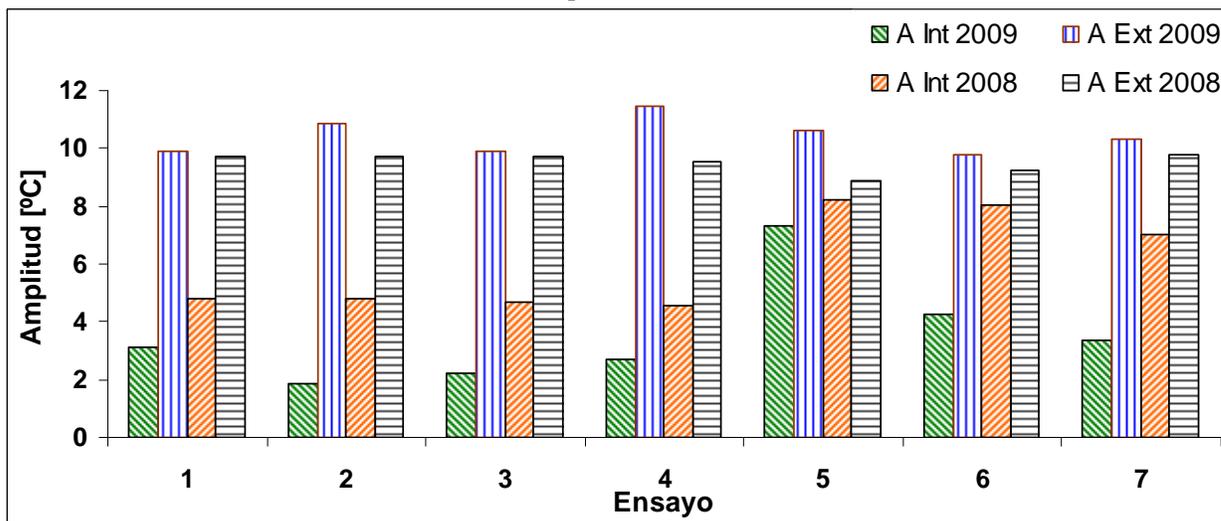


Se observa una gran influencia de la aislación exterior en la temperatura interna máxima, mientras en los ensayos realizados el 2008 la temperatura máxima interior es cercana a la exterior, en los ensayos realizados el 2009 con aislación exterior (2, 3, 4, 5, 6, y 7) la temperatura máxima interior es bastante menor que la exterior medida, debida a un menor ingreso de calor a través del muro

En el ensayo 5 (ventilación permanente) se logra obtener una temperatura interior máxima menor que la exterior máxima, sólo aplicando aislación exterior, lo que no se logra teniendo solamente la masa de muro como protección perimetral ante las sollicitaciones térmicas, esto dice que a pesar de tener una ventilación permanente la inercia del conjunto muro perimetral/aislación exterior es capaz de absorber cierta cantidad de calor disminuyendo la temperatura interior.

En el ensayo 4 (ventada destapada) se observa un buen comportamiento del cerramiento, pues a pesar que el ingreso de radiación solar es libre por la ventana, el calor producido por dicha radiación es absorbido por el muro restituyéndolo en la noche. Se sabe que el calor recibido por radiación solar es importante, por lo que observando el gráfico 4.18 se espera que la temperatura interior promedio sea elevada, ya que si la temperatura máxima no lo es entonces toda la cantidad de calor que ingresa a la caseta se aloja en muro, y este lo entrega al medio interior en las horas frías, aumentando la temperatura promedio.

Los mejores resultados son obtenidos por los ensayos con ventilación nocturna, siendo la razón de este resultado la liberación de calor por parte de los muros que ocurre durante la noche, haciendo que cuando parta el nuevo ciclo de calor el muro tenga una cantidad de calor inicial baja, por lo tanto puede ocupar su efusividad para absorber más calor durante el día, regulando y disminuyendo la respuesta térmica.

4.3.3 AmplitudGráfico 4.19
Amplitud térmica

En el ensayo 1 se aprecia la influencia significativa de la superficie de traspaso de calor que poseen las botellas sobre los tambores, pasando de una superficie de $3,05[m^2]$ ó 2 tambores ó a una superficie de $12,73[m^2]$ ó 108 botellas ó, siendo la amplitud obtenida en las mediciones de 2009 un 35% (aprox.) más baja que las mediciones realizadas en 2008. Esto es consecuencia de la cantidad de calor que es capaz de almacenar la masa efusiva, siendo en ambos casos la misma masa interior, pero en 2009 la masa posee una mayor superficie de traspaso, por lo tanto la tasa de transferencia de calor es mayor, ya sea absorbiendo o restituyendo calor al medio, resultando una menor amplitud y un aumento de la temperatura media diaria.

La única diferencia entre el ensayo 1 y 2 del 2009 es la aplicación de la aislación exterior en el ensayo 2; es fácil notar la importante influencia de la aislación exterior, reduciendo considerablemente la amplitud de la respuesta térmica (notar que la sollicitación térmica del ensayo 2 posee una de las mayores amplitudes medidas de todos los ensayos realizados). La reducción que se logra es de un 80% (aprox.), esto se puede apreciar en forma visual en el gráfico de este ensayo (ver gráfico 4.3).

Los ensayos no ventilados (2, 3 y 4) mantienen una amplitud interior alrededor de $2^{\circ}C$, destacándose el resultado del ensayo 4 (ventana destapada), este resultado se debe a la capacidad del muro de almacenar calor durante el día, pues al estar abrigado térmicamente las ganancias ocurren mediante conducción a través del aislante térmico y por convección a través del aire interior, por lo que el muro usa su inercia térmica de absorción y de transmisión simultáneamente.

Como se esperaba el ensayo 5 presenta las mayores amplitudes que son consecuencias de una ventilación permanente, estableciendo un marcado traspaso de calor convectivo con el medio exterior. Sin embargo a pesar de poseer una amplitud exterior mayor que el año 2008, el año 2009 presenta una amplitud interior menor, esto es consecuencia de la efusividad que posee el cerramiento, teniendo un comportamiento como el mencionado en el párrafo anterior.

4.3.4 FRO y FDTm

Gráfico 4.20
Factor de reducción de la onda (FRO)

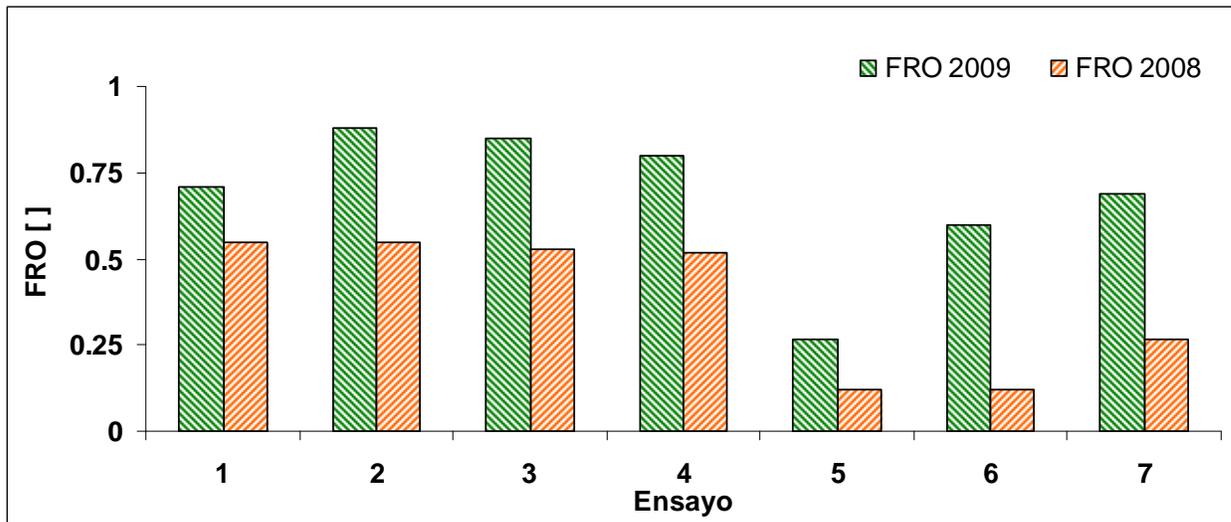
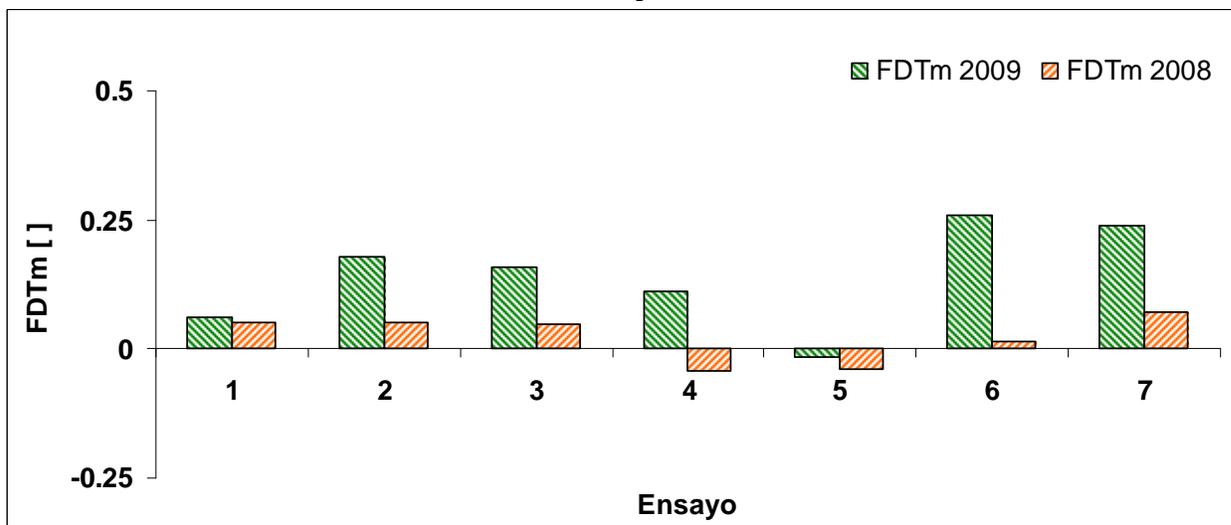


Gráfico 4.21
Factor de disminución de la temperatura modificada (FDTm)



Analizando estos dos gráficos se puede determinar el comportamiento de la inercia térmica, estudiando las respuestas frente a las sollicitaciones exteriores, y hacer una comparación entre la inercia de un muro con y sin abrigo térmico.

En el ensayo 1 se observa que al aumenta la superficie de traspaso de calor ó 2 tambores a 108 botellas ó se logra aumentar la reducción de la onda exterior, es decir, se logra aumentar el FRO de un 55% a un 71%, haciendo que la onda interior sea más plana. La reducción que sufre la temperatura exterior es despreciable, pues se aumenta el FDTm de un 5% a un 6%. Al tener un FRO del 71% y un FDTm del 6% se puede decir que la temperatura interior oscila con valores cercanos a los peaks máximos exteriores, esto es debido a la efusividad que posee la masa dispuesta en la caseta, estabilizando la temperatura interior, y como se mencionó anteriormente elevando el promedio del medio ambiente interior.

El resultado más destacado referente al FRO es el obtenido por el ensayo 2, que posee un FRO del 88%, teniendo además uno de los mejores FDTm (18%). Este resultado establece una onda interior con muy poca oscilación térmica, y con una importante reducción de la temperatura máxima, recordemos que según los cálculos hechos en el capítulo 2 punto 2.4.6 un FDTm deseable es de un 22%. La reducción de la onda exterior se aprecia con mucha claridad al observar el gráfico 4.3.

El ensayo 3 estudia la influencia de la caseta cerrada sin entrada de radiación y sin ventilación, obteniendo resultados cercanos a los del ensayo 2, proponiendo que el aporte que presenta la masa efusiva interior, cuando el cerramiento posee un abrigo térmico, no es preponderante en la respuesta de la caseta, esto se ve ratificado con el ensayo 4 que posee ganancia de calor por radiación solar directa dentro de la caseta, obteniendo un FRO del 80% y un FDTm del 11%. Los resultados de ambos ensayos se explican por la efusividad del muro, pues al no ser cargado con calor por radiación solar directa puede usar casi la totalidad de su efusividad en el control de la respuesta térmica interior. Debe observarse que el equivalente al ensayo 4 2009 que se realizó el 2008 presenta una temperatura máxima interna mayor que la máxima externa, es decir, un FDTm del -4%, con un FRO del 52%, es decir, la inercia del muro solamente pudo reducir la amplitud, pero se saturó con calor (por radiación solar) y no fue capaz de controlar el ingreso de calor a la caseta elevando la temperatura interna por sobre la exterior.

Con los ensayos analizados hasta el momento se establece una reducción de la onda exterior cercana, en promedio, al 80%, mientras que el FDTm se encuentra cercano al 15%, con estos resultados se tiene una onda térmica interior por sobre el máximo valor establecido en el rango de confort ($T_{\max}=23^{\circ}\text{C}$). Gracias a la aislación exterior se han obtenido oscilaciones térmicas reducidas, pues esta permite a la masa de muro actuar como masa efusiva, amortiguando la onda exterior. El problema es que la temperatura promedio es elevada, estando por sobre la máxima del rango de confort (ver gráfico 4.17), para solucionar este inconveniente se introduce la ventilación, la cual ayuda restando calor por medio de la convección.

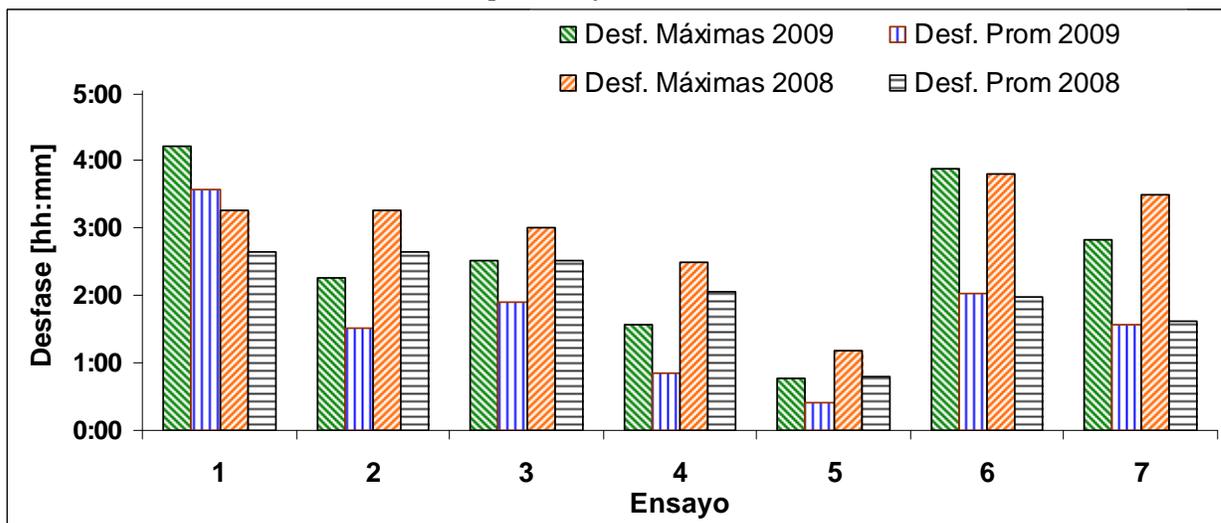
El ensayo 5 estudia la ventilación permanente y por esto la respuesta de la caseta es similar a la solicitación, estableciendo el importante aporte que genera la ventilación en la respuesta térmica de la caseta. Al observar los gráficos 4.20 y 4.21, se aprecia una mejora en la respuesta de la caseta, existe un mayor amortiguamiento, FRO: de 12% a un 27%, y una reducción de la temperatura máxima, FDTm: de -4% a -2%. Dados estos resultados se puede deducir que la diferencia entre la curva térmica exterior e interior se encuentra en los peak mínimos. Este resultado se puede apreciar en los gráficos 4.8 y 4.9, debido nuevamente al uso de la masa de muro como masa efusiva, cargándose de calor durante el día y restituyéndolo en la noche, elevando los mínimos diarios.

Los ensayos 6 y 7 corresponden a ensayos con ventilación nocturna, de esta forma el medio exterior se ocupa de retirar el calor absorbido por los muros durante el día, haciendo que el nuevo ciclo de calor comience con muros descargados, bajando la temperatura media diaria y como se puede observar en los gráficos 4.10 al 4.13, con mayor incursión dentro del rango de confort, haciendo que la demanda de energía para la climatización sea menor. Como resultado de la descarga de los muros durante la noche, la absorción de calor durante el día aumenta, disminuyendo la media y la máxima diaria (ver gráficos 4.17 y 4.18), y obteniendo valores de FDTm sobre el 22% que se estipuló en el capítulo 2 como deseable.

Es importante notar la mejora que genera el abrigo térmico en el ensayo 6, que permite reducir la temperatura máxima interior 18 veces con respecto al ensayo sin aislación, pasando de un 1% a un 26%. Notable también es el efecto producido en la amortiguación, mejorando al doble la reducción de la onda en ambos ensayos.

4.3.5 Desfase

Gráfico 4.22
Desfase promedio y desfase entre máximas



Se destaca que los desfases entre las máximas son siempre mayores que los desfases promedio, esto se debe a que el promedio es bajado por los desfases entre las mínimas, estableciendo que el enfriamiento de la caseta se produce más rápido que el calentamiento.

En los ensayos de 2008 la diferencia entre el desfase entre máximas y el promedio para los ensayos no ventilados es aproximadamente de 30 minutos, en el ensayo con ventilación permanente es de 20 minutos y los ensayos con ventilación nocturna 1 hora y 50 minutos.

En los ensayos de 2009 la diferencia entre el desfase entre máximas y el promedio para los ensayos no ventilados es aproximadamente de 40 minutos, en el ensayo con ventilación permanente es de 20 minutos y los ensayos con ventilación nocturna 1 hora y 30 minutos.

Los ensayos 6 y 7 poseen la mayor diferencia entre el desfase entre máximas y el promedio, debido a que la ventilación acelera el proceso de enfriamiento de los muros haciendo que el desfase entre las mínimas sea bajo, y por lo tanto se tiene un bajo desfase promedio.

El abrigo térmico baja los desfases entre máximas, pues la energía que se traspasa al medio interior es menor, de hecho el muro es el que resta calor del medio, absorbiéndolo, mientras que en los ensayos que no poseen abrigo el muro traspasa gran parte del calor que incide en él por radiación solar directa, manteniéndose caliente por un mayor tiempo y desfasando mayormente la onda térmica interior.

4.3.6 Masa efusiva interior

Tabla 4.11
Calor Absorbido

	ΔT_{Agua} [°C]	Q [kcal]	$\Delta T_{\text{Supuesto Aire}}$ [°C]
Ensayo 3 2008 Caseta Cerrada 2 tambores(325lt)	1.9	615.6	125.74
Ensayo 1 2009 Caseta Cerrada 108 Botellas (325lt)	3.9	1263.6	258.09
Ensayo 2 2009 Caseta Cerrada 108 Botellas(325lt), con aislación	0.85	275.4	56.25

La primera columna corresponde a la variación de temperatura diaria que presenta el agua dentro de las botellas, es decir, corresponde a la diferencia entre la temperatura máxima y la mínima.

Tabla 4.12
Amplitud interior

	Ensayo 3 2008	Ensayo 1 2009	Ensayo 2 2009
Amplitud	4.8	3.11	1.86

En la tabla 4.12 se aprecia la amplitud de las oscilaciones diarias de la temperatura interior. Se observa que la oscilación de la temperatura de los tambores en el año 2008 corresponde sólo a un 20% de la oscilación total, lo que se traduce en una baja absorción de calor, mientras que el ensayo 1 del 2009 presenta una oscilación de la temperatura de las botellas que corresponde al 63% de la oscilación total interior, por lo tanto, es claro observar que al aumentar la superficie de traspaso de calor ó de 3.05 m² a 12.73 m² ó se logra una mayor absorción de calor, el cual es restituído al medio interior en las horas de frío manteniendo cálido el interior .

Utilizando la ecuación (1) se determina la cantidad de calor que absorbe la masa efusiva interior diariamente. Es claro notar que al aumentar la superficie de traspaso ó 4 veces ó se aumenta el calor absorbido al doble.

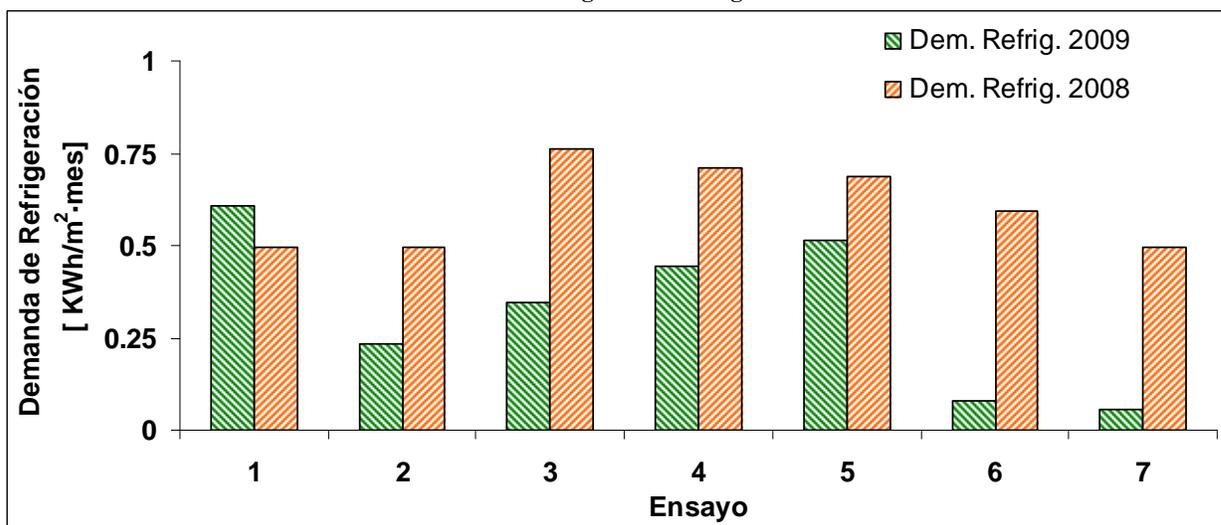
La tercera columna corresponde a la temperatura que debería alcanzar el ambiente interior cuando la masa efusiva interior haya cedido todo el calor ganado durante el día; estas temperaturas no se logran pues el medio interior pierde calor por la envolvente hacia medio exterior, es decir, el calor que cede la masa efusiva interior al medio, este último lo cede al medio exterior; así este traspaso de calor, desde las botellas hacia el medio interior y luego hacia el medio exterior mantiene cálido el interior, elevando las mínimas diarias interiores.

Luego, al aplicar el abrigo térmico, se produce una menor ganancia de calor por la envolvente, obteniendo menores temperaturas máximas interiores, y, por lo tanto, menor calor absorbido por la masa efusiva interior; aun así la masa efusiva interior se mantiene trabajando de la misma forma, manteniendo temperaturas medias similares (Ensayos 1 y 2 2009), mientras que el abrigo térmico se preocupa de disminuir la amplitud diaria y controlar el calor que ingresa al medio interior.

4.4 Análisis de resultados: Demanda y Consumo Energético

4.4.1 Refrigeración

Gráfico 4.23
Demanda Energética de Refrigeración



Al aumentar la superficie de traspaso, la masa efusiva puede absorber más calor durante el día, restituyéndolo durante la noche ó como se ha estipulado en los puntos anteriores ó, elevando la temperatura media interior y disminuyendo las oscilaciones térmicas, esto resulta en una mayor demanda de climatización, como se observa en el ensayo 1, debido a que la curva de temperatura interior se encuentra más alejada de la temperatura máxima del rango de confort.

En los ensayos aislados no ventilados la demanda disminuye casi a la mitad del valor obtenido en los ensayos sin aislación; este resultado es consecuencia del aporte a la regulación de la temperatura interior que genera el muro, que al estar con un abrigo térmico no sufre las importantes ganancias calóricas generadas por la radiación solar, como sí ocurre en los ensayos del 2008. Así el conjunto aislación exterior/muro perimetral contribuye a frenar el ingreso de calor a la caseta (aislación exterior) y controlar la temperatura mediante la masa efusiva (muro), disminuyendo la demanda energética de climatización.

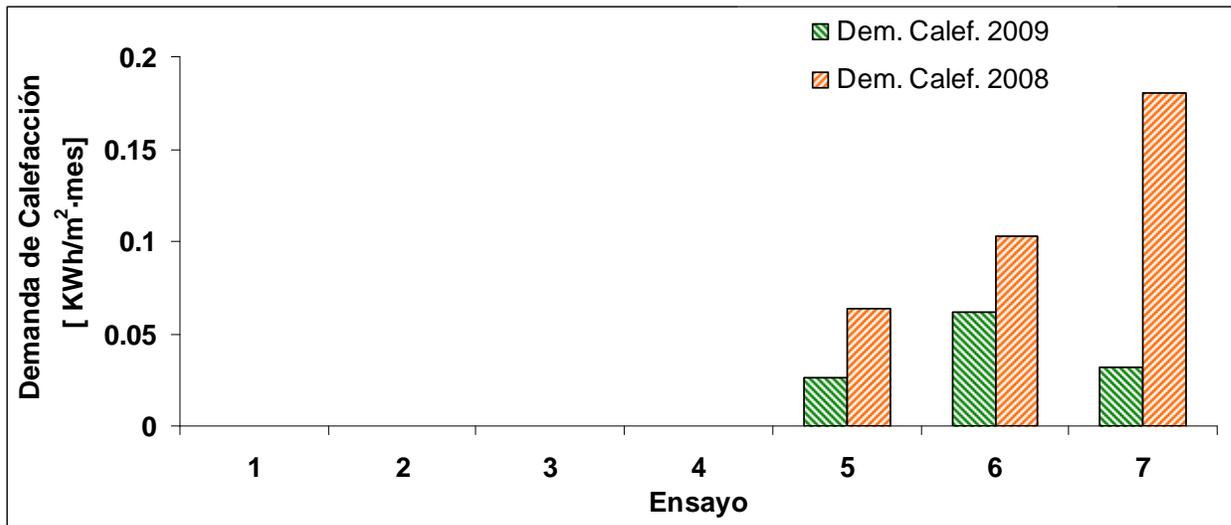
En los ensayos aislados ventilados destacan los ensayos 6 y 7 que gracias a la descarga de calor que se produce por la ventilación nocturna, la incursión de la temperatura interior dentro del rango de confort es importante, determinando grandes periodos de tiempo en que la caseta no necesita climatización, concentrándose la climatización en refrigeración al término del día y calefacción a media mañana.

Al observar los gráficos 4.10 al 4.13 se aprecia que la diferencia entre los ensayos realizados el 2008 y el 2009 radica en la amplitud de la oscilación diaria, ya que las temperaturas medias de estos ensayos son cercanas (ver tablas 4.9 y 4.10), este es el beneficio que genera el conjunto aislación exterior/muro perimetral, estableciendo, como ya se ha dicho, una regulación térmica de la oscilación diaria.

El consumo energético guarda la misma relación que el gráfico 4.23 pero con los valores aumentados 1.67 veces, producto del rendimiento de los aparatos de refrigeración (ver (47) y (48)).

4.4.2 Calefacción

Gráfico 4.24
Demanda Energética de Calefacción



Como se aprecia en los ensayos 1 al 4, de ambos años, no presentan necesidad de calefacción, pues la curva de temperatura interior medida se encuentra siempre sobre la temperatura mínima del rango de confort, producto de la acción de la inercia térmica que genera alzas en las temperaturas medias y reducciones en la amplitud de las oscilaciones térmicas.

El ensayo 5 posee una respuesta con altas demandas de refrigeración, pues la conjugación de una baja temperatura media con una gran amplitud diaria, sumado al efecto de la inercia térmica, genera una respuesta térmica que posee valores por sobre el rango de confort en la mayor parte del tiempo, estableciendo una mayor demanda de refrigeración que de calefacción.

Análogo al análisis realizado en el punto anterior, la ventilación nocturna permite la descarga del calor absorbido y el efecto de la inercia térmica permite una incursión prolongada dentro del rango de confort, estableciendo como resultados bajas demandas de climatización.

El consumo energético guarda la misma relación que el gráfico 4.24, producto de la eficiencia de los aparatos de calefacción (ver (47) y (48)).

4.5 Análisis de resultados: Costos de Climatización

Gráfico 4.25
Costos de Refrigeración

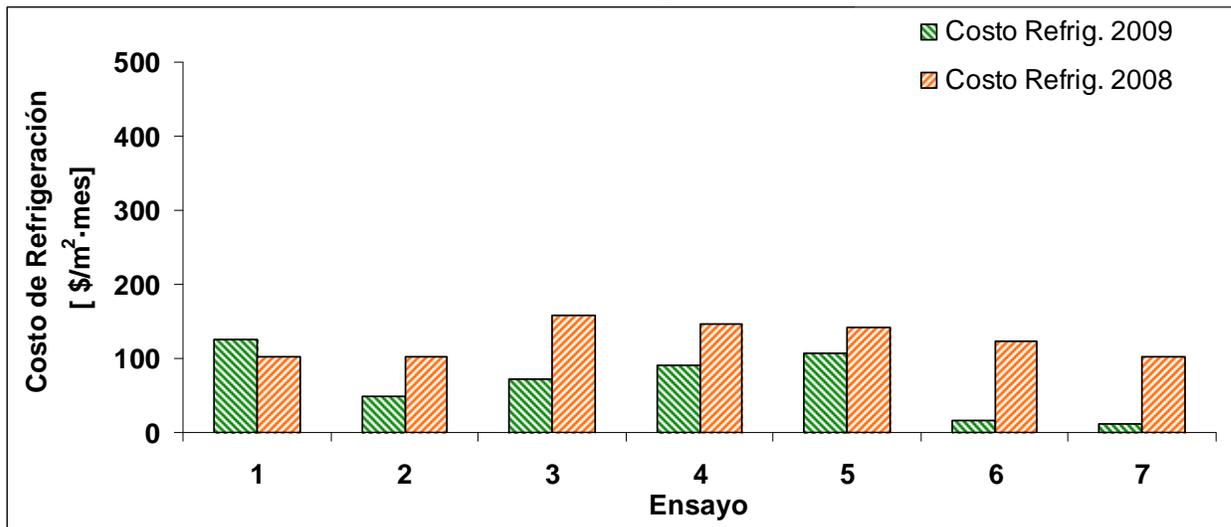
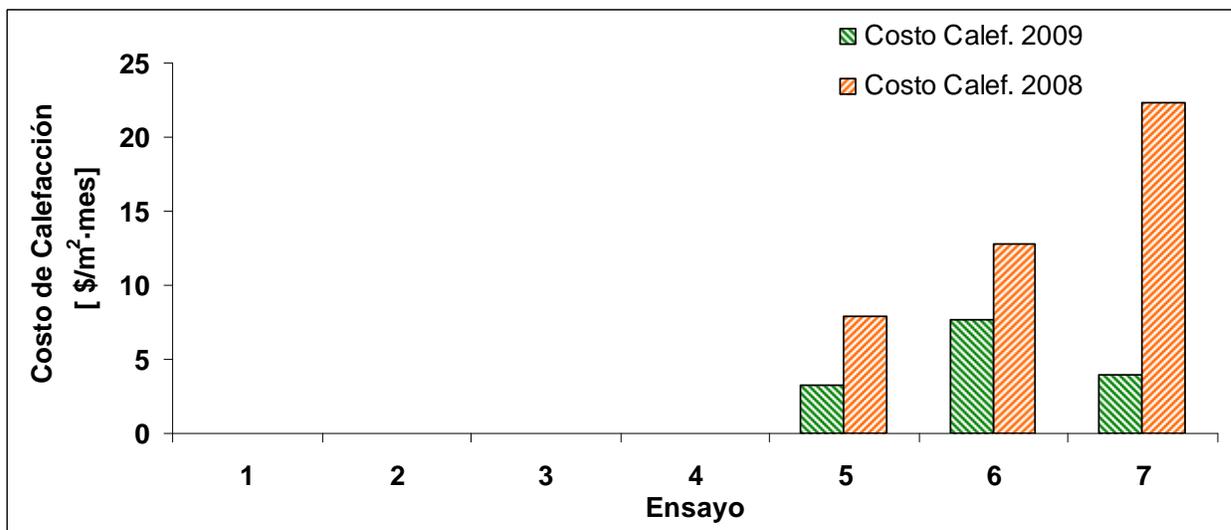


Gráfico 4.26
Costos de Calefacción



Se producen importantes bajas en los costos de climatización al usar un método pasivo como la aislación exterior, en los casos aislados no ventilados (2,3 y 4) se reduce el costo de refrigeración casi a la mitad, mientras que en los ensayos aislados ventilados (6 y 7) la reducción del costo de refrigeración se reduce casi a la sexta parte. Similar es el caso de la calefacción, donde los costos son reducidos casi a la sexta parte del costo original de la caseta sin aislación.

Si se supone que la actividad de la caseta en condiciones normales es una superposición de los casos estudiados (cerrada, ingreso de radiación solar, ventilación permanente y ventilación nocturna), el costo total de climatización estará dado por el promedio de los ensayos. Determinando el costo de cada uno de ellos se obtiene que colocando la aislación por el exterior se produce una reducción del 56% en los costos de climatización.

Capítulo 5

Modelación energitérmica de un edificio

5.1 Introducción

5.1.1 General

Con los capítulos anteriores se tiene un análisis cuantitativo de los efectos que produce la aislación exterior, referido a un entorno experimental; se cuantifican los efectos del conjunto aislación exterior/muro perimetral y se da un acercamiento al análisis cuantitativo de la demanda y los costos implicados en el confort higrotérmico, sin considerar ganancias internas.

Este capítulo tiene por objetivo realizar un análisis económico, enfocado al costo de climatización de una construcción de mediana envergadura, haciendo un análisis a la demanda energética requerida por la construcción bajo tres tipos de estados, referentes a la posición en que se coloca la aislación (sin aislación, con aislación por el interior y con aislación por el exterior).

5.1.2 Descripción

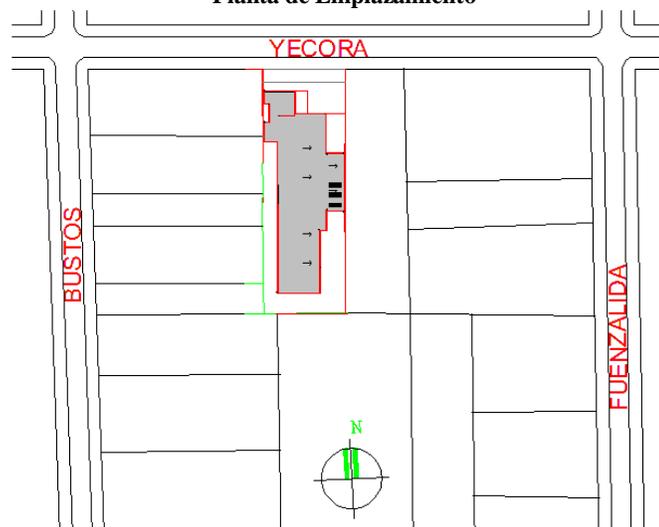
La construcción escogida para el análisis energitérmico es un centro de acogida, específicamente se trata de una Casa de Acogida Para Mujeres Maltratadas, que se realizará en Melipilla. El proyecto se encuentra en manos del MOP, los arquitectos desarrolladores son la oficina de arquitectura PM Arquitectos ó desarrolladores: Pedro Martínez y Gabriele Stange ó y el proyecto está a cargo del director regional de arquitectura del MOP, don Eliseo Huencho.

Este proyecto es emblemático para el MOP, no tan solo por su incidencia social, sino que también por su incidencia energética, ya que se trata de un proyecto pionero en el acondicionamiento climático a bajo costo, utilizando la aislación exterior como método pasivo para el control higrotérmico interior.

5.1.2.1 Ubicación

El proyecto se encuentra emplazado en Melipilla, específicamente estará ubicado en la calle Yécora, como se muestra en la siguiente imagen:

Imagen 5.1
Planta de Emplazamiento



5.1.2.2 Estructura y arquitectura

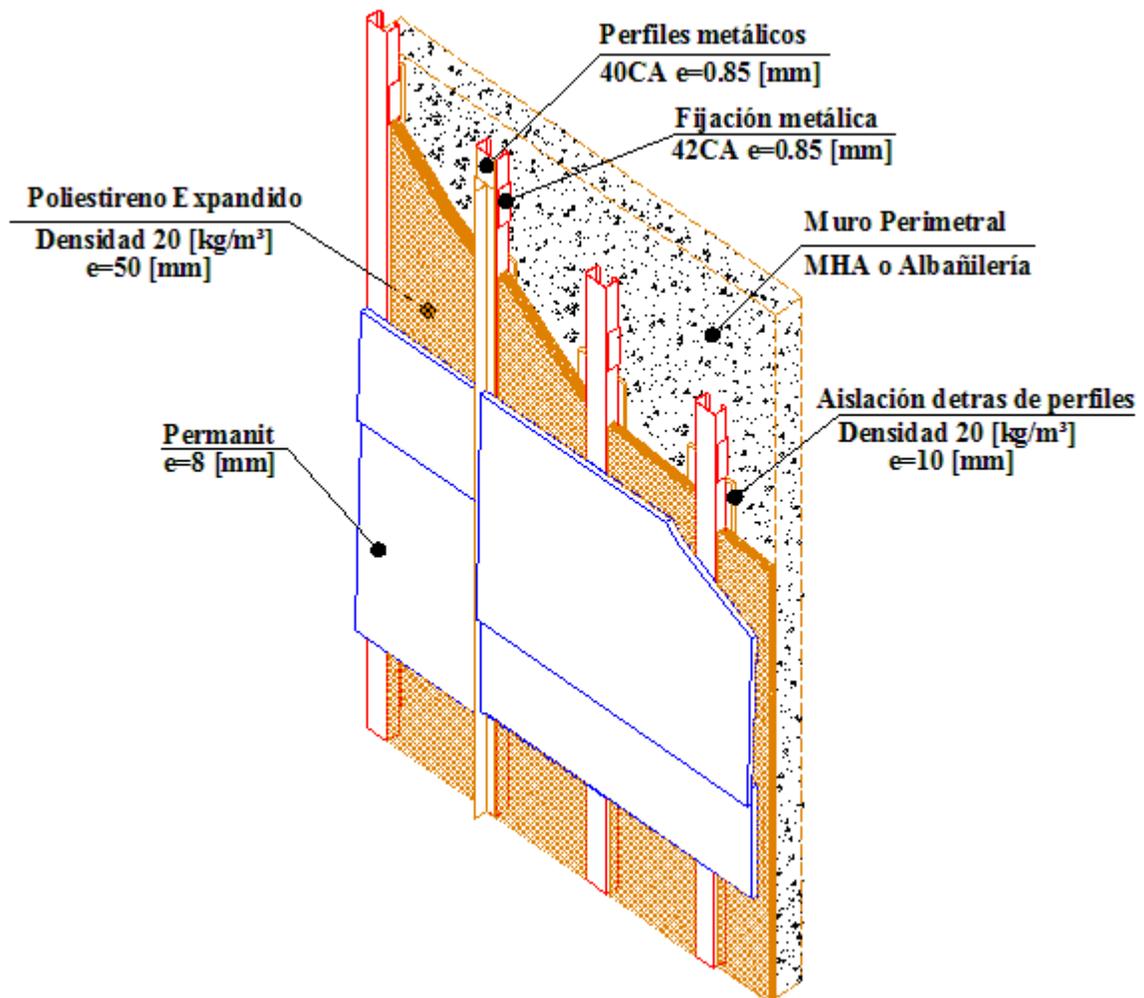
El proyecto consta de dos niveles, con una superficie total de 1018 [m²], distribuida en 562[m²] en el primer nivel y 456[m²] en el segundo nivel. El primer nivel consta de salas para talleres, comedor, cocina, oficinas y lavandería, y en el segundo nivel se encuentran los dormitorios.

La estructura sismo-resistente está conformada por muros de hormigón armado, machones de variadas dimensiones y pilares aislados en el primer nivel; el segundo nivel consta de muros perimetrales de hormigón armado.

El cerramiento ó según muestran los planos del proyecto ó está aislado por el exterior con poliestireno expandido de $e=50$ [mm] y densidad $\rho = 20$ [kg/m³], posee una terminación en fibrocemento $e = 8$ [mm] de tipo Permanit. Las fijaciones al muro se realizan mediante perfiles metálicos aislados en su base con poliestireno expandido de espesor $e=10$ [mm].

Las ventanas y lucarnas son de vidrio simple con marco de aluminio.

Imagen 5.2
Esquema de la aislación exterior



5.1.3 Características del análisis

5.1.3.1 Software

El software utilizado para la modelación energitérmica de la estructura es DesignBuilder versión 2. Este software permite realizar modelos de estructuras complejas, definiendo materialidad de los elementos, orientación espacial, porcentaje de ventanas y ubicación de ellas, y definiciones de techos, para luego definir los parámetros de análisis (días de utilización, ganancias internas, etc) y finalmente realizar una simulación de la estructura durante un periodo de tiempo definido.

Este programa considera, inercia térmica de los elementos, ganancias por radiación solar, ventilación y ganancias internas, además permite hacer simulaciones con diferentes aparatos de climatización para poder determinar cuál es el óptimo para una determinada construcción.

5.1.3.2 Análisis y ubicación de la aislación

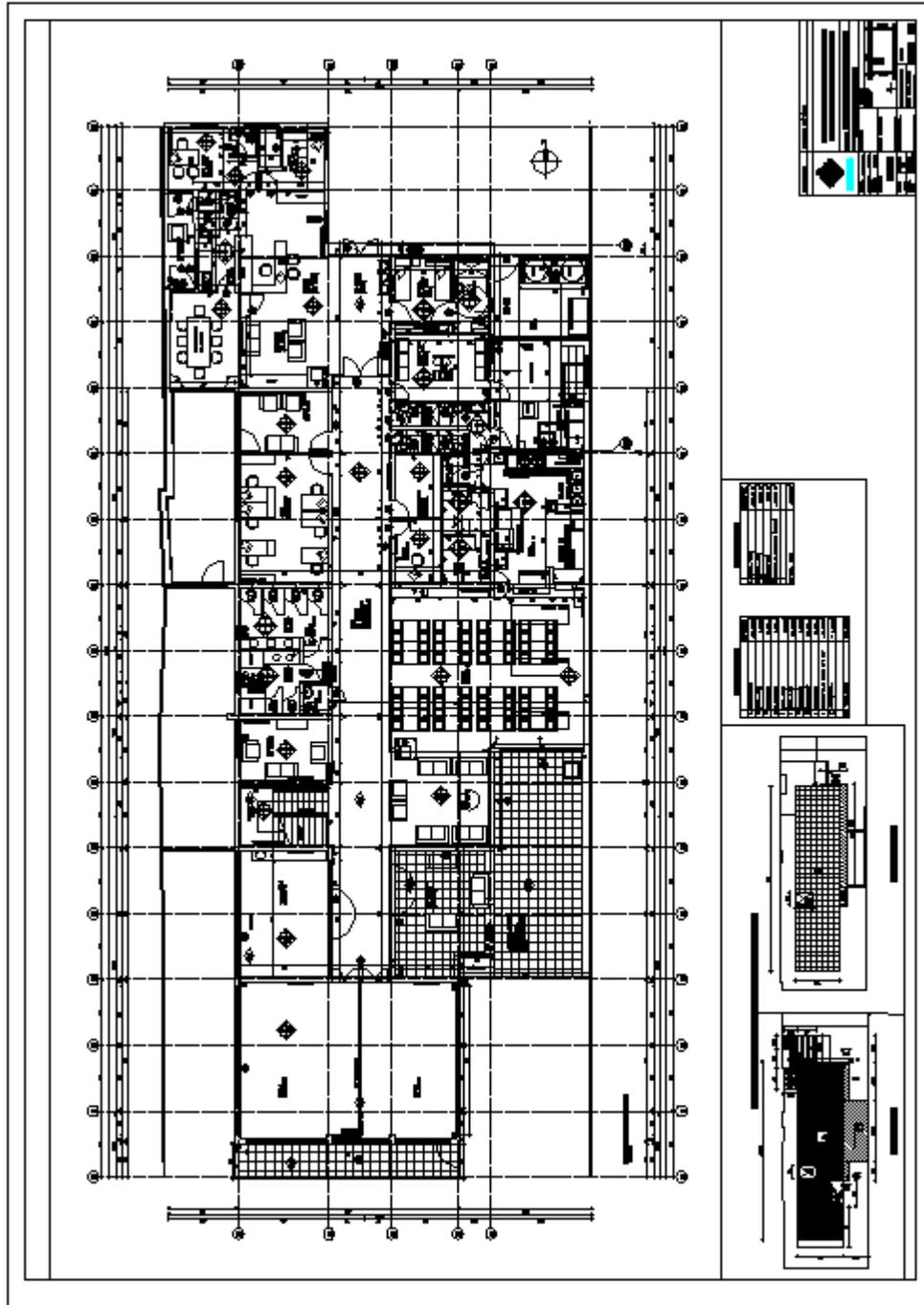
Como se mencionó en la introducción del capítulo, se realizará una comparación de las demandas y costos de climatización de la construcción durante un año, para ello se realizarán dos modelos, uno con aislación por el interior y otro con aislación por el exterior, determinando el comportamiento de estas dos posiciones, y concluyendo acerca de la posición óptima.

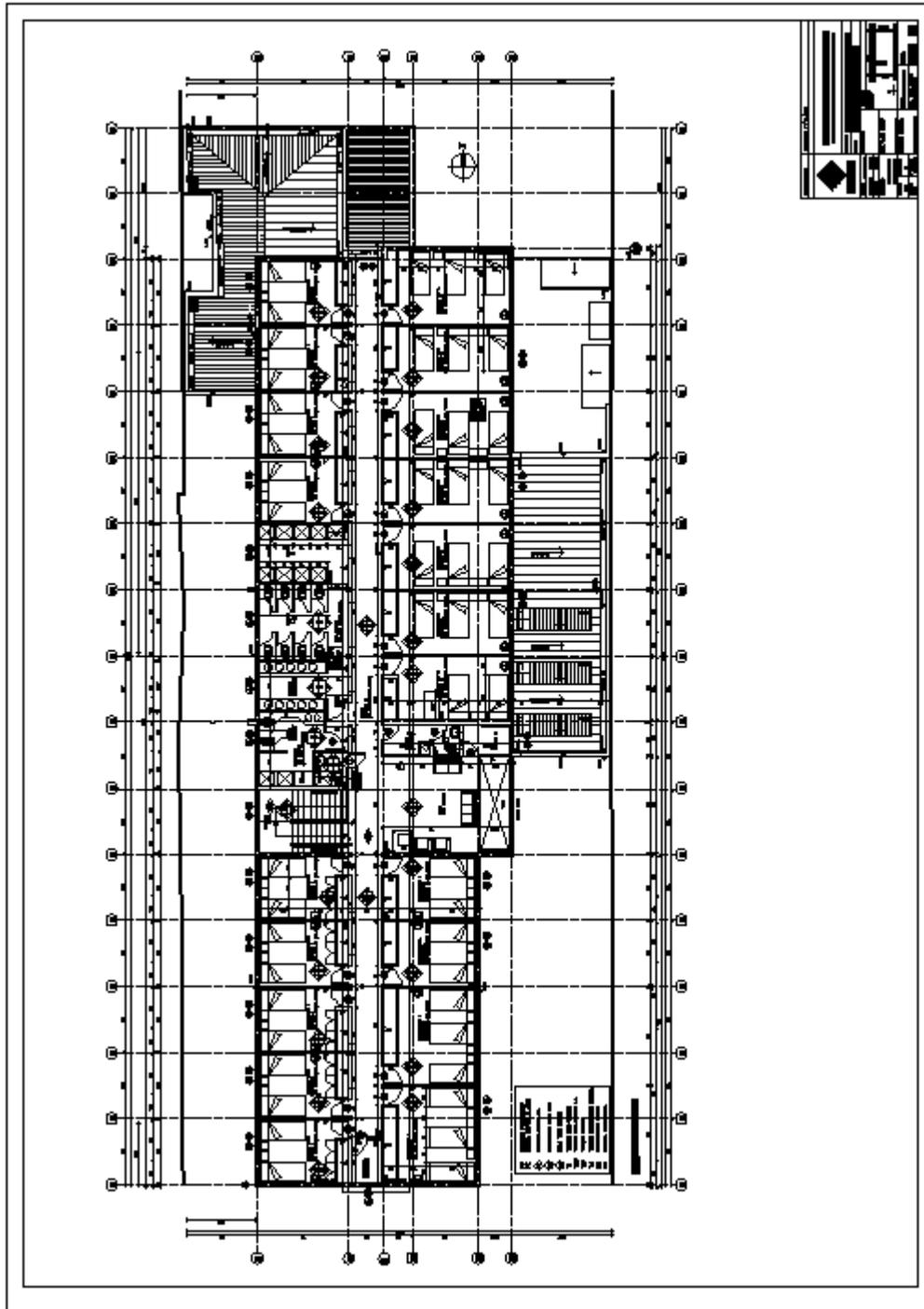
Se determinará la demanda y el costo para la misma construcción, pero esta vez, sin usar ningún tipo de aislación. Obtenidos estos datos se realizará una comparación de costos⁹, determinando ahorro y tiempo de retorno de la inversión realizada (colocación de la aislación).

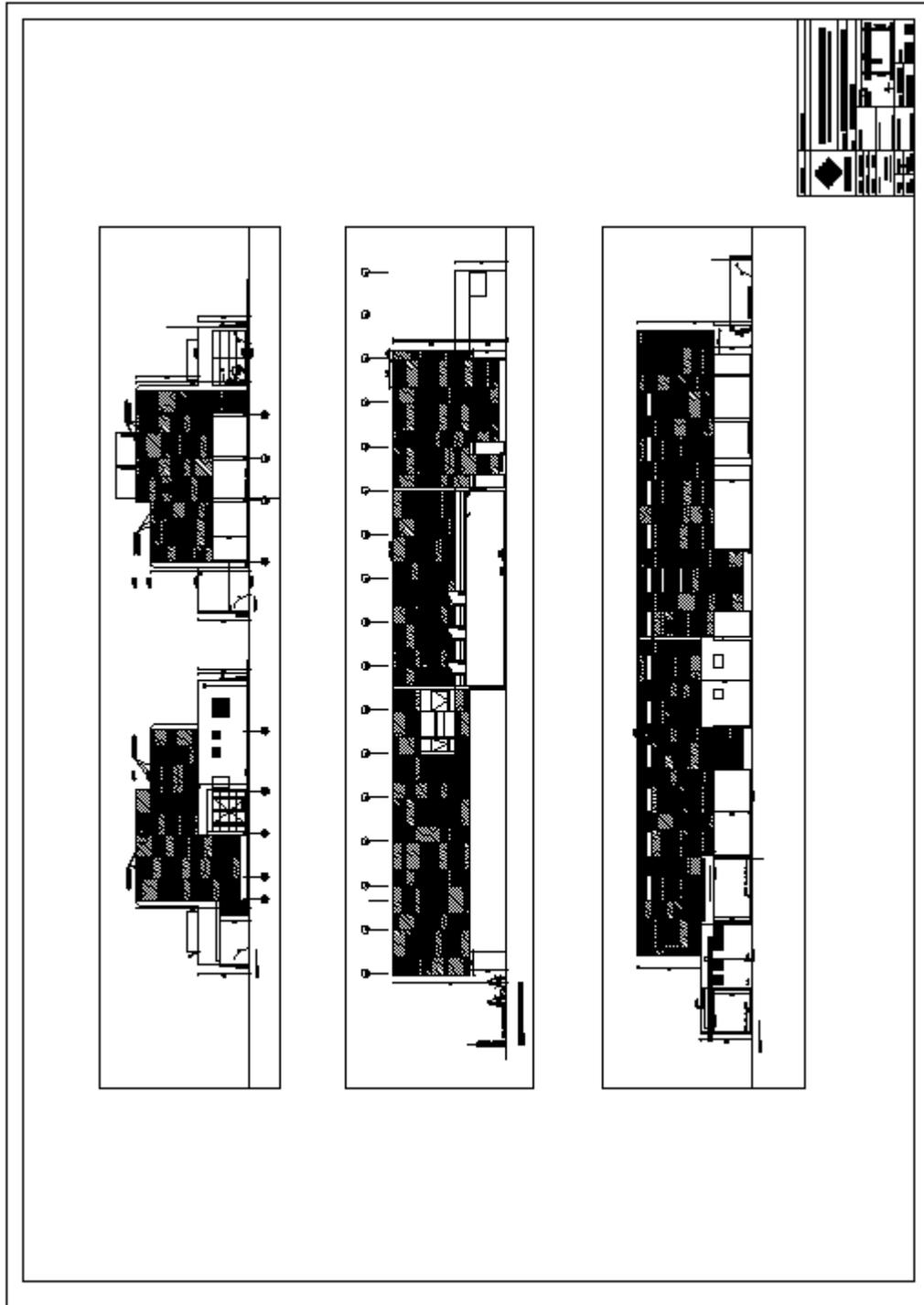
5.2 Planos

A continuación se presentan miniaturas de los planos de plantas y las elevaciones de las fachadas, estos se encuentran en formato digital en el CD adjunto. Estos planos fueron facilitados por el arquitecto Pedro Martínez.

⁹ Para el análisis de costos se utilizarán los valores del capítulo 4, es decir, $\eta=0.6$ refrigeración, $\eta=1$ calefacción y el precio del [KWh] será el de la tarifa de clientes regulados establecido en la tabla 4.8.







5.3 Modelos

Se realizaron 3 modelos, uno sin aislación, es decir, el cerramiento corresponde a un muro de hormigón armado de 20cm de espesor; otro modelo aplicando la aislación por el interior y un tercer modelo aplicando la aislación por el exterior. La aislación corresponde a 50mm de poliestireno expandido de densidad $20[\text{kg}/\text{m}^3]$.

El modelo se desarrolló conforme con los planos mencionados anteriormente, cabe destacar que para efectos del modelo no se consideró una terminación, debido al aporte despreciable en términos de fuga anual de calor que realizará la terminación con respecto a la aislación propuesta.

Imagen 5.3
Vista frontal del modelo computacional 3D

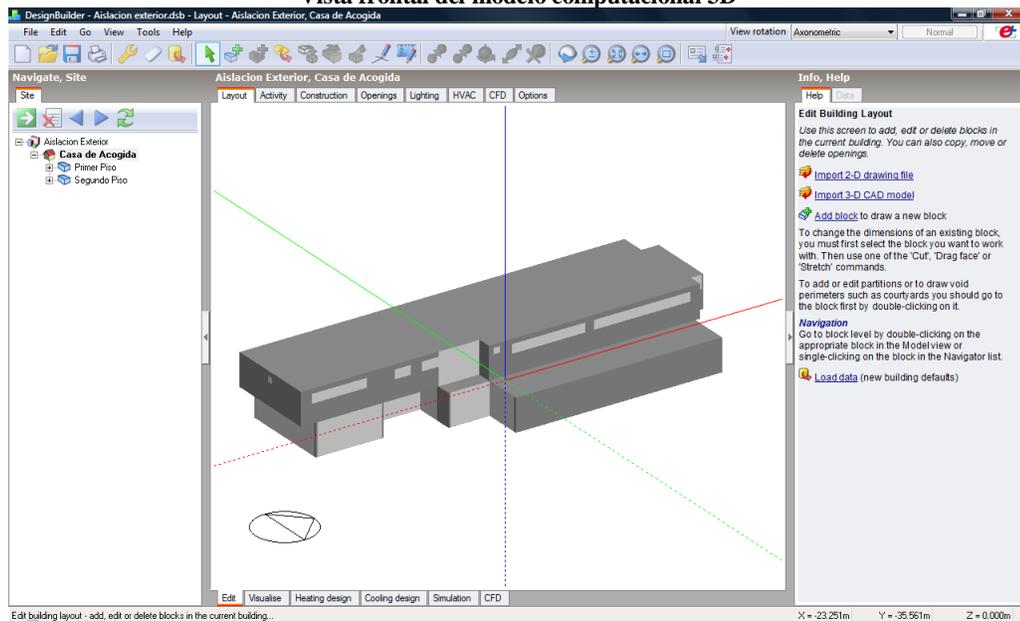
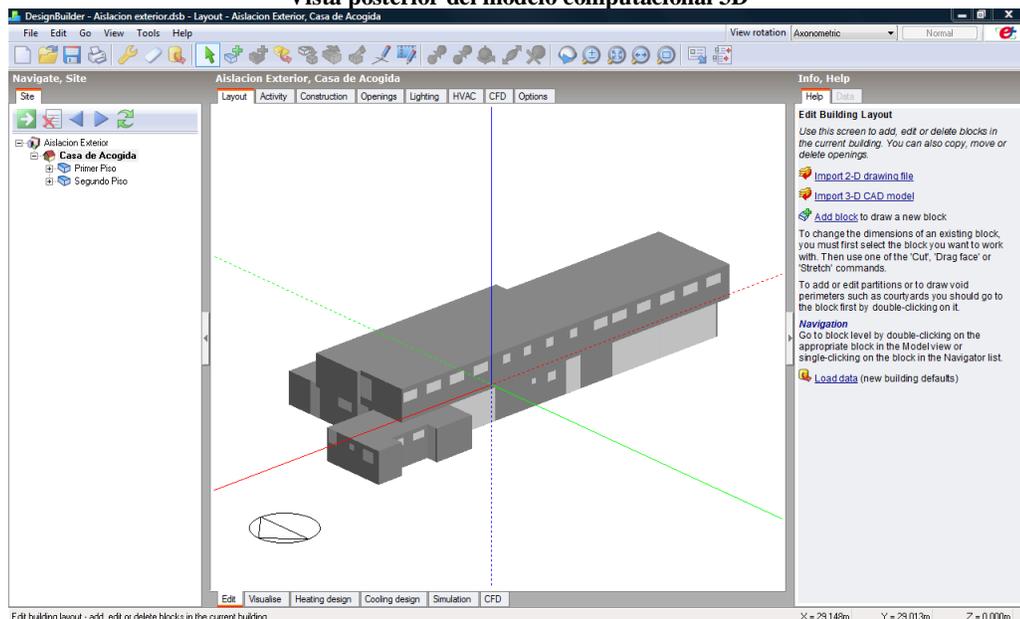


Imagen 5.4
Vista posterior del modelo computacional 3D



De esta forma se obtienen modelos con la aislación sin protección, pudiendo hacerse un análisis del conjunto aislación/muro sin otro elemento que varíe el resultado. Cualquier material adicional será un aporte para la resistencia térmica de la construcción y/o para la efusividad de la envolvente.

Imagen 5.5
Vista frontal renderizada¹⁰ 3D

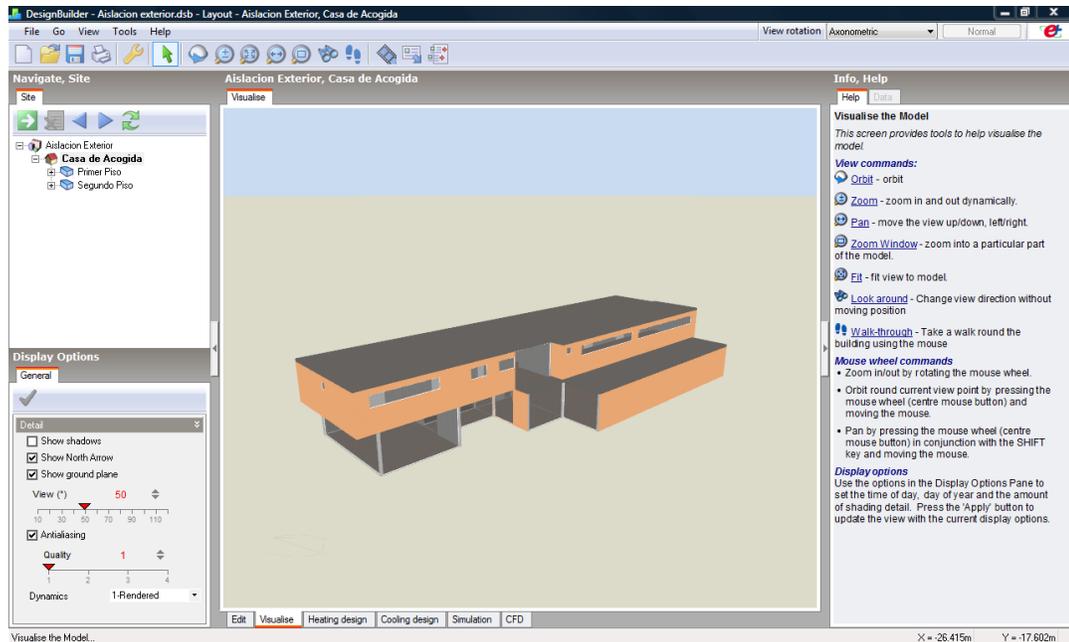
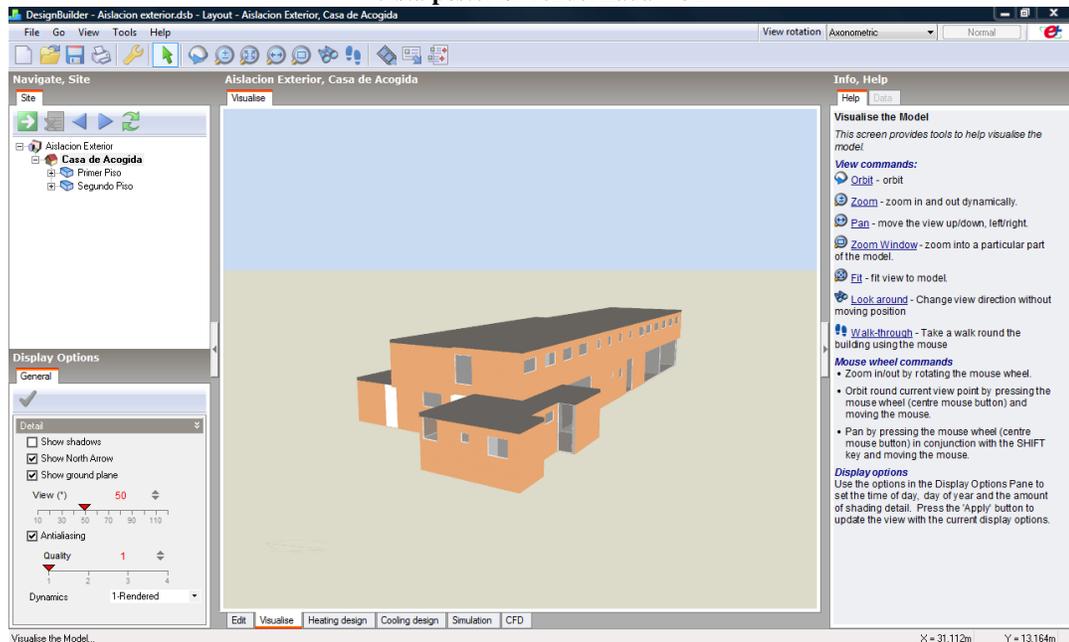


Imagen 5.6
Vista posterior renderizada¹⁰ 3D



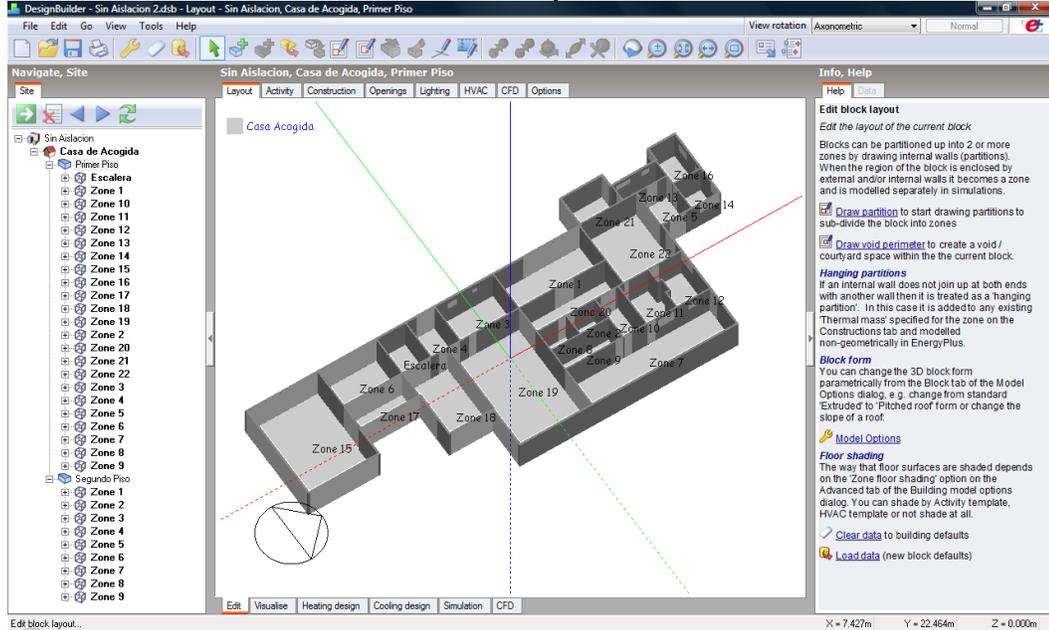
En naranja se observa la aislación exterior (50mm poliestireno expandido) aplicada al modelo (sin terminación), las puertas en blanco y las ventanas azuladas.

¹⁰ Renderizar: no existe un verbo en español para denotar esta acción, su significado es el de dar textura, color y forma a elementos computacionales modelados con gráficos simples.

5.3.1 Modelación

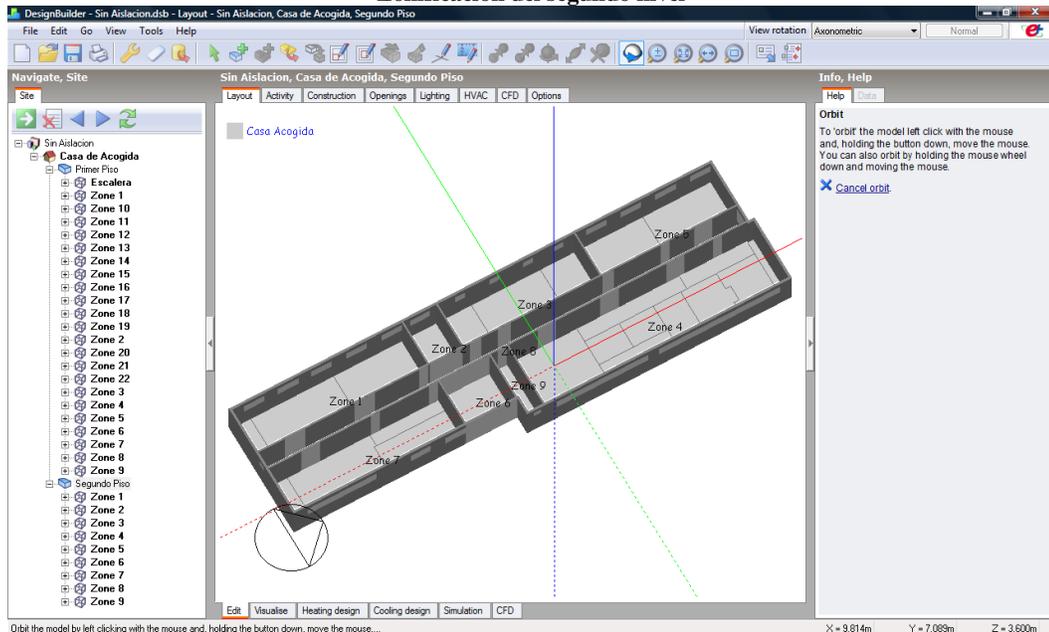
Al realizar un modelo computacional es primordial saber cómo opera el programa, pues de esta forma se evitan errores en los resultados.

Imagen 5.7
Zonificación del primer nivel



Este programa divide cada nivel en zonas, cada una con características definidas, es decir, ganancias internas, ventilación, resistencia térmica de elementos, puertas, ventanas, tabiquería, etc.. El programa opera analizando cada una de las zonas por separado, y luego realiza interacciones entre ellas, así dependiendo de los parámetros definidos determina las demandas energéticas de los aparatos dispuestos en su interior.

Imagen 5.8
Zonificación del segundo nivel



5.3.2 Consideraciones para el análisis

La definición de los parámetros del modelo se realiza en los siguientes grupos: datos del lugar, datos de la actividad, datos del cerramiento, datos de las aberturas, datos de la iluminación y datos del HVAC¹¹.

La estructura se ubica en Santiago de Chile, con esta definición se cargan automáticamente los datos de clima, es decir, latitud, longitud, altitud, zona horaria, estaciones del año, vientos, radiación solar, características del suelo, etc.. Los datos utilizados son los que se encuentran en la base de datos de la última versión de este programa (V2.0-2009) que corresponde a los registros climáticos hasta el año 2002.

Se consideró que el edificio se encuentra las 24 horas del día habitado, con una densidad de 0.1 personas por metro cuadrado; el rango de confort se supone constante a lo largo del año y corresponde a la banda entre 18°C y 23°C.

El trabajo que se desarrolla al interior se consideró como un trabajo manual ligero (Light Manual Work, LMW), esto para determinar las ganancias internas por la producción de calor provocada por el cuerpo humano. Además se usa un factor metabólico¹² que depende de las personas que habitan un lugar, en este caso se supuso la predominancia de mujeres dentro del recinto, haciendo que el factor metabólico sea 0.85.

Se supone una ganancia interna promedio equivalente a 5 [W/m²] con una fracción radiante del 20%, producida por los aparatos que se utilizan. Esta ganancia esta presente en las horas en que la casa se encuentra activa, es decir, entre las 8:00 y 18:00 horas de lunes a sábado.

El cerramiento corresponde a un muro de hormigón de 20cm de espesor y una aislación de 50mm de poliestireno expandido de densidad 20[kg/m³], la cual varía su posición de aplicación según el análisis hecho.

Los techos no poseen una inclinación considerable, por lo tanto son considerados como techos planos. Las ventanas son de tipo simple, con vidrio de 6mm y marco de aluminio. Las puertas son de madera de espesor 100mm.

Las luces se consideraron prendidas durante todo el día y producen una ganancia interna de 10 [W/m²], con una fracción radiante del 43% y una fracción visible del 18%. Son de tipo suspendidas.

El sistema de climatización es un quipo Fan-Coil, alimentado mediante corriente eléctrica y con un rendimiento 1, esto significa que se trabaja con una rendimiento del 100%, y por lo tanto los resultados entregados corresponden a la demanda energética.

La actividad del equipo de climatización son las 24 horas del día, pues se desea determinar la demanda anual de un recinto 100% climatizado.

¹¹ HVAC: Corresponde al acrónimo de Heating, Ventilating and Air Conditioning.

¹² Factor metabólico: define la constitución física de los ocupantes.(1 hombres, 0.85 Mujeres y 0.75 niños)

5.4 Demanda energética y costos de climatización

5.4.1 Demanda energética

A continuación se presentan las tablas de resumen de resultados de los tres modelos corridos, presentadas como la demanda mensual total y la demanda mensual por metro cuadrado de edificio.

Tabla 5.1
Demanda mensual de calefacción

Mes	Demanda Calefacción [KWh]			Demanda Calefacción [KWh/m ²]		
	Sin Aisl	A. Interior	A. Exterior	Sin Aisl	A. Interior	A. Exterior
Enero	16.76	26.45	12.27	0.016	0.026	0.012
Febrero	54.95	80.51	43.11	0.054	0.079	0.042
Marzo	724.02	795.71	531.87	0.711	0.782	0.522
Abril	4363.18	3845.20	3381.93	4.286	3.777	3.322
Mayo	12437.15	9769.31	9629.19	12.217	9.597	9.459
Junio	17162.11	13350.09	13494.76	16.859	13.114	13.256
Julio	22557.53	17333.90	17748.33	22.159	17.027	17.435
Agosto	16139.50	12630.10	12632.54	15.854	12.407	12.409
Septiembre	8003.93	6532.95	6162.10	7.862	6.417	6.053
Octubre	3395.27	2869.14	2336.53	3.335	2.818	2.295
Noviembre	637.57	682.81	460.07	0.626	0.671	0.452
Diciembre	78.23	108.80	56.66	0.077	0.107	0.056

Tabla 5.2
Demanda mensual de refrigeración

Mes	Demanda Refrigeración [KWh]			Demanda Refrigeración [KWh/m ²]		
	Sin Aisl	A. Interior	A. Exterior	Sin Aisl	A. Interior	A. Exterior
Enero	31329.68	30375.29	29907.61	30.776	29.838	29.379
Febrero	23077.74	22493.43	21987.68	22.670	22.096	21.599
Marzo	14774.18	15633.98	14836.58	14.513	15.358	14.574
Abril	5053.72	6243.88	5455.71	4.964	6.133	5.359
Mayo	939.94	1523.27	1166.90	0.923	1.496	1.146
Junio	151.48	303.66	198.95	0.149	0.298	0.195
Julio	100.17	187.93	126.34	0.098	0.185	0.124
Agosto	634.34	1081.00	794.61	0.623	1.062	0.781
Septiembre	1846.58	2728.41	2136.57	1.814	2.680	2.099
Octubre	5832.21	7063.88	6129.19	5.729	6.939	6.021
Noviembre	15467.08	16568.35	15538.96	15.194	16.275	15.264
Diciembre	25268.84	24996.38	24328.88	24.822	24.554	23.899

Al sumar las demandas por metro cuadrado se obtiene:

Tabla 5.3
Resumen de demandas anuales

	Sin Aislación [KWh/m ²]	Aisl. Interior [KWh/m ²]	Aisl. Exterior [KWh/m ²]
Calefacción	84.05	66.82	65.31
Refrigeración	122.27	126.91	120.44
Total	206.3	193.7	185.8

Para poder entender mejor los datos entregados en las tablas 5.1 y 5.2 se presentan en forma gráfica, mediante gráficos de barras.

Gráfico 5.1
Demanda de calefacción

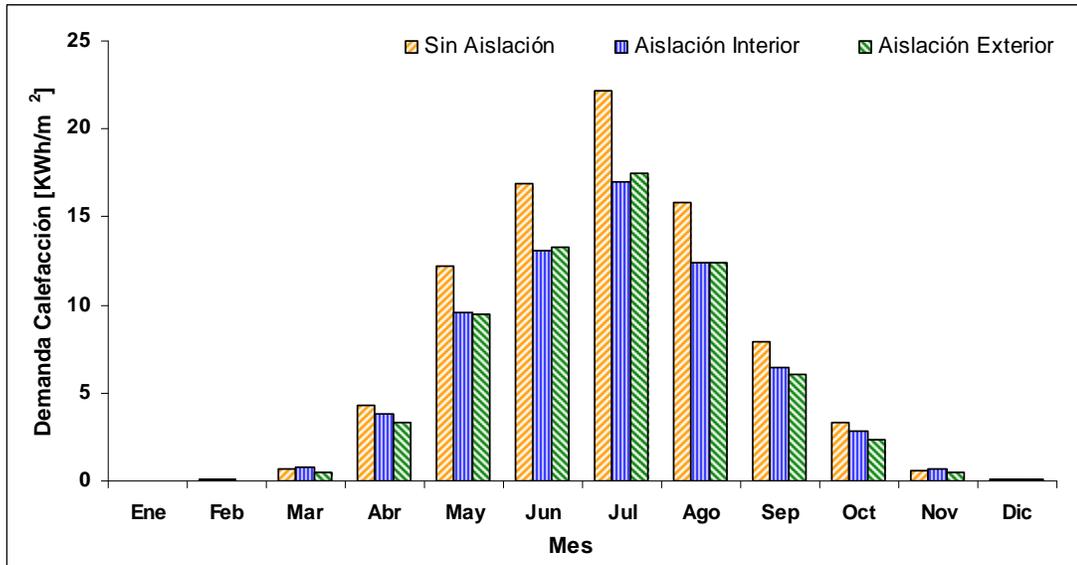
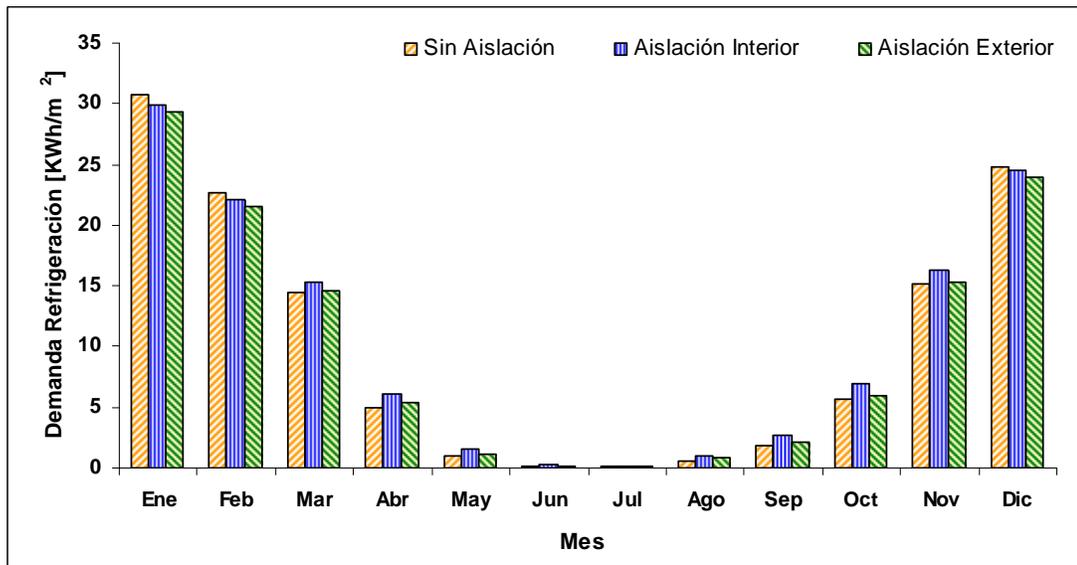


Gráfico 5.2
Demanda de refrigeración



En cuanto a calefacción, al observar el gráfico 5.1 se puede apreciar que la mejor respuesta a lo largo del año la produce la aislación aplicada por el exterior, a pesar que en los meses más fríos del año el mejor desempeño lo tiene la aislación interior.

En cuanto a refrigeración al observar el gráfico 5.2 se aprecia la importancia que posee la masa efusiva en el control de la temperatura, pues los mejores resultados son obtenidos por la aislación exterior, ya que esta permite usar la masa de muro como masa efusiva.

Para explicar lo anterior hay que tener presente que cuando un sistema posee menor inercia térmica la respuesta térmica ocurre con mayor rapidez y que al existir masa efusiva interior la generación de calor es absorbida por esta masa hasta encontrar un equilibrio con el medio interior, retardando la respuesta térmica y provocando un desfase de la onda térmica, sumado a esto se tiene que el enfriamiento de las edificaciones ocurre con mayor rapidez que el calentamiento.

Al realizar un análisis del gráfico 5.1 se aprecia que durante el invierno, específicamente en los meses más fríos, se producen diferencias entre la demanda producida por la aislación interior y la aislación exterior, esto por los supuestos dados en el capítulo 2 no se debería producir, pues en invierno se produce un estado estático de transferencia de calor, rigiendo la pérdida de calor solamente la resistencia térmica del cerramiento; y el conjunto aislación/muro posee la misma resistencia, no importando la ubicación de la aislación. Esto propone que el diseño en invierno también debe considerar la inercia de absorción aportada por el muro, pues en los meses más fríos genera aumentos en las demandas de calefacción.

La razón por la cual se produce un mejor desempeño de la aislación interior en los meses fríos responde a una disminución de la inercia térmica de absorción. Al aplicar la aislación por el interior la inercia del edificio baja, con esto la respuesta térmica se produce mucho más rápido, logrando estados de confort con mayor rapidez y cesando la generación de calor por parte del climatizador. Recordemos que existen otras fuentes de calor interno, como la actividad de las personas, los aparatos en uso y las luces encendidas, gracias a estas ganancias internas el climatizador trabaja menos tiempo durante el día, pues logra entrar con mayor rapidez en el rango de confort. Al contrario cuando se aplica la aislación por el exterior se produce un aumento de la inercia térmica y por consiguiente la respuesta térmica es más lenta, produciendo un desfase en la onda interior de calor, esto puede coincidir con el cese de las actividades diarias, y por lo tanto cierta parte ganancias internas deja de funcionar (aparatos y personas 18:00 horas), así el peso de la climatización fuera de este horario lo toma íntegramente el climatizador instalado (Fan-Coil). En resumen, cuando existe aislación interior el calor generador produce cambios térmicos con mayor rapidez, logrando una temperatura adecuada en menor tiempo; y al existir aislación exterior el calor generado debe elevar tanto la temperatura del medio interior como la de la masa efusiva, produciendo un retardo en el logro del estado térmico de confort.

Cabe mencionar también que junto con el cese de las actividades internas del edificio se produce un descenso de la temperatura exterior (noche), lo que produce una mayor diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del edificio, solicitando con mayor fuerza la salida de calor desde el edificio hacia el medio ambiente exterior.

Con respecto a la refrigeración las razones son parecidas, se logran muy buenos resultados gracias al control de temperatura que genera la masa efusiva interior, que al estar abrigada por la aislación exterior no toma carga de calor directa por radiación solar, y puede usar toda su masa como inercia de absorción disminuyendo la demanda.

En resumen las menores demandas son las producidas por la aislación exterior, disminuyendo la demanda de calefacción en un 2.3% y la de refrigeración en un 5.1% con respecto a la aislación interior. Estas diferencias se pueden apreciar en la tabla 5.3 y serán discutidas en el capítulo 6.

5.4.2 Consumo energético y costos de climatización

En el punto anterior se determinó la forma óptima de colocar de la aislación, estableciendo que se mejoran los niveles de demanda energética cuando la aislación es colocada por el exterior. En este punto se determinará la mejora en consumo y costos que tiene la colocación de la aislación por el exterior comparada con el mismo centro de acogida sin aislación.

A continuación se muestra la tabla resumen con los consumos totales mensuales y anuales, y los costos totales anuales de mantener climatizada la vivienda durante el año.

Tabla 5.4
Resumen consumos y costos totales mensuales de climatización

Mes	Consumo Total [KWh]			Consumo total [KWh/m ²]			
	Sin Aisl.	Aisl. Int.	Aisl. Ext.	Sin Aisl.	Aisl. Int.	Aisl. Ext.	
Enero	52232.9	50651.9	49858.3	51.3	49.8	49.0	
Febrero	38517.9	37569.6	36689.2	37.8	36.9	36.0	
Marzo	25347.7	26852.4	25259.5	24.9	26.4	24.8	
Abril	12786.1	14251.7	12474.8	12.6	14.0	12.3	
Mayo	14003.7	12308.1	11574.0	13.8	12.1	11.4	
Junio	17414.6	13856.2	13826.3	17.1	13.6	13.6	
Julio	22724.5	17647.1	17958.9	22.3	17.3	17.6	
Agosto	17196.7	14431.8	13956.9	16.9	14.2	13.7	
Septiembre	11081.6	11080.3	9723.1	10.9	10.9	9.6	
Octubre	13115.6	14642.3	12551.9	12.9	14.4	12.3	
Noviembre	26416.0	28296.7	26358.3	25.9	27.8	25.9	
Diciembre	42193.0	41769.4	40604.8	41.4	41.0	39.9	
Consumo Anual Total				287.8	278.3	266.0	[KWh/m ²]
Costo Anual Total				35763	34583	33055	[\$/m ²]
Costo Anual Total				36 407 239	35 205 461	33 649 753	[\$]

Para tener una visión del consumo y costo anual de calefacción y refrigeración se presenta la tabla 5.5 y 5.6 que contienen dichos valores

Tabla 5.5
Consumos anuales [KWh/m²]

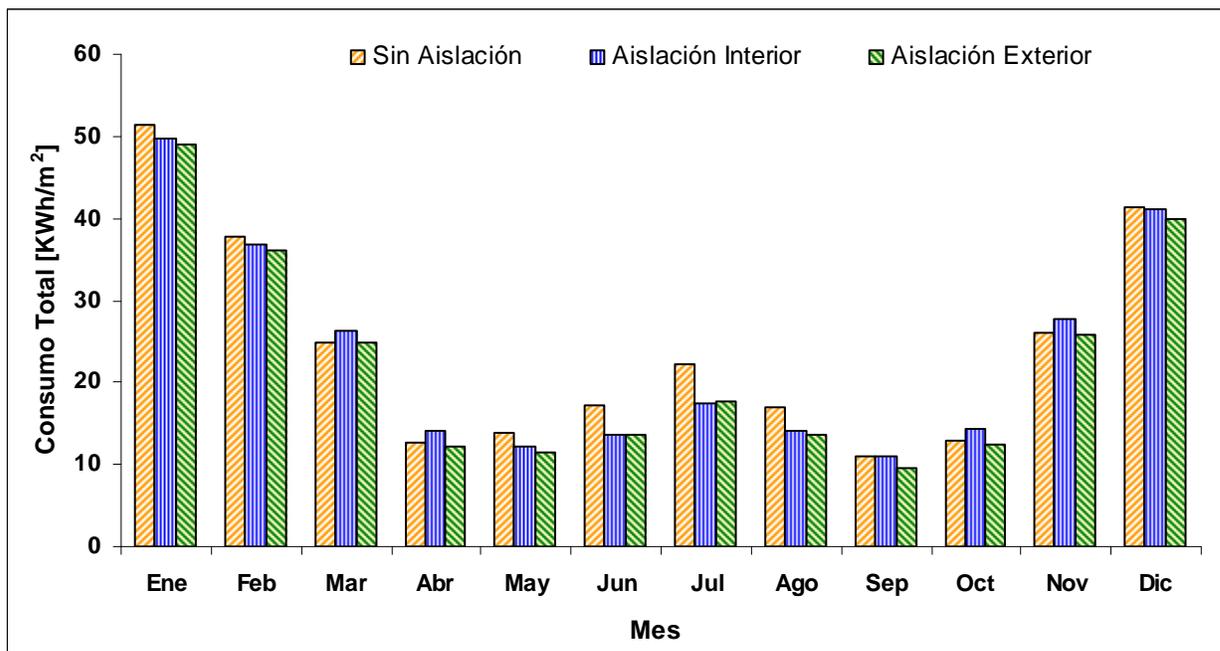
Consumo anual	Sin Aisl.	Aisl. Int.	Aisl. Ext.
Calefacción	84.057	66.822	65.314
Refrigeración	203.8	211.5	200.7
Total	287.8	278.3	266.0

Tabla 5.6
Costos anuales

Costo Anual	Sin Aisl.	Aisl. Int.	Aisl. Ext.	Unidad
Calefacción	10444	8302	8115	[\$/m ²]
	10631588	8451701	8260909	[\$]
Refrigeración	25320	26281	24940	[\$/m ²]
	25775651	26753760	25388844	[\$]
Total	35763	34583	33055	[\$/m ²]
	36 407 239	35 205 461	33 649 753	[\$]

Para tener una visión global del comportamiento del consumo y del costo del centro de acogida se grafican los datos de la tabla 5.4.

Gráfico 5.3
Consumo mensual total de climatización



Se observa el predominio en el ahorro al utilizar la aislación por el exterior, presentando ahorros anuales del 22.3% en calefacción y del 1.5% en refrigeración.

En números concretos se logra un ahorro del 7.6% anual equivalente a 2.75 millones de pesos. Como se puede apreciar el consumo energético está concentrado en los meses de verano, esto es debido a la demanda de refrigeración, pues para pasar de demanda a consumo la energía necesaria se incrementa inversamente proporcional a su rendimiento ($\eta=60\%$).

Durante los meses fríos ó Abril a Octubre ó se tiene un consumo promedio de 12.9 [KWh/m²] mensual, lo cual sitúa esta construcción como una de muy bajo consumo energético, pero se ve opacada por los consumos de los meses cálidos, en los que se alcanza hasta 49 [KWh/m²] mensual (determinar un consumo promedio de los meses cálidos no es representativo por la dispersión de valores existentes).

Un punto que llama la atención al ver el gráfico 5.3 es el mal desempeño que posee la aislación aplicada por el interior, teniendo en 4 meses peores resultados que la casa sin aislación. Aun así presenta mejor desempeño en los meses más helados, debido a su rápida respuesta provocada por la baja inercia que posee.

Al observar la tabla 5.4 se observan consumos anuales del orden de 285[KWh/m²] aprox., lo cual habla de un diseño con mucho gasto energético, considerando que en Alemania en el año 2000 tenían consumos de 70[KWh/m²], gracias al uso de la aislación exterior ese número puede bajar un poco llegando a 266[KWh/m²], lo cual no es bueno, pero se mejoran los resultados. Se debe innovar en el uso eficiente de la energía pues es un bien escaso y Chile, un país en vías de desarrollo, debe tener presente el gasto energético como un punto fundamental en su desarrollo.

5.4.2.1 Tiempo de retorno de la inversión

Ya se estableció que la mejor posición para colocar la aislación es por el exterior, sumado a esto se determinó que se produce un ahorro del 7.57% anual en los costos de climatización; con estos datos ahora es importante saber en cuánto tiempo se recupera la inversión hecha al realizar la colocación de la aislación por el exterior.

Para esto se presenta en la siguiente tabla los costos de instalación por metro cuadrado de aislación exterior.

Tabla 5.7
Costos de instalación

Aislapol de 50mm	1700	[\$/m ²]
Estuco adherente y M.O.	6300	[\$/m ²]
Sistema de Fijación	6000	[\$/m ²]
Total	14000	[\$/m²]

En la siguiente tabla se presenta la cubicación de superficie de las elevaciones de la casa de acogida.

Tabla 5.8
Cubicación de superficie de muro

Elevación Poniente	253.30	[m ²]
Elevación Oriente	278.68	[m ²]
Elevación Sur	55.67	[m ²]
Elevación Norte	89.52	[m ²]
Sup. Total Muros	677.2	[m²]

Así se tiene que el costo total de instalación es \$9.480.781, con la siguiente tabla se determina el tiempo de retorno de la inversión

Tabla 5.9
Ahorro Aislación Exterior V_s Sin Aislación

Meses	Ahorro [\$]	Acumulado [\$]
Enero	295031	295031
Febrero	227193	522224
Marzo	10952	533176
Abril	38672	571848
Mayo	301874	873722
Junio	445815	1319538
Julio	592095	1911633
Agosto	402531	2314164
Septiembre	168789	2482953
Octubre	70043	2552996
Noviembre	7169	2560165
Diciembre	197321	2757486

En tres años se ahorra:

$$\$2.757.486 \cdot 3 \text{ años} = \$8.272.457$$

Falta por recuperar \$1.208.324

En Junio hay acumulado \$1.319.538

Entonces la inversión se recuperaría en menos de cuatro años.

Capítulo 6

Comentarios y Conclusiones

6.1 Comentarios generales

6.1.1 Influencia de la aislación exterior en la caseta de prueba en verano

El primer ensayo realizado el año 2009 corresponde al estudio de la respuesta térmica de la caseta usando una mayor superficie de traspaso (sin aislación) entre el calor del medio interior y la masa efusiva dispuesta, cambiando de 2 tambores con 325 [lt] de agua a 108 botellas de 3 [lt] completando 325 [lt] de agua, con esto se aumentó de 3.05 [m²] a 12.73 [m²] la superficie de traspaso (ver gráficos 4.1 y 4.2 y tablas 4.9 y 4.10). El resultado de los ensayos indica que debido al aumento de la superficie aumenta la tasa de traspaso de calor haciendo que la masa efusiva absorba una mayor cantidad de calor, restituyéndola al medio interior en las horas de frío, con una consecuencia directa de un aumento en la temperatura media, y una disminución de la amplitud.

Al comparar los ensayos 2 y 3 realizados el año 2009 (ver gráficos 4.3 y 4.5), uso de aislación exterior con la masa efusiva interior (108 botellas) y el otro ensayo solamente con aislación exterior, se observan resultados muy similares, indicando que el aporte que genera la masa efusiva interior (108 botellas) no es significativo cuando el cerramiento posee un abrigo térmico; esto se produce ya que la masa de muro no es solicitada térmicamente por la radiación solar, por lo tanto dicha masa pasa a formar parte de la inercia de absorción (masa efusiva); así los 325 [kg] de agua son despreciable frente al cerramiento que posee una masa de 5 [ton] aprox.

Es importante notar que con el uso de aislación exterior la radiación solar incide sobre el aislante, el cual posee alta resistencia térmica, en consecuencia el calor debe ser transmitido por conducción a través del aislante y luego a través del muro para poder ingresar al medio interior, es decir, el camino es demasiado hostil como para que una gran cantidad de calor ingrese a la caseta. Con esto el muro usa su inercia térmica como inercia de absorción y de transmisión.

En resumen el conjunto aislación exterior/muro perimetral contribuye a frenar el ingreso de calor a la caseta (aislación exterior) y a controlar la temperatura mediante la masa efusiva (muro), disminuyendo la demanda energética de climatización.

El problema que radica en el uso de masa como regulador de temperatura es que la masa efusiva se carga durante el día, restando calor al medio y amortiguando la respuesta interior, es decir, se carga con calor, y en la noche cuando el medio interior está más helado el muro entrega el calor al medio, es decir, se descarga, esto logra que se eleven los mínimos, elevando en consecuencia toda la onda térmica interior, traduciéndose en importantes demandas de refrigeración, que como ya se ha visto, el uso de energía es poco eficiente y caro. La solución es sacar ese exceso de calor que posee el muro, de modo que no eleve las temperaturas interiores. Para lograr este objetivo se introduce la ventilación nocturna, en donde el medio exterior está más helado que el interior y por lo tanto el flujo de calor se produce desde el interior hacia el exterior, extrayendo calor y ñrefrescandoñ el muro, con esto el muro parte fresco, y puede guardar más calor que antes, teniendo como consecuencia directa la disminución de las temperaturas interiores y una prolongada incursión dentro del rango de confort establecido.

La aislación exterior disminuye los desfases, pues el muro se descarga más rápido. En los ensayos realizados el 2008 el muro se carga por radiación solar directa, quedando caliente por un periodo más largo de tiempo produciendo mayores desfases. Al evitar esa carga exagerada con calor el muro cede más rápido el calor al medio.

Cabe hacer notar que se producen importantes bajas en los costos de climatización al utilizar un método pasivo de control de temperatura ó gráfico y tabla 6.1 ó, resultando ser el más eficiente la aislación exterior con una adecuada ventilación nocturna, como se observa en los ensayos 6 y 7.

Gráfico 6.1
Costo total de climatización

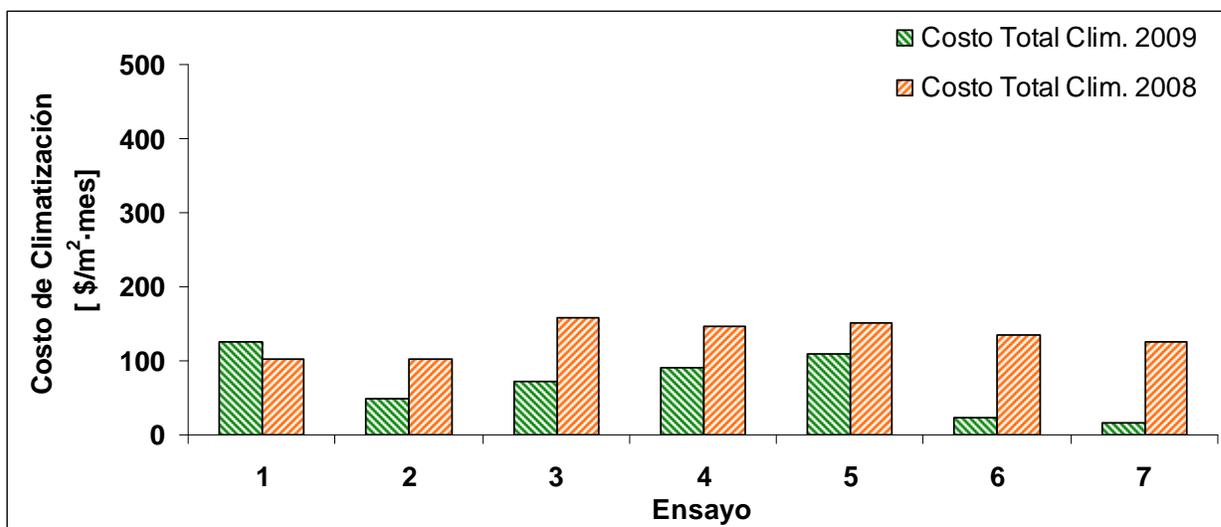


Tabla 6.1
Costo total de climatización

Costos totales de climatización por ensayo [\$/m ² ·mes]							
	1	2	3	4	5	6	7
2008	102.20	102.20	157.59	147.15	150.14	135.46	125.30
2009	126.01	48.61	71.26	91.67	109.58	24.13	15.39

Como se mencionó en el punto 4.5, si se supone que la actividad de la caseta es el promedio de los ensayos realizados, se tiene una reducción de costos del 56% en climatización, considerando que la caseta no tiene ganancias internas de ninguna clase.

6.1.2 Modelación Energética de un edificio

Al comparar las respuestas térmicas producidas por la aislación interior y la aislación exterior se observa que las demandas se ven reducidas cuando se aplica la aislación por el exterior, siendo un 4.4% menor la demanda anual del caso con aislación exterior.

El comportamiento de la aislación interior resulta ser más eficiente en los meses más fríos, donde se requiere gran demanda de calefacción y poca de refrigeración, pues se evita agregar inercia de absorción al medio interior, y de esta forma el edificio al tener poca inercia térmica responde a los cambios de temperatura en forma más rápida, evitando largos periodos de calefacción; y con una buena resistencia que evite las fugas de calor hacia el medio exterior se logra una disminución en la demanda de calefacción. En el caso concreto del edificio, esto es eficaz solamente dos meses al año, siendo ineficiente el resto del tiempo.

Por otro lado la aplicación de aislación exterior en condición de invierno provoca una mayor demanda de energía, debido a que se debe generar el calor necesario para mantener la masa de muro y el medio ambiente a una temperatura de equilibrio, es decir, al principio cuando se comienza a calefaccionar el medio interior gran parte del calor generado lo absorbe el muro, regulando la temperatura interior, como se vio en la parte experimental, y retrasando la calefacción del medio interior. Debido a la inercia térmica los cambios de estado térmico necesitan más energía, esto es favorable cuando se quiere controlar la temperatura, pero no cuando se quiere elevar la temperatura.

Al analizar el consumo del edificio con aislación por el exterior y compararla con el consumo del edificio sin aislación se observa una disminución en los costos de calefacción del 22.3%, mientras que al observar lo que sucede con la refrigeración el ahorro es solamente del 1.5%, teniendo como resultado anual un ahorro del 7.6%. El problema es que a pesar de que el porcentaje de ahorro de calefacción es alto, al transformarlo en dinero deja de ser importante. Esto es provocado por la presencia de la refrigeración, pues debido al rendimiento (60%) de los aparatos de refrigeración los costos son elevados. No así los aparatos de calefacción que tienen rendimientos cercanos al 100% y por lo tanto su costo no se eleva tanto como el de la refrigeración. Esto se puede apreciar en el gráfico 5.3 en donde el consumo de calefacción, principalmente en los meses de invierno, no supera los 17 [KWh/m²], mientras que el consumo en verano de refrigeración bordea los 50[KWh/m²].

El problema básico es la refrigeración, pues las demandas de refrigeración son grandes y en consecuencia los consumos y costos también lo son, situándose con consumos anuales cercanos a 280 [KWh/m²]. Como se puede apreciar en el gráfico 5.3 el mayor consumo se produce durante los meses de verano, debido a la alta demanda ó y en consecuencia consumo ó de refrigeración que se necesita (ver gráfico 5.2). Estos dos gráficos hablan de generar métodos de protección ante la radiación solar, de manera que no incida directamente en el cerramiento; además también se debe apuntar a la utilización de aparatos de bajo consumo con poca producción de calor ó bombas de calor ó, pues mientras más calor produzca un aparato menos eficiente es, ya que está perdiendo energía en forma de calor. Cabe destacar el ejemplo de una ampolleta de filamento comparada con una fluorescente, esta última es 7 veces más eficiente y produce mucho menos calor.

El ahorro que se produce al utilizar un método pasivo como la aislación exterior, corresponde al 7.6% de los costos totales, equivalente en este caso a 2.75 millones anuales; con estos valores se produce una recuperación de la inversión en menos de 4 años. Situando la recuperación dentro del mediano plazo y aceptable para cualquier inversionista.

Es importante mencionar que el bajo ahorro logrado responde a la gran superficie vidriada que posee el cerramiento del edificio en el primer nivel, lo cual hace que el traspaso de calor entre el medio interno y el externo se realice con facilidad a lo largo del año.

6.2 Conclusiones específicas

6.2.1 En regiones que presenten variaciones importantes de temperatura entre el día y la noche, con medias cercanas a 14[°C] y considerando edificaciones con cerramientos de albañilería u hormigón, la aislación térmica debe colocarse por el exterior para obtener el menor costo de climatización anual.

6.2.2 Como consecuencia del abrigo térmico resultan medio-ambientes con respuestas térmicas lentas, generando temperaturas más estables, lo que es beneficioso especialmente en verano (ver punto 6.1.1).

6.2.3 El diseño de edificios debe considerar cerramientos acordes al clima imperante en cada región, estableciendo ventajas y desventajas de la envolvente elegida.

6.2.4 La ventilación nocturna es la mejor forma de controlar los excesos térmicos que se generan en el interior de las edificaciones.

6.2.5 Al aplicar abrigo térmico en un muro, la inercia térmica trabaja como inercia de absorción, permitiendo el control de la temperatura en el medio interior de la edificación.

6.2.6 Al aumentar la superficie de traspaso de la masa efusiva interior de la edificación, aumenta la tasa de traspaso de calor, teniendo gran preponderancia en el control de la temperatura ambiente interior.

Bibliografía

- [1] Lavigne, Pierre òArquitectura Climática ó Una contribución al desarrollo sustentableö, Tomo 1: Bases Físicas, Francia, 1994.
- [2] Salaverry, Marcial òInercia Térmica: Influencia de la masa de muro en el comportamiento térmico de viviendas socialesö, Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2008.
- [3] Monardez, Hector òInercia térmica ó Influencia de la masa en viviendasö, Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2008.
- [4] Ordenanza general de Urbanismo y Construcción (OGUC)
- [5] Czajkowsky, Jorge òAire acondicionado III: Balance Térmico de Veranoö
- [6] Florido, Alex òDeterminación de la efusividad térmica en sólidos mediante la técnica fotoacústicaö, Memoria para obtener el título de maestría en tecnología avanzada, Centro de investigación de ciencia aplicada y tecnología avanzada, Instituto politécnico nacional, México.
- [7] Grupo energía y edificación òLa inercia térmica de los edificios y su incidencia en las condiciones de confort como refuerzo de los aportes solares de carácter pasivoö, Departamento de ingeniería mecánica, Universidad de Zaragoza, España
- [8] Manual técnico de aislación exterior CDT, Santiago, Chile, 2008
- [9] Frederick, Ramón òApuntes para el curso ME43B Transferencia de calorö, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2006
- [10] Tarifas de clientes regulados de Chilectra
<http://www.chilectra.cl/wps/wcm/connect/Web%20Content%20Chilectra/chilectra/hogar/tarifas/home+tarifas>

- [11] Tabla con la densidad del aire en altura
www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/102/comentarios/tablasC102.pdf

- [12] Uso de Design Builder
<http://sol-arq.com/index.php/administracion-datos>

- [13] Información en general
www.wikipedia.org

- [14] Información específica de física
<http://scienceworld.wolfram.com/>

- [15] Carrier
<http://www.carrierchile.cl/>

- [16] Catálogo Fan-Coil
<http://www.raditherm.com/>

- [17] Coefficient of Performance
<http://www.energyrating.gov.au/acstar.html>