



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

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN SOLAR PARA UN
EDIFICIO PÚBLICO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PEDRO JOSÉ DOMANCIC HERRERA

PROFESOR GUÍA:

ROBERTO ROMÁN LATORRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RAMÓN FREDERICK GONZALEZ

ALVARO VALENCIA MUSALEM

SANTIAGO DE CHILE

OCTUBRE 2008

Resumen

Este Trabajo de Título tiene como objetivo general diseñar un sistema de calefacción solar para un edificio público.

Para estimar las necesidades térmicas del edificio se desarrolló un modelo térmico del edificio en el software SIMUSOL, el cual busca representar su comportamiento térmico global mediante modelos conocidos de transferencia de calor aplicados a sus singularidades. Este modelamiento comprende un ajuste en base a mediciones de temperatura *in situ*.

En una primera etapa se realizaron mejoras térmicas al edificio que consisten en el aislamiento de muros con 5[cm] de aislante térmico y el reemplazo de ventanas tradicionales por termopaneles. Del modelo térmico se obtiene que el edificio con ambas mejoras térmicas incluidas, disminuye su demanda energética en un 70 %. Sin embargo la elevada inversión inicial que implica, no permiten que sea una solución directa.

Basándose en el modelo desarrollado, se dimensionó un sistema de calefacción solar complementado con un sistema de aporte auxiliar, capaz de mantener una temperatura de confort en un 95 % del invierno durante las 8:30 y las 18:00 hrs. El sistema solar resultante consiste en un colector solar plano para aire de 60[m²] para ser instalado en el techo norte del edificio y un colector tipo Muro Trombe de 14,5[m²] ubicado en la fachada norte. El sistema de aporte auxiliar que corresponde a un 10 % de la energía para calefacción, fue calculado con una potencia de 24[kW] para funcionar durante 120 horas al año.

Finalmente se realizó un modelo térmico del edificio con el sistema solar dimensionado y con las mejoras térmicas incluidas; obteniendo un aporte del sistema solar capaz de calefaccionar el edificio en un 95 % del invierno sin aporte auxiliar. Ésto gracias al importante aporte de las mejoras térmicas que impiden las altas pérdidas de calor de las viviendas y edificios tradicionales.

El desarrollo de este trabajo fue basado en el edificio ubicado en *Concha y Toro n°461*, actualmente el edificio de la *Gobernación Provincia Cordillera*.

Índice General

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Alcances	2
2. Antecedentes	3
2.1. Energía Solar	3
2.2. Sistema Solar Térmico	4
2.2.1. Sistema de Calefacción Solar	4
2.2.2. Sistema Colector Solar	5
2.2.3. Balance de Energía en Colector Solar	9
2.3. Modelos de Transferencia de Calor	11
2.3.1. Conducción	11
2.3.2. Convección	12
2.3.3. Radiación de onda corta	15
2.3.4. Radiación de onda larga	17
2.3.5. Transferencia de Masa	17
2.4. SIMUSOL	18
2.4.1. Elementos de un circuito térmico	18
2.5. Edificio Gobernación Provincia Cordillera	19
2.5.1. Materiales de Construcción	19
2.5.2. Superficies Exteriores	20
3. Metodología	21
3.1. Definición Térmica del edificio	21
3.1.1. Disposición física del edificio	22
3.2. Modelo Térmico	22
3.2.1. Muros	23
3.2.2. Ventanas	26
3.2.3. Techo	29
3.2.4. Suelo	33

3.2.5. Ventilación e Infiltraciones	34
3.2.6. Valores de entrada al modelo	35
3.3. Necesidades térmicas del Edificio	39
3.4. Dimensionamiento del sistema Solar	40
3.4.1. Modelos térmicos del sistema Solar	42
3.5. Modelo de las mejoras térmicas a considerar	46
3.5.1. Aislamiento de muros externos	46
3.5.2. Ventanas de termopanel	47
3.6. Dimensionamiento del Sistema de Aporte Auxiliar	49
4. Resultados	50
4.1. Simulación Térmica	50
4.2. Verificación del modelo	51
4.3. Carga Térmica requerida	53
4.4. Mejoras térmicas al edificio y su influencia sobre la demanda energética	54
4.4.1. Edificio con aislación en muros	54
4.4.2. Edificio con ventanas de termopanel	55
4.4.3. Aislación de muros y ventanas de termopanel	56
4.5. Evaluación económica de instalar mejoras térmicas	57
4.6. Sistema Colector Solar	59
4.6.1. Colector solar plano	61
4.6.2. Muro Trombe	65
4.7. Sistema de aporte auxiliar	66
4.8. Evaluación económica Sistema solar con aporte auxiliar	68
4.9. Mejoras térmicas y su efecto sobre el sistema solar	69
4.9.1. Muros	70
4.9.2. Ventanas	70
4.9.3. Mejoras combinadas	71
4.10. Evaluación económica de instalar el sistema solar junto con mejoras térmicas	72
5. Conclusiones	74
5.1. Mejoras térmicas al edificio	74
5.2. Sistema de calefacción solar con aporte auxiliar	74
5.3. Sistema de calefacción solar con mejoras térmicas	75
6. Bibliografía	76

Capítulo 1

Introducción

Los edificios y viviendas en zonas urbanas son calefaccionados mayoritariamente mediante gas, petróleo o energía eléctrica; recursos costosos y que incrementan su valor en forma progresiva. Parte importante de la energía utilizada se pierde por mal aislamiento térmico e infiltraciones de aire no controladas. Sin embargo existen métodos efectivos de aislación térmica y de calefacción mediante energía solar que permiten un ahorro substancial de los gastos de calefacción, además de brindar un mejor ambiente interior, al reemplazar los sistemas de combustión directa.

La Gobernación de la Provincia Cordillera, por motivación de su Gobernadora Sra. Marcela Labraña, ha decidido instalar un sistema de calefacción solar que reemplace el sistema actual de combustión directa. Para esto ha solicitado el diseño de un sistema solar efectivo, para ser instalado en la Gobernación con la participación del Programa País de Eficiencia Energética (PPEE).

Hoy en día existe una fuerte motivación mundial y en particular del estado de Chile por generar soluciones sustentables a las distintas necesidades del ser humano. Aprovechando esta buena asignación de recursos es que nace la posibilidad de realizar una aplicación de energía solar en calefacción de viviendas, que posiblemente **será una característica obligada en construcciones futuras.**

1.1. Objetivos

Objetivo General

Diseñar una solución a la calefacción del Edificio de la Gobernación Provincia Cordillera, utilizando energía solar.

Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo térmico del edificio que permita ver su comportamiento térmico.

- Ajustar el modelo mediante una comparación con medidas de temperatura en el edificio.
- Diseñar un Sistema que permita reemplazar aproximadamente el 90 % del consumo energético para calefacción en días fríos despejados, y aportar del orden de un 40 % en días nublados.
- Modelar térmicamente el edificio con el sistema solar incluido para ver su funcionamiento.
- Realizar mejoras térmicas conceptuales al edificio y analizar su influencia en el sistema.
- Desarrollar una memoria de cálculos que fundamente los resultados.

1.2. Alcances

- El diseño se realizará en base al edificio con mejoras térmicas incluidas, no al edificio existente.
- El diseño de los sistemas se realizará de forma conceptual, no comprende planos de construcción.
- Este trabajo no comprende la construcción del sistema.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Energía Solar

El Sol provee a la Tierra de gran cantidad de energía, la cual determina las condiciones climáticas, permitiendo las distintas formas de vida y su transformación. Esta energía viaja en forma de radiación, llegando a la Tierra un espectro de radiación dado por la curva de la figura 2.1.

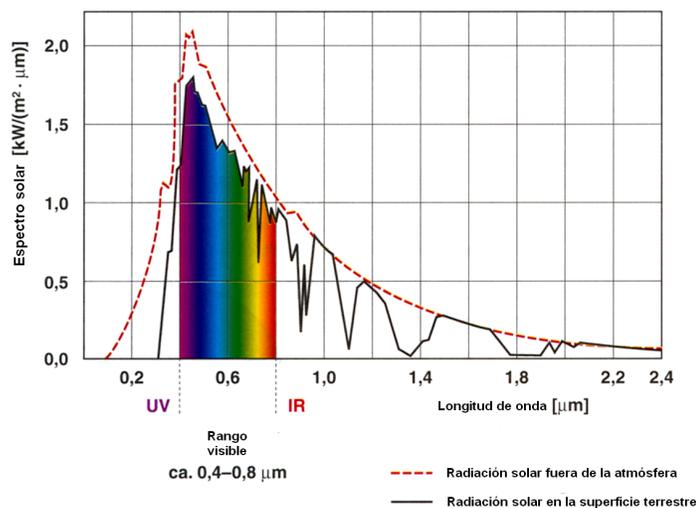


Figura 2.1: Espectro Solar.

La energía por unidad de área que llega a la Tierra en el exterior de la atmósfera, denominada constante solar, es de $1353 [W/m^2]$

En la superficie de la Tierra, al interior de la atmósfera, se tiene una *Radiación Global* que corresponde a la suma de tres formas de radiación:

- *Radiación Directa*: Luz directa del Sol, que depende de la claridad atmosférica y será acotada por la constante solar.
- *Radiación Difusa*: Radiación que emiten los cuerpos circundantes debido a su temperatura. Es difusa porque proviene de todas direcciones.
- *Radiación Reflejada*: Radiación que no es absorbida por los cuerpos, y por lo tanto reflejada a la atmósfera.

En un día de verano despejado, en la ciudad de Santiago, se tiene una Radiación Global cercana a los $1000[W/m^2]$

2.2. Sistema Solar Térmico

Un Sistema Solar Térmico capta la energía solar para ser utilizada en forma de calor.

Existen dos tipos principales de sistemas, los que utilizan un colector plano y los que utilizan uno con concentración. Los colectores con concentración, concentran la radiación directa en un foco, lo que permite alcanzar mayores temperaturas, siendo aplicables a procesos donde se requieran mayores temperaturas de trabajo, como centrales térmicas de potencia desarrolladas en etapa experimental.

Los colectores planos reciben la radiación solar sin concentrar por lo que el área captadora corresponde a toda la extensión del colector. Estos alcanzan temperaturas moderadas, fácilmente controlables que no representan un peligro para el manipulador del sistema.

Para calefacción de viviendas, son aplicables los colectores planos.

2.2.1. Sistema de Calefacción Solar

La idea de utilizar la energía solar para la calefacción de espacios (viviendas y edificios) no es nueva. Los primeros ejemplos sistemáticos que se describen en la literatura son de mediados de los años 40 en que el MIT (Massachusetts Institute of Technology) construyó una casa solar experimental. Luego, a inicios de los años 50, el inventor Harry Thomason construyó su casa cerca de Washington DC utilizando un sistema de calefacción solar con acumulación de calor en un estanque subterráneo[5].

Hay varios ejemplos más en la década de los años 1960 a 1970, pero se produce un primer gran cambio con los trabajos de Michel-Trombe a inicios de los años 70, en que se desarrolla el concepto del ahora universalmente llamado Muro Trombe, en el cual se utiliza un sistema de calefacción solar llamado pasivo[6].

En la década de 1980 a 1990 se realizan avances sistemáticos, sobre todo en lo que se relaciona con la

teoría del diseño de estos sistemas. En ello es vital la contribución de Balcomb (Figura 2.2), Löff y otros diseñadores.



Figura 2.2: Casa Solar de Balcomb.

En todo sistema de calefacción solar, se distinguen los siguientes componentes:

- **Sistema colector:** es donde se capta la radiación solar y se convierte en calor, a diversos niveles de temperatura. Aquí usualmente el calor es transferido a algún fluido que sirve para transportar la energía captada al espacio a calefaccionar.
- **Sistema de acumulación de energía:** en el cual (cuando existe) se acumulan los excesos de ganancia solar del día para ser utilizados en las horas de la noche o en períodos de baja intensidad de la radiación solar.
- **Espacio a calefaccionar o climatizar:** es el lugar donde existe la demanda de energía. Usualmente es el espacio habitable.
- **Sistema de transporte de energía:** el que transporta la energía entre los colectores, acumuladores y espacio a climatizar.

2.2.2. Sistema Colector Solar

Los sistemas colectores de energía solar con aplicación en calefacción de espacios son:

- Colector plano de aire.
- Colector plano de agua u otro fluido líquido.
- Muro Trombe.

Colector Plano de Aire

Un Colector Solar Plano se compone de una placa captadora, una cubierta transparente y un material aislante en su parte inferior, ver figura 2.3. El Colector utiliza principalmente la radiación directa, sin embargo en días nublados la radiación difusa también es aprovechable.

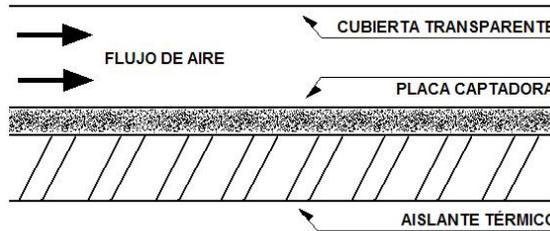


Figura 2.3: Colector Plano de Aire.

La cubierta transparente permite que el flujo de aire caliente se mantenga en el sistema, además produce un efecto invernadero en el colector ya que no es transparente a la radiación de onda larga emitida por la placa captadora al calentarse.

La placa captadora debe tener una gran absorptividad de la radiación solar, esto se logra con una superficie negra o selectiva. El aislante térmico evita las pérdidas de calor por la base del colector.

Los colectores planos de aire reciben aire del ambiente a calefaccionar (sala) mediante ductos de ventilación forzada, éste aire se calienta en los colectores y es reinyectado a la sala mediante ductos de ventilación que lo distribuyan de buena manera.

Alternativas de disposiciones de colector plano de aire

- **Colector simple de circulación delantera.** La placa absorbidora se encuentra al fondo de la caja, sobre el aislante y la circulación del aire se realiza entre el vidrio y la placa. Es el modelo tradicional, de menor complejidad de fabricación, pero con menor rendimiento.

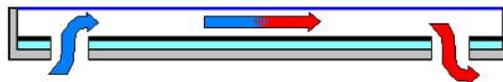


Figura 2.4: Colector simple de circulación delantera.

- **Colector de placa intermedia.** En este modelo la placa se encuentra situada en medio de la caja, realizándose la circulación de ida por detrás y la de retorno por delante del absorbedor o viceversa.



Figura 2.5: Colector de placa intermedia.

- **Colector de circulación trasera.** En ellos el absorbedor se dispone también en una altura intermedia dentro de la caja, con la diferencia de que la circulación se realiza exclusivamente por detrás de ella existiendo en el espacio entre el absorbedor y el vidrio una cámara de aire estanco. Como se comentó para el modelo anterior, según algunos fabricantes, para que los colectores de aire sean eficientes, es necesario dotarlos de una cámara de aire estanca.

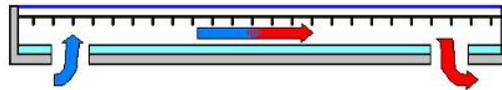


Figura 2.6: Colector de circulación trasera.

- **Colector de aire sin vidrio.** Estos son simplemente una plancha de metal negro mate toda ella calada con pequeños agujeros colocada sobre un muro. El aire calentado por éste es absorbido por un aerocirculador y llevado al interior del edificio. Es un modelo también encuadrable dentro de la arquitectura solar pasiva.

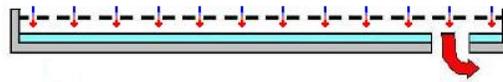


Figura 2.7: Colector de aire sin vidrio.

Colector Plano de Agua

Un Colector Plano de Agua se compone de una cubierta transparente, una superficie absorbente que recibe la energía solar y la transmite por conducción a un haz de tubos por donde va el fluido caloportador. En la base va un aislante térmico (Figura 2.4).

La cubierta transparente cumple la función de efecto invernadero y de minimizar las pérdidas por convección al ambiente. El aislante térmico disminuye las pérdidas por la base del colector.

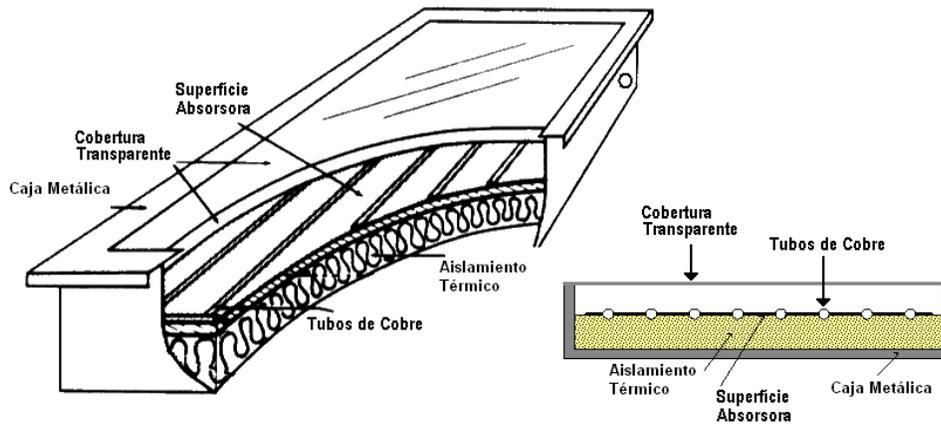


Figura 2.8: Colector Plano de Aire.

Los colectores planos de agua intercambian calor con agua u otro fluido líquido conveniente, el fluido es distribuido en las salas mediante ductos aislados térmicamente. La calefacción de las salas se realiza mediante piso radiante o radiadores adosados al muro (Figura 2.5).

Las ventajas de estos colectores es que el líquido es mejor caloportador que el aire obteniendo una mayor remoción de calor desde el colector, existe un mercado más amplio y se puede incluir un tanque de almacenamiento que permitiría extender el horario de funcionamiento del sistema.

Desventajas son que es más costoso y que hay que considerar un sistema adicional de intercambio de calor con el aire interior.

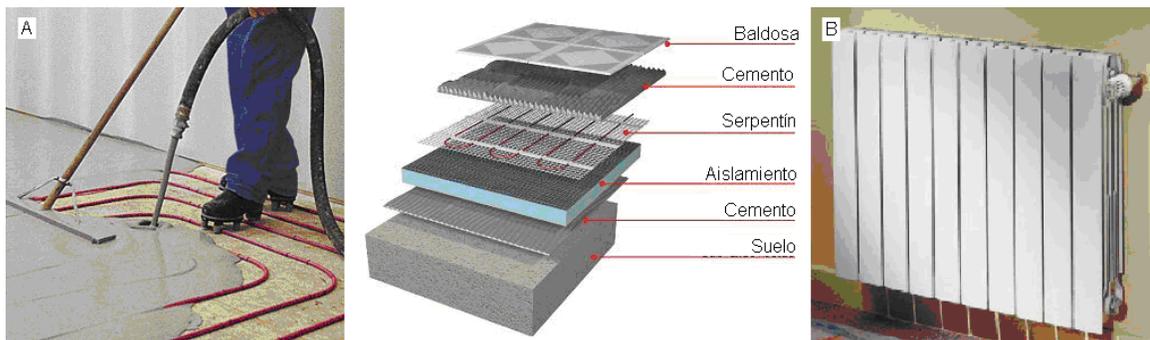


Figura 2.9: A:Piso radiante y Componentes. B:Radiador adosado al muro.

Muro Trombe

El Muro Trombe es un muro o pared orientado al norte (en el hemisferio sur) acondicionado para actuar como Colector Solar Térmico. En la cara exterior va una cubierta transparente, típicamente de vidrio, dejando un espacio de aire entre el muro y la cubierta. En la parte superior e inferior del muro hay unas aperturas de venteo que permiten el intercambio de calor con el interior de la vivienda (Figura 2.6).

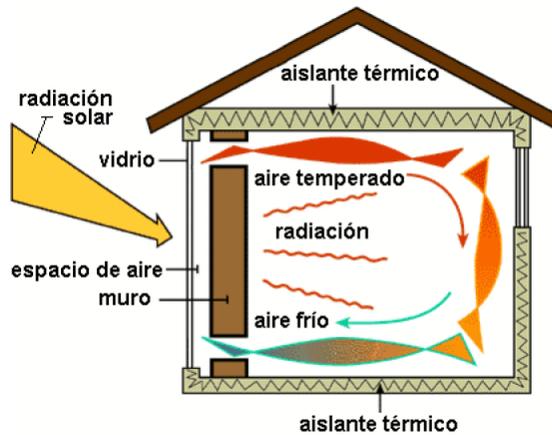


Figura 2.10: Muro Trombe.

La radiación solar de onda corta atraviesa la cubierta y es absorbida por el muro que debe tener una baja reflectividad (pintura negra o selectiva). Al calentarse el muro emite calor en forma de radiación de onda larga, la cual no atraviesa la cubierta que no es transparente para onda larga, produciéndose un efecto invernadero que permite que el muro alcance mayor temperatura.

El aire entre el muro y el vidrio se calienta produciéndose un flujo ascendente debido a la diferencia de densidad, el aire a mayor temperatura es más liviano, esto genera un flujo de aire caliente al interior por la parte superior del muro y un consiguiente flujo de aire frío del interior hacia el muro por la apertura inferior.

El muro debe ser idealmente un acumulador de calor, para esto debe ser de un calor específico elevado (relativo a materiales de construcción) y de un grosor considerable, por ejemplo de hormigón, piedra o botellas de agua. La acumulación de calor en el muro sirve para que continúe liberando calor durante la noche y así mejorar la inercia térmica de la vivienda.

2.2.3. Balance de Energía en Colector Solar

El calor entregado al fluido depende de las propiedades del colector y de la intensidad de radiación, su balance energético correspondiente será:

$$q_r [W/m^2] = I_{abs} - U_{global}(T_{co} - T_{amb}) \quad (2.1)$$

Donde,

- q_r : Calor removido o entregado al fluido.
- I_{abs} : Energía absorbida por la placa captadora.
- U_{global} : Coeficiente global de pérdidas de calor por radiación, convección y conducción; en función de las temperaturas del colector y ambiente.
- T_{co} : Temperatura de la placa captadora del colector.
- T_{amb} : Temperatura ambiente.

La Energía absorbida por la placa captadora depende de la radiación sobre la superficie colectora, la transmisividad de la cubierta transparente, y de la absorptividad de la placa.

Esto es:

$$I_{abs} = I \cdot \tau \cdot \alpha \quad (2.2)$$

Donde,

- $I [W/m_2]$: Radiación sobre la superficie colectora
- τ : Transmisividad de la cubierta transparente.
- α : Absorptividad de la placa.

Los materiales que se utilicen en el colector son determinantes para su desempeño. La transmisividad de la cubierta y la absorptividad de la placa dependen de los materiales que se utilicen, y el aislante térmico en la base del colector, debe ser adecuado para altas temperaturas.

Rendimiento de un Colector Solar

El rendimiento de un Colector Solar será la fracción entre el calor removido q_r y la energía incidente, esta última dada por la radiación incidente $I [W/m_2]$ y el área del colector A . Esto es:

$$\eta = q_r / I \cdot A \quad (2.3)$$

Este rendimiento no será constante puesto que a medida que se calienta el colector aumentan sus pérdidas de calor al ambiente, llegando a cero para la temperatura de estagnación, en que ya no es posible elevar más la temperatura del fluido caloportador. Entonces el rendimiento es decreciente con la diferencia de temperatura entre colector y ambiente, y se verá afectado por la absorptividad de la superficie captadora (Figura 2.7).

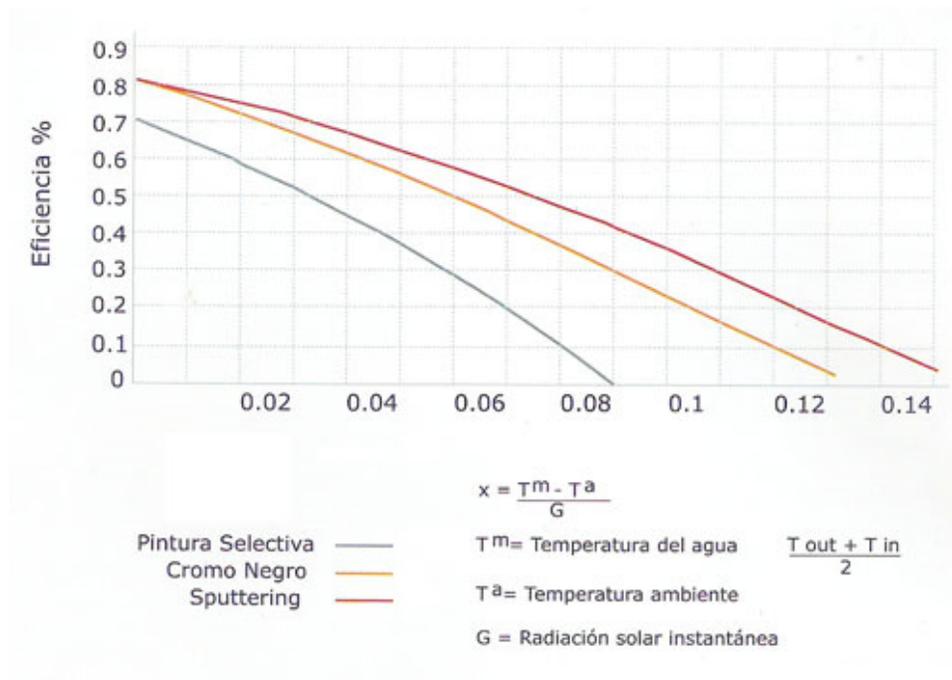


Figura 2.11: Curva de Eficiencia Colector Plano.

2.3. Modelos de Transferencia de Calor

2.3.1. Conducción

Transferencia de calor en un sólido o un fluido en reposo mediante movimiento a escala molecular, que es más intenso a mayor temperatura.

En un cuerpo isótropo en que existe un campo de temperatura $T(x,t)$, el calor transferido por unidad de área corresponde a:

$$q_x = -k \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.4)$$

Donde $k[W/mK]$ corresponde a la conductividad térmica del material.

Luego el calor transferido por un cuerpo o pared plana de espesor e y área A , será:

$$Q = k \cdot A \left[\frac{T_1 - T_2}{e} \right] \quad (2.5)$$

Donde $T_1 - T_2$ es la diferencia de temperatura entre las superficies interna y externa de la pared.

2.3.2. Convección

Transferencia de calor en un fluido que se mueve a escala macroscópica.

Extendiendo esta definición para la remoción de calor desde un cuerpo a temperatura T_1 hacia un fluido a temperatura T_2 , se determina la pérdida convectiva de calor por un área A como:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.6)$$

Donde,

- $h[W/m^2K]$: Coeficiente convectivo de la superficie.

Para espacios interiores se tiene una convección moderada, los coeficientes convectivos varían en suelo, muros y cielo[8]:

- $h_{suelo} = 8,29 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$

- $h_{muro} = 9,26 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$

- $h_{cielo} = 6,13 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$

Para espacios exteriores, se tiene un intercambio convectivo mayor dado por el viento. Para este caso se tiene un coeficiente convectivo que depende del viento de la siguiente forma:

$$h_{exterior} = 11,354 + 0,938 \cdot v \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (2.7)$$

Donde:

- $v[km/h]$: Velocidad del viento.

Intercambio convectivo en un espacio cerrado entre paredes verticales[1]

Esta situación se aplica en las ventanas dobles o termopaneles. El procedimiento es el que sigue:

Determinar el número de Grashof:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_1 - T_2) \cdot d^3}{\nu^2} \quad (2.8)$$

Donde:

- $g[m/s^2]$: aceleración de gravedad.
- $\beta[1/K]$: coeficiente de dilatación del aire.
- $T_1, T_2[K]$: temperaturas de las paredes del recinto.
- $\nu[m^2/s]$: viscosidad cinemática del aire.

A partir del Grashof, determinar el número de Nusselt:

$$Nu = 1 \text{ para } Gr \leq 2000 \quad (2.9)$$

$$Nu = 0,18 \cdot Gr^{1/4} \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{-1/9} \text{ para } 2000 \leq Gr \leq 20000 \quad (2.10)$$

$$Nu = 0,18 \cdot Gr^{1/3} \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{-1/9} \text{ para } 20000 \leq Gr \leq 11 \cdot 10^6 \quad (2.11)$$

Donde:

- d : distancia entre paredes verticales en [m].
- L : altura del espacio.

Luego el coeficiente convectivo es:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{d} [W/m^2K] \quad (2.12)$$

Donde:

- $k[W/mK]$: conductividad térmica del aire.

Convección forzada sobre placa plana

Este caso se aplica para calcular la convección en los colectores a partir de la velocidad del flujo en su interior.

Primero se obtienen los números de Reynold Re y Prandtl Pr :

$$Re = \frac{\rho \cdot U_f \cdot L_c}{\mu} \quad (2.13)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k} \quad (2.14)$$

Donde:

- $\rho [kg/m^3]$: densidad del aire.
- $U_f [m/s]$: velocidad característica del fluido.
- $L_c [m]$: dimensión característica, ancho.
- $\mu [m^2/s]$: viscosidad del fluido.
- $C_p [J/kgK]$: calor específico del fluido.
- $k [W/mK]$: conductividad térmica del fluido.

Luego el número de Nusselt Nu para placa plana en régimen turbulento es:

$$Nu = 0,029 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \quad (2.15)$$

Y el coeficiente convectivo será:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (2.16)$$

Con:

- L : largo de la placa.
- k : conductividad térmica del fluido.

2.3.3. Radiación de onda corta

La radiación de onda corta (de alta frecuencia y mayor energía) corresponde a la energía aportada por el sol a la vivienda, ésta depende de la intensidad de la radiación directa y del ángulo de incidencia, además de la radiación difusa.

La radiación incidente en un ángulo θ , sobre un plano inclinado y orientado está dada por:

$$R_{total} = I \cdot \cos(\theta) + D \quad (2.17)$$

Con:

- $I[W/m^2K]$: Radiación directa incidente.
- $D[W/m^2K]$: Radiación difusa.
- θ : Ángulo de incidencia de la radiación solar sobre el plano.

El ángulo θ depende de varios factores, su definición geométrica es la siguiente:

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \text{sen}\delta \cdot \text{sen}\phi \cdot \text{coss} - \text{sen}\delta \cdot \text{cos}\phi \cdot \text{sens} \cdot \text{cos}\gamma + \text{cos}\delta \cdot \text{cos}\phi \cdot \text{coss} \cdot \text{cosAH} \\ & + \text{cos}\delta \cdot \text{sen}\phi \cdot \text{sens} \cdot \text{cos}\gamma \cdot \text{cosAH} + \text{cos}\delta \cdot \text{sens} \cdot \text{sen}\gamma \cdot \text{senAH} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Donde:

- δ : Declinación solar, depende del día del año.
- ϕ : Latitud del punto de medición, para Santiago es $33,4^\circ$.
- s : Pendiente del plano. Ángulo entre el plano y la horizontal, para una pared será 90° .

- γ : Orientación del plano. Ángulo entre la normal al plano y el meridiano local, siendo 0° cuando el plano mira al sur, positivo al este y negativo al oeste.
- AH : Ángulo horario, tiene un valor de -180° cuando el sol se encuentra en su punto más alto y cambia $+15^\circ$ con cada hora.

La radiación I se puede medir con un instrumento o determinarse mediante algún modelo. El modelo utilizado en este trabajo es el de Perrin de Brichambaut, que describe la radiación como:

$$I = A \cdot e^{\frac{-1}{B \cdot \text{sen}(H+C)}} \quad (2.19)$$

donde:

- $I[W/m^2]$ es la radiación incidente sobre un plano horizontal.
- A, B y C son constantes.
- H es el ángulo de la altura solar.

La radiación difusa $D[W/m^2]$ puede expresarse de la siguiente forma:

$$D = 125 \cdot K \cdot (\text{sen}(H))^{0.4} \quad (2.20)$$

donde:

- K constante.
- H es el ángulo de la altura solar.

El ángulo de la altura solar H depende del día del año y de la hora del día, luego con estas ecuaciones es posible obtener la curva aproximada de radiación diaria para cualquier día despejado del año.

Las constantes A, B, C y K permiten considerar las condiciones de transparencia del aire, sus valores se muestran en la siguiente tabla:

	C. Claro	C. Normal	C. Contam.
A	1210	1230	1260
B	6	3,8	2,3
C	1	1,6	3
K	0,75	1	1,33

Figura 2.12: Constantes de Perrin de Brichambaut.

2.3.4. Radiación de onda larga

La transferencia de calor por radiación, debido a la diferencia de temperatura entre el edificio y su entorno, se determina usando la ley de Stefan-Boltzman como sigue:

$$Q_{1-2} = A_1 \cdot f_{1-2} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.21)$$

Donde:

- A_1 : Área de la superficie radiante.
- f_{1-2} : Factor de forma entre los cuerpos. El factor de forma entre un cuerpo y la bóveda celeste es 1.
- ε : Emisividad de la superficie radiante.
- σ : Constante de Stefan-Boltzman.

En este trabajo se considerarán las pérdidas de calor por radiación entre las superficies exteriores del edificio y la bóveda celeste, por lo que sólo se usará un factor de forma $f=1$. La temperatura utilizada típicamente para la bóveda celeste es 6°C bajo la temperatura ambiente.

2.3.5. Transferencia de Masa

La transferencia de masa implica una directa transferencia de calor que se expresa como sigue:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2.22)$$

Donde:

- \dot{m} : Flujo másico.
- C_p : Calor específico del aire.
- ΔT : Diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior.

Esto es un punto a considerar en las renovaciones de aire en la vivienda, y en las filtraciones de aire no controladas.

2.4. SIMUSOL

Simusol es un software para realizar simulaciones numéricas de circuitos que representan distintos sistemas físicos: térmicos, eléctricos y mecánicos; así como combinaciones de los mismos.

Este programa será utilizado para realizar las simulaciones térmicas necesarias para el diseño del sistema solar.

2.4.1. Elementos de un circuito térmico

Los circuitos térmicos que permiten modelar un sistema, se componen de una serie de elementos relacionados entre sí que representan relaciones de interacción entre elementos físicos. Dependiendo de las características del sistema, estos elementos son los siguientes:

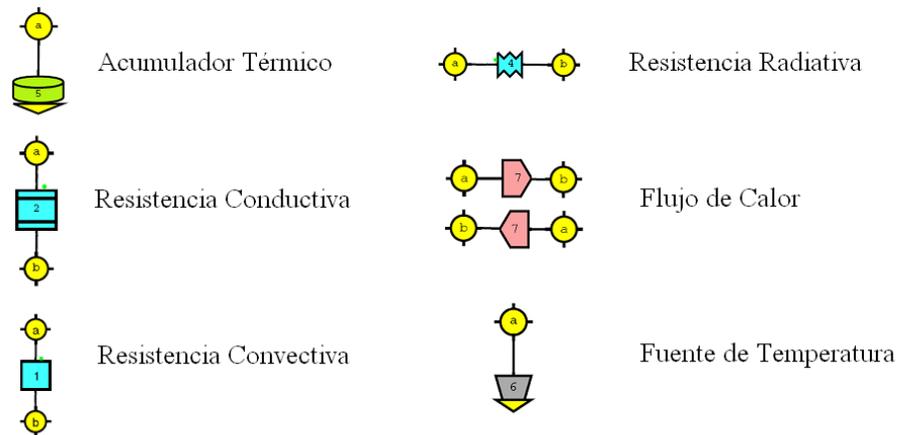


Figura 2.13: Elementos de un modelo en SIMUSOL.

Los parámetros que caracterizan a los elementos son los siguientes:

- Resistencias Conductivas (área, espesor, conductividad térmica).
- Resistencias Radiativas (área, emisividad, factor de forma).
- Resistencias Convectivas (área, coeficiente convectivo).
- Acumulador de calor (calor específico, masa).
- Flujo de Calor (área, potencia por unidad de área).
- Flujo de Masa (calor específico, flujo másico).
- Fuente de Temperatura (temperatura).

2.5. Edificio Gobernación Provincia Cordillera

El estudio se ha realizado basado en este edificio en particular: Edificio Gobernación de la Provincia Cordillera, está ubicado en Concha y Toro n°461 en la comuna de Puente Alto (ver figura). Es un edificio de dos pisos; en su planta baja se está acondicionando para atención a público en un ambiente, el segundo piso tiene oficinas donde trabajan los funcionarios de la gobernación.



Figura 2.14: Gobernación Provincia Cordillera.

2.5.1. Materiales de Construcción

El edificio es de albañilería de unos 30 años de antigüedad, el techo es de teja colonial sin aislante térmico, las ventanas son de perfil metálico poco hermético.

La siguiente tabla muestra los materiales de construcción con sus características físicas:

Material	Superficie de intercambio térmico	Densidad [kg/m ³]	Calor Especifico [J/kgK]	Conductividad [W/mK]	transmisividad	absortividad
Cemento	muros, suelo	2300	921	1,5		0,85
Ladrillo	muros	1900	840	0,87		0,7
Vidrio	ventanas	2500	837	0,814	0,95	0,05
Madera	puertas	600	1670	0,25		
teja colonial	techo	1800	720	0,6		0,7
tierra	sub suelo	1670	880	0,7		
cobre	colector	8920	380	401		
aire		1,2	1029	0,02		
lana mineral	aislamiento	40		0,04		
poliestireno expandido	aislamiento	20	1600	0,04		
Pintura selectiva						0,96

Figura 2.15: Materiales del Edificio.

2.5.2. Superficies Exteriores

Las superficies exteriores del edificio son aquellas que intercambian calor con el ambiente, por lo que se debe conocer sus dimensiones . Estas se muestran en m^2 en la siguiente tabla:

	Muros[m2]	Ventanas[m2]	Techo[m2]	Suelo[m2]
Norte	155,2	25,2	96,5	165
Sur	160,7	19,7	96,5	
Este	107,6	10,9		
Oeste	105,3	13,2		

Figura 2.16: Superficies del Edificio.

Esta revisión de antecedentes de la teoría involucrada en el diseño de sistemas solares y de las características del edificio estudiado, nos permiten dar paso al desarrollo del trabajo. En el siguiente capítulo se expone la metodología utilizada en el estudio y la forma en que se abordó el problema.

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se presenta la metodología utilizada en el desarrollo del trabajo, que consiste en el diseño de un sistema de calefacción que utilice principalmente energía solar. El procedimiento consiste en el desarrollo de un modelo térmico del edificio estudiado, que permita representar las necesidades térmicas del edificio. Luego, en base al modelo, dimensionar el sistema de calefacción y ver el comportamiento térmico del edificio con el sistema instalado.

Los puntos desarrollados son los siguientes:

1. Definición Térmica del edificio.
2. Modelo Térmico.
3. Necesidades Térmicas del Edificio.
4. Dimensionamiento del Sistema Solar.
5. Dimensionamiento del Sistema Auxiliar.

3.1. Definición Térmica del edificio

La definición térmica del edificio consiste en una revisión de la envolvente del edificio, su volumen interior y su materialidad.

La envolvente del edificio corresponde a la superficie exterior del edificio, aquella que intercambia calor con el ambiente, esto es: Muros, Ventanas, Techo y suelo.

Los datos necesarios de la envolvente son:

- Área.
- Espesor.

- Material y sus propiedades térmicas.
- Orientación.
- Infiltraciones de aire.

Del interior del edificio se deben considerar los siguientes elementos:

- Volumen de aire.
- Volumen, densidad y calor específico de los materiales.

3.1.1. Disposición física del edificio

La revisión de áreas y espesores de superficies del edificio, hace necesario un dibujo a escala que posteriormente permita ubicar los sistemas colectores solares.

La siguiente figura corresponde a la fachada norte del edificio, dibujado en Solid Edge V16.

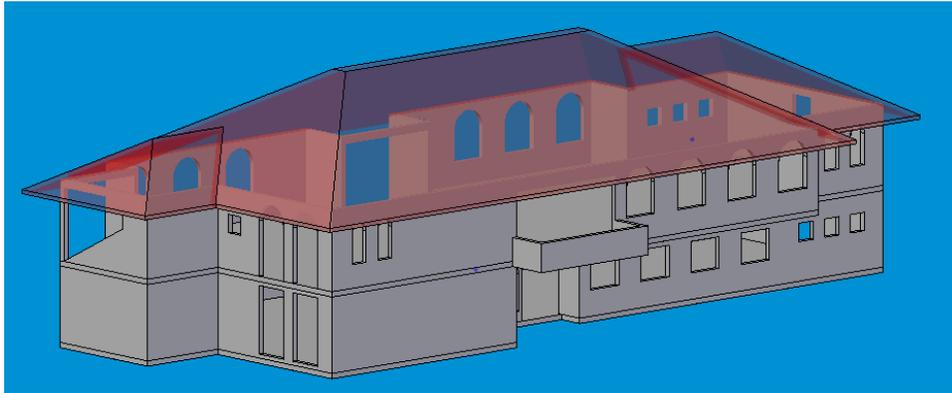


Figura 3.1: Dibujo a escala del Edificio. Solid Edge V16.

3.2. Modelo Térmico

El modelo busca determinar el comportamiento térmico del edificio frente a una condición ambiental dada. Se entiende como comportamiento térmico a la respuesta o resultante de temperatura interna del edificio frente a las condiciones externas de temperatura y radiación solar.

Este comportamiento térmico está estrictamente relacionado con las características constructivas del edificio; en términos de materiales, forma, orientación e infiltraciones de aire.

El modelo térmico fue desarrollado en el software SIMUSOL. Este programa simula sistemas térmicos en forma de redes: nodos interconectados.

Por simplicidad fueron simulados en redes separadas, pero dentro del mismo modelo, los siguientes elementos:

- Muros
- Ventanas
- Techo
- Suelo
- Infiltraciones

Estas redes tienen en común el nodo **AI** (*Aire interno*) que muestra la temperatura al interior del edificio y está en contacto con muros, ventanas, techo y suelo; permitiendo intercambio térmico con ellos mediante resistencias térmicas debidamente definidas. A su vez, estos elementos intercambian calor con el ambiente externo mediante sendas resistencias térmicas. Además se considera un flujo másico de aire entre el interior y exterior del edificio, que también influye en la temperatura interna.

3.2.1. Muros

Los muros exteriores o periféricos intercambian calor con el exterior, los muros interiores sólo son modelados como acumuladores de calor. El intercambio térmico fue considerado de la siguiente forma:

- **Conducción.** Los muros tienen un espesor de $e = 0,2[m]$ y un coeficiente conductivo $k = 1,5[W/mK]$. Conducen calor de acuerdo a su área A y a la diferencia de temperatura entre su superficie interior y exterior de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q = -k \cdot A \left[\frac{T_1 - T_2}{e} \right] \quad (3.1)$$

- **Convección.** Existe convección en el interior y exterior de los muros con coeficientes convectivos $h_{murointerior} = 8,29[W/m^2K]$ y $h_{muroexterior} = 11,354 + 0,938 \cdot v[W/m^2K]$, donde $v[m/s]$ es la velocidad del viento. El intercambio de calor convectivo con el aire interno y externo según su área A y la diferencia de temperatura $(T_1 - T_2)$ entre la superficie y el aire, se obtiene de la siguiente ecuación:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (3.2)$$

■ **Radiación.** Hay dos formas de intercambio radiativo:

- **Radiación de onda corta:** es la radiación proveniente del sol que calienta la superficie externa de los muros de acuerdo a su orientación y condiciones de radiación según la siguiente ecuación (sección 2.3.3):

$$R_{total} = I \cdot \cos(\theta) + D \quad (3.3)$$

Esto queda representado en el modelo por un flujo de calor en la superficie exterior del muro que corresponde a:

$$Q = A \cdot \alpha \cdot R_{total} \quad (3.4)$$

Donde α es la absorptividad del muro y A su área.

- **Radiación de onda larga:** es el calor irradiado por la superficie exterior del muro hacia la bóveda celeste según la siguiente ecuación:

$$Q_{1-2} = A_1 \cdot f_{1-2} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.5)$$

Estas ecuaciones son representadas en los elementos del circuito y unidos mediante nodos de acuerdo a la situación real, así permiten modelar la transferencia de calor entre el interior y exterior del edificio.

En la siguiente figura se muestra el modelo considerado para muros:

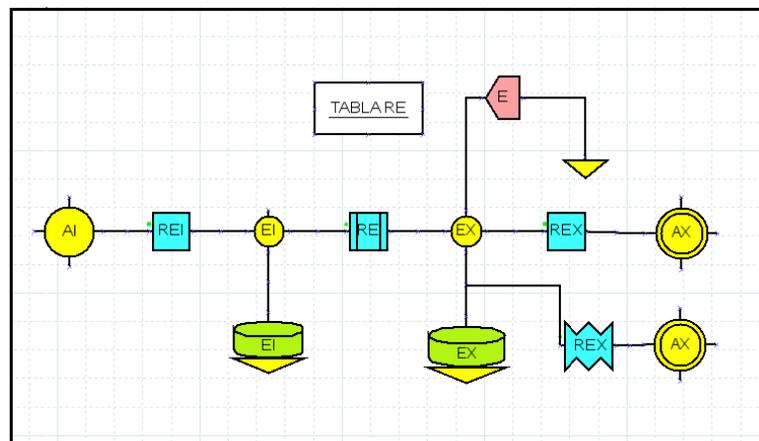


Figura 3.2: Modelo para muros. (Ejemplo de muro que mira al Este).

En este modelo, los elementos (azul, verde y rojos) y sus parámetros son los siguientes:

- **REI**: Resistencia convectiva interior (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
- **RE**: Resistencia conductiva (Área [m^2], Espesor [m], Conductividad [W/mK]).
- **REX**: Resistencia convectiva exterior (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
- **REX**: Resistencia radiativa exterior (Área [m^2], Emisividad, Factor de forma).
- **EI**: Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la mitad interior del muro.
- **EX**: Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la mitad exterior del muro.
- **E**: Flujo de calor (Área m^2 , Flujo [W/m^2]). Representa el aporte de la radiación solar.
- **TABLA RE**: Contiene los datos de radiación diario y según orientación considerando la absorptividad α del muro, dado por

$$\alpha \cdot R_{total} = \alpha \cdot (I \cdot \cos(\theta) + D), \quad (3.6)$$

para el flujo de calor considerado en **E**.

Los nodos y su referencia física son los siguientes:

- **AI**: Aire interno del edificio.
- **EI**: Superficie interior del muro.
- **EX**: Superficie exterior del muro.
- **AX**: Aire externo.

Considerar que el nodo **AI** debe estar conectado a un acumulador que represente su masa y calor específico, pero no se dibujó para mostrar sólo el modelo del muro; de igual forma tampoco se dibujó una fuente de temperatura conectada a **AX** que determina su temperatura a lo largo del día (temperatura ambiente) . Éstos serán graficados más adelante.

Luego el conjunto de muros en sus cuatro orientaciones, se modelará con la siguiente configuración:

Conduce calor de acuerdo a su área A y a la diferencia de temperatura entre su superficie interior y exterior de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q = -k \cdot A \left[\frac{T_1 - T_2}{e} \right] \quad (3.7)$$

- Convección.** Existe convección en el interior y exterior de las ventanas con coeficientes convectivos $h_{ventanainterior} = 8,29[W/m^2K]$ y $h_{ventanaexterior} = 11,354 + 0,938 \cdot v[W/m^2K]$. Intercambia calor con el aire interno y externo según su área A de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (3.8)$$

- Radiación.** Hay dos formas de intercambio radiativo:

- Radiación de onda corta:** En este caso la radiación proveniente del sol traspassa el vidrio calentando el aire interior del edificio, esta depende de su orientación y condiciones de radiación según la ecuación:

$$R_{total} = I \cdot \cos(\theta) + D \quad (3.9)$$

Esto queda representado en el modelo por un flujo de calor directo al aire interno:

$$Q = A \cdot \tau \cdot R_{total} \quad (3.10)$$

Donde τ es la transmisividad del vidrio y A su área.

- Radiación de onda larga:** es el calor irradiado por la superficie exterior de la ventana hacia la bóveda celeste según la siguiente ecuación:

$$Q_{1-2} = A_1 \cdot f_{1-2} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.11)$$

En la siguiente figura se muestra el modelo considerado para ventanas:

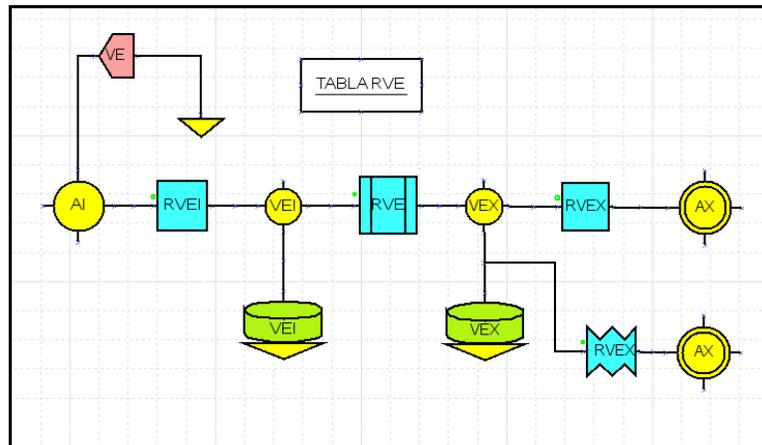


Figura 3.4: Modelo para ventanas. (Ejemplo de ventanas que miran al Este).

En este modelo, los elementos (azul, verde y rojos) y sus parámetros son los siguientes:

- **RVEI**: Resistencia convectiva interior (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
- **RVE**: Resistencia conductiva (Área [m^2], Espesor [m], Conductividad [W/mK]).
- **RVEX**: Resistencia convectiva exterior (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
- **RVEX**: Resistencia radiativa exterior (Área [m^2], Emisividad, Factor de forma).
- **VEI**: Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la mitad interior de la ventana.
- **VEX**: Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la mitad exterior de la ventana.
- **VE**: Flujo de calor (Área m^2 , Flujo [W/m^2]). Representa el aporte de la radiación solar.
- **TABLA RVE**: Contiene los datos de radiación diario y según orientación considerando la transmisividad τ del vidrio, dado por:

$$\tau \cdot R_{total} = \tau \cdot (I \cdot \cos(\theta) + D), \quad (3.12)$$

para el flujo de calor considerado en **VE**.

Los nodos y su referencia física son los siguientes:

- **AI**: Aire interno del edificio.
- **VEI**: Superficie interior de la ventana.
- **VEX**: Superficie exterior de la ventana.
- **AX**: Aire externo.

Luego el conjunto de ventanas en sus cuatro orientaciones, se modelará con la siguiente configuración:

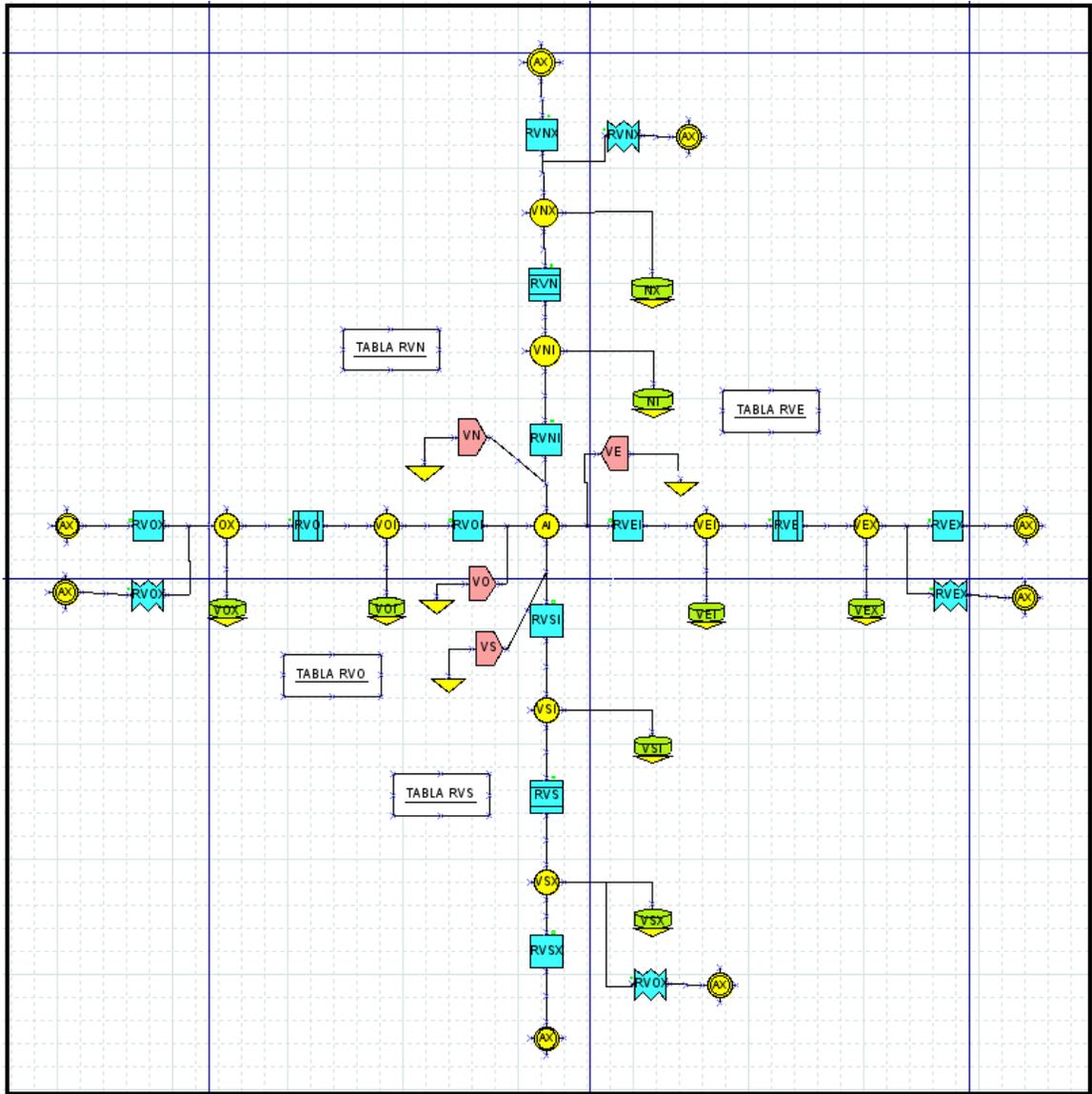


Figura 3.5: Modelo para ventanas N, S, E, O.

3.2.3. Techo

El Techo intercambia calor con el exterior por conducción, convección y radiación. El intercambio térmico fue considerado de la siguiente forma:

- Conducción.** El Techo se compone de teja en su exterior con un espesor de $e = 0,05[m]$ y un coeficiente conductivo $k = 0,6[W/mK]$; y en su interior lana de vidrio con un espesor de $e = 0,08[m]$ y un coeficiente conductivo $k = 0,04[W/mK]$. Conduce calor de acuerdo a su área A y a la diferencia de

temperatura entre su superficie interior y exterior de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q = -k \cdot A \left[\frac{T_1 - T_2}{e} \right] \quad (3.13)$$

- **Convección.** Existe convección en el interior y exterior del techo con coeficientes convectivos $h_{techointerior} = 9,26 [W/m^2K]$ y $h_{techoexterior} = 11,354 + 0,938 \cdot v [W/m^2K]$. Intercambia calor con el aire interno y externo según su área A de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (3.14)$$

- **Radiación.** Hay dos formas de intercambio radiativo:

- **Radiación de onda corta:** La radiación proveniente del sol calienta la superficie externa del techo de acuerdo a su orientación y condiciones de radiación según la siguiente ecuación:

$$R_{total} = I \cdot \cos(\theta) + D \quad (3.15)$$

El techo tiene dos aguas con orientaciones norte y sur, luego la radiación se representa en el modelo por dos flujos de calor en la superficie exterior del techo que corresponden a:

$$Q_i = A_i \cdot \alpha \cdot R_{total} \quad (3.16)$$

donde α es la absorptividad del techo, y A_i el área del techo con orientación $i(N,S)$.

- **Radiación de onda larga:** es el calor irradiado por la superficie exterior del techo hacia la bóveda celeste según la siguiente ecuación:

$$Q_{1-2} = A_1 \cdot f_{1-2} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.17)$$

En la siguiente figura se muestra el modelo considerado para el techo:

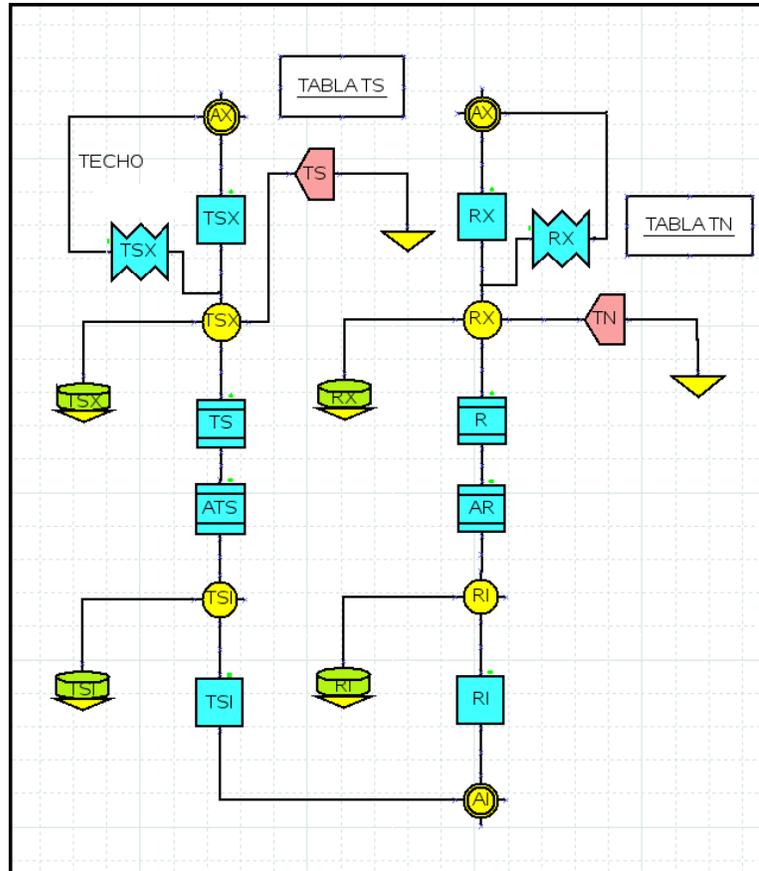


Figura 3.6: Modelo para el Techo.

En este modelo, los elementos (azul, verde y rojos) y sus parámetros son los siguientes:

- **RX**: Resistencia convectiva exterior (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
- **RTS**: Resistencia convectiva exterior (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
- **RX**: Resistencia radiativa exterior (Área [m^2], Emisividad, Factor de forma).
- **TSX**: Resistencia radiativa exterior (Área [m^2], Emisividad, Factor de forma).
- **R**: Resistencia conductiva de la teja norte (Área [m^2], Espesor [m], Conductividad [W/mK]).
- **TS**: Resistencia conductiva de la teja sur (Área [m^2], Espesor [m], Conductividad [W/mK]).
- **AR**: Resistencia conductiva del aislante (Área [m^2], Espesor [m], Conductividad [W/mK]).
- **ATS**: Resistencia conductiva del aislante (Área [m^2], Espesor [m], Conductividad [W/mK]).

- **RI**: Resistencia convectiva interior (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
- **TSI**: Resistencia convectiva interior (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
- **RX**: Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la mitad exterior del techo norte.
- **TSX**: Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la mitad exterior del techo sur.
- **RI**: Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la mitad interior del techo norte.
- **TSI**: Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la mitad interior del techo sur.
- **TN**: Flujo de calor (Área m^2 , Flujo [W/m^2]). Representa el aporte de la radiación solar en la hoja norte.
- **TS**: Flujo de calor (Área m^2 , Flujo [W/m^2]). Representa el aporte de la radiación solar en la hoja sur.
- **TABLA TN y TS**: Contiene los datos de radiación diario y según orientación considerando la absorptividad α del techo, dado por:

$$\alpha \cdot R_{total} = \alpha \cdot (I \cdot \cos(\theta) + D), \quad (3.18)$$

para el flujo de calor considerado en **RTN** y **RTF**.

Los nodos y su referencia física son los siguientes:

- **AX**: Aire externo.
- **RX**: Superficie exterior del techo norte.
- **RI**: Superficie interior del techo norte.
- **TSX**: Superficie exterior del techo sur.
- **TSI**: Superficie interior del techo sur.
- **AI**: Aire interno.

3.2.4. Suelo

El Suelo intercambia calor con el subsuelo por conducción y con el aire interno por convección. El intercambio térmico fue considerado de la siguiente forma:

- Conducción.** El Suelo tienen un espesor de $e = 0,8[m]$ y un coeficiente conductivo $k = 1,5[W/mK]$. Conduce calor de acuerdo a su área A y a la diferencia de temperatura entre su superficie superior e inferior de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q = -k \cdot A \left[\frac{T_1 - T_2}{e} \right] \quad (3.19)$$

- Convección.** Existe convección en la superficie superior del suelo con un coeficiente convectivo $h_{suelo} = 6,13[W/m^2K]$. Intercambia calor con el aire interno según su área A de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (3.20)$$

En la siguiente figura se muestra el modelo considerado para el suelo:

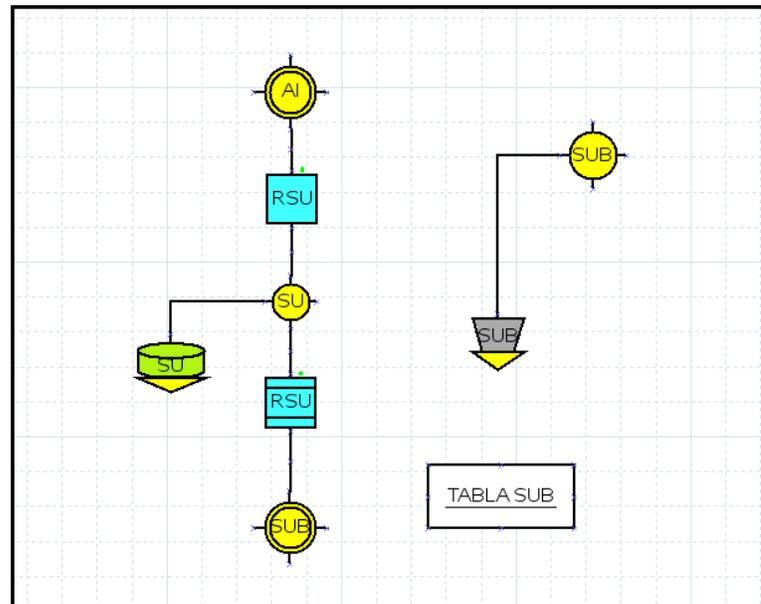


Figura 3.7: Modelo para el Suelo.

En este modelo, los elementos (azul y verde) y sus parámetros son los siguientes:

- RSU:** Resistencia convectiva interior (Área $[m^2]$, Convectividad $[W/m^2K]$).

- **RSU:** Resistencia conductiva (Área [m^2], Espesor [m], Conductividad [W/mK]).
- **SU:** Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la masa del suelo.
- **SUB:** Fuente de temperatura (Temperatura [$^{\circ}C$]). Representa la temperatura del suelo.
- **TABLA SUB:** Contiene los datos de temperatura para la fuente **SUB**.

Los nodos y su referencia física son los siguientes:

- **AI:** Aire interno.
- **SU:** Superficie superior del suelo.
- **SUB:** Superficie inferior del suelo.

3.2.5. Ventilación e Infiltraciones

La ventilación controlada en un edificio debe aportar el aire fresco suficiente para mantener un ambiente adecuado, esto significa una concentración de CO2 menor a las 1000[ppm], para esto se debe tener una ventilación de 4[lt/s * persona][9]. Considerando que en el edificio trabajan 20 personas, se necesita una ventilación de 720[m³/h]. El edificio tiene 1950[m³] por lo que tenemos 2,9 renovaciones de aire en una jornada de 8 hrs.

Para efecto de calefacción, la ventilación corresponde a un gasto energético considerable. Dependiendo de la calidad constructiva del edificio, las infiltraciones contribuyen en mayor o menor medida a este gasto.

El calor removido por ventilación e infiltraciones de aire queda dado por:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \Delta T \quad (3.21)$$

Donde:

- \dot{m} : Flujo másico.
- C_p : Calor específico del aire.
- ρ : Densidad del aire.
- ΔT : Diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior.

Esto se representa en el modelo como renovaciones de aire por hora, según se muestra en la siguiente figura:

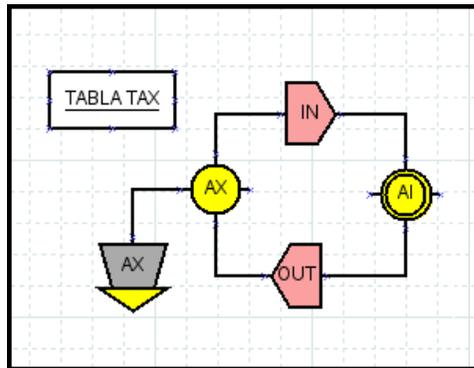


Figura 3.8: Renovaciones de aire.

En este modelo, los elementos (rojos, verdes) y sus parámetros son los siguientes:

- **IN**: Flujo de Masa (Calor específico $[J/kgK]$, Flujo $[kg/s]$).
- **OUT**: Flujo de Masa (Calor específico $[J/kgK]$, Flujo $[kg/s]$).
- **AX**: Fuente de Temperatura (Temperatura $[^{\circ}C]$).

Los nodos y su referencia física son los siguientes:

- **AI**: Aire interno.
- **AX**: Aire externo.

La tabla TAX contiene el caudal de renovación de aire durante el día.

3.2.6. Valores de entrada al modelo

Constantes

Las constantes del modelo son los parámetros que se ingresan en los elementos del modelo. Estos son: coeficientes de transferencia de calor, áreas, espesores, masas, y temperaturas iniciales; correspondientes a la vivienda estudiada.

Variables

Las variables de entrada al modelo son la temperatura exterior, la radiación y la ventilación, éstos determinan la temperatura interna del edificio de acuerdo a sus características constructivas. También se debe considerar la velocidad del aire en el exterior y las infiltraciones de aire.

Para la simulación se utilizó como ejemplo la radiación de un día 21 de Julio, que de acuerdo al modelo de Perrin de Brichambaut, se tienen las siguientes curvas para las distintas superficies de la envolvente del edificio:

- Radiación incidente en las paredes verticales del edificio:

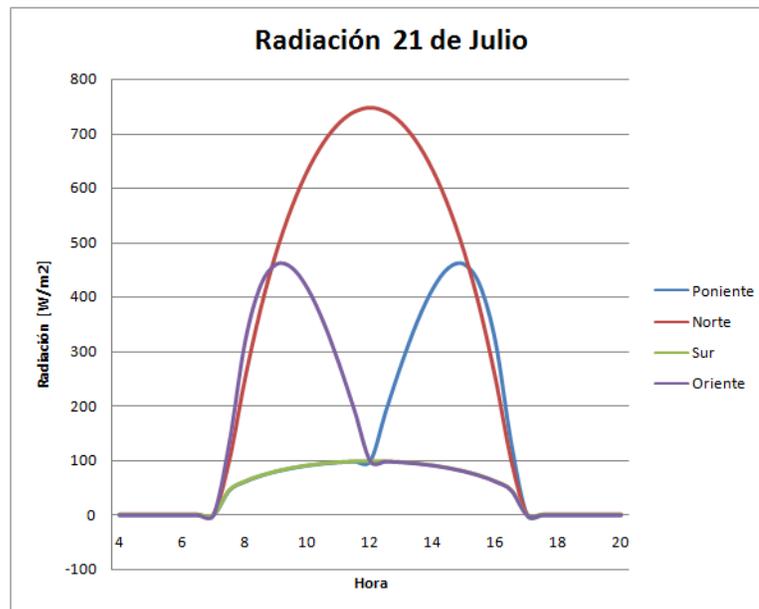


Figura 3.9: Radiación incidente en paredes.

Se observa que en la fachada Norte hay una radiación bastante considerable, esto debido a la declinación del sol en invierno que permite radiación directa del sol sobre esta cara a lo largo del día. Ésta será la que se utilizará para calentar el interior de la vivienda mediante el sistema solar.

Se observa también que las radiaciones sobre las caras oriente y ponientes son coherentes ya que muestran sus puntos máximos en las horas que se encuentran con luz directa. Para la fachada sur sólo se aprecia radiación difusa.

- Radiación incidente en el techo del edificio: Dada la inclinación del techo (30°), en su ala norte se tiene una posición privilegiada en términos de radiación solar ya que su inclinación está muy cerca

de la declinación solar, incluso se puede apreciar que tiene una mayor radiación que sobre el plano horizontal.

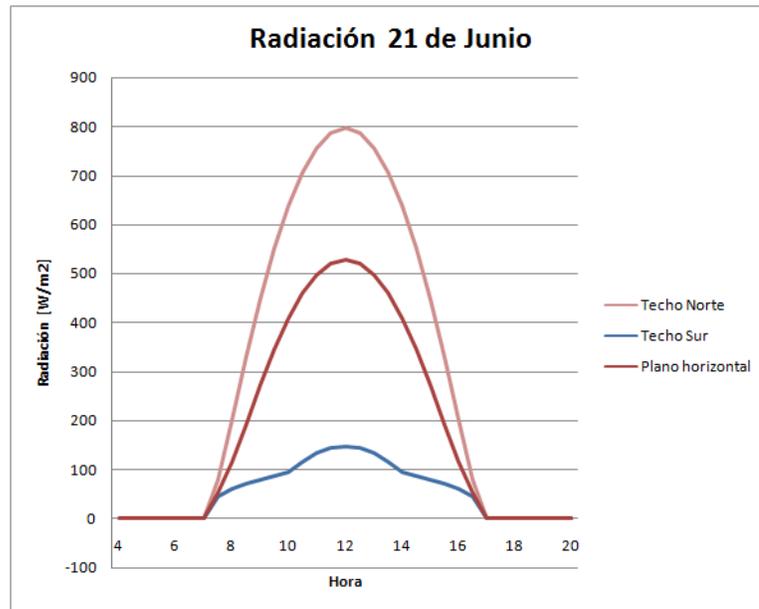


Figura 3.10: Radiación incidente en el techo.

- Temperatura: La temperatura exterior es el gran determinante de la temperatura interior del edificio, ya que las pérdidas de calor son función de la diferencia de temperatura entre el interior y exterior.

La temperatura exterior tiene una forma variable típicamente sinusoidal a lo largo del año, con ciclos de 24 horas. Observándose la mayor temperatura pasado el medio día, cerca de las 15 hrs. y la menor temperatura justo antes del amanecer, cerca de las 6 hrs.

Dependiendo de las condiciones climáticas, los días presentan una conocida variabilidad en su temperatura. Las variables principales son la nubosidad, radiación solar y viento.

En la ciudad de Santiago, durante el invierno de 2008 se registraron las siguientes temperaturas entre los meses de Mayo a Agosto [10]:

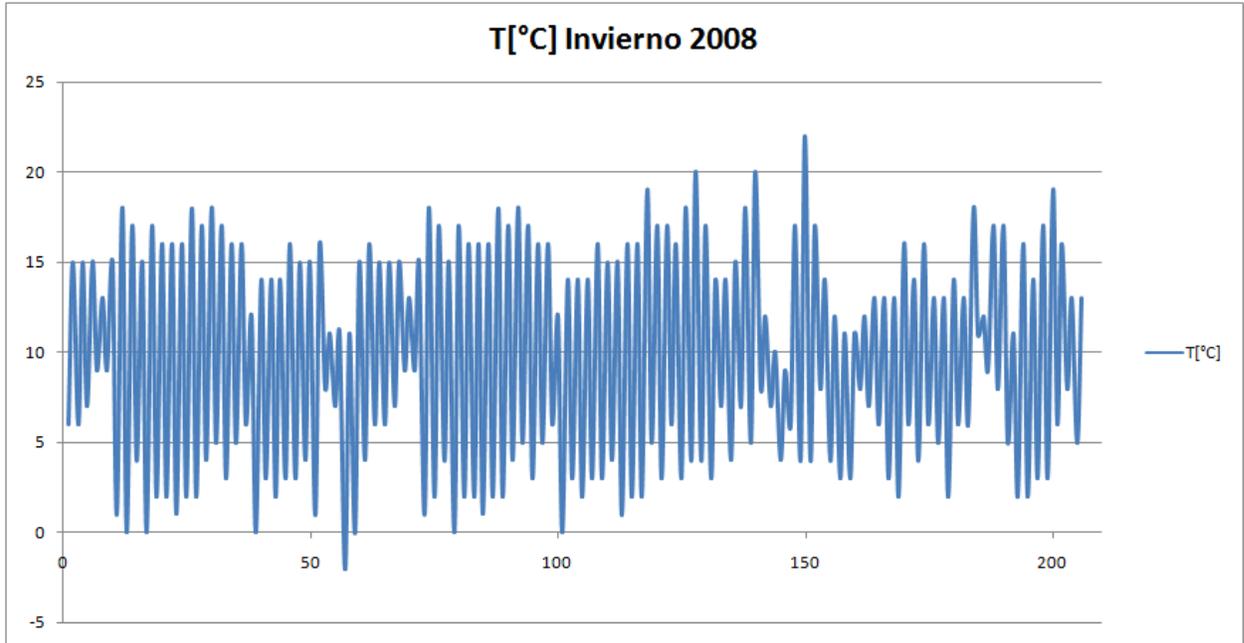


Figura 3.11: Temperatura Invierno 2008.

A continuación se muestran en curvas separadas las máximas y mínimas registradas. Es interesante notar que las mínimas temperaturas se registran cerca del 21 de junio, día más corto del año en el hemisferio sur y por lo tanto el día con menor radiación solar.

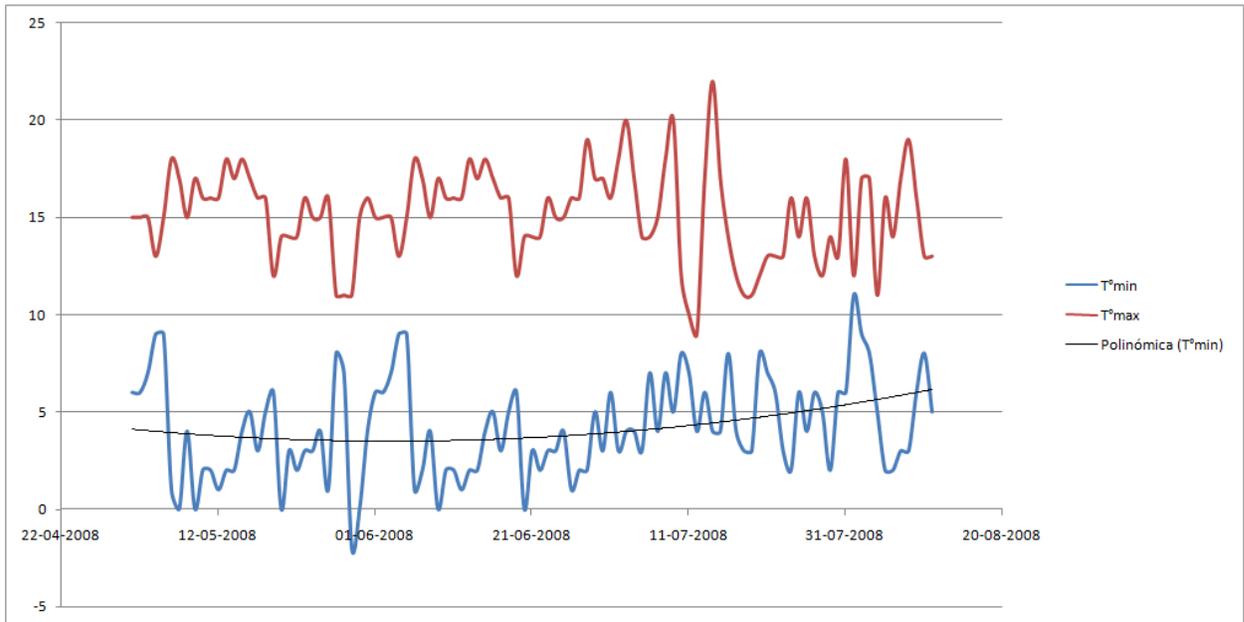


Figura 3.12: Temperaturas máximas y mínimas Invierno 2008.

Un aspecto importante a considerar del clima, es que los días nublados alcanzan una menor máxima ya que no llega radiación solar directa, pero registran una mínima más elevada ya que en la noche hay menor pérdida de calor por radiación al espacio, esto se debe a que el vapor de agua actúa como efecto invernadero y es notable su efecto en las temperaturas mínimas.

Esto se puede notar en el siguiente gráfico que cubre entre el 15 de Mayo y 15 de Junio. La zona marcada corresponde a dos días nublados (27 y 28 de Mayo) seguidos por una noche despejada (29 de Mayo) donde se registra la temperatura más baja del año.

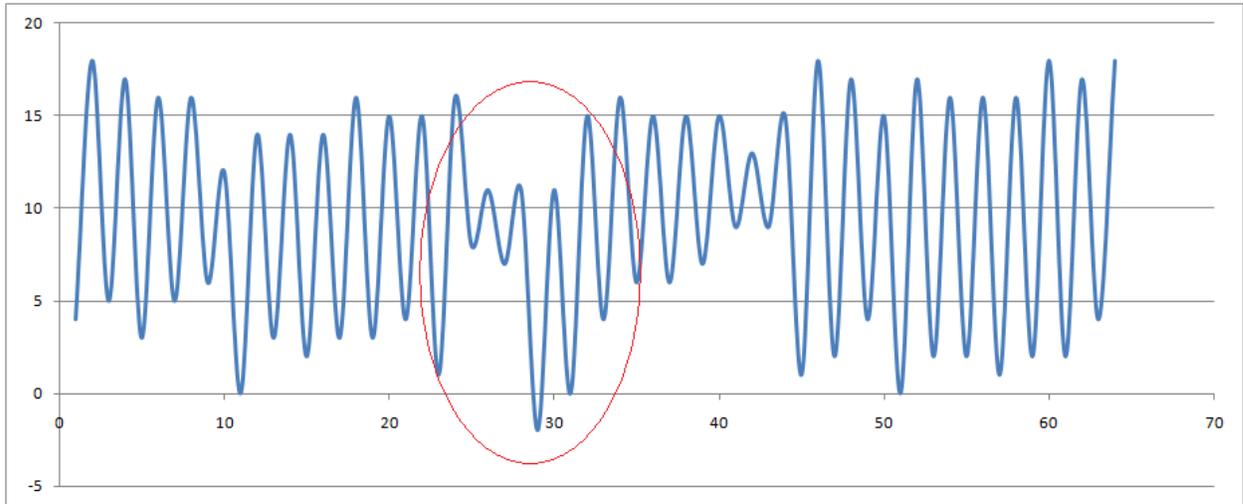


Figura 3.13: Temperaturas entre 15 Mayo y 15 Junio 2008.

3.3. Necesidades térmicas del Edificio

Las necesidades de calor del edificio quedan dadas por la suma de las pérdidas de calor que presenta frente a una cierta diferencia de temperatura entre su interior y exterior. Siendo la temperatura interior de confort 19°C y la temperatura exterior una curva típica para época de invierno.

Las pérdidas se separan en pérdidas por transferencia de calor a través de la envolvente, por conducción, radiación y convección; y las pérdidas por ventilación.

Las pérdidas de calor se expresan como sigue:

- Pérdidas por transferencia de calor

$$Q_1 = S \cdot U \cdot \Delta T \quad (3.22)$$

Donde:

- S : Envolvente del edificio [m^2].
 - U : Coeficiente global de transferencia de calor [W/m^2K].
 - ΔT : Diferencia de temperatura entre la temperatura de confort y la temperatura exterior.
- Pérdidas por ventilación:

$$Q_2 = \frac{V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T \cdot N}{3600} \quad (3.23)$$

Donde:

- $V[m^3] \cdot \rho[kg/m^3]$: Masa de aire interior.
- C_p : Calor específico del aire.
- ΔT : Diferencia de temperatura entre la temperatura de confort y la temperatura exterior.
- N : cantidad de renovaciones de aire por hora.

Luego las necesidades térmicas, que será aportado por el sistema de calefacción, será:

$$Q_{calefaccion} = Q_1 + Q_2 \quad (3.24)$$

3.4. Dimensionamiento del sistema Solar

Dada la curva de energía solar disponible, no es posible alcanzar la temperatura de confort a primera hora en la mañana, por esto, el sistema solar suplirá el máximo porcentaje de la necesidad térmica del edificio según sea posible dada el área disponible para instalar los paneles solares.

El balance energético en un colector solar es:

$$q_r[W/m^2] = I_{abs} - U_{global}(T_{co} - T_{amb}) \quad (3.25)$$

Donde,

- q_r : Calor removido.
- I_{abs} : Energía absorbida por la placa captadora.

- U_{global} : Coeficiente global de pérdidas de calor por radiación, convección y conducción; en función de las temperaturas del colector y ambiente.
- T_{co} : Temperatura de la placa captadora del colector.
- T_{amb} : Temperatura ambiente.

y

$$I_{abs} = R_{total} \cdot \tau \cdot \alpha \quad (3.26)$$

Con,

- R_{total} : Radiación incidente total.
- τ : Transmisividad de la placa transparente cobertora.
- α : Absortividad de la placa captadora.

El sistema solar será dimensionado tal que:

$$Q_{calefaccion} = q_r \cdot A_{colectores} + Q_{auxiliar} \quad (3.27)$$

3.4.1. Modelos térmicos del sistema Solar

Modelo del Colector solar plano:

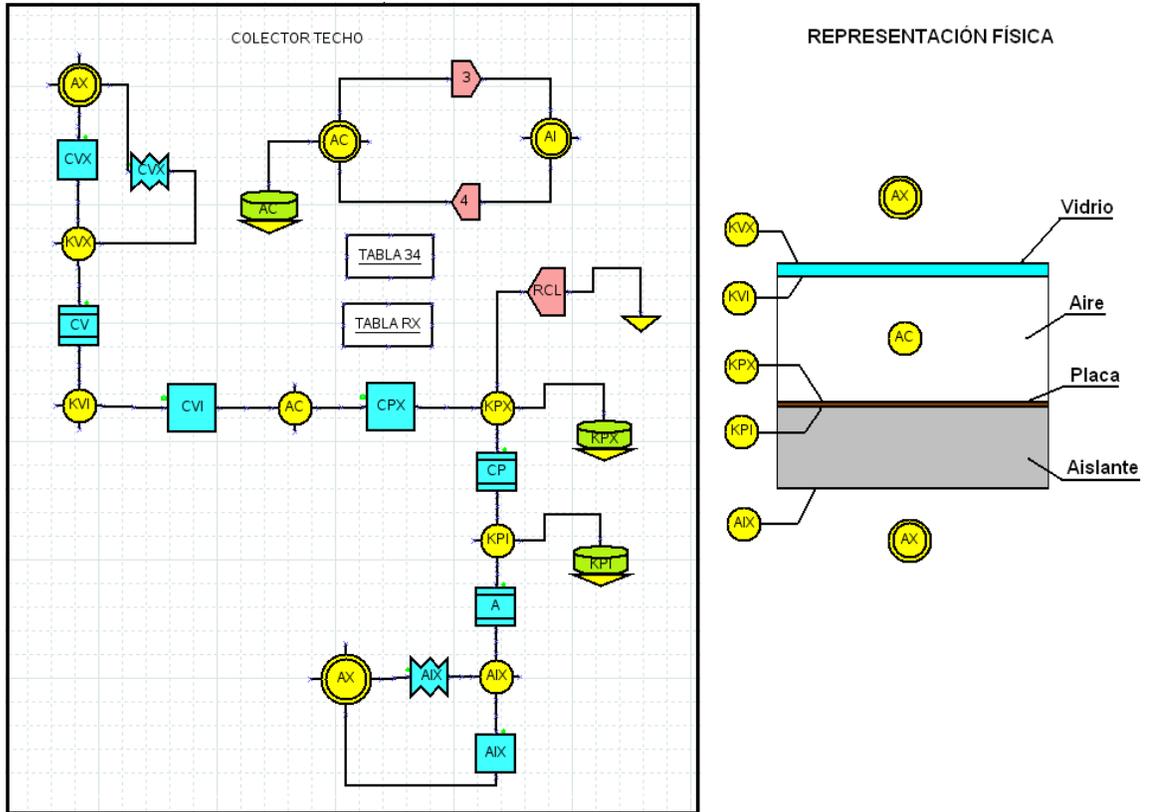


Figura 3.14: Modelo para Colector Solar plano de aire.

En este esquema se muestra el modelo realizado para el colector y para la circulación de aire (circuito cerrado arriba a la derecha) que permite el intercambio térmico con el interior.

Los nodos, elementos y sus parámetros son los siguientes:

- Circulación de aire: Los elementos (rojos y verde) y sus parámetros son:
 - **3:** Flujo de Masa (Calor específico $[J/kgK]$, Flujo $[kg/s]$).
 - **4:** Flujo de Masa (Calor específico $[J/kgK]$, Flujo $[kg/s]$).
 - **AC:** Acumulador de calor (Calor específico $[J/kgK]$, Masa $[kg]$). Representa la masa de aire dentro del colector.

Los nodos y su referencia física son:

- **AC:** Aire dentro del colector.
- **AI:** Aire interno del edificio.
- **Colector Solar:** Los elementos (rojo, verde y azul) y sus parámetros son:
 - **CVX:** Resistencia convectiva exterior del vidrio (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
 - **CVX:** Resistencia radiativa exterior (Área [m^2], Emisividad, Factor de forma).
 - **CV:** Resistencia conductiva del vidrio (Área [m^2], Espesor [m], Conductividad [W/mK]).
 - **CVI:** Resistencia convectiva interior del vidrio (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
 - **CPX:** Resistencia convectiva exterior de la placa captadora (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
 - **CP:** Resistencia conductiva de la placa captadora (Área [m^2], Espesor [m], Conductividad [W/mK]).
 - **A:** Resistencia conductiva del aislante inferior (Área [m^2], Espesor [m], Conductividad [W/mK]).
 - **AIX:** Resistencia convectiva exterior del aislante (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
 - **AIX:** Resistencia radiativa exterior del aislante (Área [m^2], Emisividad, Factor de forma).
 - **KPX:** Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la mitad de masa de la placa.
 - **KPI:** Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la mitad de masa de la placa.

Los nodos y su referencia física son:

- **AX:** Aire Externo.
- **KVX:** Superficie exterior del vidrio cobertor.
- **KVI:** Superficie interior del vidrio cobertor.
- **AC:** Aire interno del colector.
- **KPX:** Superficie exterior de la placa captadora, que recibe la radiación.
- **KPI:** Superficie interior de la placa captadora, hacia el aislante.
- **AIX:** Superficie exterior del aislante.

Modelo del Muro Trombe:

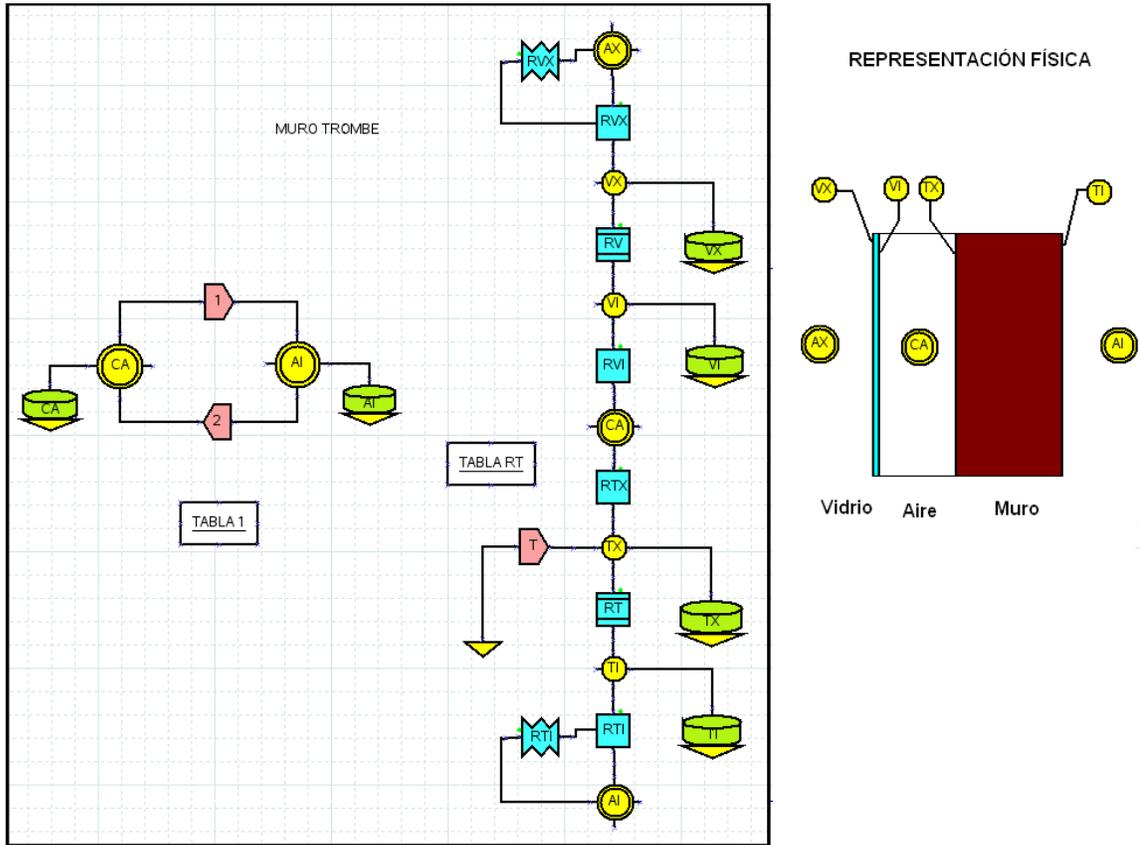


Figura 3.15: Modelo para Muro Trombe.

En este esquema se muestra el modelo realizado para el Muro Trombe y para la circulación de aire (circuito cerrado al lado izquierdo) que permite el intercambio térmico con el interior.

Los nodos, elementos y sus parámetros son los siguientes:

- Circulación de aire: Los elementos (rojos y verde) y sus parámetros son:
 - **1**: Flujo de Masa (Calor específico $[J/kgK]$, Flujo $[kg/s]$).
 - **2**: Flujo de Masa (Calor específico $[J/kgK]$, Flujo $[kg/s]$).
 - **CA**: Acumulador de calor (Calor específico $[J/kgK]$, Masa $[kg]$). Representa la masa de aire dentro del colector.
 - **AI**: Acumulador de calor (Calor específico $[J/kgK]$, Masa $[kg]$). Representa la masa de aire al interior del edificio.

Los nodos y su referencia física son:

- **CA:** Aire dentro del Muro Trombe.
- **AI:** Aire interno del edificio.
- **Colector Solar:** Los elementos (rojo, verde y azul) y sus parámetros son:
 - **RVX:** Resistencia convectiva exterior del vidrio (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
 - **RVX:** Resistencia radiativa exterior del vidrio (Área [m^2], Emisividad, Factor de forma).
 - **RV:** Resistencia conductiva del vidrio (Área [m^2], Espesor [m], Conductividad [W/mK]).
 - **RVI:** Resistencia convectiva interior del vidrio (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
 - **RTX:** Resistencia convectiva exterior del Muro (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
 - **RT:** Resistencia conductiva de la placa captadora (Área [m^2], Espesor [m], Conductividad [W/mK]).
 - **RTI:** Resistencia convectiva interior del muro (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
 - **RVX:** Resistencia radiativa interior del muro (Área [m^2], Emisividad, Factor de forma).
 - **VX:** Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la mitad exterior del vidrio.
 - **VI:** Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la mitad interior del vidrio
 - **TX:** Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la mitad exterior del muro.
 - **TI:** Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la mitad interior del muro.

Los nodos y su referencia física son:

- **AX:** Aire Externo.
- **VX:** Superficie exterior del vidrio cobertor.
- **VI:** Superficie interior del vidrio cobertor.
- **CA:** Aire interno del Muro Trombe.
- **TX:** Superficie exterior del Muro, que recibe la radiación.
- **TI:** Superficie interior del Muro, hacia el interior del edificio.
- **AI:** Aire interno del edificio.

Estos sistemas son incluidos al modelo térmico del edificio, con áreas de captación según los espacios disponibles en el techo y fachada norte.

Definiendo un parámetro de diseño en que el 95 % del invierno se disponga de una temperatura interna de confort de 19[°C], esto implica 4 días al año con temperaturas inferiores. Luego según su efecto en el sistema sea satisfactorio, quedarán determinadas sus dimensiones de manera que se cumpla el parámetro de diseño.

3.5. Modelo de las mejoras térmicas a considerar

Las mejoras térmicas a implementar en el modelo son:

3.5.1. Aislamiento de muros externos

Consiste en un aislante térmico de 5[cm] de espesor de poliestireno expandido, ubicado en la cara exterior de los muros. Su esquema para simular es el siguiente:

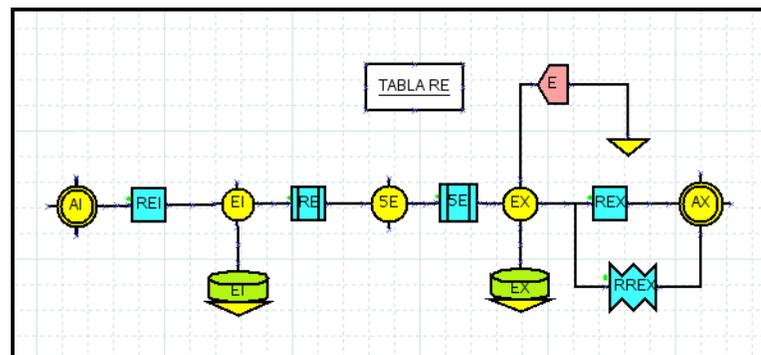


Figura 3.16: Esquema de muros con aislante exterior.

En este modelo, los elementos (azul, verde y rojos) y sus parámetros son los siguientes:

- **REI**: Resistencia convectiva interior (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
- **RE**: Resistencia conductiva del muro (Área [m^2], Espesor [m], Conductividad [W/mK]).
- **SE**: Resistencia conductiva del aislante (Área [m^2], Espesor [m], Conductividad [W/mK]).
- **REX**: Resistencia convectiva exterior (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
- **RREX**: Resistencia radiativa exterior (Área [m^2], Emisividad, Factor de forma).

- **EI:** Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la masa del muro.
- **EX:** Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la masa del aislante.
- **E:** Flujo de calor (Área m^2 , Flujo [W/m^2]). Representa el aporte de la radiación solar.
- **TABLA RE:** Contiene los datos de radiación diario y según orientación considerando la absorptividad α del muro, dado por

$$\alpha \cdot R_{total} = \alpha \cdot (I \cdot \cos(\theta) + D), \quad (3.28)$$

para el flujo de calor considerado en **E**.

Los nodos y su referencia física son los siguientes:

- **AI:** Aire interno del edificio.
- **EI:** Superficie interior del muro.
- **SE:** Superficie exterior del muro e interior del aislante.
- **EX:** Superficie exterior del aislante.
- **AX:** Aire externo.

3.5.2. Ventanas de termopanel

Consiste en reemplazar las ventanas tradicionales por termopaneles. Los termopaneles son ventanas de doble vidrio que limitan en forma considerable el intercambio térmico con el exterior, debido a la baja transferencia de calor que permite el aire confinado entre los vidrios. Su esquema para simular es el siguiente:

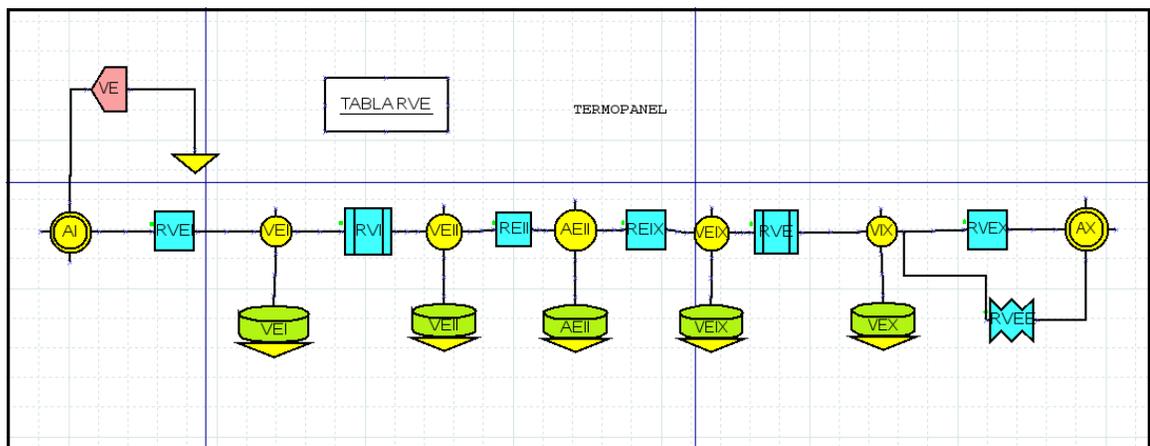


Figura 3.17: Esquema de ventanas dobles (termopaneles).

En este modelo, los elementos (azul, verde y rojos) y sus parámetros son los siguientes:

- **RVEI:** Resistencia convectiva interior (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
- **RVI:** Resistencia conductiva vidrio interior (Área [m^2], Espesor [m], Conductividad [W/mK]).
- **REII:** Resistencia convectiva 1º vidrio hacia el espacio confinado (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
- **REIX:** Resistencia convectiva 2º vidrio hacia el espacio confinado (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
- **RVE:** Resistencia conductiva vidrio exterior (Área [m^2], Espesor [m], Conductividad [W/mK]).
- **RVEX:** Resistencia convectiva exterior (Área [m^2], Convectividad [W/m^2K]).
- **RVEX:** Resistencia radiativa exterior (Área [m^2], Emisividad, Factor de forma).
- **VEI, VEII, VEIX, VEX:** Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa la mitad del vidrio correspondiente.
- **AEII:** Acumulador de calor (Calor específico [J/kgK], Masa [kg]). Representa el aire confinado entre vidrios.
- **VE:** Flujo de calor (Área m^2 , Flujo [W/m^2]). Representa el aporte de la radiación solar.
- **TABLA RVE:** Contiene los datos de radiación diario y según orientación considerando la transmisividad τ del vidrio, dado por:

$$\tau \cdot R_{total} = \tau \cdot (I \cdot \cos(\theta) + D), \quad (3.29)$$

para el flujo de calor considerado en **VE**.

Los nodos y su referencia física son los siguientes:

- **AI:** Aire interno del edificio.
- **VEI:** Superficie interior del 1º vidrio.
- **VEII:** Superficie exterior del 1º vidrio.
- **AEII:** Aire confinado.
- **VEIX:** Superficie interior del 2º vidrio.
- **VIX:** Superficie exterior del 2º vidrio.
- **AX:** Aire externo.

3.6. Dimensionamiento del Sistema de Aporte Auxiliar

La capacidad del sistema de aporte auxiliar será el complemento del sistema de calefacción solar para alcanzar la carga térmica requerida. Su dimensionamiento será resultado directo de esta carga térmica complementaria. Dependiendo de la solución, en un escenario favorable la carga auxiliar podrá ser nula, o en caso contrario, tener un máximo igual al total de la carga térmica requerida.

En el siguiente capítulo se muestran los resultados y análisis desarrollados de acuerdo a la metodología descrita.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Simulación Térmica

El modelo térmico, desarrollado en base al edificio estudiado, simulado para una radiación correspondiente a un día 21 de Junio despejado y con una temperatura exterior supuesta, tiene el siguiente comportamiento:

Situación actual

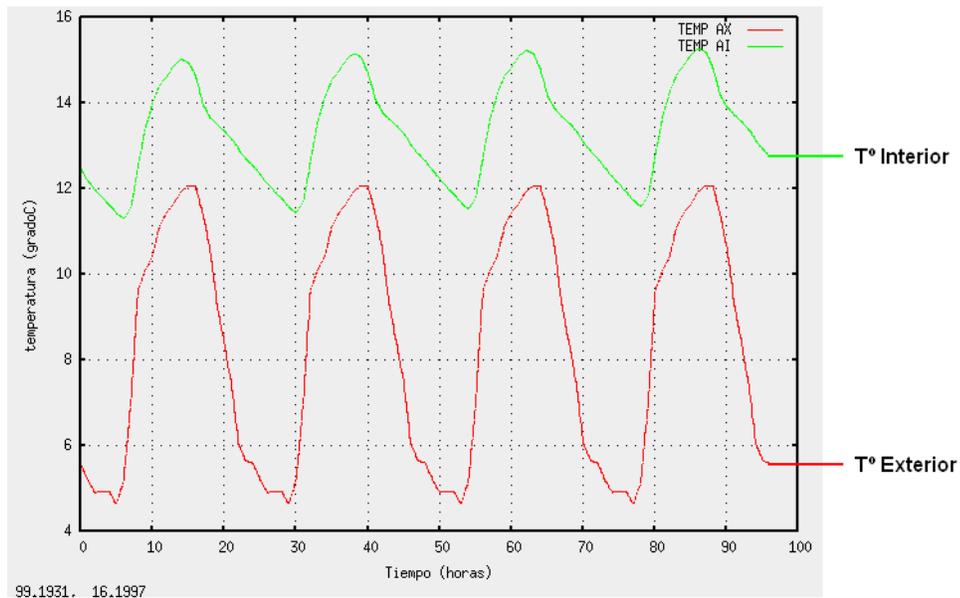


Figura 4.1: Comportamiento térmico del Edificio **AI** con temperatura exterior **AX**.

En este caso el edificio se encuentra sin aporte de calor más que la radiación solar. El modelo muestra un edificio con una inercia térmica considerable que le permite no enfriarse demasiado durante la noche, pero su ganancia solar durante el día no es muy elevada, alcanzando una temperatura apenas 3[°C] sobre la temperatura exterior.

4.2. Verificación del modelo

Para verificar el modelo se hicieron mediciones de temperatura en el edificio, para luego ver si el modelo tiene un comportamiento similar bajo las mismas condiciones. A continuación se muestra la temperatura medida entre los días Martes 27/05/08, a partir de las 17hrs. (línea roja), y Lunes 02/06/08. A modo de referencia, se muestran las condiciones climáticas durante esos días.

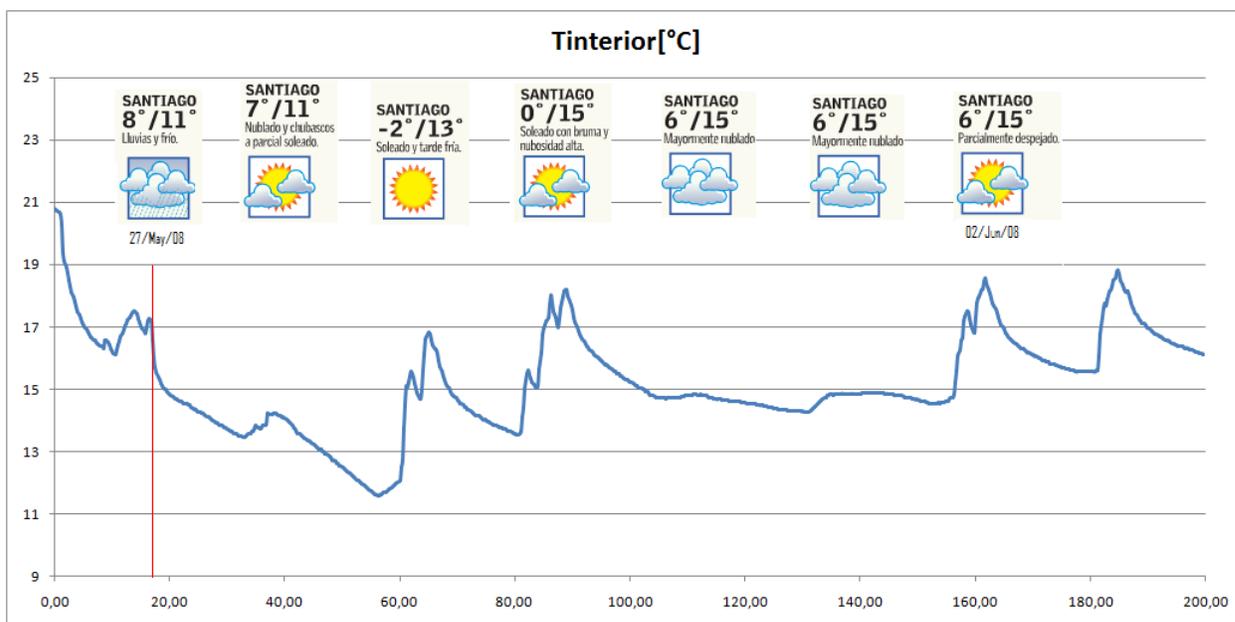


Figura 4.2: Temperatura interior medida. A modo de referencia se muestra la condición del clima.

Esta temperatura es resultado de las condiciones de temperatura exterior, la radiación existente durante esos días y las ganancias de calor internas, durante los días hábiles, compuestas por:

- 5 estufas a gas de 3500[W] c/u.
- 20-25 personas en actividad de oficina, que corresponde a 2500[W], puesto que una persona genera entre 100 y 120[w] [9].
- 5 computadores de escritorio, que corresponden a unos 1000[W], considerando fuente de poder de 200[W].

Luego se ingresaron al modelo estas condiciones de temperatura exterior, radiación y aporte de calor interno; obteniendo la siguiente respuesta para los primeros cuatro días, superponiendo la temperatura interna medida:

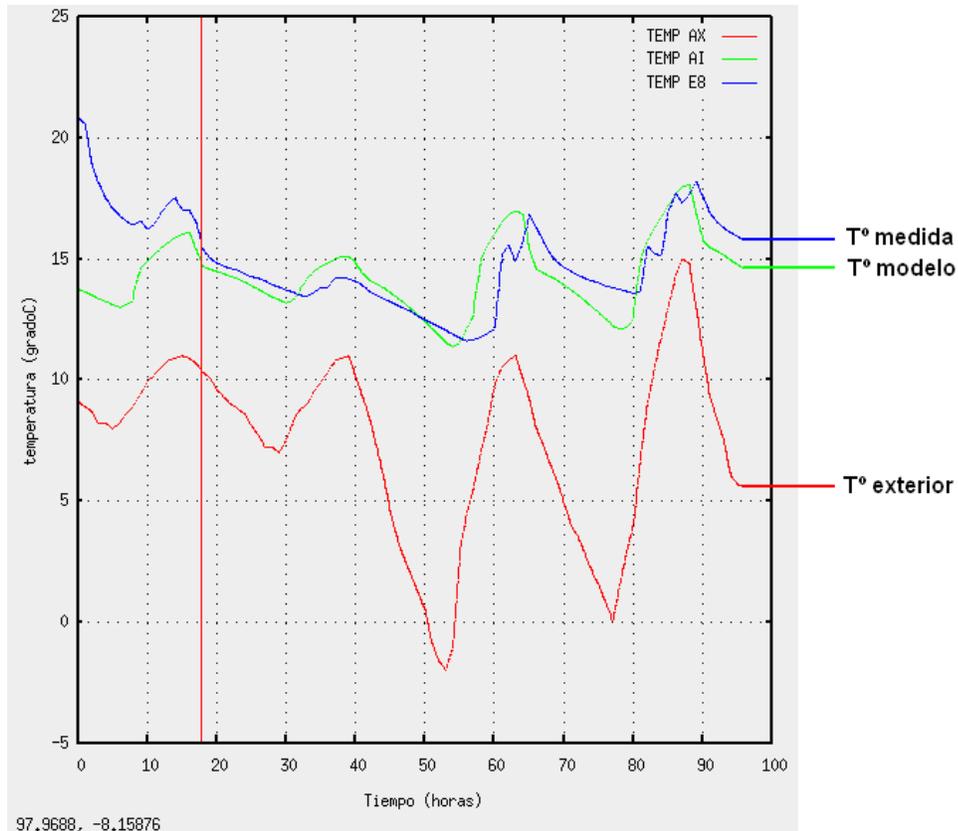


Figura 4.3: Comportamiento del modelo térmico del Edificio **AI** con temperatura exterior **AX** y condiciones de radiación similares a los días de muestreo. Superpuesta se encuentra la curva de temperatura real **E8**.

Se observa que la respuesta obtenida por la simulación es coherente, el modelo varía de acuerdo a las condiciones de temperatura exterior y radiación siguiendo una curva que se aproxima en forma satisfactoria a lo medido.

Se considera entonces que el modelo es representativo de la realidad.

Durante el proceso de ajuste del modelo se observan los siguientes aspectos:

- Las ventanas son la principal superficie de intercambio térmico con el exterior por unidad de área. El espesor del vidrio debe ser de al menos 3 mm. Utilizar vidrios de mayor espesor afectará en forma positiva y muy considerable al desempeño térmico del edificio, especialmente cuando la arquitectura dispone de grandes áreas de ventanas.
- Las ventanas que dan al sur deben ser lo más reducidas posibles ya que no aportan calor durante el día, y durante la noche contribuyen al enfriamiento del edificio.
- El aislamiento térmico del techo es fundamental para controlar las pérdidas de calor en la noche, éste

debe ser de al menos 8 cm de espesor.

- La cantidad de masa $V \cdot \rho$ que conforme el edificio, y de acuerdo a su calor específico C_p , determina la inercia térmica del edificio. Una masa térmica reducida, reduce la capacidad de la vivienda para acumular calor y genera una disminución más violenta de su temperatura; sin embargo, una masa térmica muy grande hace que sea más difícil elevar la temperatura en su interior. Se postula que existe una masa térmica óptima para una determinada vivienda, que dependerá del uso que se le dará y del clima local.

4.3. Carga Térmica requerida

Considerando una temperatura de confort de 19°C y una situación crítica que representa una secuencia de días más desfavorables que el 95 % del invierno, esto implica que probablemente habrán 4 días con peores condiciones, en base a las temperaturas registradas durante el invierno de 2008, se determina la siguiente situación de diseño:

Situación de diseño: Una secuencia de dos días despejados fríos ($\text{min}=2[^{\circ}\text{C}]$, $\text{max}=12[^{\circ}\text{C}]$), seguidos de dos días nublados fríos ($\text{min}=6[^{\circ}\text{C}]$, $\text{max}=10[^{\circ}\text{C}]$).

Ingresando estas condiciones al modelo térmico realizado, se determina la carga térmica requerida por el edificio (área pintada) durante el día:

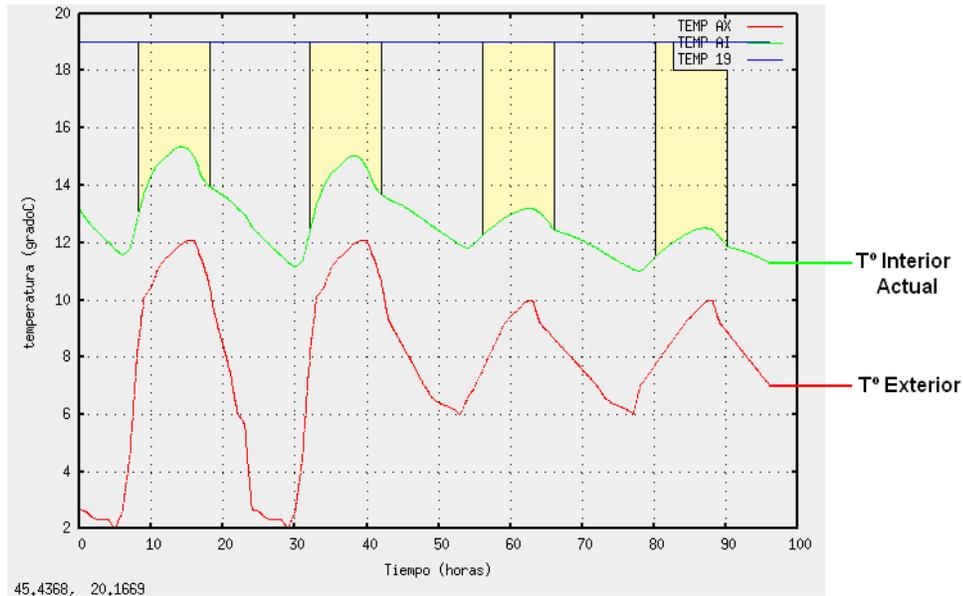


Figura 4.4: Carga térmica requerida. Situación actual.

Esto corresponde a una demanda promedio diaria para la situación de diseño de $270[kWh]$.

La curva de temperatura interna queda determinada por el aporte natural de energía solar, ventilación actual y aporte de calor por ocupación que corresponde a:

- 20-25 personas en actividad de oficina, que corresponde a $2500[W]$, puesto que una persona genera entre 100 y $120[w]$ [9].
- 5 computadores de escritorio, que corresponden a unos $1000[W]$, considerando fuente de poder de $200[W]$.

4.4. Mejoras térmicas al edificio y su influencia sobre la demanda energética

Con el edificio simulado, se verá cómo influyen las características térmicas del edificio en términos de su capacidad de intercambio térmico con el exterior, en las condiciones de temperatura interna. Para esto se revisarán tres casos; primero el edificio con un aislante térmico de poliestireno expandido ($k = 0,04[W/m^2K]$) de $5[cm]$ de espesor en todos sus muros por la cara exterior, luego el edificio con sus ventanas reemplazadas por termopanel y por último el edificio con aislación en muros junto con ventanas de termopanel.

El análisis pretende mostrar la influencia de las mejoras térmicas al edificio sobre su demanda energética y así determinar una estrategia a seguir para mejorarlo térmicamente de manera conveniente. También permitirá ver las ventajas que se logran con las mejoras térmicas antes de pensar en alguna solución de aporte energético, ya sea solar o convencional.

4.4.1. Edificio con aislación en muros

Aislando los muros exteriores del edificio con $5[cm]$ de poliestireno expandido ($k = 0,04[W/m^2K]$) por su cara externa, considerando una ganancia interna por ocupación y la ganancia por radiación solar, cuyo principal aporte es por las ventanas con orientación Norte, el edificio presenta el siguiente comportamiento:

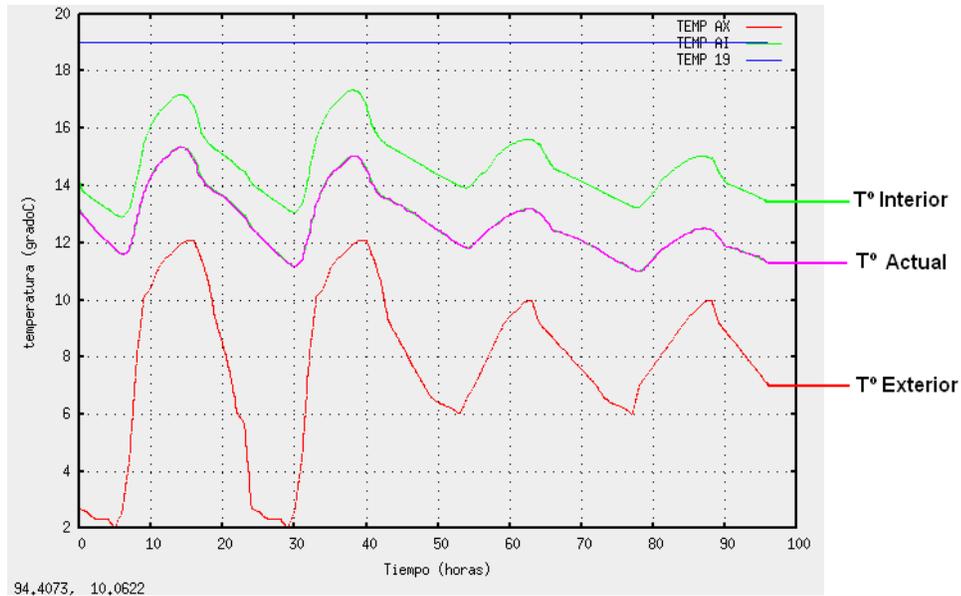


Figura 4.5: Edificio con muros aislados Verde. Situación actual Magenta

Como se aprecia en la figura, las pérdidas de calor durante la noche se reducen notablemente gracias al efecto de la aislación. Esto permite que durante el día el edificio alcance mayor temperatura disminuyendo la demanda energética un 40 %.

El costo estimado de aislar los muros, considerando materiales e instalación es de \$21.000.- por m^2 . Esto es un total instalado de \$11.070.000.-

4.4.2. Edificio con ventanas de termopanel

Cambiando las ventanas del edificio por termopaneles (ventanas dobles), considerando una ganancia interna por ocupación y ganancia por radiación solar por ventanas, sin aislamiento en muros, el edificio presenta el siguiente comportamiento:

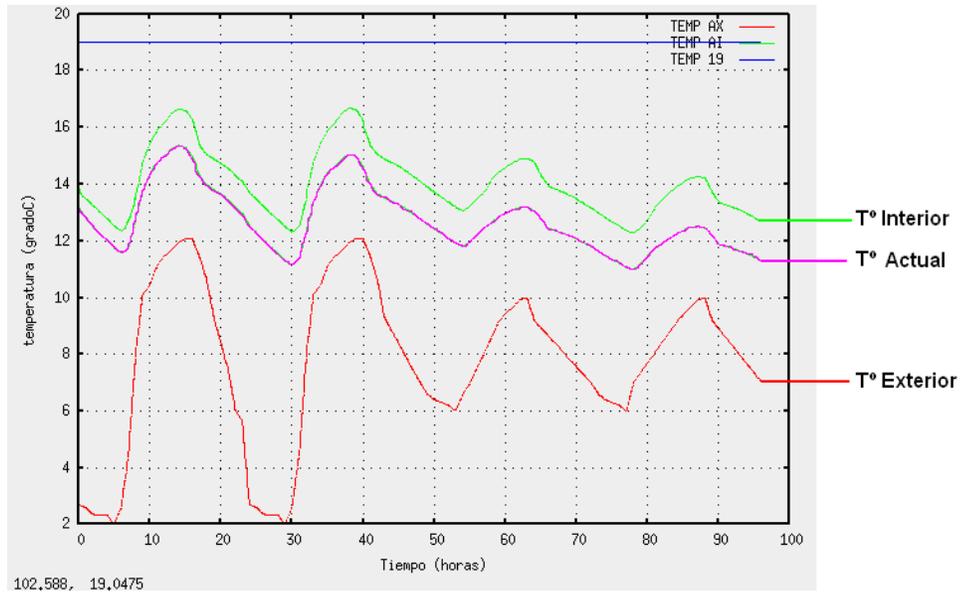


Figura 4.6: Edificio con ventanas de termopanel Verde. Situación actual Magenta.

Se aprecia en la figura que el cambio de ventanas tradicionales por termopaneles reduce las pérdidas de calor durante la noche de manera considerable, aunque en menor medida que el aislamiento de muros. En la figura se aprecia que las necesidades térmicas del edificio se reducen en el orden de un 30 %.

El costo estimado de termopaneles instalados de tipo corredera con marcos de aluminio es de \$85.000.- por m^2 , para termopaneles instalados fijos con marcos de aluminio el costo es de \$65.000.- por m^2 . Para el edificio estudiado se ha calculado un costo total de \$4.725.000.-

4.4.3. Aislación de muros y ventanas de termopanel

Combinando las mejoras térmicas, esto es muros aislados con 5[cm] de poliestireno expandido ($k = 0,04[W/m^2K]$) y termopaneles en todas las ventanas, y considerando ganancias térmicas por ocupación y radiación solar por ventanas, se obtiene el siguiente comportamiento:

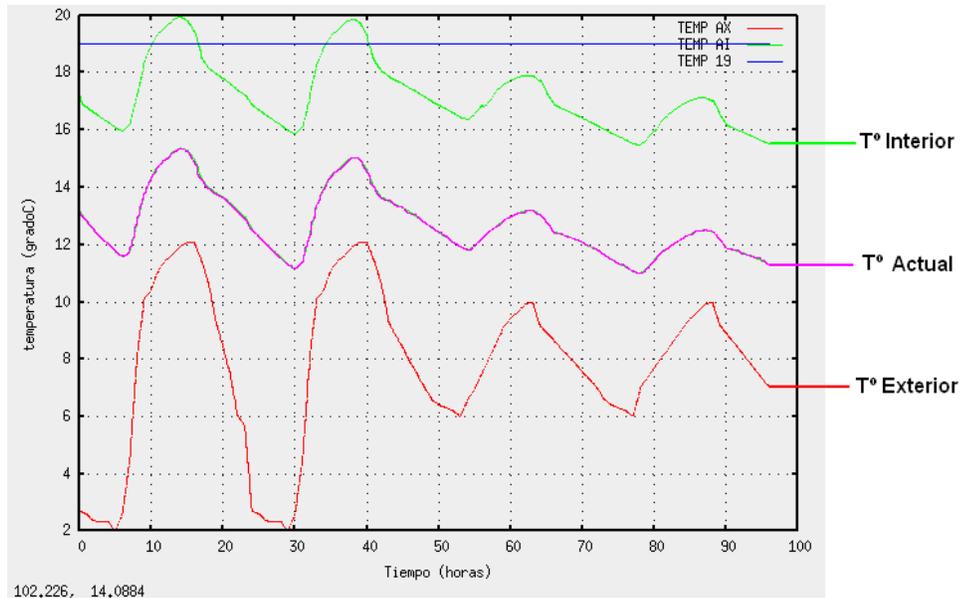


Figura 4.7: Edificio con muros aislados y ventanas de termopanel Verde. Situación actual Magenta

Se observa que la demanda energética disminuye notablemente, cerca de un 70 %. Es importante notar cómo mejora la condición interior del edificio únicamente controlando las pérdidas. Hay una importante ventaja comparativa al aislar muros y ventanas, ya que en conjunto producen una mejora mayor que la suma de cada una por sí sola. Si lo pensamos es bastante lógico, ya que cada solución por sí sola, es como tener un termo destapado; tarda en enfriarse, pero si lo tapamos (aislar completamente) el enfriamiento tarda considerablemente más.

El costo estimado de estas mejoras instaladas es de \$15.795.000.-

4.5. Evaluación económica de instalar mejoras térmicas

En forma general se ha obtenido el Valor Presente Neto (VPN) en pesos Chilenos (CLP), de La instalación de un aislante térmico de 5cm de espesor en los muros exteriores y el reemplazo de las ventanas por termopaneles; Complementado con un aporte auxiliar de 12[kW]; frente a la solución actual consistente en 5 estufas a gas licuado de 3,500[W] c/u. Para el cálculo se han tenido las siguientes consideraciones:

- Valor actual de las mejoras térmicas: \$ 15.795.000.-
- Valor actual de 1 radiador de 1[kW]: \$ 6.800.-
- Valor actual de 1 kWh (kilo Watt hora): \$ 86.-

- Valor actual de 1 kg de gas licuado (GLP): \$ 1000.-
- Consumo de 1 estufa de 3,500[W] por 1 hora: 150[gr].
- El precio del GLP y del kWh aumentan un 5 % anual.
- Se considera una tasa de descuento de un 5 % anual.
- El sistema de aporte auxiliar funciona a plena carga durante 120 hrs/año.
- El sistema actual funciona a plena carga durante 1200 hrs/año.

Tenemos entonces:

- Para el Sistema Solar con aporte auxiliar:

Un costo al primer año C_1 de

$$C_1 = 15,795,000 + 12 \cdot 6,800 + 12[kW] \cdot 86[1/kWh] \cdot 120[h/ano] = 16,000,000.- \quad (4.1)$$

Y para los años siguientes:

$$C_i = 12[kW] \cdot 86[1/kWh] \cdot 120[h/ano] = 123,800.- \quad (4.2)$$

$$C_{i+1} = C_i \cdot 1,05 \quad (4.3)$$

- Para el Sistema actual se tiene un costo de :

$$C_0 = 0,15[kg] \cdot 1000[1/kg] \cdot 5[estufas] \cdot 1200[h/ano] = 900,000.- \quad (4.4)$$

$$C_{i+1} = C_i \cdot 1,05 \quad (4.5)$$

Entonces el VPN es el siguiente:

	Aislamiento y termopaneles	Sistema actual
VPN	-\$ 18.523.574	-\$ 19.245.855
período [año]		
1	-\$ 16.000.000	-\$ 900.000
2	-\$ 136.180	-\$ 990.000
3	-\$ 149.798	-\$ 1.089.000
4	-\$ 164.778	-\$ 1.197.900
5	-\$ 181.256	-\$ 1.317.690
6	-\$ 199.381	-\$ 1.449.459
7	-\$ 219.319	-\$ 1.594.405
8	-\$ 241.251	-\$ 1.753.845
9	-\$ 265.376	-\$ 1.929.230
10	-\$ 291.914	-\$ 2.122.153
11	-\$ 321.105	-\$ 2.334.368
12	-\$ 353.216	-\$ 2.567.805

Figura 4.8: VPN Mejoras térmicas v/s Sistema Actual.

De acuerdo a los cálculos realizados, el proyecto es rentable a 12 años.

4.6. Sistema Colector Solar

En esta sección se modelará el comportamiento térmico del edificio con un sistema de colectores solares sin considerar mejoras térmicas, es decir sobre el edificio actual. En el próximo capítulo se modela el edificio con sistema de colectores solares en conjunto con las mejoras térmicas de aislación.

Utilizando el modelo térmico, mediante simulaciones y considerando los espacios disponibles para la instalación de colectores, se ha determinado que con un colector plano de aire ubicado en el techo con orientación Norte, de un área de $60[m^2]$, más un muro Trombe ubicado en una fachada norte de un área de $14,5[m^2]$, se tiene una temperatura interior satisfactoria.

Su disposición en el edificio será en la fachada norte, de la siguiente manera:

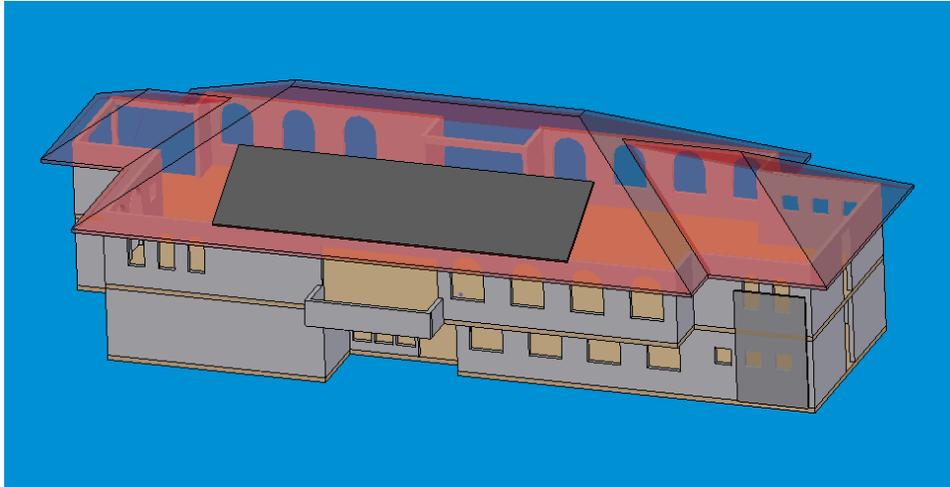


Figura 4.9: Disposición del Sistema Solar en el edificio **Verde**. Situación actual **Magenta**

La simulación de el edificio con éste sistema solar incorporado, frente a la situación de diseño, muestra el siguiente comportamiento:

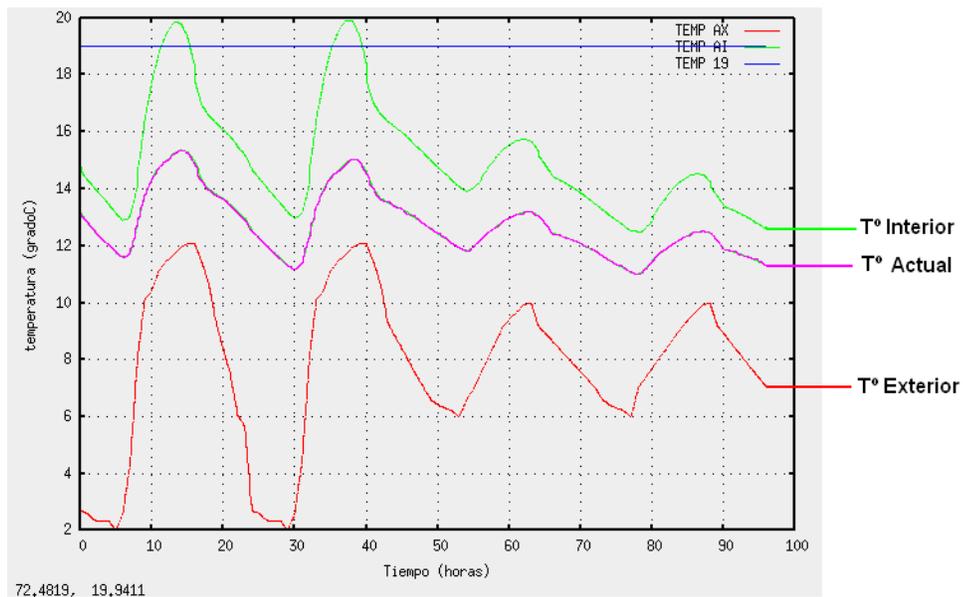


Figura 4.10: Aporte del Sistema Solar.

En este punto es necesario hacer una comparación entre las dos soluciones:

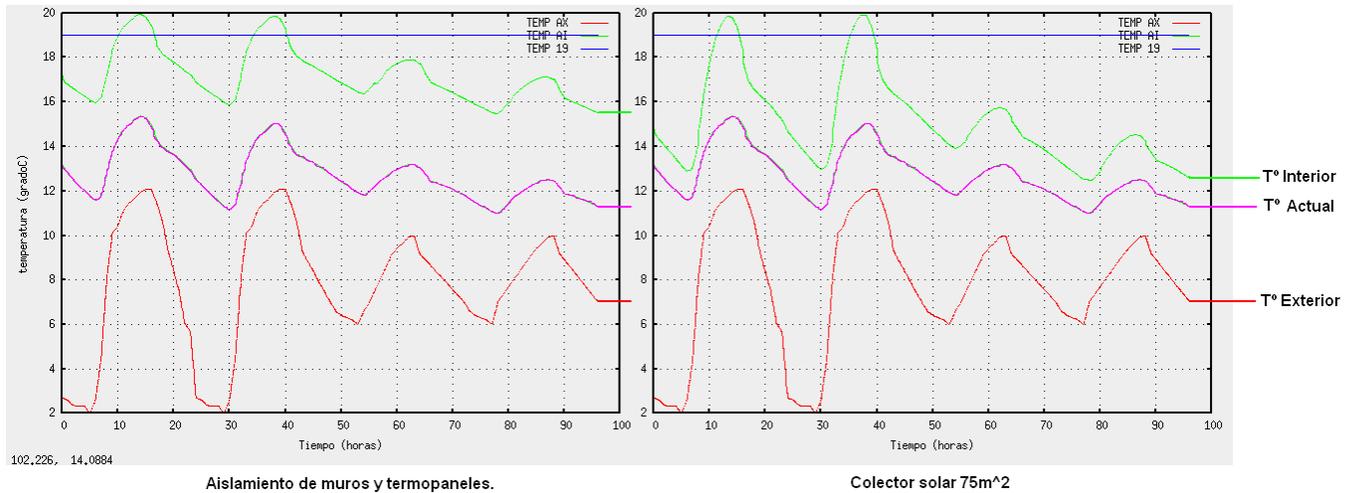


Figura 4.11: Comparación entre el comportamiento térmico del edificio aislado térmicamente v/s comportamiento con un sistema de colectores solares.

Notablemente la ganancia energética de las mejoras térmicas es superior al sistema colector solar por sí sólo. Considerando que la mejora térmica comprende aislación de muros y ventanas de termopanel, ya que sólo realizar una mejora, implica un beneficio mucho menor.

Por muy grande que sea el área de captación solar, si las pérdidas no son controladas, el sistema solar no será suficiente, y deberá ser complementado por un sistema de aporte auxiliar importante.

4.6.1. Colector solar plano

Se determinó que el colector solar plano utilice como fluido caloportador el mismo aire del interior del recinto, ya que tiene la ventaja de que no se necesita un sistema adicional de intercambio de calor con el interior, que debido a la baja diferencia de temperatura no tendría una buena eficiencia.

El colector tiene un área total de $60[m^2]$ y un costo estimado de \$6.000.000.- y será instalado en el techo norte del edificio, el cual tiene una inclinación de 30° y una orientación norte casi perfecta. Se han considerado cinco módulos de $3 \times 4m$, los cuales tienen las siguientes características:

1. Cobertura de vidrio de 3mm.
2. Placa absorbidora de cobre o acero con pintura selectiva (negra) en su cara externa.
3. Aislante térmico de lana mineral de 80mm en la cara inferior de la placa captadora.
4. Caja en perfiles de aluminio para armar el conjunto.

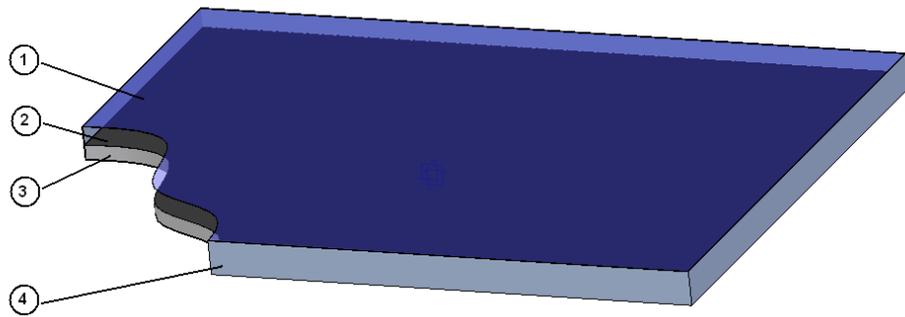


Figura 4.12: Colector solar plano.

Del modelo térmico del colector instalado en el edificio funcionando, es interesante ver cómo varía la temperatura de los distintos componentes del colector plano. En la siguiente figura se pueden ver las temperaturas de:

- AX: Aire externo.
- AI: Aire interior del edificio.
- AC: Aire dentro del colector.
- KPI: Placa captadora.

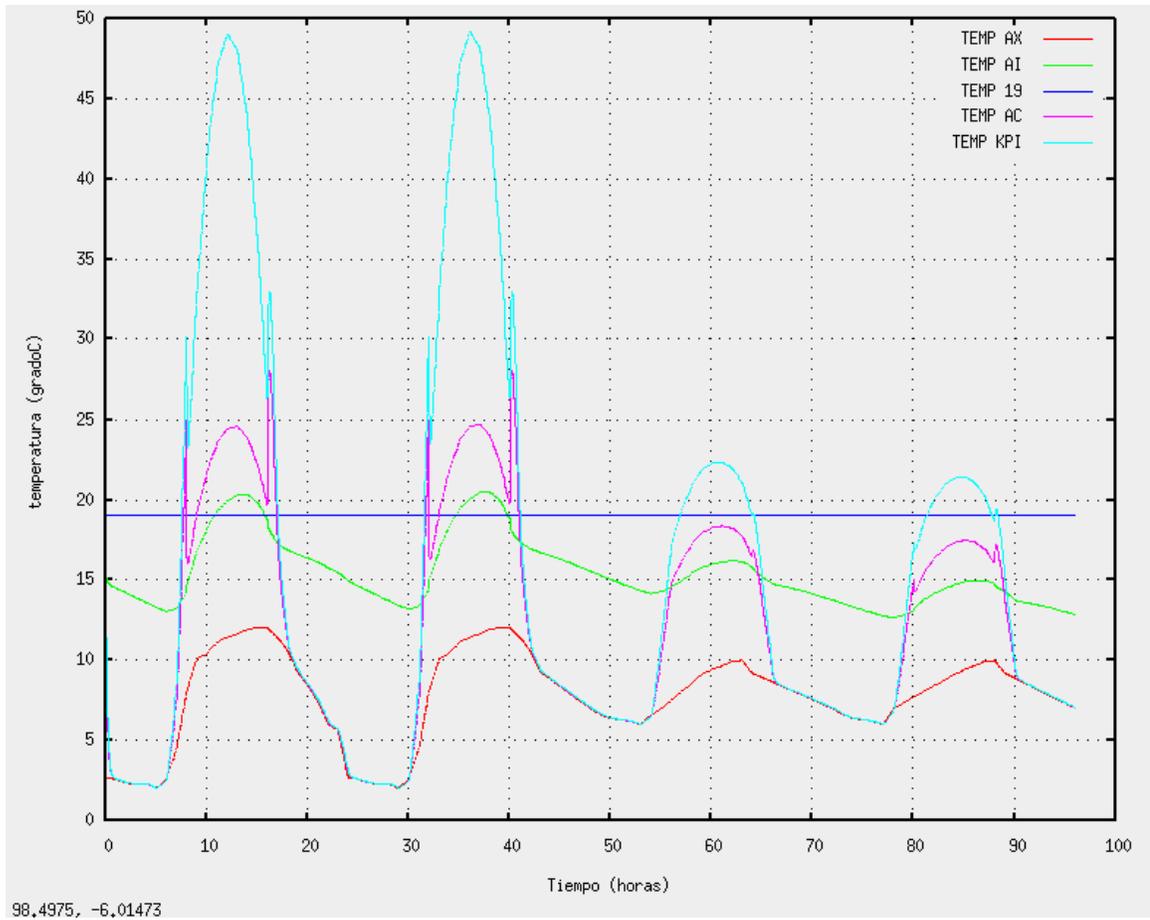


Figura 4.13: Temperatura de los componentes del Colector Plano.

Análisis de sensibilidad de la velocidad del aire dentro del colector

Al aumentar la velocidad dentro del colector aumenta el coeficiente convectivo y por lo tanto la cantidad de calor removido y su eficiencia, ya que al mantener una menor temperatura en el colector, sus pérdidas disminuyen. Con la velocidad, también aumenta la convección hacia el vidrio y por lo tanto una mayor transferencia de calor al exterior, lo que hace pensar que disminuirá su eficiencia.

La siguiente figura muestra la sensibilidad del aporte del colector frente a variaciones en la velocidad del aire en su interior para un día despejado.

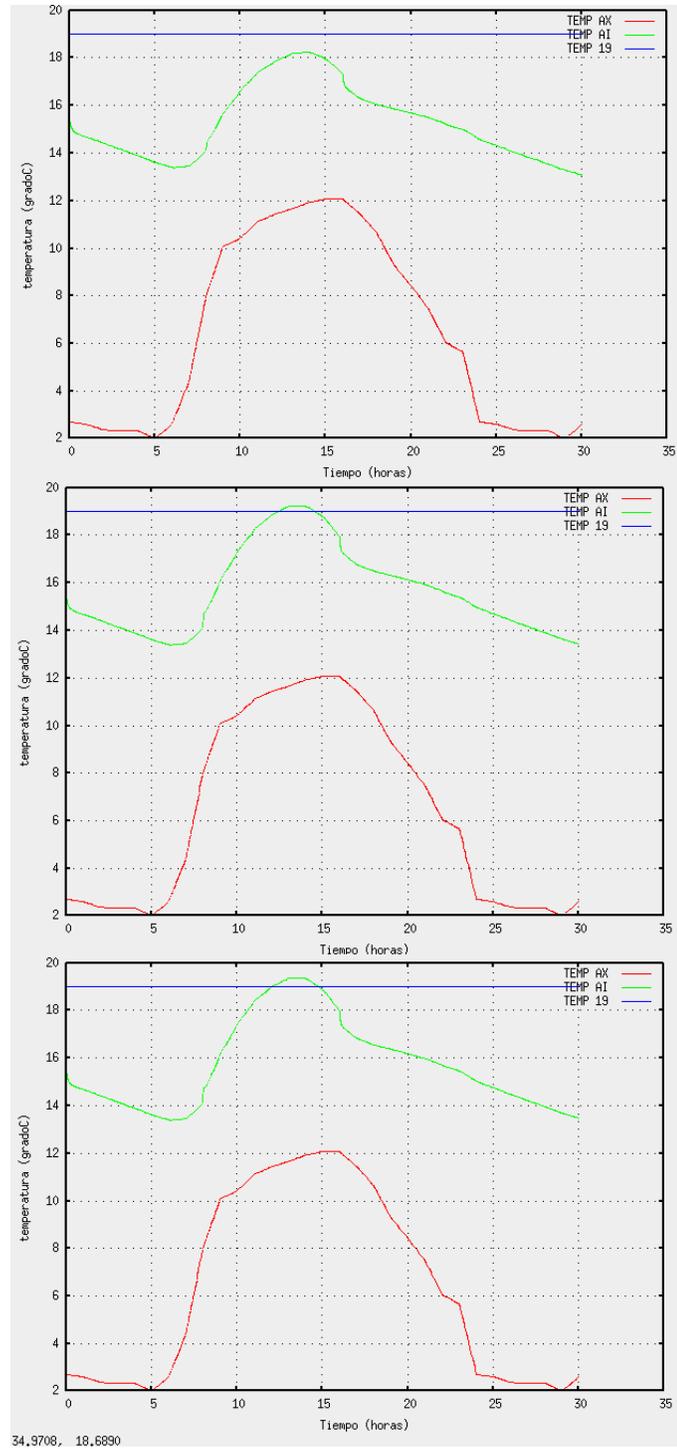


Figura 4.14: Sensibilidad de la eficiencia del Colector frente a variaciones de la velocidad del aire. Desde el 1º al 3º cuadro, las velocidades son $V1=0.33[m/s]$, $V2=2.67[m/s]$, $V3=10[m/s]$

Se observa que a medida que aumenta la velocidad en el colector se tiene una mayor temperatura interior, es decir un mayor aporte a la calefacción, sin embargo a partir de una velocidad de $2,67[m/s]$ que corresponde

a una caudal de $4[m^3/s]$ circulando en los colectores, ya no se aprecia un aumento importante. Por lo tanto se utilizó una velocidad de $2,7[m/s]$ para el aire dentro de los colectores y del Muro Trombe.

De la misma manera se determinó que para días nublados, sólo era necesaria una velocidad de $0.3[m/s]$.

4.6.2. Muro Trombe

El Muro Trombe obtenido del modelo, tiene un área de $14,5[m^2]$ y tiene un costo estimado de \$3.000.000.- y será instalado en la fachada norte del edificio en el costado poniente. sus características son:

- Cobertura de vidrio de 3mm.
- Se utiliza el mismo muro del edificio, con una apertura en su parte inferior y superior para permitir la circulación de aire.

Es interesante ver cómo varía la temperatura de los distintos componentes del Muro Trombe. En la siguiente figura se pueden ver las temperaturas de:

- AX: Aire externo.
- AI: Aire interior del edificio.
- CA: Aire dentro del Muro Trombe.
- TX: Superficie exterior del Muro Trombe.
- TI: Superficie Interior del Muro Trombe.

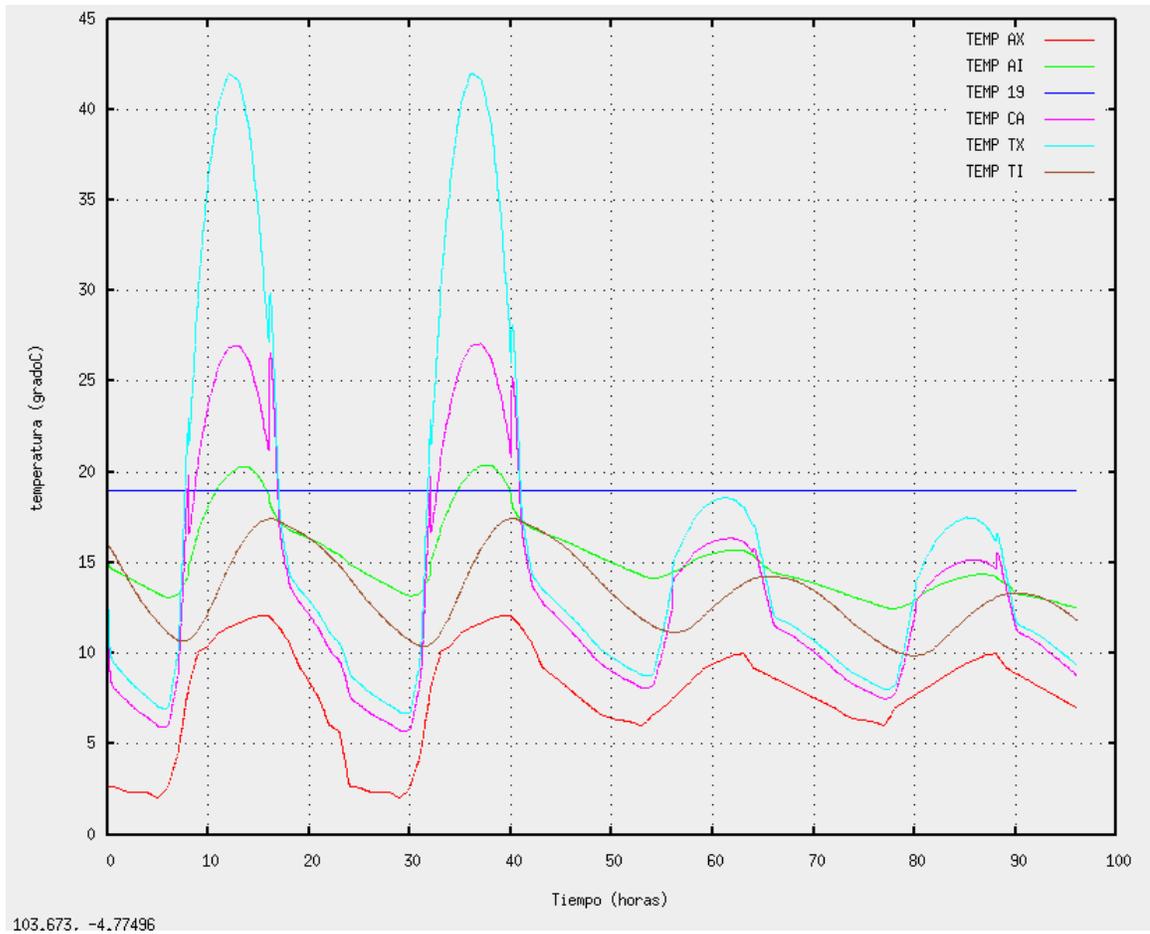


Figura 4.15: Temperatura de los componentes del Muro Trombe.

4.7. Sistema de aporte auxiliar

El sistema de aporte auxiliar debe ser capaz de aportar el calor necesario para mantener una situación de confort térmico los días en que el sistema solar es insuficiente. Esta carga térmica corresponde al área pintada en el siguiente gráfico:

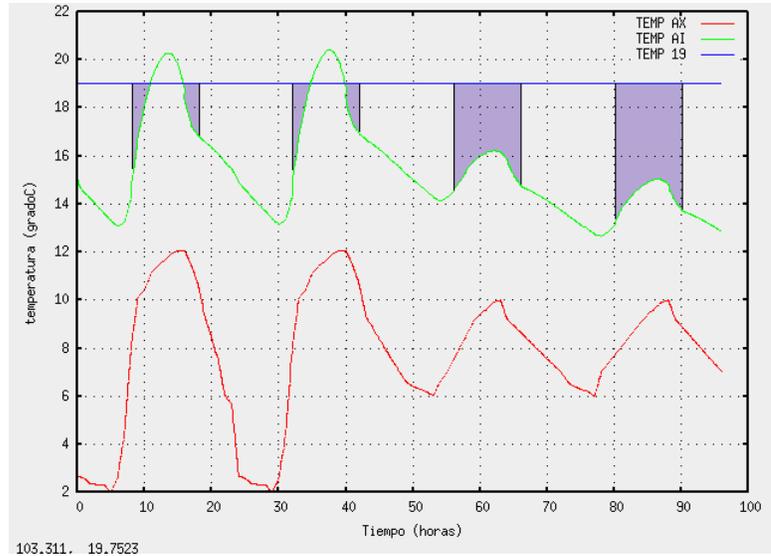


Figura 4.16: Aporte auxiliar.

Esto corresponde a una demanda promedio diaria para la situación de diseño de $156[kWh]$.

Mediante simulaciones con el modelo se ha determinado que el aporte auxiliar debe ser de $24[kW]$, con el cual se obtiene el siguiente resultado:

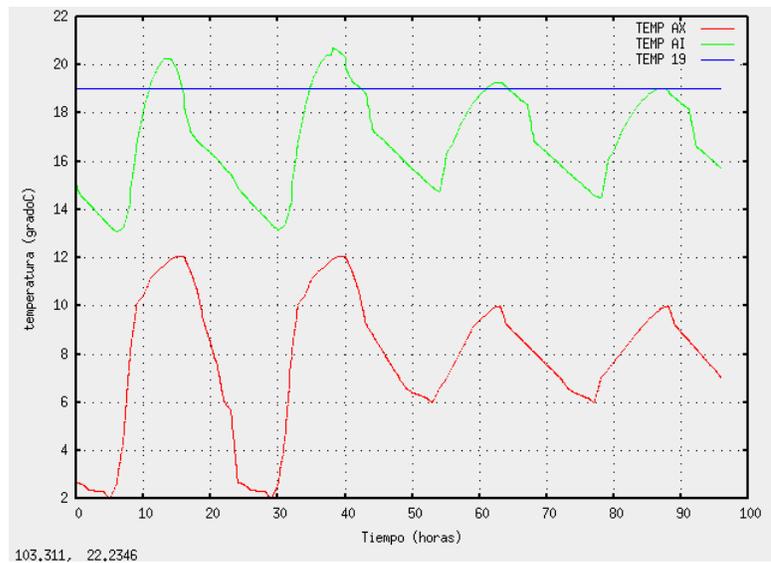


Figura 4.17: Aporte auxiliar.

Se estima que el sistema auxiliar deberá funcionar durante un 10 % de las horas laborales frías, esto es 120 hrs/año. Por lo que, a pesar de ser de una potencia alta, no se piensa en sistemas de alta eficiencia dado

su bajo uso; más bien sistemas de aporte directo ya sea radiativos o convectivos.

4.8. Evaluación económica Sistema solar con aporte auxiliar

En forma general se ha obtenido el Valor Presente Neto (VPN) en pesos Chilenos (CLP), de La instalación del sistema solar compuesto por $60[m^2]$ de colector solar plano para aire y $14,5[m^2]$ de muro trombe, complementado con un aporte auxiliar de $24[kW]$; frente a la solución actual consistente en 5 estufas a gas licuado de $3,500[W]$ c/u. Para el cálculo se han tenido las siguientes consideraciones:

- Valor actual del sistema solar descrito instalado: \$ 9.000.000.-
- Valor actual de 1 radiador de $1[kW]$: \$ 6.800.-
- Valor actual de 1 kWh (kilo Watt hora): \$ 86.-
- Valor actual de 1 kg de gas licuado (GLP): \$ 1000.-
- Consumo de 1 estufa de $3,500[W]$ por 1 hora: 150[gr].
- El precio del GLP y del kWh aumentan un 5 % anual.
- Se considera una tasa de descuento de un 5 % anual.
- El sistema de aporte auxiliar funciona a plena carga durante 120 hrs/año.
- El sistema actual funciona a plena carga durante 1200 hrs/año.

Tenemos entonces:

- Para el Sistema Solar con aporte auxiliar:

Un costo al primer año C_1 de

$$C_1 = 9,000,000 + 24 \cdot 6,800 + 24[kW] \cdot 86[1/kWh] \cdot 120[h/ano] = 9,410,880.- \quad (4.6)$$

Y para los años siguientes:

$$C_i = 24[kW] \cdot 86[1/kWh] \cdot 120[h/ano] = 247,680.- \quad (4.7)$$

$$C_{i+1} = C_i \cdot 1,05 \quad (4.8)$$

- Para el Sistema actual se tiene un costo de :

$$C_0 = 0,15[kg] \cdot 1000[1/kg] \cdot 5[estufas] \cdot 1200[h/ano] = 900,000.- \quad (4.9)$$

$$C_{i+1} = C_i \cdot 1,05 \quad (4.10)$$

Entonces el VPN es el siguiente:

		Sistema Solar + aporte auxiliar	Sistema actual
VPN		-\$ 13.110.581	-\$ 14.343.682
período [año]			
	1	-\$ 9.410.880	-\$ 900.000
	2	-\$ 272.448	-\$ 990.000
	3	-\$ 299.693	-\$ 1.089.000
	4	-\$ 329.662	-\$ 1.197.900
	5	-\$ 362.628	-\$ 1.317.690
	6	-\$ 398.891	-\$ 1.449.459
	7	-\$ 438.780	-\$ 1.594.405
	8	-\$ 482.658	-\$ 1.753.845
	9	-\$ 530.924	-\$ 1.929.230
	10	-\$ 584.016	-\$ 2.122.153

Figura 4.18: VPN Sistema Solar con aporte auxiliar v/s Sistema Actual.

De acuerdo a los cálculos realizados, el proyecto es rentable a 10 años.

4.9. Mejoras térmicas y su efecto sobre el sistema solar

A continuación se mostrará el comportamiento térmico del edificio con el sistema de colectores solares y con las mejoras térmicas.

Como se vió anteriormente, las mejoras estudiadas son:

- Incluir un aislante térmico en el exterior de los muros de 5 cm de espesor con un $k \leq 0,04[W/mK]$ como lana mineral o poliestireno expandido.

- Cambiar las ventanas tradicionales por termopaneles, que se conforman de dos vidrios con un espacio cerrado de aire intermedio.

4.9.1. Muros

Se incluye un aislante térmico de lana mineral de 5 cm de espesor.

Su efecto en el desempeño térmico del sistema es bastante importante, ésto se muestra en la siguiente figura:

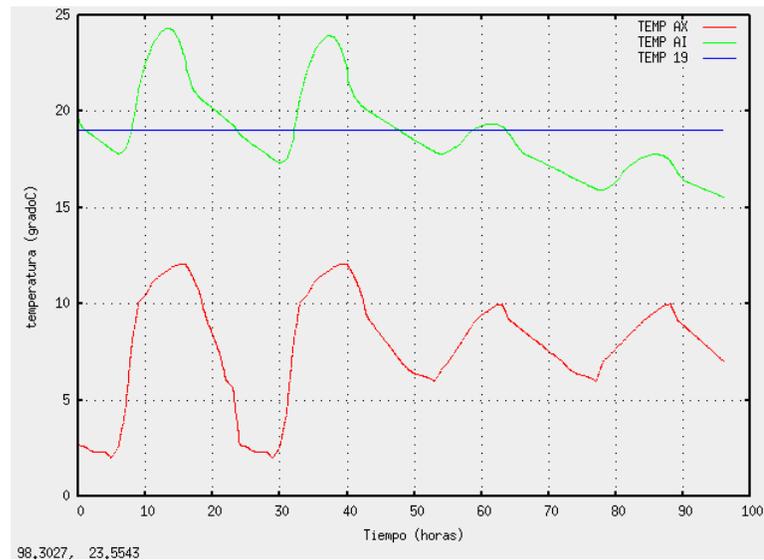


Figura 4.19: Comportamiento térmico del edificio con Sistema solar y muros aislados.

4.9.2. Ventanas

Se cambian ventanas tradicionales por termopaneles.

Su efecto en el sistema también es bastante apreciable, se muestra en la siguiente figura:

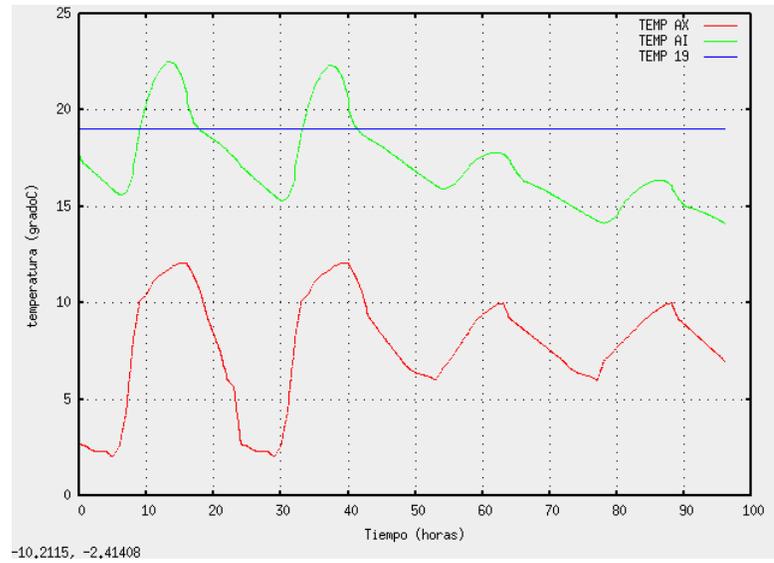


Figura 4.20: Comportamiento térmico del edificio con Sistema Solar y ventanas dobles.

4.9.3. Mejoras combinadas

Si combinamos las mejoras, es decir cambiar ventanas por termopaneles y aislar muros con 5[cm] de lana mineral o poliestireno expandido, se tiene el siguiente resultado:

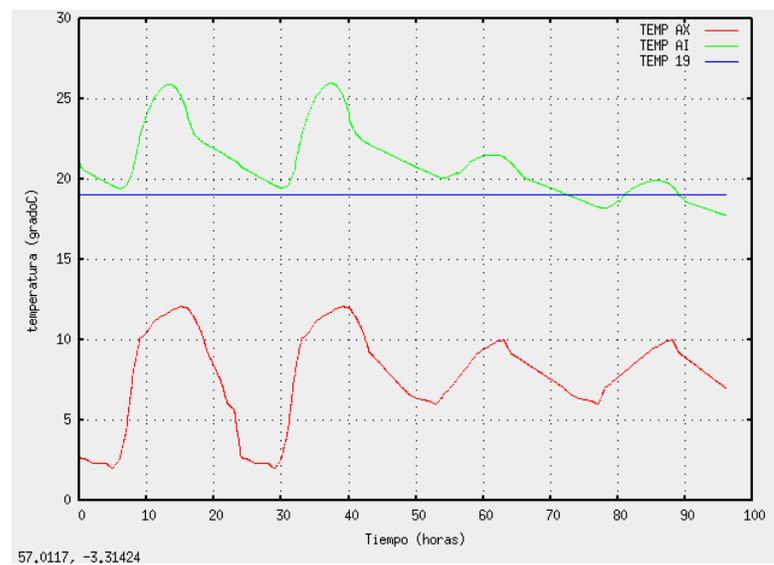


Figura 4.21: Comportamiento térmico del edificio con sistema solar, muros aislados y ventanas dobles.

Se aprecia que bajo estas condiciones de aislamiento, el Sistema de calefacción Solar es suficiente para calefaccionar el edificio en un 95 % de los días fríos, sin un sistema de aporte auxiliar.

Es notable cómo mejora el desempeño del sistema solar al mejorar las características térmicas del edificio. Dada la disposición de la energía solar, que a primera hora en la mañana es muy baja como para calefaccionar con rapidez, es fundamental disminuir las pérdidas de calor durante la noche. El principal inconveniente de implementar mejoras térmicas en un edificio es la elevada inversión que significa y lo difícil que es para las organizaciones asumir gastos que generen beneficios a largo plazo.

4.10. Evaluación económica de instalar el sistema solar junto con mejoras térmicas

En forma general se ha obtenido el Valor Presente Neto (VPN) en pesos Chilenos (CLP), de La instalación del sistema solar compuesto por $60[m^2]$ de colector solar plano para aire y $14,5[m^2]$ de muro trombe, junto con la instalación de un aislante térmico de 5cm de espesor en los muros exteriores y el reemplazo de las ventanas por termopaneles; frente a la solución actual consistente en 5 estufas a gas licuado de $3,500[W]$ c/u. Para el cálculo se han tenido las siguientes consideraciones:

- Valor actual del sistema descrito instalado: \$ 24.795.000.-
- Valor actual de 1 kg de gas licuado (GLP): \$ 1000.-
- Consumo de 1 estufa de $3,500[W]$ por 1 hora: 150[gr].
- El precio del GLP aumenta un 5 % anual.
- Se considera una tasa de descuento de un 5 % anual.
- El sistema actual funciona a plena carga durante 1200 hrs/año.

Tenemos entonces:

- Para el Sistema Solar con aporte auxiliar:

Un costo al primer año C_1 de

$$C_1 = 24,795,000.- \quad (4.11)$$

Y para los años siguientes:

$$C_i = 0.- \quad (4.12)$$

- Para el Sistema actual se tiene un costo de :

$$C_0 = 0,15[kg] \cdot 1000[1/kg] \cdot 5[estufas] \cdot 1200[h/ano] = 900,000.- \quad (4.13)$$

$$C_{i+1} = C_i \cdot 1,05 \quad (4.14)$$

Entonces el VPN es el siguiente:

	Sistema Solar + Aislamiento y termopaneles	Sistema actual
VPN	-\$ 24.795.000	-\$ 25.177.485
período [año]		
1	-\$ 24.795.000	-\$ 900.000
2	\$ 0	-\$ 990.000
3	\$ 0	-\$ 1.089.000
4	\$ 0	-\$ 1.197.900
5	\$ 0	-\$ 1.317.690
6	\$ 0	-\$ 1.449.459
7	\$ 0	-\$ 1.594.405
8	\$ 0	-\$ 1.753.845
9	\$ 0	-\$ 1.929.230
10	\$ 0	-\$ 2.122.153
11	\$ 0	-\$ 2.334.368
12	\$ 0	-\$ 2.567.805
13	\$ 0	-\$ 2.824.586
14	\$ 0	-\$ 3.107.044

Figura 4.22: VPN Sistema solar con mejoras térmicas v/s Sistema Actual.

De acuerdo a los cálculos realizados, el proyecto es rentable a 14 años.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Mejoras térmicas al edificio

- El aislamiento térmico en un edificio es fundamental para cualquier estrategia de calefacción de bajo consumo energético.
- Las mejoras térmicas al edificio, que consisten en el aislamiento de muros con 5[cm] de lana mineral o poliestireno expandido ($k \leq 0,04[W/mK]$) y el reemplazo de las ventanas tradicionales por ventanas de termopanel con un coeficiente global de transferencia de calor $U \leq 3,5[W/m^2K]$; permiten disminuir la demanda energética del edificio en un 70 %.
- El aislamiento térmico de ventanas y muros en conjunto, genera un ahorro energético comparativamente mayor que la suma de las soluciones por separado. Esto implica que para obtener un mayor beneficio por aislación térmica, se debe aislar toda la periferia, es decir muros y ventanas; y no desperdiciar grandes inversiones en una sola solución.

5.2. Sistema de calefacción solar con aporte auxiliar

Sobre una instalación de calefacción solar sin incluir aislamiento térmico del edificio o vivienda, se concluye lo siguiente:

- Un sistema de calefacción solar que no considera aislación térmica, tendrá grandes dificultades para alcanzar temperaturas de confort en las primeras horas de la mañana, y siempre deberá considerar un sistema de aporte auxiliar que lo complemente.
- Un dimensionamiento adecuado llevará sin problemas a temperaturas de confort en los días despejados, después de dos horas de radiación directa sobre los colectores, típicamente alrededor de las 10 de la mañana. Pero en días nublados y durante las noches, la temperatura caerá muy por debajo del confort térmico.

- Para edificios ocupados en horario de oficina, el sistema de aporte auxiliar no representa un gasto muy elevado ya que no funcionará en la noche, por lo que se recomiendan sistemas económicos de aporte directo, no sistemas de bomba de calor ya que su baja utilización no justifica la inversión.

5.3. Sistema de calefacción solar con mejoras térmicas

- Se ha determinado que el edificio recibe tanta energía en forma de radiación solar como para calefaccionarlo en un 95 % del invierno, sin aporte adicional de energía. Dadas las condiciones climáticas presentes en la ciudad de Santiago, es posible prescindir de un sistema de calefacción tradicional en un 95 % del invierno, esto significa cuatro días al año con una temperatura bajo los 19[°C]. Esto es posible con un sistema de captación y conducción de energía solar a su interior, y un aislamiento térmico adecuado del edificio.
- El costo de implementar un sistema de estas características en una vivienda o edificio que no tiene buena aislación térmica, es muy alto y tiene un plazo de recuperación de la inversión muy largo; por lo que es difícil que particulares y organizaciones realicen este tipo de implementaciones sin algun apoyo o incentivo adicional.
- Al desarrollar una solución así en una vivienda o edificio, la estrategia natural es primero aislar la vivienda y luego ver las necesidades térmicas para dimensionar el sistema colector solar.

Capítulo 6

Bibliografía

[1] Danilo Poklepovic Zegers. Modelación Térmica de un Refugio de Montaña con Calefacción Solar Pasiva. Memoria de Título de Ingeniero Civil Mecánico. 2004. Universidad de Chile.

[2] Dolores Alía de Saravia, Luis R. Saravia, Diego Saravia. Manual de Simusol. 2007. Facultad de Ciencias Exactas, U.N.Sa - Inenco (Instituto U.N.Sa-Conicet) - Consejo de Investigación, U.N.Sa.

[3] Joachim Göttsche, Radiación Solar. Presentación Escuela de Verano Energías Renovables Chile (EVER 2007). 2007. Solar-Institut Jülich.

[4] Página web de California Energy Commission, www.consumerenergycenter.org.

[5] Harry E. Thomason. Experience with solar houses. 1965.

[6] Trombe F., J. F. Robert, M. Cabanot, B. Sesolis. Concrete wall to collect and hold heat. Solar Age. 1977.

[7] Ken Butti, John Perlin. A Golden Thread, 2500 years of solar architecture and technology. 1980.

[8] Ashrae. Handbook of fundamentals. 1977. New York.

[9] McQuiston, Parker, Spitler. Climatización, ventilación y aire acondicionado. 2001.

[10] www.weather.com