

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

**VALORACIÓN DE LA RESPUESTA TÉRMICA
EN EDIFICIOS: LA REPERCUSIÓN
DINÁMICA DE LA ENVOLVENTE**

Tesis presentada por:

HASSAN ARHAM

Para obtener el título de:

Doctor de la Universidad Politécnica de Cataluña.

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona
Departamento de Construcciones Arquitectónicas I**

Barcelona, 21 de septiembre de 2005.

Dirigida por:
Dr. Antoni Isalgué.

Tutor:
Dr. Rafael Serra Florensa.

Índice general

Índice general -----	3
Introducción general -----	8
I Modelos dinámicos en los edificios -----	14
I.1 Flujos de energía en los edificios -----	18
I.2 La ruta de los flujos energéticos y los efectos causales -----	20
I.2.1 Transferencia de calor por conducción -----	20
<i>I.2.2 Transferencia de calor por convección</i> -----	22
I.2.3 Intercambio de radiación de las superficies interiores de longitud de onda larga -----	23
I.2.4 Intercambio de radiación de las superficies exteriores de longitud de onda larga -----	23
I.2.5 Radiación de longitud de onda corta -----	24
I.2.6 Sombreado e insolación -----	24
I.2.7 Ventilación -----	25
I.2.8 Ganancias interiores -----	26
I.2.9 Sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC)-----	27
I.3 Métodos dinámicos para el análisis térmico en edificios -----	28
I.3.1 Red eléctrica equivalente. -----	28
I.3.2 Técnica de transformada de Fourier finita y compleja (CFFT)-----	31
I.3.3 Aplicación de una red neuronal artificial para modelar la térmica dinámica del espacio de un edificio y su sistema calorífico. -----	34
I.3.3.1 Estructura de la red -----	36
I.3.4 Ecuaciones diferenciales. -----	36
I.3.5 Modelos ARMA. -----	36
I.4 El análisis frecuencial -----	39
I.4.1 Introducción -----	39
I.5 Obtención de la Función de Transferencia -----	41
I.5.1 Aplicación -----	46
II. Valoración de la respuesta dinámica interior de la primera vivienda -----	50
II.1 Introducción -----	52
II.2 Características constructivas del edificio de mediciones: -----	55
II.3 Condición de protección persianas cerradas -----	56
II.3.1 Análisis en el dominio temporal -----	56
II.3.1.1 La respuesta interior en la temporada de invierno: -----	56
II.3.1.2 La respuesta interior para la temporada de verano-----	59
II.3.1.3 La respuesta interior para la época de primavera -----	61

II.3.2	Análisis en el campo de frecuencias: -----	65
II.3.2.1	Relación existente entre la frecuencia y la amplitud de las - oscilaciones interiores de temperatura -----	65
II.3.2.2	La respuesta térmica interior en invierno -----	67
II.3.2.3	La respuesta térmica interior en verano -----	69
II.3.2.4	La respuesta térmica interior en primavera -----	70
II.3.2.5	Comparación de las respuestas de verano, invierno y primavera ----	71
II.4	Condición de protección persianas abiertas -----	75
II.4.1	Respuesta de invierno -----	75
II.4.2	Respuesta de primavera -----	81
II.4.3	Comparación de la respuesta interior para diferentes estaciones -----	82
II.5	La distribución espacial de la respuesta interior-----	83
II.5.1	Ausencia de la radiación solar directa -----	85
II.5.1.1	<i>La respuesta interior para distintas estaciones del año-----</i>	<i>85</i>
II.5.2	Respuesta interior para distintas estaciones del año y para cada rango de frecuencia -----	90
II.5.2.1	La respuesta interior en las frecuencias medias -----	90
II.5.2.2	La respuesta interior en altas frecuencias-----	91
II.5.3	Persianas abiertas, presencia de la radiación solar -----	92
II.5.3.1	La respuesta interior para distintas estaciones del año -----	92
II.5.4	Respuesta interior para distintas estaciones del año y para cada rango de frecuencia -----	97
II.5.4.1	<i>Las características de la respuesta interior en las frecuencias medias-----</i>	<i>97</i>
II.5.4.2	<i>Las características de la respuesta interior en las altas frecuencias -----</i>	<i>97</i>
II.5.5	Comparación de las ganancias para ambas condiciones de protección -	98
II.5.5.1	<i>Estación de invierno -----</i>	<i>98</i>
II.5.5.2	<i>Estación de primavera-----</i>	<i>101</i>
II.5.5.3	<i>Comparación de las oscilaciones para cada rango de frecuencias en separado ---</i>	<i>102</i>
II.5.6	Análisis de diferentes tipos de la excitación exterior -----	105
II.5.6.1	<i>La respuesta interior para un día nublado con persianas cerradas (estación intermedia) -----</i>	<i>106</i>
II.5.6.2	<i>La respuesta interior para un día nublado con persianas abiertas (estación de invierno)-----</i>	<i>109</i>
II.5.6.3	<i>La respuesta interior para un día soleado con persianas cerradas (invierno)---</i>	<i>110</i>
II.5.6.4	<i>La respuesta interior para un día soleado con las persianas cerradas (verano) --</i>	<i>112</i>
II.5.7	Relación entre la distribución espacial de la radiación solar y la respuesta interior -----	114
II.5.7.1	<i>Introducción-----</i>	<i>114</i>
II.5.7.2	<i>La forma, orientación y distribución -----</i>	<i>115</i>
II.5.7.3	<i>Comparación entre distintos tipos de protección-----</i>	<i>116</i>
III.	Valoración de la respuesta dinámica de la segunda vivienda-----	122

III.1 Introducción	124
III.2 Colocación de los puntos de medición	127
III.3 Análisis y resultados	128
III.3.1 Respuesta interior con persianas abiertas	128
<i>III.3.1.1 La constante de tiempo del muro</i>	131
III.3.2 Respuesta interior con persianas cerradas	134
III.3.3 Respuesta interior para los días nublados	138
IV. Modelización numérica	144
IV.1 Introducción	146
IV.2 Estado de arte	148
IV.2.1 ARCHISUN	148
IV.2.2 SIMEDIF	151
IV.2.3 programas de AEF	152
IV.2.4 Los modelos de simulación térmica en edificios.	153
IV.3 Breve descripción del método de cálculo	155
IV.4 Aplicaciones	160
IV.4.1 Primera aplicación	161
<i>IV.4.1.1 Presencia de la radiación solar directa</i>	162
<i>IV.4.1.2 Ausencia de la radiación solar directa</i>	174
IV.4.2 Segunda aplicación	184
<i>IV.4.1.1 Presencia de la radiación solar directa</i>	185
<i>IV.4.1.2 Ausencia de la radiación solar directa</i>	192
<i>IV.4.1.3 Respuesta interior para días nublados</i>	195
V. Sensibilidad de la respuesta interior a los parámetros del modelo numérico	198
V.1 Introducción	200
V.2 Consideraciones generales	202
V.2.1 Capacidad calorífica y espesor de los muros	202
V.2.1 Color de las paredes exteriores	203
V.2.3 Orientación y sus efectos sobre los ambientes interiores	203
V.2.4 Ventanas	204
V.3 Aplicaciones	206
V.3.1 Vivienda con gran abertura vidriada al sur	206
V.3.2 Sensibilidad de la respuesta interior a los cambios: Presencia de la radiación solar	207
<i>V.3.2.1 Respuesta interior al multiplicar la inercia interior y de la piel por dos</i>	208
<i>V.3.2.2 Respuesta interior al dividir la inercia interior y de la piel por dos</i>	210
<i>V.3.2.3 Dividir la inercia por dos y reducir el tamaño de las ventanas a la mitad</i>	212
<i>V.3.2.4 Multiplicar la inercia por dos y dividir el tamaño de las ventanas por dos</i>	214
<i>V.3.2.5 Conservar la misma inercia y dividir el tamaño de las ventanas por dos</i>	217

<i>V.3.2.7 Multiplicar la inercia por dos y sin radiación solar directa</i> -----	220
<i>V.3.2.8 Dividir la inercia por dos y sin radiación solar directa</i> -----	222
<i>V.3.2.9 Dividir la inercia y el tamaño de las ventanas por dos con orientación norte</i> --	224
<i>V.3.2.10 Multiplicar la inercia por dos, dividir el tamaño de las ventanas por dos con orientación norte</i> -----	226
V.3.3 Sensibilidad de la respuesta interior a los cambios: Ausencia de la radiación solar -----	228
<i>V.3.3.1 Respuesta para doble inercia y para mitad inercia</i> -----	230
<i>V.3.3.2 Respuesta interior cuando reducimos la ventilación a la mitad y cuando la aumentamos al doble</i> -----	232
V.3.4 Vivienda con galería al sur -----	236
<i>V.3.4.1 Respuesta interior cuando duplicando la inercia y cuando la reducimos a la mitad</i> -----	239
<i>V.3.4.2 Respuesta interior cuando duplicamos el tamaño de las ventanas y cuando lo reducimos a la mitad</i> -----	241
<i>V.3.4.3 Respuesta interior para mitad inercia-mitad ventana y mitad inercia-doble ventana</i> -----	244
<i>V.3.4.4 Respuesta interior para doble inercia-doble ventana y doble inercia-mitad ventana</i> -----	246
<i>V.3.4.5 Respuesta interior si duplicamos la proporción de ventilación y cuando la disminuimos a la mitad</i> -----	248
<i>V.3.4.6 Respuesta interior para doble-inercia-doble ventilación y para doble-inercia-mitad-ventana-doble ventilación</i> -----	249
<i>V.3.4.7 Respuesta interior para mitad-inercia-mitad-ventana-mitad ventilación y para mitad-inercia-doble-ventana-doble ventilación</i> -----	251
VI.Conclusiones -----	256
Anexo 1 -----	266
Anexo 2 -----	278
Anexo 3 -----	286
Bibliografía -----	290

Introducción general

Existe una larga tradición de investigación y desarrollo en la construcción inteligente de los edificios, es decir, desde nuestros orígenes el hombre siempre ha procurado protegerse de las variaciones ambientales exteriores. Ello comienza cuando se origina la necesidad de protegerse en refugios específicos de los distintos elementos como son, el frío, la lluvia, el viento, los animales, etc. Con el tiempo estos refugios se irán mejorando y perfeccionando con mejoras en el diseño y materiales y pensando siempre en la comodidad, teniendo en cuenta el aprovechamiento de las energías naturales.

Desde entonces y hasta la fecha, el hombre sigue perfeccionando estos lugares construyendo espacios más amplios y pensando aún más en su comodidad y seguridad.

En el siglo XX, con la expansión de energías fósiles, los edificios han sido cada vez más modernos y presentando un gran confort térmico a los usuarios, utilizando las fuentes de energías activas como es la calefacción y la refrigeración.

La crisis energética ha afectado a cualquier parcela de la actividad humana, incluyendo la arquitectura y el urbanismo. Ello está dando lugar a la crisis de ciertas concepciones arquitectónicas contemporáneas (principalmente de algunas que provienen del movimiento moderno) configuradas en su mayor parte en el seno de los países altamente industrializados con modelos económicos altamente expansivos, basados en concepciones irrealistas de *energía infinita* hoy en vías de caducidad.

La cruda realidad actual, sin embargo, está demostrando la imposibilidad de un crecimiento sin límites y no es de extrañar que ello haya planteado la necesidad de buscar modelos de bajo consumo energético. Parece pues, necesaria una nueva lectura y versión de la arquitectura contemporánea ya que sus soluciones formales han sido en su mayoría ajenas al problema energético. Esta lectura crítica permitirá desarrollar una metodología de análisis más científica. De este enfoque energético, que contribuirá a mejorar y racionalizar el diseño arquitectónico, surgirá una nueva concepción que podríamos denominar: *arquitectura de bajo consumo energético*. Arquitectura que deberá adaptarse al clima y aprovechar las energías naturales.

La envolvente de los edificios es el lugar por donde se produce el mayor flujo energético entre el interior y el exterior. En el presente trabajo se pretende tener en cuenta las variaciones térmicas dinámicas que se producen en el interior del edificio, principalmente las debidas a los flujos que se producen a través de la piel teniendo en cuenta los distintos mecanismos que conceden variabilidad en el tiempo y el espacio.

Debido a una sensibilidad social cada vez mayor hacia la importancia del desarrollo sostenible y la necesidad de reducir la polución debida a los gases nocivos (CO₂), de nuevo la piel de los edificios está en el enfoque de investigaciones. Básicamente este enfoque viene de que la envolvente protege el ambiente interior del ambiente exterior. En el presente estado del conocimiento, nuevos acercamientos en la mejora de la función de la piel son importantes, donde una de las principales preguntas es: ¿Podemos realizar eso exclusivamente a partir del conocimiento existente? Y de allí ¿qué tipo de investigación y desarrollo es necesario extender desde el conocimiento existente para el diseño de la envolvente?

En este sentido, se han llevado a cabo diversos estudios e investigaciones, “la envolvente del edificio es parte del conjunto: Reconsideración de las aproximaciones tradicionales”. El estudio describe las consideraciones, la metodología del acercamiento y entra intensamente en los productos que están disponibles de esta investigación. Así mismo existe mucha dedicación en el campo de aplicación práctica [1].

Ya desde los años 60 del pasado siglo, una inmensa cantidad de investigaciones ha sido efectuada para desarrollar estrategias e instrumentos (incluidos los software) para posibilitar la valoración del funcionamiento relacionado con la calidad de los edificios tal como el ambiente térmico interior, el uso de la energía, la luz natural, exposición al sol, aislamiento acústico, etc. Estos medios son desarrollados desde varios puntos de vista que por supuesto están relacionado con ilustraciones específicas y complicadas. En varios casos, estas herramientas son solamente aplicadas cuando se conoce todo acerca del edificio.

El objetivo principal es desarrollar una metodología para todas las consideraciones de diferentes aspectos que determinan la calidad del edificio, con el principal enfoque en la envolvente.

Dudas:

Así pues, en la preparación del proyecto, la discusión que puede surgir es cómo encontrar y determinar la falta de la información sobre la pauta de la respuesta térmica dinámica en el interior del edificio, y hasta qué nivel afecta la tipología del edificio, la condición de protección de la envolvente (por ejemplo, los toldos y las persianas), la distribución espacial de la inercia interior sobre esa respuesta dinámica?

Hipótesis:

En la presente investigación se analiza la relación de la evolución de los parámetros ambientales interiores de los edificios respecto a la evolución exterior de un punto de vista dinámico.

La hipótesis a seguir para el análisis es, en primera etapa, efectuar mediciones de variables ambientales en diversas tipologías de edificios. Estas mediciones se hacen bajo condiciones dadas en la protección de la envolvente (la fachada principal). La intención es encontrar una relación entre las condiciones de protección de la envolvente, la tipología del edificio y la respuesta dinámica que se genera a causa de la combinación de ambas particularidades (tipología y la protección). En segundo lugar se utilizará un modelo de ecuaciones para la determinación de la evolución de la temperatura interior, con el fin de evitar las molestias debidas a la dificultad de efectuar las mediciones *in situ*.

Se sigue una metodología de evaluación total de los parámetros exteriores que más influyen sobre la respuesta térmica interior del edificio utilizando como variables de entrada, la radiación solar, la temperatura exterior y la ventilación, y como variables de salida, la evolución de la temperatura interior y en algunos casos de la cantidad de la luz.

En este trabajo se analizarán dos tipos de viviendas aproximadamente de la misma orientación pero de características constructivas diferentes.

El primer piso es original de una gran obertura vidriada al sur, la cual le permite una amplia captación solar, no obstante unas pérdidas efectivas considerables durante las horas de sombra.

El segundo piso es característico de una galería al sur y una inercia térmica interior concentrada básicamente en el muro de separación galería-interior, lo cual le permite un gran almacenamiento de calor.

Los objetivos principales de esta investigación son:

- Identificar pautas y desarrollar herramientas para optimizar el consumo energético en los edificios y a la vez conseguir unas condiciones interiores de confort propias para los climas mediterráneos.
- Desarrollar una metodología donde la envolvente es considerada dentro de su contexto como una protección al progreso de las variables dinámicas exteriores. Esa protección provoca una amortiguación en las variables ambientales interiores. Esta sistemática permitirá cambiar el elemento o los elementos adecuados en la envolvente del edificio para una mejora en las condiciones térmicas dinámicas interiores.
- Hallar huecos de conocimientos a partir de la aproximación hecha en edificios reales y adaptarlos a otros proyectos.
- Experimentar la metodología en práctica, y evaluar los resultados.
- Extraer información de las mediciones de variables ambientales de edificios reales, para llegar a una conclusión sobre su comportamiento térmico, que se pueda aplicar a otros edificios. Esto servirá de guía para una serie de modelos de diseño y control térmico.

Contenido:

Se estudian dos casos de comportamiento térmico para poner de manifiesto una serie de cosas, y se formula un modelo relativamente sencillo para simular fácilmente, y se hacen unos principios de análisis de sensibilidad.

En cuanto al contenido, hemos agrupado el trabajo en cinco capítulos.

El primer capítulo contiene el desarrollo teórico de las herramientas utilizadas en el análisis, los conceptos básicos de la transferencia de calor en edificios, y una descripción del edificio como un sistema dinámico.

En los capítulos 2 y 3 se detallan los diferentes casos de viviendas. Se analizan las mediciones efectuadas bajo condiciones dadas en la protección de la fachada principal, y se comparan los diferentes resultados. Asimismo el significado de las deducciones conseguidas. La comparación entre los dos prototipos de viviendas nos conduce a conclusiones muy importantes a la hora de valorar la tipología del edificio frente a su respuesta térmica interior.

En el capítulo 4 se explica el modelo numérico utilizado, y se hacen las comparaciones con los resultados obtenidos de forma experimental.

En el capítulo 5 se analiza la sensibilidad de la respuesta térmica dinámica interior frente a los posibles cambios en las características constructivas del edificio. Se utiliza el modelo numérico para este análisis.

Al final del trabajo se resumen las conclusiones sacadas de cada capítulo.

I Modelos dinámicos en los edificios

A fin de entender cómo funciona térmicamente un edificio, podemos analizarlo y estudiar sus diversas funciones energéticas generales. La transferencia de calor en los edificios se produce de una forma no-lineal, es decir que los intercambios de calor entre el edificio y su entorno no siguen una ley uniforme sino que depende de muchos factores (el edificio no pierde el calor de la misma forma que lo gana). Casi todos los componentes y los materiales del edificio tienen más de una función térmica. Estas funciones son muy interdependientes, por ejemplo las ventanas abiertas permiten una transferencia de calor a través del flujo de aire generado entre el exterior y el interior del edificio, pero aunque estas ventanas estén cerradas, sigue habiendo un flujo de calor, con otras características (la transmisión y la radiación). Por lo tanto, pocas funciones del edificio pueden aislarse de las demás.

Un edificio tiene su propio microclima, delicado equilibrio interno de mecanismos conectados. Así pues, el análisis térmico en edificios corre siempre el riesgo de dejar de lado u oscurecer algunas relaciones entre las distintas funciones del edificio y de dar una visión demasiado simple de cómo funciona térmicamente un edificio. Los investigadores intentan encontrar y estudiar la conexión entre estas relaciones y así facilitar la lógica del funcionamiento.

Cada material empleado en la construcción de un edificio tiene su propio tipo de propiedades físicas en cuanto al aporte de calor. Una parte importante del trabajo de un arquitecto es elegir y combinar los materiales de construcción de modo que den como resultado un edificio cuyo recinto cumpla lo mejor posible su función del control del clima, dejando el menor trabajo a los sistemas, consumidores de energía, de calefacción y refrigeración, y produciendo la máxima comodidad a los ocupantes.

En los edificios distinguimos tres mecanismos básicos capaces de transportar el calor:

- 1) *La radiación* es un traslado de calor mediante la propagación, en línea recta, de ondas electromagnéticas a través del espacio o del aire desde un objeto caliente a otro menos calientes. Todos los objetos emiten calor bajo la forma de una radiación electromagnética infrarroja, y todos reciben radiación de los objetos que los rodean. Distinguimos dos tipos de radiación termal en edificios: la radiación emitida por el sol a temperaturas muy altas (con una longitud de onda relativamente corta) y la radiación de fuentes terrestres, emitida a una temperatura mucho más baja (de larga longitud de onda).

- 2) *La convección* es un traslado de calor por medio de una corriente móvil de aire o agua.
- 3) *La conducción* es una corriente de calor a través de un material sólido. La resistencia de un material a la conducción de calor es una medida de su valor aislante.

Para entender mejor el proceso y el balance térmico en los edificios, explicaremos al principio de este capítulo los diferentes modos de transferencia de calor en los edificios, las rutas de los flujos de calor y los balances energéticos. Después, citaremos los diversos modelos dinámicos de la transferencia de calor y las diferencias existentes entre unos y otros. Algunos son muy aplicables en la arquitectura, otros son más específicos y muy precisos para las aplicaciones microscópicas pero pierden significado cuando se trata de aplicaciones macroscópicas como la determinación de la temperatura en los edificios. Y al final explicaremos la metodología a seguir a lo largo de esta tesis y la herramienta utilizada para la determinación de los balances térmicos existentes entre el edificio y su entorno.

I.1 Flujos de energía en los edificios

Reflexionando sobre la figura 1, la cual muestra la ruta de los flujos encontrados dentro y fuera de los edificios, la interacción de estos flujos se hace de una forma dinámica cuyo control nos permitirá detectar el nivel de confort térmico y las demandas de energía.

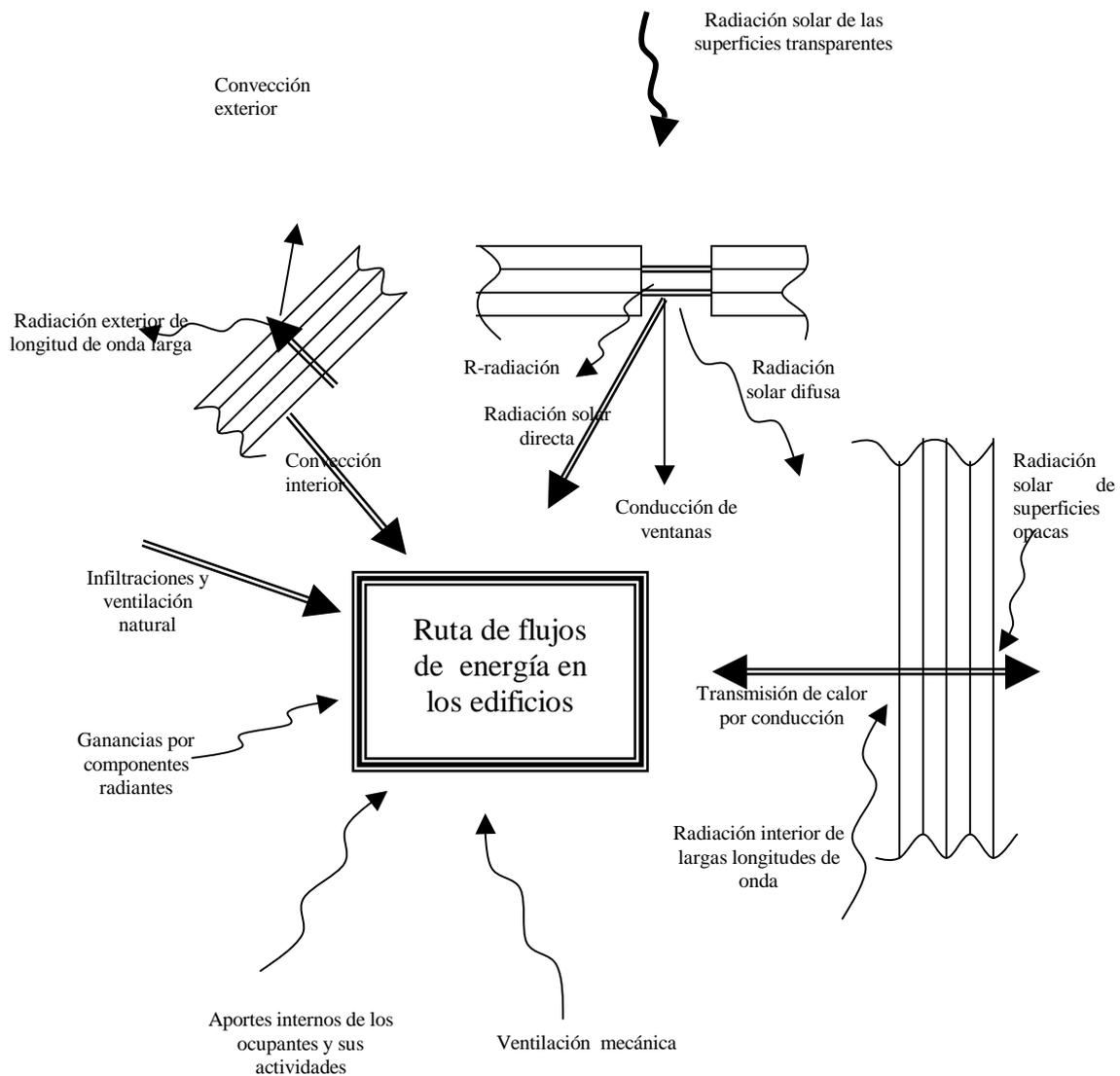


Figura 1: Rutas de los flujos de calor en el edificio

Para entender mejor la aproximación de la figura 1, es aconsejable visualizar un sistema tal como la red eléctrica con resistencias dependientes del tiempo y capacidades sujetadas a los

deferentes potenciales. El flujo restante de cada red eléctrica parcial representa el flujo de calor entre los dos lados del edificio.

Los elementos de construcción, el contenido de las habitaciones, los sistemas vidriados, los dispositivos de energía renovables etc., pueden ser tratados como una red nodal que es caracterizada por capacitancias donde la conexión de los nodos intermedios es caracterizada con conductancias. Los nodos poseen “variables de estado” como la temperatura y la presión (análogo a voltaje).

Dado que los nodos tienen diferentes capacitancias, las proporciones son diferentes de un nodo a otro, es decir que los aportes del nodo anterior ($i - 1$) es distinta del nodo posterior ($i + 1$) y eso es igual para la acumulación como para la disipación de energía. Esta distribución es un comportamiento dinámico, junto a la naturaleza de cada flujo parcialmente y los parámetros de la red equivalente que representan la complejidad del modelo del edificio. La resolución del modelo (que es el número de los nodos) es una función de los objetivos del análisis.

Manifiestamente, un plan de primera aproximación en la estimación de las temperaturas del verano requerirá un nivel más bajo de discretización que un estudio detallado de la ventilación interior [2], es decir que la temperatura interior de verano varía poco entre el nodo i y el nodo $i + 1$, mientras que la ventilación lo hace de una forma más complicada y se requiere una aproximación aun más centrada entre los dos nodos consecutivos.

Es posible usar una simulación en primera etapa para determinar la mejor combinación entre el diseño y el esquema de construcción para proporcionar las variaciones del ambiente exterior, y así minimizar las necesidades del consumo de energía a través de un control activo. La evolución de la temperatura interior es el resultado de múltiples fenómenos de transferencia de calor que interactúan entre el exterior del edificio y el interior, sin descartar el factor humano que es determinante a la hora de hacer un balance de las causas que entran en las evoluciones dinámicas de la temperatura interior.

Dicho de otro modo, si el sistema en sí es complejo a causa de las variaciones imprevistas en los parámetros ambientales exteriores, lo es aún más si añadimos a esto el administrador “usuario” y sus actividades en el edificio. Por ello la resolución del problema dinámico en los edificios es mucho más compleja que resolver por ejemplo la simulación térmica dinámica de un lago donde la temperatura del ambiente es homogénea [3].

I.2 La ruta de los flujos energéticos y los efectos causales

A continuación se dará una breve descripción de los mecanismos de transferencia de calor y de masa, y los factores que les dan lugar.

I.2.1 Transferencia de calor por conducción

La resistencia de un material a la conducción de calor es una medida de valor de su poder aislante. La velocidad con la cual un edificio gana o pierde calor en cualquier parte de su recinto en unas condiciones estables de temperatura interna y externa, es directamente proporcional a la diferencia, a la temperatura del aire, entre el exterior y el interior, e inversamente proporcional a la resistencia térmica total de esta parte del recinto.

La conducción de calor es el proceso con el cual una fluctuación de un flujo de calor en una frontera de una superficie de un material sólido encuentra su camino hacia la otra frontera, disminuyendo en magnitud y atrasándose en el tiempo debido a la inercia térmica del material.

Dentro de la pared del edificio, la transferencia de calor por conducción es función de la temperatura y de los flujos de calor en las dos partes externas de la pared, de la posible generación de calor dentro de la pared, de la temperatura y la humedad relativa y de las propiedades termodinámicas de cada material que constituye esa pared, y la posición relativa de los materiales. Con las excitaciones de los parámetros ambientales exteriores declarados como datos conocidos a través de centros meteorológicos, el objetivo es determinar la distribución de la temperatura y la humedad relativa, y por lo tanto, las variaciones dinámicas del flujo de calor en las dos caras de la pared. En muchas ocasiones, es importante considerar el flujo de calor en más de una dirección, por ejemplo en los casos donde se prevén puentes térmicos o bien donde las esquinas son relativamente importantes respecto al área del muro.

Las propiedades termo-físicas de los materiales incluyen la conductividad, k [$\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$], la densidad, ρ [kg m^{-3}], y la capacidad calorífica, C [$\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$]. Estas propiedades son dependientes del tiempo debido a las fluctuaciones de la temperatura y la humedad relativa de los materiales, y también dependen (en algunos casos) de la posición y la dirección si el

material no es homogéneo o anisótropo respectivamente [3]. En algunas aplicaciones, semejantes dependencias son ignoradas y las propiedades termo-físicas son constantes.

Dichas propiedades pueden ser combinadas para proporcionar un simple índice que será utilizado en la primera etapa de diseño para distinguir el rendimiento de los materiales de construcción. La transmisión térmica global U [$\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$], es dada por:

$$U = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{x_i}{k_i} + R_{si} + R_{so} + R_c}$$

donde N es el número total de las capas de la construcción, x_i es el espesor de cada capa i [m], R es la combinación de la resistencia radiante y conductiva [$\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$] y los subíndices si , so , y c indican las superficies interiores, exteriores y intermedia respectivamente.

Tradicionalmente, los investigadores han confiado en estos conceptos simples de estudios para evaluar las características de pérdida de calor en la piel del edificio. Como ejemplo, si el aislamiento térmico se encuentra en la parte de la superficie que da al interior del edificio, entonces cualquier radiación solar directa penetrando a través de las ventanas no será absorbida por los muros ya que el aislante actúa como una barrera al calor.

En cambio, la energía solar causará un aumento en la temperatura de la superficie que, a su vez, causará un aumento en la proporción de la ventilación natural a causa de la agitación térmica. Y por consiguiente, es probable que una penetración de una considerable energía solar aumenta el calor interior si no se produce una refrigeración. Al contrario, si el aislamiento se coloca en la parte externa de la pared, con la capacidad calorífica de los materiales que forma la piel expuesta al interior, entonces las ganancias de calor de las superficies interior por la radiación solar pueden ser almacenadas.

Con un diseño correcto, esta energía almacenada puede ser más tarde controlada de una forma pasiva (preferiblemente que de una forma mecánica) para minimizar las necesidades de calefacción y evitar el recalentamiento. Por otra parte, la capacidad térmica interior puede dar lugar a una elevada demanda energética debido a la alta proporción inicial de la

transferencia de energía para calentar los muros interiores. Con la siguiente operación, la capacidad puede ayudar a minimizar los picos y maximizar las demandas energéticas en planta. Esto, a su vez, dará un ambiente estable amortiguando y absorbiendo las excitaciones provenientes del exterior. En resumen, la transferencia de calor por conducción, es un proceso que evoluciona de una forma dinámica, siguiendo las fluctuaciones de los diversos parámetros ambientales exteriores y interiores. Podemos decir que la transferencia de calor por conducción es un transcurso complejo debido a la variabilidad de las fuentes de excitación exterior. Muchos estudios se han llevado a cabo. Un grupo de investigaciones han estudiado la transferencia de calor a través de un muro de múltiples capas[4].

I.2.2 Transferencia de calor por convección

Este es el proceso con el que los flujos de calor son intercambiados entre una superficie (opaca o transparente) y el aire adyacente a la misma. En la edificación es muy usual separar entre los procesos de convección sucedidos en el interior y el exterior. En el caso anterior, frecuentemente la convección es considerada como una fuerza ya que con las superficies internas, el movimiento de aire natural y/o forzado puede ocurrir dependiendo del diseño interior y de la localización mecánica del equipo (localización de las aberturas).

El aire posee una capacidad térmica baja, y por consiguiente cuando un edificio no esté ventilado, la temperatura del aire interior alcanza la temperatura superficial de los muros interiores y oscila en relación a la temperatura superficial exterior media. Las relaciones de las oscilaciones de las temperaturas medias interiores y exteriores dependen en una gran parte del color de las superficies exteriores [5]. Cuando más oscuro es el color de las superficies exteriores, más absorción y por lo tanto más transferencia de calor hacia el interior y más agitación térmica entre las superficies interiores y el aire adyacente a ellas. La convección natural depende del gradiente de temperatura entre las temperaturas del aire y la temperatura radiante de las paredes.

La convección forzada es función de la dirección de los flujos de aire. Típicamente, para las superficies exteriores, la velocidad y la dirección del viento son disponibles para algunas alturas y existen técnicas para estimar la proporción de la convección forzada utilizando métodos numéricos usando las técnicas de elementos finitos y las condiciones de capas límites [5].

1.2.3 Intercambio de radiación de las superficies interiores de longitud de onda larga

En varios métodos simplificados, los coeficientes superficiales de transferencia de calor son tratados como una combinación entre la convección y la radiación de largas longitudes de onda a pesar de que los valores utilizados son a menudo dudosos [2]. En realidad, los dos procesos son relacionados por el hecho que ambos pueden aumentar o disminuir los valores de la temperatura superficial de la pared.

La radiación de longitud de onda larga de las superficies interiores esta relacionada con la temperatura superficial, la emisividad superficial, el ángulo sólido con el cual se ve la superficie (el factor de vista), y de la naturaleza de la superficie reflectante (difusa, especular o mixta). La dirección de los flujos tenderá a establecer un equilibrio en la temperatura superficial con la refrigeración de las superficies calientes y el calentamiento de las superficies frías. Se crea un importante flujo de intercambio cuando se trata de dos superficies opuestas (una caliente y otra fría) como, por ejemplo, en el interior, cuando una superficie recibe la radiación solar directa y la intercambia con una superficie que esta en la sombra. Una medida a seguir para aumentar la captación es agregar superficies vidriadas que incorporan una capa de baja emisividad. Esto aumenta las reflexiones de los flujos de calor de longitud de onda larga y por lo tanto actúa como una barrera que impide la pérdida de calor hacia el exterior.

1.2.4 Intercambio de radiación de las superficies exteriores de longitud de onda larga

El intercambio de energía a través de la radiación de larga longitud de onda entre las superficies exteriores (opacas y transparentes) y la bóveda celeste, los edificios circundantes y la tierra puede resultar muy importante, especialmente durante las noches de un cielo despejado. Ese intercambio puede causar un descenso en la temperatura superficial exterior a nivel bajo cero grado centígrado, especialmente con las superficies del tejado y puede ser crítico en el caso de edificación con bajo nivel de aislamiento térmico. En cambio, en algunos casos, el flujo recibido puede ser una ganancia más en el balance energético global, aunque en muchas condiciones la irradiación sirve para la refrigeración nocturna.

Un tratamiento adecuado de estos flujos de calor requiere una habilidad en la estimación de varios factores: temperatura eficaz del cielo en función de predominante y tipo de nubes; la temperatura de los edificios circundantes, la temperatura del suelo en función de las condiciones del terreno, la temperatura ambiental exterior, el efecto del calentamiento de las superficies por cualquier rayo de sol y el factor de forma para acoplar geoméricamente la superficie con las tres porciones “bóveda celeste, la tierra y los edificios circundantes”.

1.2.5 Radiación de longitud de onda corta

En muchos edificios, las ganancias de energía a través de la radiación solar directa constituyen una significativa porción significativa de la energía total. Básicamente, en la simulación energética en los edificios, las ganancias solares dependen mucho de la latitud, la ubicación, la forma, los sistemas de captación, la orientación y la estación del año.

En el caso de las superficies transparentes, una parte de la radiación solar incidente sobre el lado externo del cristal es reflejada y otra parte es transmitida. Dentro de las capas del cristal algunas reflexiones tienen lugar y una porción de energía es absorbida por el cristal aumentando de esta forma su temperatura. Este aumento de temperatura aumentará el proceso de la transferencia de calor por conducción y por consiguiente, ayuda a establecer las temperaturas de los dos lados exterior e interior del cristal el cual, a su vez, impulsará la convección y la radiación de larga longitud de onda.

El componente de la parte transmitida de la radiación incidente cae (sin retraso en el tiempo) sobre algunas superficies interiores, la cual se comporta de la misma forma que las superficies exteriores del edificio: reflexión/ absorción de las superficies opacas, reflexión/ absorción y transmisión de las superficies transparentes (hacia otras superficies interiores o al exterior) donde el calor absorbido es luego disipado con retraso.

1.2.6 Sombreado e insolación

Estos factores controlan la magnitud y el punto de aplicación de la energía solar y de esta forma dictan la exactitud global de cualquier algoritmo del proceso solar. Es muy habitual de suponer que el sombreado de la fachada causado por obstrucciones (tales como los edificios y los árboles) reduce la magnitud de insolación directa, dejando paso únicamente a la radiación difusa. Al contrario, el sombreado causado por las obstrucciones de la fachada (como los toldos, marquesinas, etc.) depende del ángulo eficaz que forma el sol con el

objeto en cuestión y no reduce mucho la magnitud de la insolación (la fachada sigue recibiendo calor en las partes opacas que se absorbe por las paredes y transmite al interior por la conducción).

En cualquier punto cuando la radiación solar penetra directamente a través de las aberturas vidriadas será asociada con una o más superficies interiores, dependiendo de la latitud del sol y de la geometría del edificio. Las superficies de captación pueden ser opacas, ventanas en otras paredes (conectando la zona con otra zona o dando a un ambiente exterior), muebles, superficies especiales (como sensores o placas solares), ocupantes, etc.

1.2.7 Ventilación

En los edificios, existen tres tipos de ventilación: infiltración, flujos de aire cruzados y la ventilación mecánica. Estos flujos producen una subida en los intercambios de calor.

La infiltración es el nombre que se da a las fugas de aire desde el exterior y pueden ser consideradas de dos tipos: un forzoso movimiento de aire a través de los escapes tal como las pequeñas rendijas alrededor de las ventanas y las puertas y a través de las paredes mismas; y la penetración de aire intencionado a través de las oberturas (ventanas, conductos de ventilación etc.) frecuentemente denominada ventilación natural.

Los flujos de aire cruzados, como en el caso de la infiltración, son causados por las variaciones en la presión y por las fuerzas resultantes de las diferencias de la densidad de aire causada por el gradiente de la temperatura entre varias zonas.

La ventilación mecánica es la fuente de aire calculada para satisfacer la renovación de aire requerida y, quizá, calentar o enfriar el espacio.

Un estudio estadístico demuestra que los usuarios prefieren la ventilación natural controlada [6].

Muchos estudios son llevados a cabo en cada uno de los tipos de ventilación mencionados: La recién llegada de los ordenadores y otros equipamientos en las oficinas ha aumentado las ganancias térmicas interiores. Las grandes fachadas vidriadas en su mayoría con pocas sombras son más comunes en la arquitectura moderna. Esto junto a las ganancias térmicas por la iluminación artificial hace necesario un serio plan de ventilación [7].

“Cómo utilizar la ventilación natural para la refrigeración de pequeñas oficinas” es una investigación que utiliza un software “TAS” para analizar las zonas de los flujos de aire, la evolución de la temperatura y las necesidades de refrigeración de las oficinas. En este trabajo han procurado de analizar el impacto de la orientación del viento y el grado de la protección en los edificios sobre la proporción de ventilación [8].

A un nivel apropiado para construir un modelo energético, el movimiento de aire es a menudo representado por un sistema de redes con nodos en cuales los nodos presentan el volumen del aire y la zona entre dos nodos consecutivos representa la distribución de los caminos del flujo del aire que conectan estos dos volúmenes y a través de los cuales el flujo llega a pasar. Se aplican técnicas numéricas a esta red para establecer el balance de masa entre cualquier área nodal de dos temperaturas diferentes y condiciones límites de presión. Semejante método se adapta bien a la determinación de la contribución de los movimientos de aire a los requisitos de energía [2]. Una aproximación más comprensiva involucra la solución de la energía, continuidad (masa) y la ecuación de la cantidad de movimiento (ecuaciones de Navier-Stokes) cuando se aplica finamente a un dominio discretizado.

1.2.8 Ganancias interiores

En muchos edificios, el efecto de las ganancias de calor a través de las instalaciones de luz, ocupantes y pequeños equipos de energía puede ser considerable. Por lo tanto, es muy importante procesar estas fuentes de energía de la forma más precisa posible. Típicamente, esto necesitará una separación del proceso de calor (radiación y convección) y las emisiones de la humedad relativa, y la provisión de un mecanismo para permitir un control de cada una de las fuentes.

Es habitual asumir que la emisión de calor por convección es instantáneamente experimentada como una carga de aire considerando que la porción radiante, comportándose de una manera similar a la radiación de corta longitud de onda que penetra a través de la envolvente de un edificio, se reparte proporcionalmente entre las superficies interiores opacas y transparentes según alguna estrategia de distribución. Debido a la relación innata con la capacidad calorífica de la construcción, el componente radiante experimentará un retraso en el tiempo antes de que pueda contribuir a la carga refrescante o elevar la temperatura del aire interior.

Algunas fuentes de ganancias interiores, como las luminarias y los aparatos electrodomésticos, requieren una elaboración de un modelo de comportamiento eléctrico para controlar las emisiones de calor.

I.2.9 Sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC)*

El problema de predicción del consumo de energía ha sido tradicionalmente dividido en dos etapas.

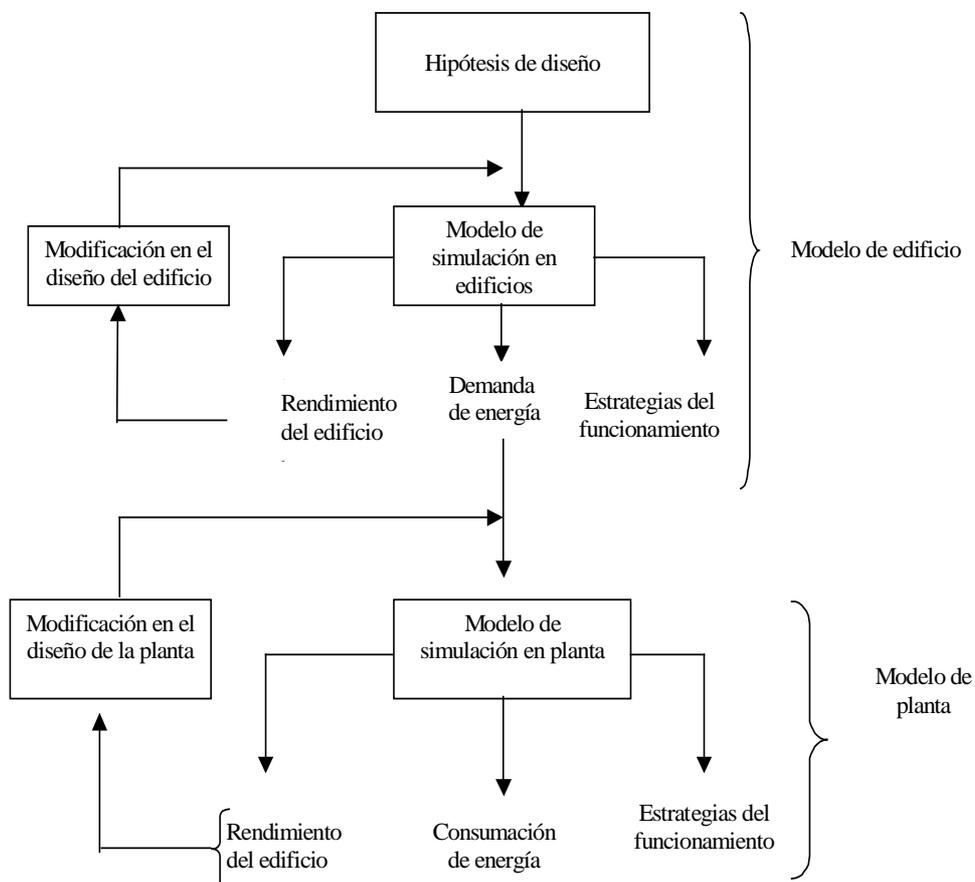


Figura 2: modelo en edificio y modelo en planta

La primera etapa tiene que ver con la predicción de la demanda de energía para satisfacer las solicitudes de energía por los usuarios del edificio. Esto es hallado por la modificación de diversas ganancias y pérdidas de calor instantáneo como una función de la distribución

* HVAC: Heating, Ventilating and Air Conditioning systems.

de las capacidades térmicas. En la segunda etapa, esta demanda de energías es modificada por las características constructivas de la vivienda para conocer la energía realmente consumida. La primera etapa tiene que ver con el diseño de la vivienda para reducir las demandas de energía, mientras que la segunda etapa tiene que ver con el diseño de la planta para mejorar la demanda y minimizar el consumo (consecuentemente bajar las emisiones de gases nocivos).

I.3 Métodos dinámicos para el análisis térmico en edificios

Diversos modelos utilizan el proceso térmico dinámico para calcular la transferencia de calor en edificios. Cada uno de ellos utiliza una técnica diferente donde a continuación citamos las más destacadas.

I.3.1 Red eléctrica equivalente.

Aborda probablemente el planteamiento conceptual más simple. Utiliza la analogía entre un circuito eléctrico y la transferencia de calor a través de elementos multi-capas, donde se representan las regiones de igual temperatura mediante nodos. Estos nodos están conectados por resistencias y capacitores, planteándose para cada uno de estos nodos una ecuación. Se forma así un sistema de ecuaciones de balance energético, a través de cuya resolución se obtienen los parámetros térmicos equivalentes. Este método brinda una interpretación física directa del fenómeno de intercambio de flujos caloríficos entre el exterior y el interior de un edificio.

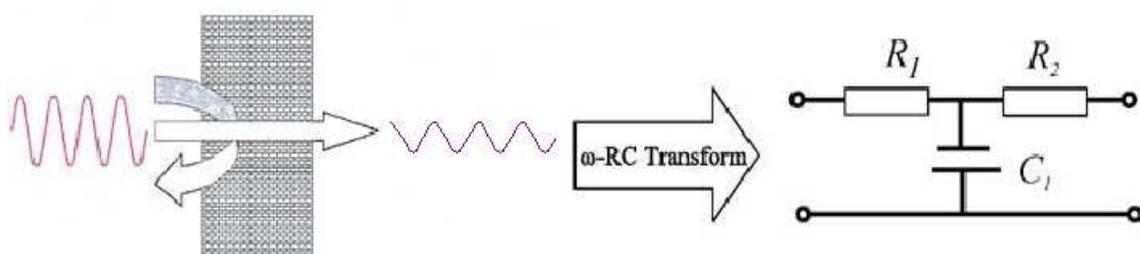


Figura 2: Red eléctrica equivalente de un muro

La técnica ha sido utilizada por T. Webb [T. Weber et al.9] en el cual los resultados demuestran que es posible describir el flujo de calor entre los componentes del edificio con RC-network.

En la modelización numérica (capítulo 4)*, se ha aplicado la técnica de la red eléctrica equivalente.

La transferencia de calor en los edificios se relaciona siempre con los fenómenos de la transmisión entre un mínimo de tres diferentes niveles de temperaturas y el almacenamiento de calor por los componentes interiores del edificio. Para estos tipos de problemas no existen soluciones analíticas. Una manera de resolver el problema es calculando la transferencia de calor por métodos numéricos como los métodos de elementos finitos (FEM), diferencias finitas (FDM).

El famoso programa comercial TRANSYS** [10] utiliza la técnica de FDM. Es un modelo que considera el espacio como cajas rectangulares y no distingue la geometría del volumen total del local [T. Weber et al.9]. El modelo es sensible a la cantidad de los elementos utilizados lo cual provoca a menudo problemas de la inestabilidad del sistema, y de esta forma se necesita reducir los pasos de tiempo hasta intervalos de 10 a 15 minutos***. Además de este modelo existen otros mencionado por T.Weber en [9] (ver la bibliografía).

Mientras estos métodos proporcionan soluciones bastante exactas, a menudo se presentan problemas de estabilidad cuando se conectan con otros componentes. Es por lo tanto de mayor interés encontrar modelos simples que son limitados en sus niveles de complejidad pero que son suficientemente estables. Un semejante tipo es el modelo de red eléctrica equivalente RC-network, también existen otros modelos tales los modelos de función de transferencia y distintos modelos analíticos simplificados. Un ejemplo de modelos semi-analítico es presentado por Laouadi [11].

* En el capítulo 4 se explica la metodología utilizada para la simulación de la temperatura interior en edificios utilizando la técnica de la red eléctrica equivalente.

** TRANSYS es un software comercial, como todos los códigos comerciales, es difícil acudir a los detalles desarrollados en la obtención de las ecuaciones. La mayor parte de información es comercial donde sólo se indica la técnica usada. (FDM en este caso).

*** En el cálculo del modelo numérico del capítulo 4, hemos utilizado un intervalo de tiempo de 10 minutos entre cada dos resultados consecutivos. Se puede considerar el tiempo de 10 minutos como suficiente para que exista un gradiente entre dos mediciones de temperatura exterior.

T. Weber ha utilizado dos tipos de red eléctrica equivalente, triangular RC-network* y Star RC-network.

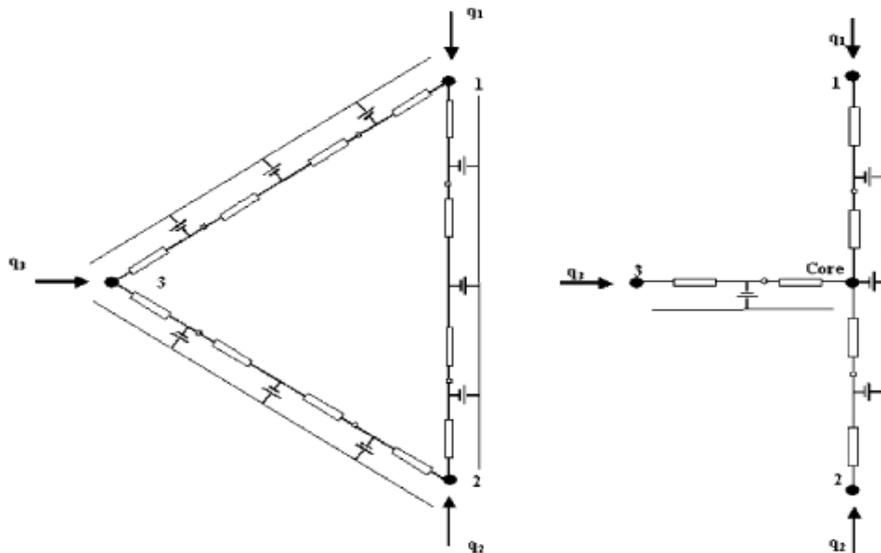


Figura 3: Red eléctrica equivalente de forma triangular denominada Δ -network y Star RC-network denominada Y-network. Cada flujo de calor se considerará positivo si entra en la construcción y negativo si sale de la construcción.

Para ser capaz de mostrar los flujos de calor en “triangular RC-network”, el camino más fácil es de describir los flujos de calor entre los puntos 1-3 donde el resultado es una matriz que se calcula a través de multiplicar la matriz de transferencia de calor por el vector de temperatura. Usualmente, las temperaturas son asumidas como conocidas (condiciones iniciales).

Para ajustar bien el problema T.Weber adjuntó las dos formas de RC en solo una dando resultado a una nueva forma llamada Δ -I network.

* llamada también Δ -network o triangular RC-network.

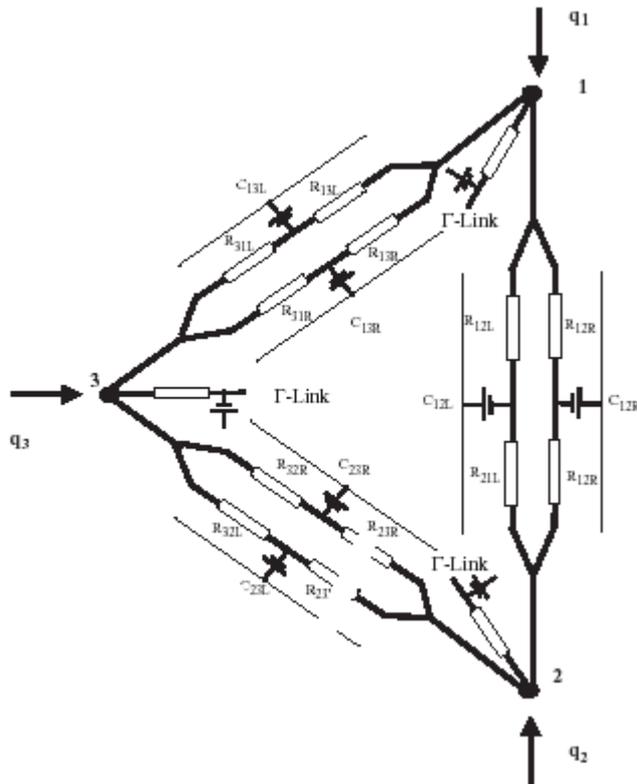


Figura 4: RC network triangular modificada y denominada Δ - Γ network.

Mientras es muy fácil perfeccionar la red de Y-RC para los espesores normales de los elementos de la construcción, es más complicado hallar resultados satisfactorios cuando las capas de los muros se ponen demasiado delgadas. La utilización de la combinación de ambas (Δ - Γ network) permite incorporar la geometría del local y así obtener un resultado más brillante [9].

1.3.2 Técnica de transformada de Fourier finita y compleja

(CFFT)*

Existen varios métodos de presentación de los resultados, de los cuales la técnica utilizada en este trabajo consiste en una presentación frecuencial de las variaciones dinámicas de la temperatura y la cantidad de la luz en el interior de los edificios. El método armónico o frecuencial puede ser utilizado para resolver la ecuación de la conducción de calor si las condiciones límites son presentadas como funciones periódicas [12]. El ambiente puede ser aproximado razonablemente por un número limitado de coeficientes de serie de Fourier

* CFFT: Complex Finite Fourier Transform.

[13]. Mackey and Wright [14-15] son los primeros que utilizaron el método frecuencial para el cálculo de las ganancias térmicas a través de las paredes y tejados de un edificio, el cual separa los locales que tienen una temperatura constante de la variación sinusoidal de la temperatura del aire exterior. Van Gorcum [16], Muncey and Spencer [17-18], Pipes [19], Gupta [20], Sonderegger [21], Hittle [22], y otros contribuyeron el método armónico para la predicción de las cargas.

CFFT es una técnica analítica que permite la transformación de los problemas dentro de la forma que conduce a las soluciones periódicas. Ésta técnica puede ser usada por distintos problemas en los que se desea una solución periódica. La técnica CFFT ha sido previamente empleada para los sistemas de almacenamiento de la energía térmica por Yumrutas R [23-24] y más tarde como una aplicación para las soluciones periódicas de la transferencia de calor a través de los muros de múltiples capas y tejados de los edificios [25]. Siendo un método analítico, CFFT se ha propuesto como una alternativa de otros métodos analíticos y numéricos.

La evolución, en el tiempo, de la temperatura exterior y la radiación solar directa es considerada como funciones periódicas. El modelo CFFT utiliza estos dos parámetros como datos de entrada para representar las estimaciones de la temperatura de las superficies interiores del muro y el flujo de calor a través el mismo.

La transferencia de calor a través los muros de los edificios es función de las temperaturas interior y exterior, de las temperaturas circundantes y de las superficies interiores, de los coeficientes superficiales de la transferencia de calor interior y exterior, y de la radiación solar. Si se obtiene la temperatura superficial de las capas interiores del muro, se puede calcular la transferencia de calor hacía el interior del local utilizando ésta temperatura superficial, los coeficientes de superficiales de la transferencia de calor y la temperatura interior. Yumrutas R [25] se ha limitado en calcular la temperatura superficial de las capas interiores y el flujo de calor a través el muro utilizando como valores de entrada, la temperatura exterior y la radiación solar.

Se estiman la variación de la temperatura periódica de las superficies de las capas interiores y el flujo de calor a través el muro. Se considera que el muro es compuesto de un número de capas limitado como demuestra la figura siguiente:

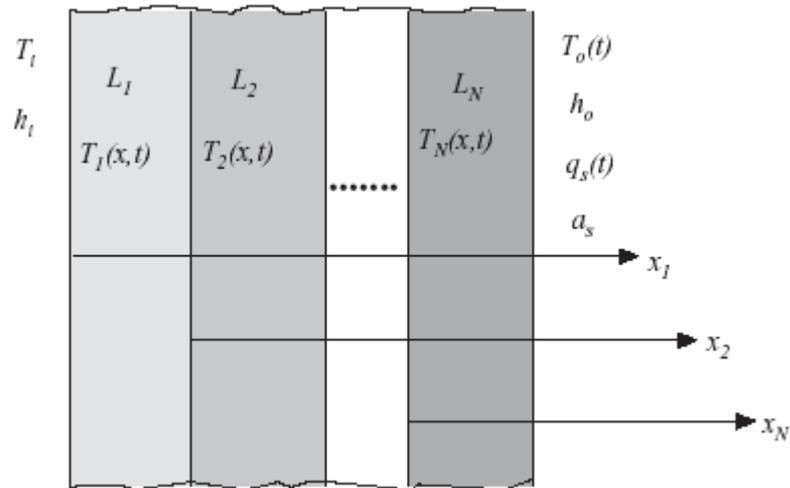


Figura 5 : El muro se compone de N capas.

El espesor de la capa n se denomina L_n , y la temperatura transitoria localizada dentro de la capa n se denomina T_n . El lado izquierdo del muro está expuesto al aire interior con una temperatura T_i . El lado derecho del muro está expuesto al aire exterior que se encuentra a la temperatura dada $T_o(t)$. El flujo de la radiación solar de la superficie externa del muro, $q_s(t)$, es también considerado como un parámetro de tiempo conocido.

La transferencia de calor al interior del edificio a través las paredes y los tejados se calcula con la siguiente ecuación diferencial, con las condiciones al límite:

$$\frac{\partial^2 T_n}{\partial x_n^2} = \frac{1}{\alpha_n} \frac{\partial T_n}{\partial t} \text{ para } 1 \leq n \leq N,$$

$$h_i(T_i - T_1) = -k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \text{ a } x_1 = 0,$$

$$-k_{n-1} \frac{\partial T_{n-1}}{\partial x_{n-1}} (x_{n-1} = L_{n-1}) = -k_n \frac{\partial T_n}{\partial x_n} (x_n = 0)$$

para $2 \leq n \leq N$,

$$T(x_{n-1} = L_{n-1}) = T(x_n = 0) \text{ para } 2 \leq n \leq N,$$

$$-k_N \frac{\partial T_N}{\partial x_N} = h_o [T_N - T_o(t)] - \alpha_s q_s(t) \quad \text{a } x_N = L_N,$$

donde α es la difusividad térmica, α_s el coeficiente de absorción superficial. k la conductividad térmica. h_i y h_o los coeficientes de transferencia de calor superficial al lado interior y exterior de la pared respectivamente.

La aplicación de la técnica CFFT puede resolver las ecuaciones diferenciales anteriores de la siguiente forma:

$$T_n(z_n, \tau) = \sum_{j=-M}^M T_{nj}(z_n) e^{i\omega_j \tau}, \quad \omega_j = 2\pi j,$$

$$T_{nj}(z_n) = \int_{-1/2}^{1/2} T_n(z_n, \tau) e^{-i\omega_j \tau} d\tau,$$

$$T_{no}(z_n) = \int_{-1/2}^{1/2} T_n(z_n, \tau) d\tau. \quad z_n = \frac{x_n}{L_n}, \quad \tau = \frac{t}{p}, \quad p = 24 \text{ h.}$$

1.3.3 Aplicación de una red neuronal artificial para modelar la térmica dinámica del espacio de un edificio y su sistema calorífico.

Las redes neuronales artificiales (ANN) “Artificial Neural Network” han sido utilizadas para modelar la térmica dinámica en edificios, su sistema de agua caliente y la influencia de la radiación solar. En [26] se ha ampliado una red neuronal para prever la temperatura interior. Se han usado datos climáticos reales durante varios meses del invierno y un modelo de edificio válido (basado en los datos de construcción del edificio) para aplicar la red y generar una relación entre las mediciones de entrada (temperatura al aire exterior, radiación solar, posición de la válvula calorífica y la temperatura interior del edificio) y la

salida deseada (prever la temperatura interior). El objetivo de este trabajo era de investigar el potencial de usar un ANN con el método de la descomposición de valores singulares (SVD) para prever la temperatura del espacio interior y controlar el sistema calorífico y así ahorrar la energía gastada en la calefacción de los interiores.

Otros autores [27] muestran un nuevo acercamiento para la predicción de cargas térmicas - de término corto- en edificios. El método se basa en un tipo especial de red neuronal artificial (ANN). Esta ANN está enseñada por medio de un algoritmo híbrido. Este sistema utiliza valores de temperaturas al día, la carga actual, la hora y el día como entradas. La actuación de este pronosticador ha sido evaluada usando datos reales y resultados de las oposiciones internacionales.

En [28], un edificio inteligente ha sido definido en el que se aumenta al máximo la eficacia del servicio con un costo mínimo. Este autor enumera una lista de componentes del edificio inteligente, poniendo en primer lugar, el sistema de dirección de energía (EMS). Este sistema controla el consumo de energía del edificio. Para un funcionamiento bueno de EMS, se necesita información precisa de este consumo para saber cómo se comporta en cortos y largos plazos. Esta predicción de carga de corto plazo, STLF, puede pronosticar la carga eléctrica de regiones, países y incluso en edificios durante un periodo de minutos, horas, días o semanas. La literatura informa en los últimos años que la aplicación de las redes neuronales artificiales (ANN) en la predicción de carga eléctrica demuestra que esta técnica es una de las más acertadas en diferentes áreas tales las ciudades o los edificios. En estos estudios, la ANN se ha empleado en la instrucción de correlacionar las condiciones climáticas, horarios, etc., con las variaciones de la carga, para predecir, cualesquiera picos de carga diaria, el consumo total, o la carga a cada hora. La ventaja de ANN con respecto a los otros modelos es su habilidad de modelar un problema de múltiples variables dadas las relaciones complejas entre las variables. También, ANN puede extraer la relación no-lineal implícita entre estas variables por medio de “ilustración” a través de los datos.

Se han logrado muchos resultados excelentes en aplicaciones reales con ANN en STLF. Los trabajos de [29-31] son un buen ejemplo. Un problema que se ha investigado en los últimos años para resolver el problema de STLF con ANA ha sido la selección de la mejor estructura para aplicar. En [32], se dan varias reglas para construir una red neuronal cuasi-óptima para STLF.

Sin embargo, el método ANN no se puede aplicar a todo el conjunto del edificio debido a la no-linealidad del último.

I.3.3.1 Estructura de la red

También se explica en [33] que puede usarse cualquier topología de ANN para apoyar la estructura de retroalimentación (FB). La red neuronal usa el método de "backpropagation" (BPM) donde el algoritmo se detalla en [34].

I.3.4 Ecuaciones diferenciales.

Mediante este método, el sistema físico se ve sometido también a un proceso de discretización nodal, en donde cada nodo representa un elemento con temperatura uniforme. Se plantea para cada uno una ecuación de balance energético, que contemple intercambios de calor en diferentes formas como: conducción, convección, radiación, fuentes de calor, transferencia de masa, agregando sus correspondientes condiciones de contorno. Queda así definido un sistema de N ecuaciones en derivadas parciales de tiempo y espacio.

I.3.5 Modelos ARMA.

Este modelo (AutoRegressive Moving Average), con sus diferentes variantes (ARX, ARMAX, etc.), se basa sobre la hipótesis de operar en ambiente estocástico. No es, como los anteriores, un modelo físico-matemático, sino que es un modelo matemático-estadístico (M. G. Messina y otros, 1990).

Una de las ventajas de este procedimiento es que los coeficientes son relativamente fáciles de calcular, mediante varias posibilidades en la elección del método de cálculo. Otra ventaja es que el modelo puede funcionar como "predictor" de la evolución futura de la variable de salida, sobre la base de la información acumulada, por lo que se aplica frecuentemente para control térmico en los edificios.

La desventaja, al ser un modelo matemático-estadístico, es que se pierde de vista la conexión directa entre los coeficientes matemáticos y los parámetros físicos, que se obtienen a través de relaciones entre los coeficientes.

Junto a los modelos ARMA y las ecuaciones diferenciales se han detallado más modelos como el análisis modal y otros [35].

Dentro de las posibilidades para el planteamiento de modelos en sistemas térmicos dinámicos, lineales y de parámetros constantes, existen, desde el punto de vista de la metodología, una infinidad de métodos. Éstos parten en general de una base físico-matemática pero tienen diferente grado de aproximación a la realidad, y ofrecen diferentes ventajas y desventajas, según la situación planteada.

A continuación descartaremos algunas aplicaciones en distintos campos de la transferencia de calor.

- Los paneles saturados con materiales de cambio de fase (PCM*) proporcionan el almacenamiento térmico que es distribuido a lo largo de todo el edificio permitiendo un buen diseño solar pasivo y bajando así los costes de energía. Este trabajo examina la dinámica térmica de la temperatura, pero no es directamente iluminado por los rayos directos de sol. La intención de este estudio es proporcionar pautas útiles seleccionando un PCM óptimo y estimando los beneficios de los productos PCM en el diseño arquitectónico. La energía almacenada durante un ciclo diario depende de: a) la temperatura de fusión de PCM; b) el rango de temperatura encima del que ocurre la fusión y c) la capacidad latente por unidad de área de panel.

Se estudian separadamente situaciones con el panel en partición interior o dentro de la envolvente del edificio. En [36] se presentan las siguientes manifestaciones: El máximo de energía diurna almacenada ocurre, en la mayoría de las circunstancias, cuando el valor de la temperatura de fusión de PCM está cerca del valor de temperatura del cuarto de almacenamiento. El almacenamiento de la energía diurna disminuye si la transición de cambio de fase ocurre encima de rango de temperaturas. El almacenamiento diurno logrado puede limitarse alrededor de 300-400 kJ/m², aun cuando el panel tiene una capacidad latente mayor.

* PCM: Phase Change Material.

- Aplicación de la térmica dinámica en la determinación de la constante de tiempo. La representación espectral de la constante de tiempo es una descripción útil para el comportamiento térmico dinámico en asambleas y microsistemas. Después de presentar la idea de la representación espectral de la constante de tiempo de estructuras microelectrónicas, el trabajo proporciona un algoritmo que puede ser utilizado para calcular el espectro de la constante de tiempo en programas de simulación térmica. El espectro de la constante de tiempo obtenido puede ser la base de cálculo del comportamiento transitorio, diagramas de la pulsación de resistencia térmica, y reconstrucción estructural [37].

Un programa del análisis térmico de edificio, llamado TASE ha estudiado los efectos de los modelos del coeficiente de transferencia de calor interior en la térmica dinámica de un local de prueba y el consumo de energía y la carga máxima para un módulo de vivienda [38]. Se han comparado valores medidos y calculados del aire interior, temperatura de la superficie y valores del flujo de calor. Se han usado las ecuaciones de la correlación de ASHRAE, Alamdari y Hammond y Khalifa y Mariscal en los cálculos.

- La simulación térmica dinámica del lago Kinneret. A diferencia de la simulación térmica dinámica en edificios, en este trabajo la simulación se hace en un lago, lo cual implica que las variables exteriores son casi constantes para todo el periodo de cálculo. Es un cálculo más sencillo teniendo en cuenta que los edificios son sistemas no-lineales, y la variación de los parámetros que intervienen en el cálculo dependen de la hora del día, de la estación del año, de la ubicación, de las características medioambientales exteriores, etc. Pero aun así es un buen método que explica como se hacen estos tipos de simulaciones.

En este estudio [39], se ha usado un modelo hidrodinámico unidimensional DYRESM para simular la estructura térmica del lago Kinneret para un periodo encima de 45 meses. Este análisis se enfoca en la aplicación de una nueva versión de un modelo hidrodinámico unidimensional al Lago Kinneret y simulación de los procesos físicos. DYRESM es un modelo de proceso basado en la calibración libre que simula la distribución vertical de la temperatura (estratificación) y salinidad en lagos y depósitos. Cada algoritmo ha sido simplificado a la descripción física mínima esencial que rinde a un modelo más sólido y más rápido. La simulación modelo reproduce la temperatura de una capa superficial de la columna de agua a dentro de menos de 1 °C.

I.4 El análisis frecuencial

I.4.1 Introducción

En este trabajo se han analizado medidas de temperaturas y radiación en viviendas ocupadas durante extendidos intervalos de tiempo y bajo condiciones variables en la protección de la piel y en la excitación exterior. Se han hecho mediciones en dos locales durante períodos prolongados de tiempo y se han seleccionado los intervalos representativos basándonos en las condiciones de protección de la piel y las características meteorológicas de la excitación exterior, días soleados o nublados. La colocación de las sondas de mediciones en el interior se realizó de tal manera que se puede estudiar el comportamiento de la respuesta térmica dinámica interior en función de la profundidad (distancia de la fachada principal). Se han seguido dos viviendas ubicadas en la ciudad de Barcelona. Los dos pisos tienen la misma orientación, Sur 15° Este. La elección de la orientación sur ha sido motivada por el hecho que ésta permite una dinámica más importante que en otros casos, por la considerable incidencia de la radiación solar directa. Los dos locales en estudio tienen aproximadamente el mismo volumen y se diferencian en la distribución espacial de la inercia térmica y de las características de la envolvente. Mientras que el primer local presenta una gran superficie vidriada al sur (con muy baja inercia de la piel), el segundo local posee una galería (espacio intermedio) donde la temperatura dentro de la galería tiene un aspecto totalmente distinto de la temperatura interior del local.

El sistema de adquisición de datos graba cada 10 minutos en pares una medición de temperatura y otra de luz, para analizar estos datos hay que sacar una medición media de cada tres mediciones de 10 minutos.

El análisis de datos experimentales temporales, durante un cierto periodo de tiempo, se puede realizar tanto en el dominio temporal como en el frecuencial. Analizando los datos temporales para intervalos de largo plazo será casi imposible extraer información suficiente de los fenómenos que se repiten en periodos concretos; así que el análisis frecuencial permite detectar comportamientos que se repiten con frecuencias determinadas. Para ello

se aplicará una transformada de Fourier (que es aplicable a una función física periódica o casi periódica de periodo $T = \frac{2\pi}{\omega}$ que permite pasar del espacio temporal al frecuencial y viceversa.

Esta operación está expresada por [29]:

$$F(\omega) = F(f(t)) = \frac{1}{T} \int f(t)e^{i\omega t} dt \quad \text{para } 0 < t < T$$

donde t es el tiempo, T periodo y ω la frecuencia.

Esta función de transformada de Fourier está expresada en relación a un dominio temporal continuo. En nuestro caso se trata de mediciones experimentales de magnitudes ambientales durante cierto periodo de tiempo, estaríamos en presencia de una serie discreta de datos temporales. Para transformar esta serie, se debería aplicar otra expresión para obtener la transformada discreta de Fourier, la forma discreta es [40]:

$$F(\omega_k) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{t=T} f(t) [\cos(\omega_0 kt) + i \sin(\omega_0 kt)]$$

la suma para los intervalos temporales entre $t=0$ y $t=T$ conlleva M puntos experimentales, con la fórmula anterior se encuentran los valores de $F(\omega_k)$, $k=0\dots N$,

k es el número de armónico concreto

N el número de armónicos total $< M$

$f(t)$ es la variación ambiental que puede ser temperatura, radiación solar, etc.)

ω_0 es la frecuencia fundamental

n identifica el intervalo entre medidas de la serie discreta, es decir, el intervalo entre cada medición, que depende del sistema de adquisición de datos.

La función F obtenida es función de la frecuencia ω , y es la que se utilizará para el análisis y cálculo de la Función de Transferencia, considerando a la temperatura y la radiación solar como funciones casi periódicas y transformadas. Se obtendrá de este modo la transformada F de cada una de estas magnitudes.

La transformada discreta de Fourier inversa se aplica para pasar del dominio frecuencial al dominio temporal, así esta aplicación se puede utilizar para confirmar que la Transformada de Fourier directa está bien calculada comparando las gráficas de las variaciones

ambientales en función de tiempo en los dos casos: 1- mediciones directas, 2- mediciones después de aplicar la transformada de Fourier directa y inversa.

A partir de datos experimentales del edificio, se obtendrá la Función de Transferencia (T.F) global del sistema que serviría para su caracterización.

I.5 Obtención de la Función de Transferencia

Se define la Función de Transferencia (TF) del sistema como el cociente entre la función de salida y la función de entrada, en el espacio frecuencial. Esto significa que en el sistema térmico, se puede obtener la función de Transferencia dividiendo una variable ambiental interior por una variable ambiental exterior, pero expresadas en función de la frecuencia, es decir:

$$T.F(\omega) = \frac{F(f_s(\omega))}{F(f_e(\omega))}$$

donde $F(f(\omega))$ es el modulo de la transformada de Fourier de la variable ambiental $f(t)$.

La T.F obtenida está expresada también en función de la frecuencia. Para cálculos de la T.F se ha supuesto que el sistema edificio con una entrada: temperatura exterior o la radiación solar y una salida: temperatura interior es un sistema lineal, ya que la T.F esta definida bajo la condición de linealidad, pero esto no suele ser siempre así, es decir, que la mayoría de los fenómenos físicos que se producen en la naturaleza no son lineales y el comportamiento del edificio planteado en términos de temperatura y la radiación solar en realidad no son lineales, es decir que el edificio no se calienta del mismo modo que se enfría. La relación por lo tanto no esta bien determinada.

En este estudio utilizaremos el método frecuencial para analizar las respuestas interiores en función de los rangos de frecuencias. Antes de efectuar el análisis en el campo de frecuencias, hemos de determinar una escala de frecuencias aproximada, la cual no permite dibujar tres zonas de frecuencias: ***bajas, medias y altas frecuencias.***

En el anexo II se explica detalladamente los diferentes pasos a seguir para construir y simplificar el gráfico de la función de transferencia.

Para apreciar bien las tres zonas y ver donde aproximadamente empieza una zona y termina otra. A continuación un ejemplo de las ganancias térmicas a través de un muro en función de frecuencias [41].

En la metodología de análisis que se sigue a lo largo de este trabajo, y para construir los gráficos de la evolución de la función de transferencia en función de las frecuencias, se ha de distinguir sólo los valores significativos del modelo de la transformada de Fourier de los datos interiores y exteriores, ya que el margen de error aumenta si se divide sobre valores muy pequeños. El modelo de la transformada de Fourier de los datos medidos depende fuertemente de las veces en que se repite el fenómeno físico, es decir, que los valores más significativos corresponden siempre a frecuencias múltiplos ó submúltiplos de un día (1 día, 2 días, 3 días..., 1/2 de día, 1/3 de día, 1/4 de día, 1/5 de día y 1/6 de día). Y se descartan los otros valores que no presentan ningún fenómeno físico repetible. Algunos modelos de transformada de Fourier no se incluyen en el cálculo debido a que los valores que presentan son poco significativos, sobre todo en las altas frecuencias donde la amplitud de oscilación es mínima. La frecuencia más alta que hemos tenido en consideración en este trabajo corresponde a la frecuencia de 4 horas. A partir de esta frecuencia es arriesgado interpretar los resultados obtenidos ya que la información de que se dispone en las altas frecuencias varía mucho de un caso a otro y de un día a otro.

Las mediciones de las variables ambientales han sido obtenidas a través de un sistema de adquisición de datos, donde los detalles del sistema y de las células de captación se explican detalladamente en el Anexo.

La mayoría de los muros están hechos por más de tres capas sin contar con la cámara de aire, estos muros pueden ser considerados como una construcción de múltiples capas unidimensional. Cada capa es homogénea, isotópica y tiene propiedades térmicas constantes (λ , ρ , y C_p).

La ecuación de la conducción de calor por cada capa está dada por:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \cdot \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

Donde T es la temperatura. λ , ρ , C_p la conductividad térmica, densidad y el calor específico respectivamente. El flujo de calor q un tiempo arbitrario t y una locación x en el muro esta dado por:

$$q(x,t) = -\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \quad (2)$$

Siempre con la condición que λ , ρ y C , son constantes para cada capa, y que $T(x,0)=0$. La transformada de Laplace puede ser aplicada a las ecuaciones (1) y (2), entonces la ecuación de transmisión en términos de las variaciones de Laplace de la temperatura y el flujo de calor para ambos lados de la pared esta dada por:

$$\begin{bmatrix} T_{int}(s) \\ q_{int}(s) \end{bmatrix} = M(s) \cdot \begin{bmatrix} T_{ext}(s) \\ q_{ext}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{ext}(s) \\ T_{int}(s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde $M(s)$ es la matriz total de la transmisión del muro completo, cual puede ser realizado por una multiplicación de las matrices de transmisión de cada capa del muro incluyendo los dos lados interior e exterior del muro como siguiente:

$$M(s) = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} = M_{int}(s) M_n(s) \cdots M_1(s) M_{ext}(s)$$

Donde

$$M(s) = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

Los elementos de la matriz de transmisión pueden ser dados en forma de funciones hiperbólicas:

$$A_i = D_i = \cosh \left(L_i / \sqrt{\frac{s}{\alpha_{m_i}}} \right)$$

$$B_i = -R_i \frac{\sinh(L_i \sqrt{\frac{s}{\alpha_{m_i}}})}{(L_i \sqrt{\frac{s}{\alpha_{m_i}}})}$$

$$C_i = -L_i \sqrt{\frac{s}{\alpha_{m_i}}} \sinh(L_i \sqrt{\frac{s}{\alpha_{m_i}}}) / R_i$$

Donde n es el número de capas de los muros sólidos L_i , R_i y $\alpha_{m_i} (= \lambda_i / \rho_i C_{p_i})$ son el espesor, la resistencia térmica y la difusividad térmica de la capa número i respectivamente.

de la ecuación (3) la ecuación de la transmisión que relaciona temperaturas con flujos de calor en ambos lados de la pared:

$$\begin{bmatrix} q_{ext}(s) \\ q_{int}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x(s) - G_y(s) \\ G_y(s) - G_z(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext}(s) \\ T_{int}(s) \end{bmatrix}$$

Donde $G_x(s)$, $G_y(s)$ y $G_z(s)$ son las funciones de transferencia de la conducción de calor del exterior, muro e interior respectivamente. Todas son funciones hiperbólicas transcendentales complicadas, especialmente para una construcción de más de dos capas.

Estas funciones son expresadas de esta forma:

$$G_x(s) = A(s)/B(s)$$

$$G_y(s) = 1/B(s)$$

$$G_z(s) = D(s)/B(s)$$

En nuestro caso utilizaremos la función de transferencia del muro es decir

$$G_y(s) = 1/B(s)$$

substituyendo s por $j\omega$ podemos llegar a una ecuación de tipo $B(j\omega) = P + j Q$

Donde

$$P = \frac{1}{2\sqrt{\frac{2d^2\omega}{\alpha}}} \langle (\cos\sqrt{\frac{2d^2\omega}{\alpha}}) \sinh(\sqrt{\frac{2d^2\omega}{\alpha}}) + \sin(\sqrt{\frac{2d^2\omega}{\alpha}}) \cosh(\sqrt{\frac{2d^2\omega}{\alpha}}) \rangle$$

$$Q = \frac{1}{2\sqrt{\frac{2d}{\alpha}}} \left(\sin\left(\sqrt{\frac{2d^2\omega}{\alpha}}\right) \cosh\left(\sqrt{\frac{2d^2\omega}{\alpha}}\right) - \cos\left(\sqrt{\frac{2d^2\omega}{\alpha}}\right) \sinh\left(\sqrt{\frac{2d^2\omega}{\alpha}}\right) \right)$$

$\alpha = (\lambda/\rho.Cp)$ es la difusividad térmica, d espesor y ω la frecuencia.

I.5.1 Aplicación

El muro en aplicación es dentro de las características constructivas de la ciudad Barcelona.

" Muro de ladrillo" de un espesor de 30 cm con cámara de aire y sin aislamiento.

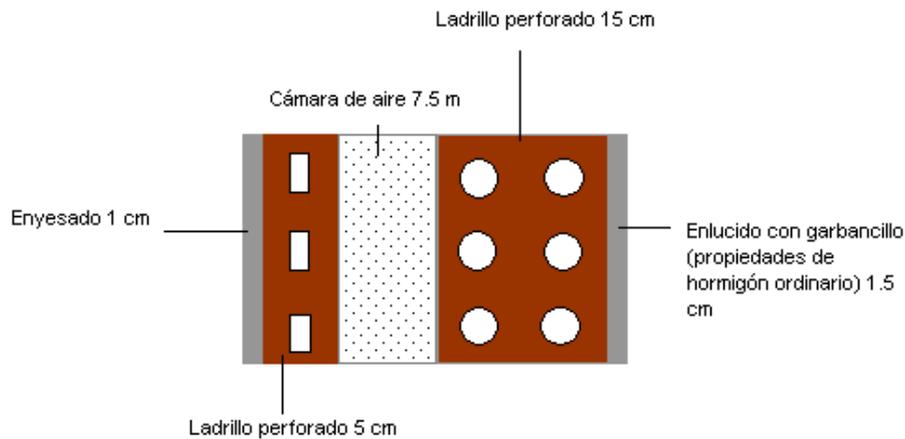


Figura 6: Esquema del muro multi-capas en cálculo.

Datos del muro:

$\lambda[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$d[\text{m}]$	$C_p[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$\rho[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
0.51	0.01	960	1120
0.30	0.05	840	1000
4.76	7.5	1200	1.3
0.30	0.15	840	1000
0.51	0.015	960	1120

A continuación la gráfica de la función de transferencia por conducción del muro:

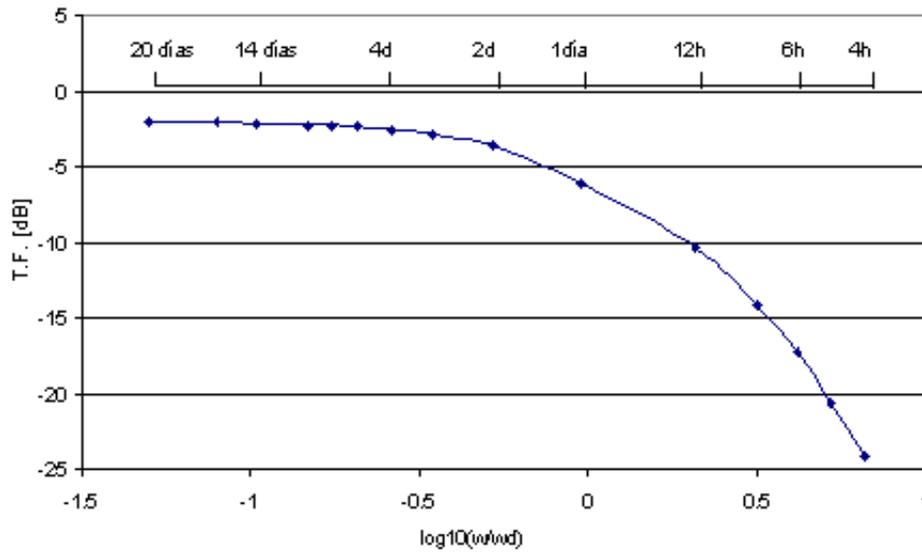


Figura 7: Evolución de T.F de un muro de múltiples capas en función de frecuencia.

El eje horizontal indica las frecuencias. Los números que aparecen en la parte debajo de la figura son calculados de una forma que se respecta la escala para todos los intervalos de mediciones. La referencia es el valor cero que corresponde siempre a la frecuencia de **un día**.

ω es la frecuencia en cuestión y ω_d es la frecuencia de **un día**

$$\omega = \frac{2\pi}{d \cdot 86400} \quad \text{y} \quad \omega_d = \frac{2\pi}{86400s} \quad [\text{rad/s}]$$

donde d es el número de días o fracciones de un día.

Por lo tanto $\log_{10}\left(\frac{\omega}{\omega_d}\right)$ es un valor adimensional.

El eje vertical demuestra el porcentaje de la amplitud de oscilación de la temperatura en el lado interior del muro.

Analizando la figura de las oscilaciones interiores de temperatura en función de frecuencia observamos tres zonas distintas de oscilaciones:

- Entre la frecuencia de 20 días hasta la frecuencia de 4 días, el porcentaje de las oscilaciones de la temperatura es el mismo. La función de transferencia es constante para este intervalo de tiempo. Podemos decir que, de una frecuencia de varios meses hasta la frecuencia de 4 días el interior del edificio gana y pierde de la misma forma. A este rango de frecuencias le llamaremos: ***bajas frecuencias***.
- Entre la frecuencia de 4 días y la frecuencia de 12 horas, empieza a ver una caída que tiene una forma de curvatura aproximada a una parabólica, en la relación entre la amplitud de oscilación interior-exterior. Es una zona donde el porcentaje de las oscilaciones se sitúa entre el valor (valor de 4días) y el valor (valor de 1 día). Es decir que el muro empieza a frenar las oscilaciones a estas frecuencias, y la constante de tiempo de la masa térmica del muro es de un tiempo más grande que 1 día. A este rango de frecuencias le llamaremos ***medias frecuencias***.
- Por ultimo, entre la frecuencia de 12 horas hasta la frecuencia de 4 horas, la caída en las oscilaciones interiores es muy grande y lineal, el porcentaje de las oscilaciones es muy pequeño (menos de 1% para la frecuencia de 6 horas por ejemplo). A este rango de frecuencias le llamaremos ***altas frecuencias***.

Intuimos que el método frecuencial es el que mejor puede corresponder al enfoque arquitectónico que nos guía aquí.

II. Valoración de la respuesta dinámica interior de la primera vivienda

II.1 Introducción

En este capítulo vamos a analizar la relación que existe entre el tipo de protección de la piel y la evolución de la temperatura interior. El análisis se hace a través de datos experimentales obtenidos midiendo variables ambientales en edificios.

El objetivo es extraer información de las mismas, para llegar a algún tipo de conclusión sobre el comportamiento térmico, que se pueden extrapolar a otros edificios. Esto serviría de guía para una serie de pautas de diseño térmico.

El análisis efectuado en este capítulo corresponde a un piso habitable, con características constructivas muy comunes en la ciudad de Barcelona, con una gran abertura vidriada en la fachada principal orientada al sur (15° este). Los intercambios de calor a través de superficies vidriadas son importantes. El control y la protección de las oscilaciones exteriores en este caso son administradores primordiales para mantener el confort térmico.

Debido a las características constructivas de la vivienda, hemos elegido dos tipos de protección en la piel que pueden ser útiles de analizar para llegar a una conclusión sobre la variación de la temperatura interior. En este análisis hemos sacado varios intervalos de mediciones del ambiente interior y exterior para dos condiciones de protección de la piel del edificio: *persianas cerradas* y *persianas abiertas*.

A causa de la diferenciación en las excitaciones exteriores a lo largo del año, hemos intentado sacar mediciones para todas o casi todas las estaciones del año fijando ambas condiciones de protección en la piel del edificio.

En primera parte el análisis consiste en sacar conclusiones de gráficos de la temperatura interior y exterior contruidos en función del tiempo, y más tarde en hacer un análisis en el campo de frecuencias para ver con más detalles la influencia de la condición de protección de la envolvente sobre la amplitud de oscilación de la temperatura interior. En la tercera parte compararemos la distribución espacial de las oscilaciones de la temperatura interior

respeto a una condición de protección fija al nivel de la envolvente. En esta tercera parte hemos de analizar también la relación que existe entre la distribución espacial de la temperatura interior y la evolución de la radiación solar exterior.

La envolvente del edificio es la capa externa que lo cubre y separa los espacios habitados del ambiente exterior, tanto bajo la superficie del suelo como encima de la misma.

La envolvente del edificio se compone del tejado, del suelo, de los muros, de las ventanas y de las puertas, es decir, todo lo que separa el interior del exterior del edificio. Dicha envolvente asume el papel con varias funciones:

- Protege el interior contra los elementos climáticos.
- Permite la entrada de la luz solar (por las ventanas.)
- Asegura, en ciertos casos, la renovación del aire por aeración (ventanas) e infiltraciones naturales.

En el pasado, la envolvente tenía la función de crear un ambiente interior y proteger a los ocupantes y sus bienes del viento, la nieve, la radiación solar y la lluvia, con un mínimo de mantenimiento y un máximo de durabilidad. Hoy en día, la concepción de la envolvente mantiene los mismos objetivos, pero con un mayor rigor, y se debe tener en cuenta la economía de la energía. Por eso, la calidad de la envolvente del edificio es un factor determinante que puede influir en la cantidad de energía que se consume por:

- La calefacción en temporadas frías.
- La climatización en temporadas calientes.
- La ventilación.

Cuantitativamente, el efecto de la envolvente depende de su espesor y de sus propiedades termo físicas. Los materiales situados en el espacio interior como los muebles, el suelo, los muros de separación interior, tienen un efecto sobre la temperatura interior modificando la capacidad calorífica de la estructura, y también por la proporción de absorción del calor producido al momento, o penetrado por la construcción.

Una mejora de la envolvente del edificio puede reducir sensiblemente la demanda de energía. Las infiltraciones o escapes de aire a través de la envolvente, son a menudo, responsables de las deterioraciones que puede producir la humedad en el edificio.

Existen dos causas principales de dispersión de calor a través de la envolvente de un edificio:

- La transferencia de calor (por conducción, convección y radiación.)
- Las infiltraciones y escapes: los intercambios de aire atribuidos a las infiltraciones ocurridas cuando la presión del aire en el interior es diferente de la presión exterior. Este fenómeno se explica por tres factores: el efecto chimenea, el viento y la ventilación mecánica.

La mejora de la envolvente de una casa exige una planificación adecuada. Antes de proseguir, es muy importante determinar claramente las zonas de la envolvente que deseamos mejorar. Por esta razón, en este capítulo, analizaremos la respuesta térmica dinámica interior.

El objetivo es establecer la función de cada elemento de la construcción de la envolvente sobre la ganancia térmica dinámica interior. El método que vamos a usar para esta determinación es el análisis en el campo de frecuencias, donde la onda térmica se compone de varios armónicos. Cualquier variación (aumento o disminución de la amplitud de los armónicos) es debida a uno o varios elementos determinados de la construcción de la envolvente.

II.2 Características constructivas del edificio de mediciones:

El piso de que se trata es de una topología urbana tradicional, dentro de las características constructivas de la ciudad de Barcelona.

La estructura portante es de hormigón, los muros son de ladrillo y está rodeado por otros pisos similares, con excepción de la fachada principal orientada aproximadamente al Sur (Sur 15° Este.) El piso presenta una gran ventana orientada al sur, de un tamaño total de 8 m², lo que permite un aporte solar considerable.

- Ubicación de las sondas de medición:

Una serie de sondas de mediciones de temperatura y de luz están repartidas a lo largo de la planta del piso partiendo de la obertura de la fachada principal, tal y como se muestra a continuación:

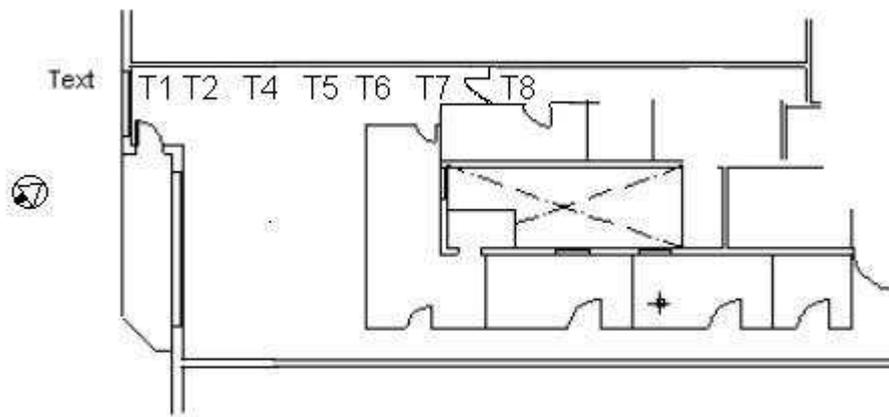


Figura 1: esquema en planta de la vivienda de análisis

- | | |
|--|--|
| T ₁ a una distancia de 50 cm de la fachada principal. | T ₆ a 4 m de la fachada principal. |
| T ₂ a 1 m de la fachada principal. | T ₇ a 6 m de la fachada principal. |
| T ₄ a 2 m de la fachada principal. | T ₈ a 8.10 m de la fachada principal. |
| T ₅ a 3 m de la fachada principal. | |

Cada sonda de temperatura va acompañada de una célula de medición de la luz.

II.3 Condición de protección persianas cerradas

La variación de la temperatura interior depende de las precauciones tomadas al nivel de la piel del edificio (dejar o impedir que entren las oscilaciones exteriores.)

A continuación, analizamos la respuesta interior fijando una condición dada en la protección de la piel, en este caso "*persianas cerradas*".

La amplitud de las impulsiones exteriores y las infiltraciones de aire a través de la envolvente, son factores importantes que influyen en el tipo de respuesta interior. Con este fin, se definieron varios intervalos de mediciones en temporadas distintas del año (verano e invierno.) El objetivo es llegar a una conclusión sobre hasta qué punto afectan las oscilaciones exteriores y las infiltraciones de aire sobre la evolución de la temperatura interior.

II.3.1 Análisis en el dominio temporal:

II.3.1.1 La respuesta interior en la temporada de invierno:

Para analizar el efecto de las oscilaciones exteriores sobre la respuesta interior en invierno, se efectuaron mediciones de temperatura del aire y de la radiación solar dentro del mismo edificio antes mencionado. Las mediciones fueron tomadas sin calefacción y sin incidencia de la radiación solar directa (persianas cerradas.) El intervalo de las mediciones corresponde a 8 días desde el 01 hasta el 08 de enero 2003.

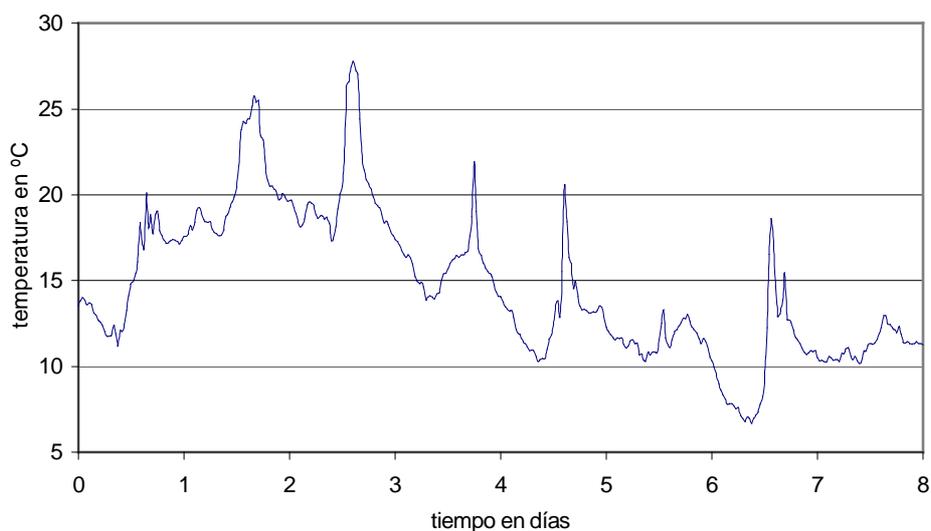


Figura 2: Evolución temporal de la temperatura exterior durante 8 días. La medición fue sacada de la sonda de medición instalada en la sobra al exterior de la vivienda

La temperatura exterior media es de 14.70 °C. La amplitud de las oscilaciones diarias es aproximadamente 10°C entre el ciclo día- noche

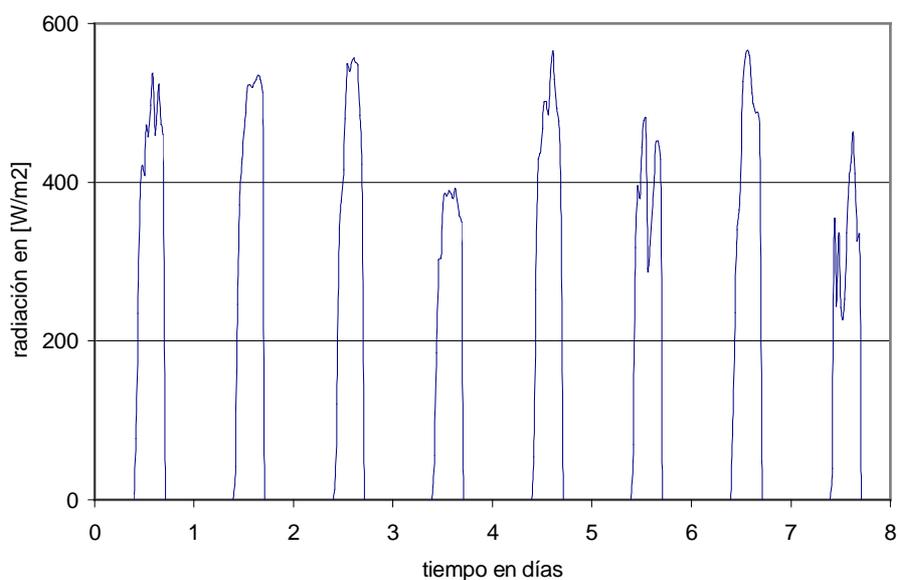


Figura 3: Evolución de la radiación solar exterior durante el mismo intervalo de mediciones. Datos extraídos de la sonda de medición fotovoltaica instalada en el exterior sobre un plano horizontal.

Las sondas de mediciones de temperatura y radiación exterior están protegidas de los rayos directos del sol. Por lo cual, la gráfica de la radiación solar medida corresponde a la luz difusa del cielo, y a las reflexiones provenientes de las superficies de los edificios del entorno.

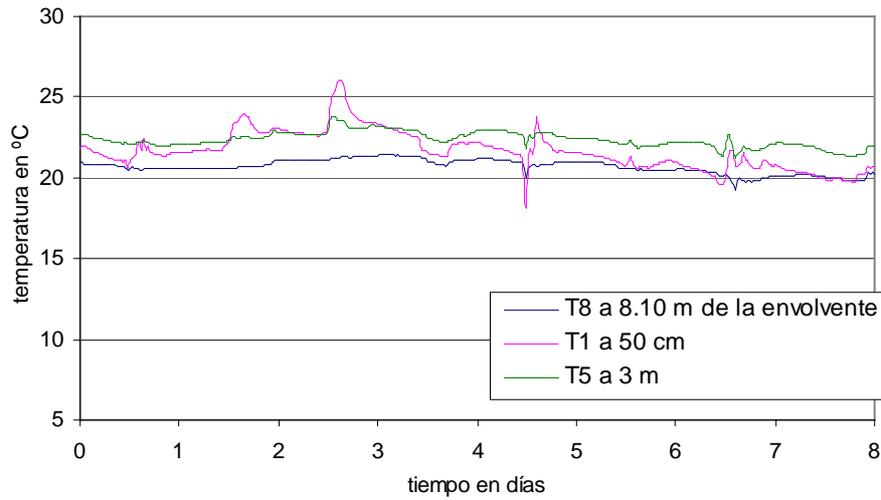


Figura 4: Evolución de las temperaturas interiores T1, T5 y T8. Datos de 8 días desde el 01 hasta el 08 de enero 2003.

Las mediciones se tomaron del 01 al 08 de Enero 2003. Se aprecia que la temperatura media interior es la misma para las tres sondas. Es el resultado esperado ya que la influencia exterior cerca de la envolvente es grande.

La amplitud de las oscilaciones de las temperaturas interiores es de 2°C en promedio. Se puede decir que, en el interior, la temperatura varía diariamente la quinta parte que en el exterior. Debido a la condición de protección persianas cerradas, la amplitud de oscilación de la temperatura en el interior es mínima.

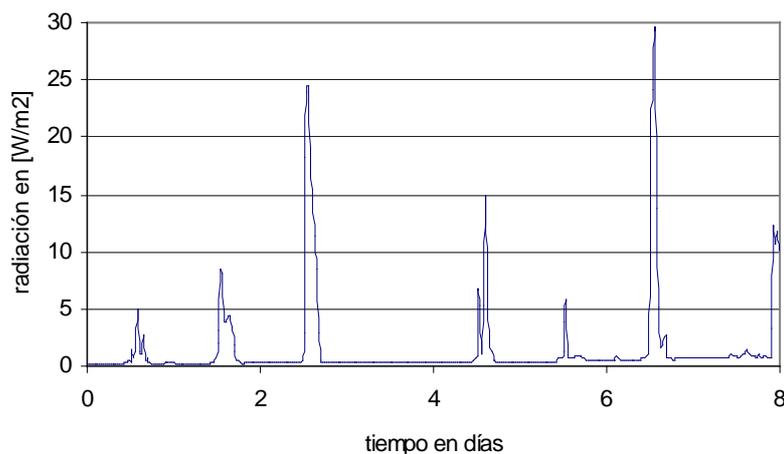


Figura 5: La radiación solar en el interior correspondiente a la sonda 5. Condición de protección persianas cerradas.

Aunque las persianas están bajadas, existen infiltraciones de luz a través de las últimas. La fachada sur del piso recibe una cantidad de radiación solar muy importante en el invierno, y con un ángulo de incidencia muy pequeño. Por consecuencia, la posibilidad de la penetración de la radiación solar aumenta. Siquiera así, la cantidad de la luz en el interior comparando con la registrada al mismo tiempo en el exterior es incomparable. Las persianas bien cerradas son opacas a los rayos del sol.

II.3.1.2 La respuesta interior para la temporada de verano

La longitud de variación día – noche de la temperatura exterior es muy alta para la época de verano, ya que durante el día la radiación solar hace subir la temperatura del aire a valores muy altos. En cambio, la refrigeración nocturna suaviza mucho estos aumentos. A continuación, se hicieron mediciones de la temperatura del aire y de la radiación solar en el interior del mismo piso antes mencionado.

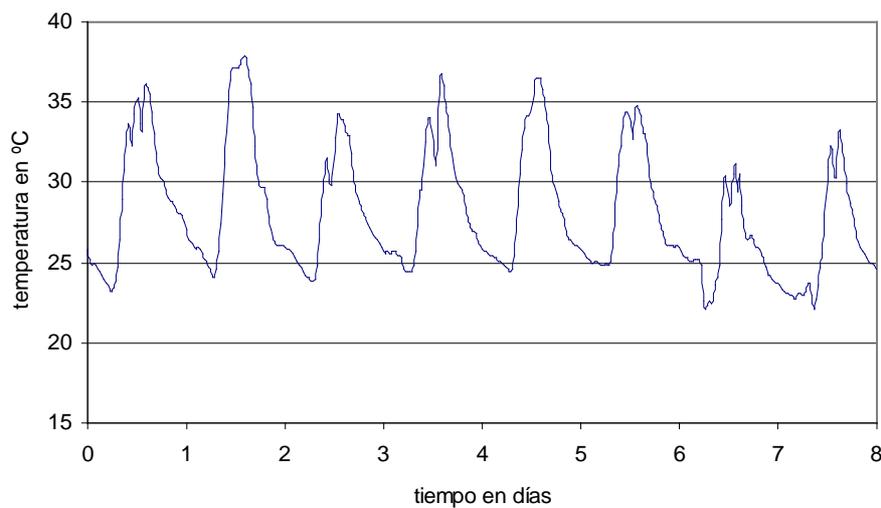


Figura 6: Evolución de la temperatura del aire exterior durante 8 días desde el 16 hasta el 23 de agosto 2002.

La amplitud de las oscilaciones día - noche es de 12°C en promedio. En el gráfico, se comprueba que, durante las mediciones, todos los días fueron soleados.

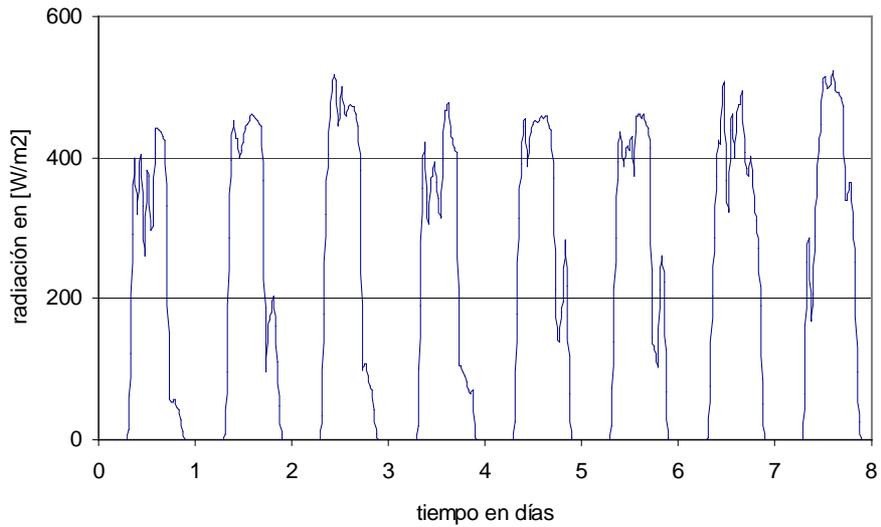


Figura 7: Evolución de la radiación solar exterior. Datos de 8 días desde el 16 hasta el 23 de agosto 2002.

La radiación solar exterior obtenida corresponde a una célula fotovoltaica protegida de los rayos directos del sol.

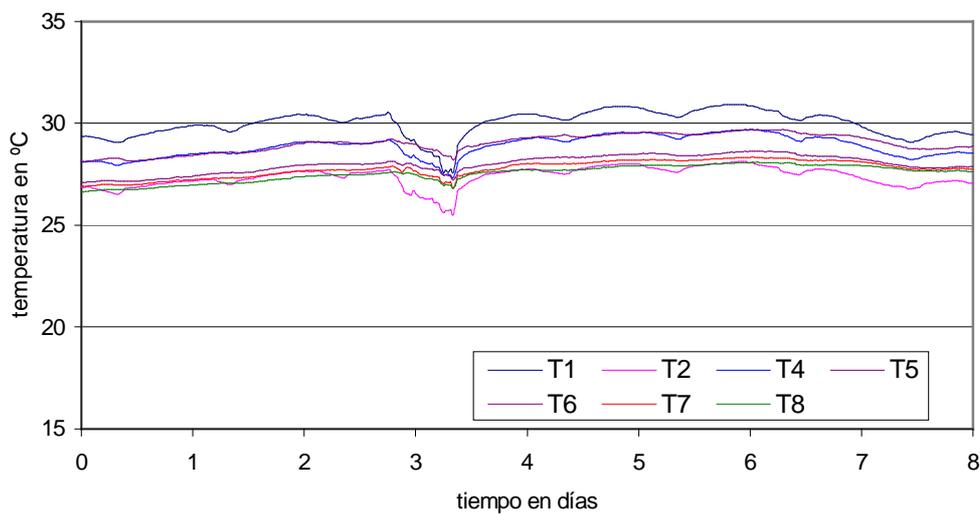


Figura8: Evolución de las temperaturas interiores para un intervalo de mediciones de 8 días desde el 16 hasta el 23 de agosto del 2002.

Las sondas de mediciones T_1 (a 50 cm. de la ventana) y T_2 (a 1 m de la ventana) muestran unas oscilaciones diarias de aproximadamente 0.5 °C. Las temperaturas interiores restantes

evolucionan de una forma muy suave, y tienden a ser planas. Se puede decir que la oscilación de la temperatura interior es una décima parte de la de la temperatura exterior.

Se produjo una caída de la temperatura para todas las sondas la noche del día 4, probablemente debida a que se mantuvieron las ventanas abiertas toda la noche; por lo tanto, las pérdidas térmicas hacia el exterior fueron importantes.

En la época de las mediciones, no había presencia de los ocupantes ni por el día ni durante las noches. La cantidad de la radiación solar registrada en el interior es prácticamente nula (menos de 10 lux en máximo). Las mediciones se hicieron en el mes de agosto. La radiación solar de verano sobre una fachada sur es mínima, y las persianas se mantuvieron totalmente bajadas, lo cual impidió la penetración de la radiación solar directa. En esto, influye un factor muy importante, que es la mentalidad de los ocupantes, que son conscientes del efecto sobre el confort interior de la radiación directa y de las renovaciones de aire.

II.3.1.3 La respuesta interior para la época de primavera

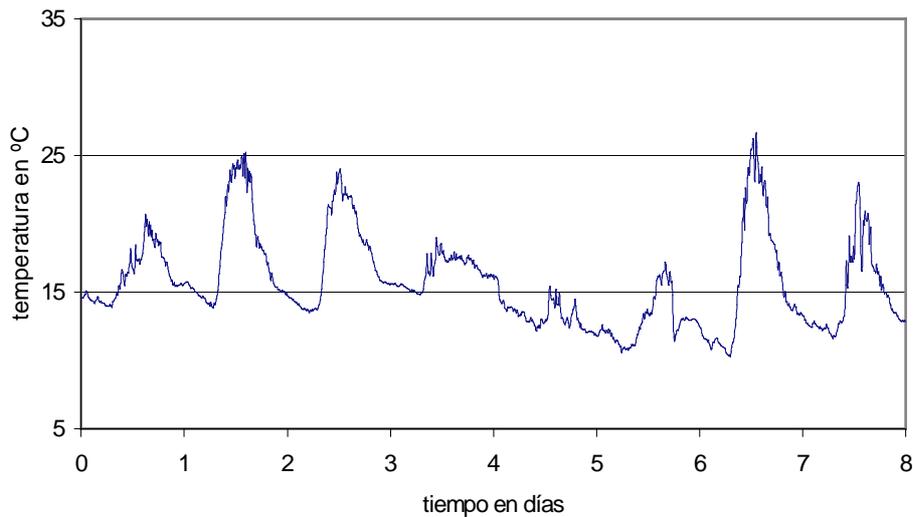


Figura9: Evolución de la temperatura exterior. Datos de 8 días desde el 28 de abril hasta el 05 de mayo 2002.

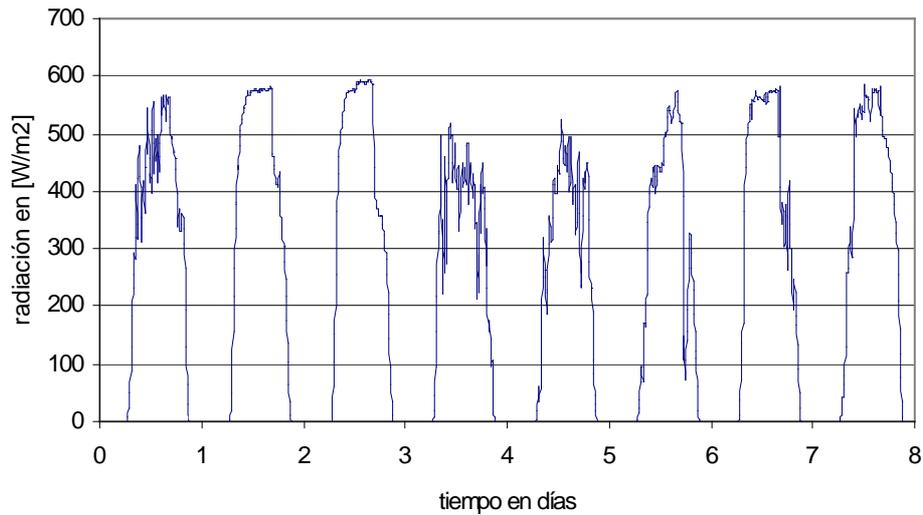


Figura10: Evolución de la radiación solar exterior para la época de las mediciones.

La amplitud de la variación de la temperatura exterior es variable de un día a otro. La máxima oscilación es de 10 ° C, y la mínima es de 2 ° C. Durante la época de mediciones, hubo algunos días nublados, justamente los que corresponden a la oscilación mínima de la temperatura exterior en el ciclo día-noche.

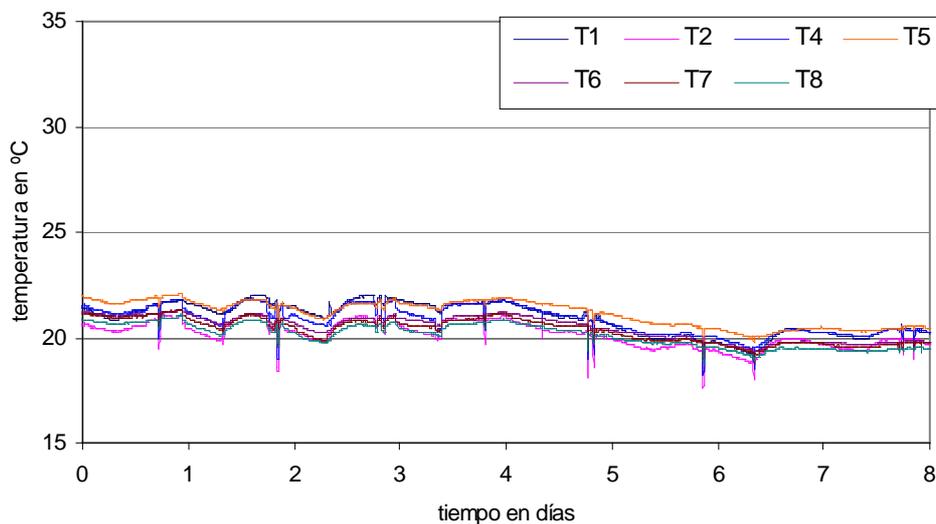


Figura11: Evolución de las temperaturas interiores para la misma época de mediciones. Condición de protección de la envolvente: Persianas cerradas.

La variación de la temperatura interior para todas las sondas es en general suave, y la magnitud de oscilación día - noche es aproximadamente de 1°C. La temperatura media interior es casi la

misma para todas las sondas; se puede decir que la temperatura en el interior es casi la misma, independientemente de la distancia a la obertura.

La variación de la radiación solar en el interior es prácticamente nula, ya que el máximo registrado de la luz por las sondas fotovoltaicas no supera 0.16 W/m^2 . En este caso, las persianas se mantuvieron bien cerradas, lo que impidió la infiltración de la radiación solar.

A continuación, una comparación de la diferencia y de la amplitud entre la temperatura media interior y exterior.

	Temperatura exterior media	Temperatura media interior	Diferencia de amplitud de oscilación	Variación ΔT
Invierno	14.7 °C	21.35 °C	7.5 °C	6.65 °C
Verano	28.05 °C	28.36 °C	12.6 °C	0.31 °C
Primavera	15.7 °C	20.57 °C	9 °C	4.87

Analizando la tabla, la diferencia de la amplitud de oscilación entre la temperatura exterior e interior es distinta de una estación de año a otra. La comparación nos guía a conclusiones sobre la estrategia de los ocupantes frente a la protección de las oscilaciones exteriores de temperatura.

En invierno es cuando menos se protege de las excitaciones exteriores ya que la diferencia de amplitud es la mínima entre las tres estaciones del año. Es decir que la amplitud de oscilaciones de la temperatura interior es relativamente grande. Mientras que en verano los usuarios suelen protegerse más de las fluctuaciones exteriores de la temperatura y eso se refleja en la diferencia en amplitud de oscilaciones (12.6 °C), es decir que la temperatura interior tiende a ser plana y la amplitud no alcanza el 0.5 °C de diferencia entre el mínimo y el máximo.

De este análisis, podemos decir que los usuarios se protegen más del calor de verano que del frío de invierno. Dicho de otra forma, la resistencia de la vivienda al calor en verano es más grande que en el invierno.

En invierno, la condición es suave, y fácilmente se obtienen temperaturas interiores medias en las proximidades de 20°C ó en zona de confort.

Los valores correspondientes a temperatura interior media fueron calculados teniendo en cuenta todos los valores que marcaron las sondas de medición interior:

$$T_{\text{interior_media}} = \sum_{i=1}^{i=384} \frac{(T_{1i} + T_{2i} + T_{4i} + T_{5i} + T_{6i} + T_{7i} + T_{8i})}{(7 \times 384)}$$

Donde 384 es el número total de puntos.

Se ve claramente que el gradiente de temperatura en invierno es más importante que en verano y primavera. En invierno, se procura no ventilar mucho, para impedir infiltraciones de aire fresco, las cuales, podrían causar un brusco descenso de la temperatura interior. Al mismo tiempo, se aprovecha al máximo la incidencia de los rayos de sol sobre la fachada Sur. La radiación solar calienta el aire y las superficies que constituyen la piel del piso; estas superficies, irradian energía de nuevo, pero con una longitud de onda mayor. Gran parte de esta energía se pierde de nuevo hacia el exterior a través de la convección, pero otra parte se emite al interior del local a través de la conducción por las paredes. La ausencia de ventilación nocturna en invierno disminuye las pérdidas efectivas de calor por la renovación de aire.

Entre tanto, en verano, el gradiente de temperatura disminuye. La temperatura interior media es prácticamente igual a la temperatura exterior media. Sin embargo, la amplitud de oscilación de la temperatura interior es inferior a un grado centígrado, mientras que la amplitud de oscilación de la temperatura exterior es de más de 12 ° C.

El piso en estudio no posee ningún tipo de refrigeración activa, y presenta una masa térmica media. Las paredes son de ladrillo con cámara de aire y sin aislante. El calor absorbido durante el día y emitido por la noche, evita los grandes cambios de temperatura diurna que se producen en edificios de estructura ligera.

En cambio, la situación de primavera puede considerarse como un intermedio entre la de invierno y la de verano. La variación de la temperatura interior-exterior está en un punto medio entre la variación de invierno y la variación de verano.

II.3.2 Análisis en el campo de frecuencias:

II.3.2.1 Relación existente entre la frecuencia y la amplitud de las oscilaciones interiores de temperatura

II.3.2.1.1 Capacidad calorífica y espesor de los muros

La capacidad calorífica o térmica, la facultad de almacenar calor, es una importante calidad de los materiales de construcción. En general, la capacidad térmica es aproximadamente proporcional a la masa. Grandes cantidades de materiales densos contendrán grandes cantidades de calor. Los materiales porosos y las pequeñas piezas de material contienen pequeñas cantidades de calor. El agua contiene una capacidad térmica más alta que cualquier otro material en las temperaturas normales del aire, pero la tierra, el ladrillo, la piedra, el yeso, los metales y el hormigón son también materiales de capacidad térmica alta[42].

La parte externa de la envolvente de una construcción está sometida alternativamente a un calentamiento durante el día y a una refrigeración durante la noche. La temperatura de una superficie externa depende esencialmente de su color y de su orientación.

Una parte del calor absorbido durante el día calienta la masa de los muros y de tejados y no es que el resto que está transmitido al interior. La relación entre el calor absorbido y el calor acumulado en los materiales de construcción depende antes de todo de la capacidad calorífica de la envolvente, es decir del producto del peso por el calor específico. Pues, a causa de variaciones periódicas de las condiciones exteriores, y con las diferencias de temperaturas y una resistencia térmica dada, el flujo de calor transmitido al interior del edificio decrece cuando la capacidad calorífica de su estructura crece.

Por la noche, el calor acumulado por una estructura de gran capacidad calorífica es restituído, lo que reduce la cantidad de calor pérdida a un nivel inferior a aquello que alcanzaremos con la misma diferencia de temperaturas si habíamos considerado solamente la resistencia térmica. Podemos decir que la capacidad calorífica “modera” la importancia de los flujos entrantes y salientes del edificio, y entonces reducir las fluctuaciones de

temperaturas interiores. Es más, la capacidad calorífica introduce un retardo en el momento donde intervienen las fases de calentamiento y refrigeración de la temperatura y aquellas del ciclo de flujos de calor (efecto de desfase).

Una construcción con una capacidad calorífica elevada permite entonces, en una proporción considerable, de controlar las condiciones térmicas interiores en las regiones de grandes temperaturas diurnas y a radiación solar intensa. Es entonces posible de regular las fluctuaciones de temperatura no solamente a aquellas debidas a régimen calorífico de superficies externas expuestas a la radiación solar y al ambiente exterior, pero igualmente aquellas resultantes de la penetración de calor por las aberturas de forma de radiación solar, de infiltraciones del aire exterior, o bien del calor disipado en el interior mismo con los aportes internos por el uso de los electrodomésticos.

Asimismo, la capacidad calorífica por unidad de superficie de estructura es el producto multiplicativo de la densidad, del espesor y del calor específico de sus componentes. Pero el efecto térmico obtenido si modificamos la densidad de un material es completamente diferente de aquello que obtendremos si aumentamos el espesor, aunque resulte la misma modificación en la capacidad calorífica.

Una aumentación en la capacidad calorífica obtenida por una densidad mayor no entrena ninguna disminución de la conductividad térmica, y no evite entonces la reducción de la resistencia térmica. El cambio de materiales pesados por materiales ligeros con resistencia térmica elevada, sin modificar el espesor de los muros, reduce la capacidad calorífica. En este caso el cambio es poco eficaz para la mejora de las condiciones térmicas en verano donde se necesita grandes masas térmicas para frenar el calor exterior. Cuando, para elevar la capacidad calorífica, aumentamos el espesor del muro, la resistencia térmica del conjunto es igualmente aumentada de una forma proporcional, y entonces los efectos térmicos son mucho más grandes [5].

II.3.2.1.2 Las características teóricas de la conducción de calor en función de la frecuencia a través de una construcción de múltiples capas " muro"

Resumiendo, se puede considerar tres rangos de frecuencias para el análisis en edificios:

- Bajas frecuencias: son todas las frecuencias de periodicidad superior a 4 días.
- Frecuencias medias: aquellas de periodicidad entre 4 días y 12 horas.
- Altas frecuencias: las de periodicidad inferior a 12 horas.

II.3.2.2 La respuesta térmica interior en invierno

El análisis de Fourier nos permite la descomposición de la onda térmica en varios armónicos. A continuación, la gráfica señala el espectro de las ondas térmicas correspondiendo a las temperaturas T1 (a 50 cm de la fachada principal), T4 (a 2 m) y T5 a (3 m).

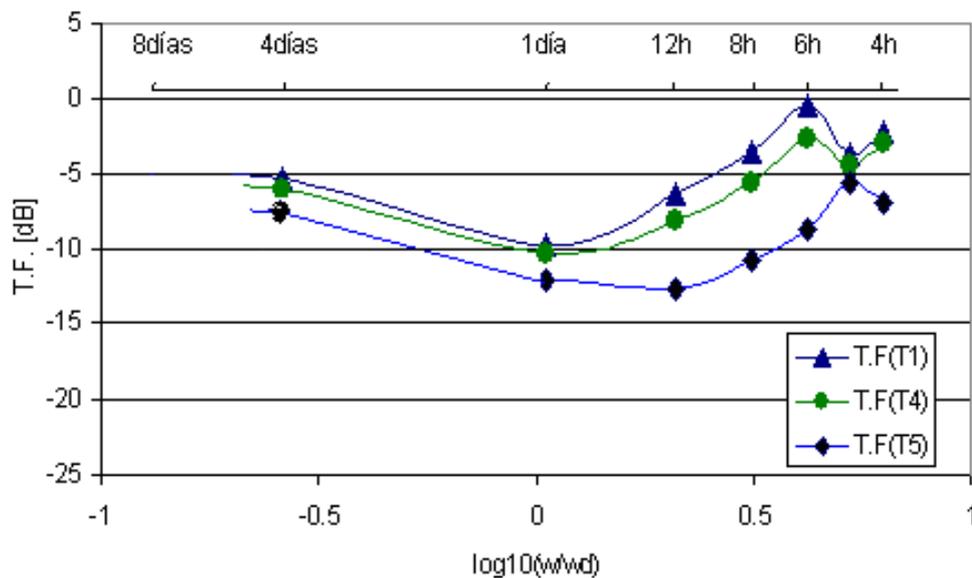


Figura12: Evolución de la función de transferencia para las temperaturas T1, T4 y T5. 8 días desde el 01 hasta el 08 de Enero de 2003. Persianas cerradas.

El eje de abscisas indica la frecuencia (ω/ω_d [adimensional]), que es 2π veces el número de repeticiones del fenómeno físico periódico en una unidad de tiempo dividido por el número de repeticiones del fenómeno físico periódico en un día. El eje de ordenadas presenta el módulo de la función de transferencia ($|T.F|$).

El valor numérico de $|T.F|$ a cada frecuencia, caracteriza el porcentaje de la amplitud de oscilaciones interiores respecto a la exterior

Si $\log_{10} |T.F| > 0$ para una frecuencia dada, significa que la amplitud de la oscilación de la temperatura en el interior, es mayor que la amplitud de la temperatura exterior.

Si $\log_{10} |T.F| = 0$ ($|T.F| = 1$), significa que la amplitud de oscilación de la temperatura interior, es igual a la del exterior.

Si $\log_{10} |T.F| < 0$, significa que la amplitud de oscilación de la temperatura interior, es menor que la amplitud de la temperatura exterior.

Las oscilaciones interiores respecto al exterior son gradualmente menores cuando el valor numérico de $\log_{10} |T.F|$ aumenta en negativo.

Analizando el gráfico, observamos primero, una caída de ganancias, al pasar de las bajas frecuencias a las frecuencias medias, hasta llegar a la frecuencia de un día, la cual presenta el valor más pequeño. Luego, al pasar de las frecuencias medias a las altas frecuencias, se nota una recuperación en ganancias. El valor más alto de las ganancias corresponde a la frecuencia de 6 horas (un cuarto de día).

Se aprecia que, para todo el rango de frecuencias, existe una pequeña diferencia en ganancias entre T1 y T4. La diferencia es mayor entre T1 y T5 (log T.F de T5 presenta los valores más negativos).

Según la distribución de las sondas dentro del local en estudio, en las que corresponden a T1 y T4, la abertura principal subtiende un gran ángulo sólido. En cambio, la sonda de T5 está situada detrás de una mesa y, por lo tanto, el ángulo sólido es menor y se encuentra más protegida. La energía intercambiada entre el interior y el exterior es mayor cuando desde la ubicación interior se forma un ángulo sólido amplio con la abertura del exterior.

II.3.2.3 La respuesta térmica interior en verano

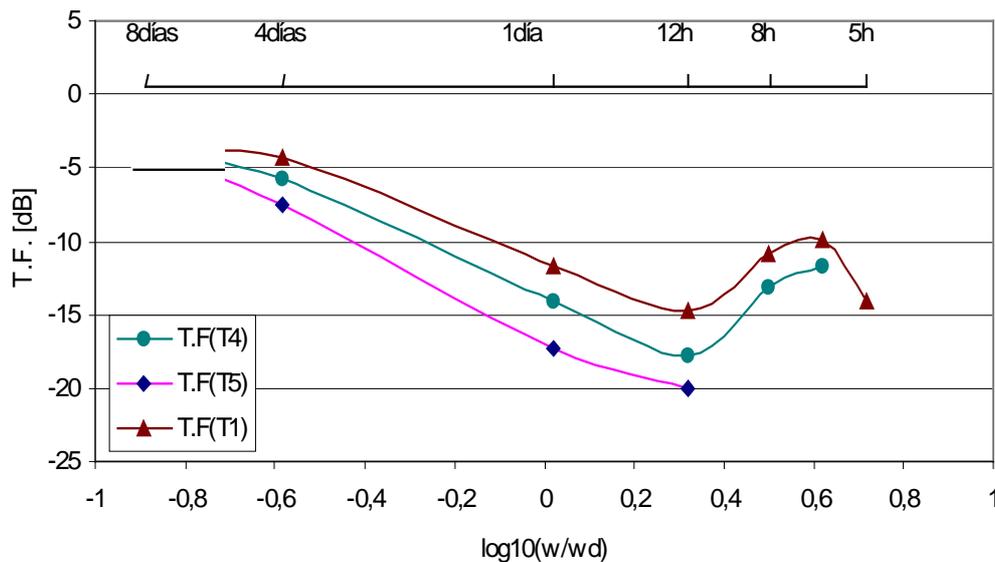


Figura 13: Evolución de la función de transferencia para T1, T4 y T5. 8 días desde el 16 hasta el 23 de Agosto 2002. Persianas Cerradas

La función de transferencia sigue aproximadamente la misma evolución. Se observa una caída en ganancias al pasar de la frecuencia de 8 días a la frecuencia de medio día, la cual presenta el valor mínimo en ganancias. Una recuperación en el porcentaje de las oscilaciones interiores respecto a las exteriores de la frecuencia de 12 horas hasta la frecuencia de 6 horas. Existe una ausencia de valores de T.F para la sonda T5 a partir de la frecuencia de 12 horas. Esto es debido al aumento del error de cálculo ya que los valores obtenidos por la transformada de Fourier son insignificantes y no se pueden tener en cuenta para construir la gráfica (en las frecuencias altas, la amplitud de oscilaciones de T5 es mínima).

En frecuencias medias y en altas frecuencias, los valores de T.F para todas las temperaturas presentan los valores logarítmicos negativos más altos (-2 para la frecuencia de medio día), lo cual significa que la oscilación de la temperatura interior en este caso, es mínima. Se puede decir que el porcentaje de las oscilaciones interiores respecto a las exteriores es casi inapreciable y que la temperatura en el interior -independientemente de la posición espacial- es casi constante y no sigue la evolución de las oscilaciones exteriores.

II.3.2.4 La respuesta térmica interior en primavera

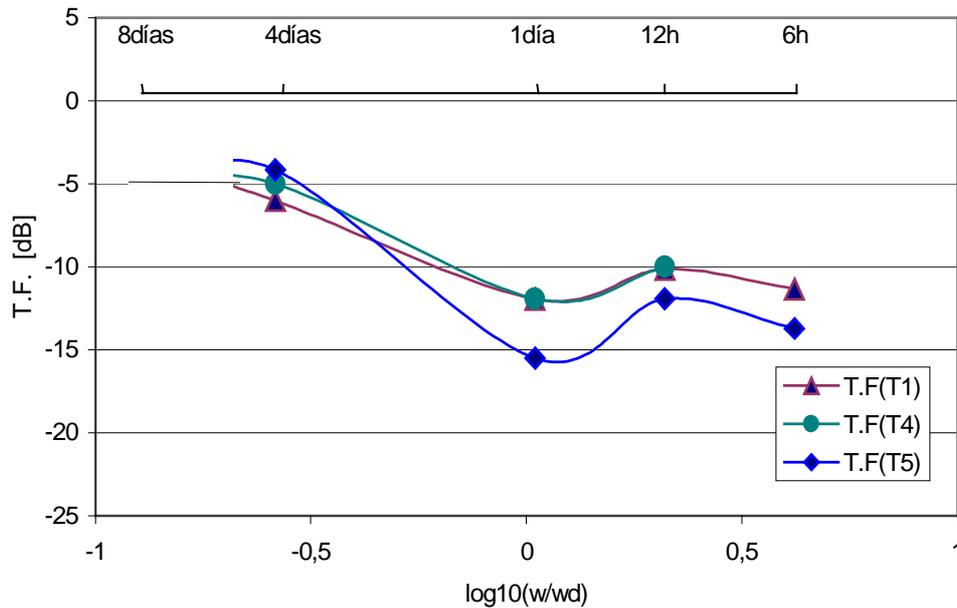


Figura14: Evolución de la función de transferencia para T1, T4 y T5. Datos de 8 días desde el 28 de Abril hasta el 05 de Mayo 2002. Persianas cerradas.

La figura precedente –que corresponde a las mediciones de primavera- representa respuestas térmicas de diferentes ubicaciones del local en estudio, siempre dentro de la condición de protección dinámica persianas cerradas.

La evolución de la función de transferencia para las temperaturas T_1 , T_4 y T_5 sigue la misma ley que en los casos de invierno y verano. Una caída en amplitud de oscilaciones interiores de bajas frecuencias (frecuencia de 8 días) hasta la frecuencia de un día, la cual presenta el valor mínimo de amplitud. De nuevo, una recuperación en la amplitud de oscilaciones cuando nos dirigimos de frecuencias medias a altas frecuencias.

Queda mencionar que, en este caso y comparando con el caso anterior de invierno, las oscilaciones correspondientes a la temperatura T_5 son bastantes similares a las oscilaciones correspondientes a T_1 , T_4 sobre todo en las bajas frecuencias. Se puede decir que el espacio interior tiende a tener una misma respuesta para todas las ubicaciones espaciales.

II.3.2.5 Comparación de las respuestas de verano, invierno y primavera

Antes de efectuar una comparación entre las respuestas térmicas de distintas estaciones del año y para no complicar el análisis, hemos de considerar que el espacio interior tiene una única respuesta. Es decir que supondremos que la vivienda tiene una amplitud de oscilación igual para todas las ubicaciones espaciales.

Como se ha mencionado antes, en el piso de estudio hemos colocado una serie de sondas de temperatura y luz formando una línea perpendicular a la abertura de la fachada principal. En tal caso, hemos calculado el promedio entre todas las funciones de transferencia de todas las sondas obteniendo de esta manera una única función de transferencia para todo el piso. El proceso a seguir, es de calcular la función de transferencia (T.F) de cada punto, y posteriormente, obtener el promedio de todas las (T.F).

En la figura que sigue, se presentan el promedio de las respuestas interiores del piso, para tres estaciones distintas del año, invierno, primavera y verano, bajo la condición de protección persianas cerradas.

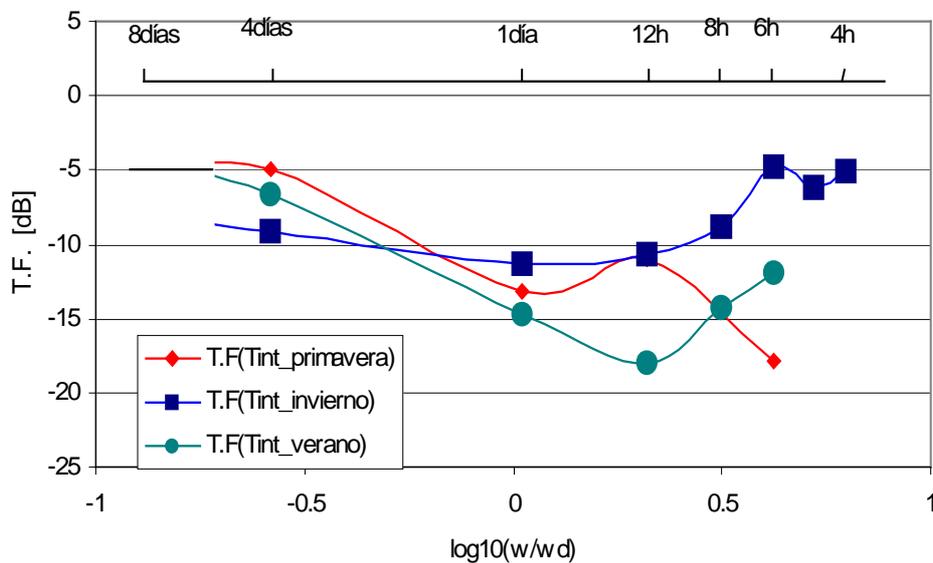


Figura15: Comparación de la evolución de la función de transferencia de las temperaturas interiores medias. Condición de protección persianas cerradas.

II.3.2.2.1 Invierno

En las bajas frecuencias: Para la frecuencia de 4 días, $\log_{10} |T.F| = -0.9$, es decir que el ambiente interior recibe un 12% de las oscilaciones exteriores.

Las ganancias en bajas frecuencias son debidas a la ventilación en largos intervalos de tiempo (donde existe un intercambio continuo de masa) y al calor acumulado a través de la masa térmica del edificio (el cual se emite luego a bajas frecuencias).

En nuestro caso, durante la época de mediciones, las ventanas se mantuvieron cerradas, excepto para intervalos de tiempo inferiores a 4 horas; por lo tanto, no entra directamente en las oscilaciones en las bajas frecuencias sino en posteriormente en las frecuencias medias y altas frecuencias.

El edificio cuenta con una masa térmica media, y la amplitud de las oscilaciones de temperatura en el exterior no presenta grandes valores; todos estos fenómenos hacen que la respuesta térmica a la frecuencia de 8 días sea menor.

En las frecuencias medias: para la frecuencia de 4 días, $\log_{10} |T.F| = -0.91$, es decir que el ambiente interior recibe un 12% de las oscilaciones exteriores, y para la frecuencia de 1 día, $\log_{10} |T.F| = -1.12$, lo que significa que el porcentaje de las oscilaciones interiores respecto a las exteriores es del 7%. Son valores mínimos, pero comparando con las ganancias para las estaciones de primavera y verano, se puede decir que son importantes.

Las ganancias a frecuencias medias son debidas a la ventilación durante intervalos de tiempos medios (orden de 4 días a 12 horas), a la transferencia de calor por conducción y a las ganancias indirectas por radiación solar sobre las superficies exteriores.

En altas frecuencias: es cuando la amplitud de las oscilaciones interiores alcanza el máximo. A la frecuencia de 6 horas, $\log_{10} |T.F| = -0.477$, es decir que el ambiente interior recibe un 33.3% de las oscilaciones exteriores.

La amplitud de oscilación interior en altas frecuencias es debida a fenómenos ambientales sucedidos en intervalos de tiempo cortos, como la abertura de las ventanas por los usuarios durante las horas del día, la radiación solar directa (máximo de 8 horas al día), los aportes

internos (calefacción durante las noches de invierno, el calor disipado por los ocupantes y los electrodomésticos...)

En nuestro caso, los flujos de aire fresco intercambiados por ventilación diurna, y la radiación solar en el interior (ver la gráfica de la evolución de la radiación solar en el interior durante la época de mediciones) son los principales responsables de las oscilaciones térmicas dinámicas en altas frecuencias.

II.3.2.2 .2 Primavera

En bajas frecuencias, $\log_{10} |T.F| = -0.50$ para la frecuencia de 8 días, las fluctuaciones de la temperatura interior son aproximadamente de un 31% de las fluctuaciones exteriores. Se aprecia que, a largo plazo, las fluctuaciones interiores son un 18% más elevadas en primavera (tiempo favorable para dejar de protegerse mucho de las fluctuaciones exteriores) que en invierno (necesidad de protección cerrando las ventanas para intervalos largos de tiempo y aislando bien de las fluctuaciones exteriores).

El edificio en invierno cambia su resistencia térmica efectiva (menos pérdidas efectivas hacia el exterior), por lo tanto, se necesitan intervalos de tiempo prolongados para que el interior reciba la misma cantidad de ganancias que en primavera.

En frecuencias medias: $\log_{10} |T.F| = -1.31$ para la frecuencia de un día, la amplitud de oscilación interior es de un 5% de la amplitud exterior; es un valor relativamente cercano al registrado en la época de invierno (12%). Es el resultado esperado, ya que el fenómeno principal de las ganancias en el interior, es el calor intercambiado por conducción de las paredes.

En altas frecuencias: $\log_{10} |T.F| = -0.69$ para la frecuencia de 6 horas, el ambiente interior recibe un 20% de las fluctuaciones exteriores, un valor del 13% más pequeño para la misma frecuencia que en invierno.

Del mismo modo, es el resultado esperado, ya que la fachada sur del piso permite la recepción de cantidades de radiación solar más importantes en la estación de invierno que en primavera (la intensidad de la radiación interior demostrada por las gráficas anteriores demuestra que es mayor en invierno que en primavera).

II.3.2.2.3 Verano

En bajas frecuencias: $\log_{10}|T.F| = -0.6$ para la frecuencia de 4 días, la temperatura en el interior recibe aproximadamente un 25% de las oscilaciones exteriores. Comparando con la estación de invierno, las fluctuaciones interiores son cerca de 12.5% más grandes en verano que en invierno.

Los largos intervalos de ventilación y la falta de necesidad de sus ocupantes de no protegerse durante las noches hacen que las oscilaciones a bajas frecuencias sean mayores y la fluctuación de la temperatura interior tiende a igualarse con las fluctuaciones exteriores.

En frecuencias medias: $\log_{10}|T.F| = -1.47$ para la frecuencia de un día, es decir que la temperatura interior oscila sólo un 3.4% de la oscilación exterior. En las frecuencias medias, el posible aumento en la amplitud de las oscilaciones de la temperatura interior es debido al calor ganado por la conducción de las paredes y por las renovaciones de aire debidas a la ventilación durante intervalos de tiempo de orden de un día aproximadamente.

Las persianas cerradas causan una resistencia más al calor por conducción a causa de la posible cámara de aire quieta que sirve de aislamiento.

En verano, la cantidad de la radiación incidente sobre la fachada sur es menor que aquella recibida sobre la misma en invierno. Por lo tanto, se reduce visiblemente el flujo de calor exterior–interior.

En altas frecuencias: $\log_{10}|T.F| = -1.19$ para la frecuencia de 6 horas, lo que significa que el ambiente interior recibe sólo un 6.5% del ambiente exterior. También es el resultado esperado, ya que como los ocupantes se protegen al máximo del calor del día, y ello impide que haya infiltraciones de radiación solar en el interior, y por consecuencia, menos ganancias internas por radiación directa.

II.4 Condición de protección persianas abiertas

Para dejar que la radiación solar penetre al interior del local, se ha de dejar las persianas abiertas durante las horas del sol. No se ha podido coger mediciones para todas las estaciones del año, teniendo en cuenta que el local está habitado y resulta poco razonable no protegerse de la radiación solar durante la estación de verano, sobre todo si se requiere protegerse del calor del día manteniendo, además de las persianas cerradas, también las ventanas, para disminuir el intercambio por convección y ventilación, ya que la temperatura del aire exterior durante las horas del sol es más alta que la temperatura del aire interior. A continuación, y para acostumbrarse a interpretar los gráficos en la escala de frecuencias, sólo analizaremos los datos después de transformarlos del dominio temporal al campo de frecuencias. Las mediciones corresponden al mismo local en estudio con la ubicación (Sur 15° Este) de la ciudad de Barcelona.

II.4.1 Respuesta de invierno

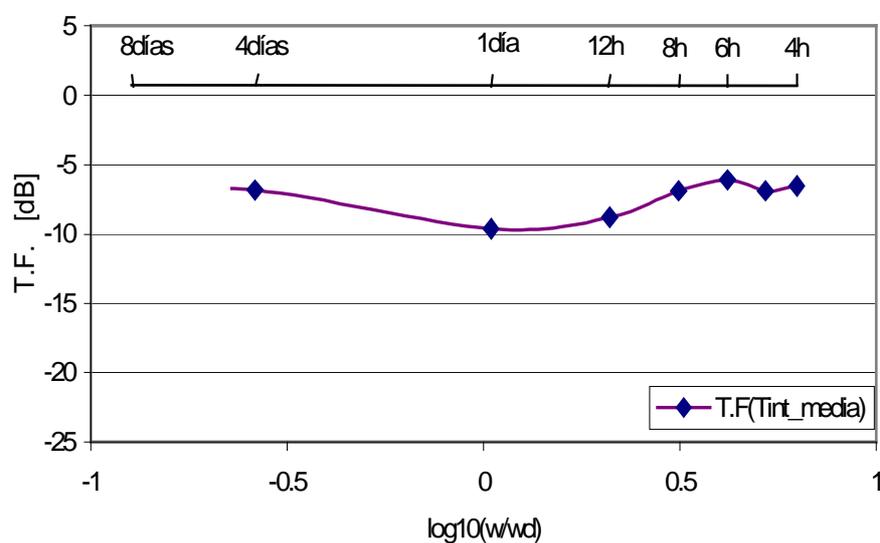


Figura16: Evolución de la función de transferencia de la temperatura interior media.

Datos de 8 días desde el 24 hasta el 31 de enero 2002. Persianas abiertas

La figura representa la respuesta térmica dinámica global del local de estudio. Se ha calculado la media del módulo de la transformada de Fourier de cada una de las sondas interiores, haciendo como si el local tuviera una única respuesta. La primera observación a subrayar en

este gráfico, es que todas las ganancias interiores, en todas las frecuencias, se sitúan entre $\log_{10}|T.F| = -0.6$ y $\log_{10}|T.F| = -1$. La fluctuación máxima de la temperatura interior corresponde a la frecuencia de *6 horas* (un tercio de día), donde el orden de las oscilaciones interiores alcanza el 24,48% de las oscilaciones exteriores. En cambio, la fluctuación mínima corresponde a la frecuencia de *un día*, donde el margen de las oscilaciones interiores, esta vez, es de un 10,88% de las oscilaciones exteriores. Falta añadir que durante la época de las mediciones, se mantuvieron las ventanas cerradas durante largos intervalos de tiempo, lo cual significa que el abrir las ventanas durante cortos intervalos de tiempo sólo afecta el orden de la respuesta interior en altas frecuencias. Por consiguiente, el espectro de las ganancias en bajas frecuencias (frecuencia de 4 días) sólo es de un 20% de las oscilaciones exteriores (el intercambio másico del calor durante cortos intervalos de tiempo a través de las ventanas abiertas interviene poco en las ganancias a bajas frecuencias). Cuando se mantienen las ventanas cerradas, se aumenta la resistencia global de la vivienda, lo cual provoca un descenso en las amplitudes de oscilación en las bajas frecuencias.

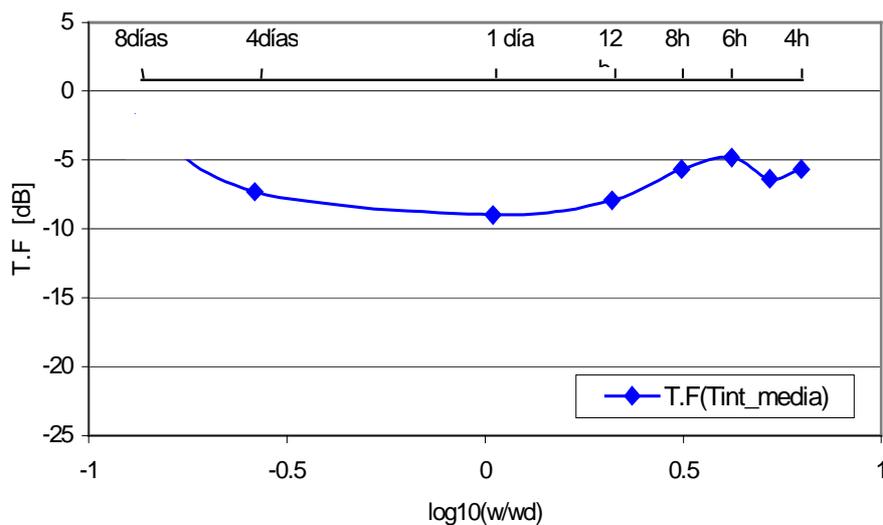


Figura17: T.F.(Tint_media). 8 días desde el 01 hasta el 08 de febrero 2002.

Persianas abiertas con escasa ventilación nocturna.

La evolución de la respuesta dinámica interior es prácticamente idéntica al caso de la figura 16. Para la época del año (invierno) y para la misma condición de protección (persianas abiertas) es lógico que la amplitud de las oscilaciones sea igual para ambos casos sobre todo en las frecuencias bajas y medias. Se puede apreciar una ligera diferencia en las oscilaciones en las altas frecuencias debido a posibles cambios “cortos” en las oscilaciones exteriores.

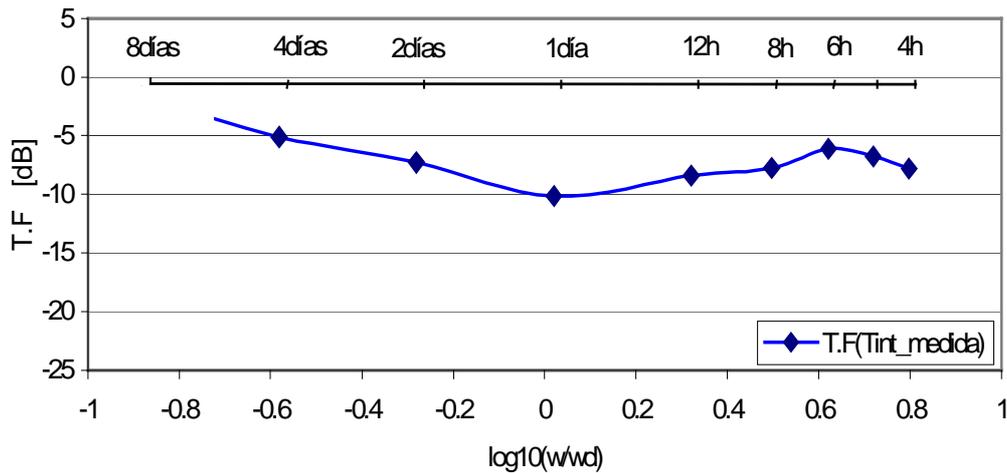


Figura18: T.F.(Tint_medida) 8 días desde el 02 hasta el 09 de diciembre
2002. Persianas abiertas

Otra vez más, la respuesta dinámica interior del local sigue la misma evolución para todas las frecuencias, tratándose de la condición de protección “persianas abiertas”. En general, las ganancias internas descienden cuando nos dirigimos de las frecuencias bajas hasta la frecuencia de un día (frecuencias medias), la cual presenta el menor valor en ganancias; este valor empieza luego a ascender, cuando nos dirigimos hacia las frecuencias altas.

A continuación, una comparación entre las tres respuestas interiores en invierno nos dará una idea de la diferencia que puede existir al nivel de la resistencia de la envolvente aunque se trate de la misma condición de protección “persianas abiertas”. Durante las mediciones, se mantuvieron las mismas condiciones de protección de la piel del edificio, exceptuando las mediciones correspondiendo a los casos de enero y diciembre, donde había una ligera ventilación nocturna.

La figura siguiente presenta la evolución de la temperatura del aire exterior para los tres intervalos de tiempo.

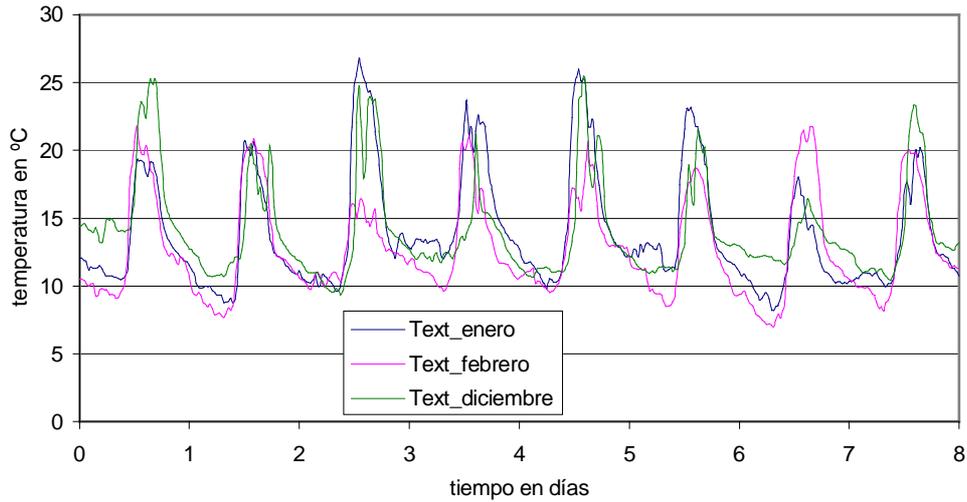


Figura19: Comparación entre la evolución de las temperaturas exteriores para los meses de enero, febrero y diciembre 2002. Datos de 8 días.

La amplitud de las oscilaciones de la temperatura exterior para los tres casos es bastante similar, lo cual significa que, para los tres casos, la excitación exterior es aproximadamente de misma intensidad. Podemos decir que en los tres casos, el piso estaba expuesto al mismo orden de la excitación exterior,

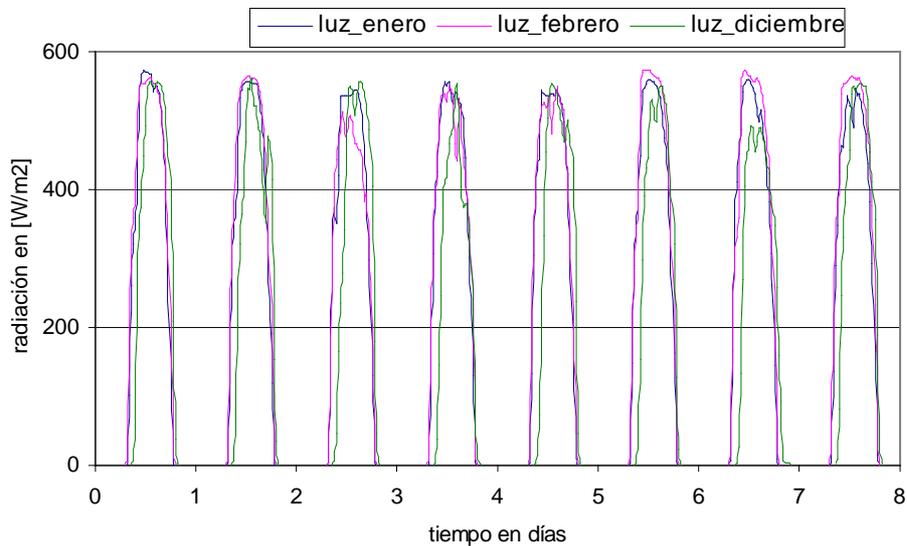


Figura20: Comparación entre la evolución de la radiación exterior para los meses de enero, febrero y diciembre 2002. Datos de 8 días.

De la misma forma, la radiación exterior es de mismo orden para los tres casos en estudio, y todos los días son soleados. Lo cual significa que el tipo de la respuesta interior sólo depende

de las características de la condición de protección de la envolvente.

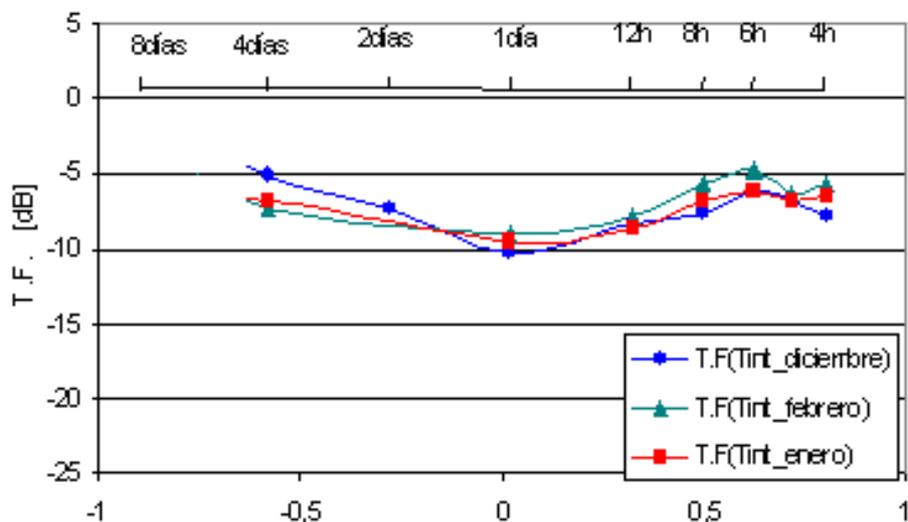


Figura21: Evolución de la función de transferencia de los tres casos de invierno. Persianas abiertas.

En las altas frecuencias, la evolución de las oscilaciones interiores es la misma para los tres casos, con un pico de ganancias a la frecuencia de 6 horas, que corresponde aproximadamente a la duración de la captación solar dentro del local.

En las bajas frecuencias, se nota una ligera diferencia en la oscilación interior entre los tres casos. Como se ha indicado antes, en los casos correspondiendo a diciembre y febrero, las mediciones se hicieron manteniendo una ligera ventilación continua; por lo tanto, las renovaciones continuas de aire con el exterior hacen que el ambiente interior fluctúa más en las bajas frecuencias. Se puede decir que la ventilación por largos intervalos de tiempo afecta directamente el orden de las oscilaciones en bajas frecuencias.

Por último, y para acabar el análisis de la respuesta térmica de invierno, a continuación se ha de hacer una comparación entre la respuesta en enero 2002 y enero 2003, bajo las mismas condiciones de protección de la piel “persianas abiertas.

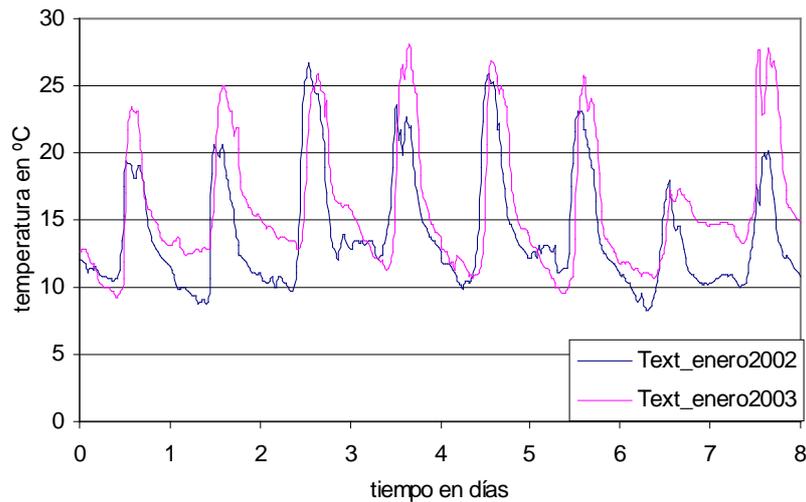


Figura22: Comparación de las temperaturas exteriores para 8 días del mes de enero 2002 y enero 2003.

Como se nota a través de la figura de la evolución de la temperatura del aire exterior durante las dos épocas de las mediciones, la amplitud de las oscilaciones es muy similar, y se puede decir, que para los dos casos, la longitud de la excitación exterior es la misma en ambos casos. Por lo tanto, la respuesta térmica dinámica en el interior sólo se diferenciará, entre ambos casos, por las condiciones interiores de protección y los aportes causados por las actividades de los ocupantes (abrir y cerrar las ventanas, aportes internos por los aparatos electrodomésticos, ganancias y pérdidas por conducción de las paredes de separación con los pisos que rodean el piso estudiado, etc.)

La figura 23 presenta la evolución de la respuesta dinámica interior para los dos casos en estudio. Como se puede observar, en las altas frecuencias (desde la frecuencia de un día hasta la frecuencia de 4 horas), y a frecuencias medias (desde la frecuencia de 7 días hasta la frecuencia de 1 día), el grado de las oscilaciones interiores es prácticamente el mismo en ambos casos.

De la misma manera, el orden de la oscilación interior a bajas frecuencias (frecuencia de 4 días) es idéntico también. Se puede decir que la respuesta térmica dinámica interior es la misma para ambos casos. Aunque puedan existir diferencias en las oscilaciones de los parámetros ambientales exteriores, debido al intervalo de frecuencias analizado en este estudio, no se aprecia mucho la diferencia en las oscilaciones interiores.

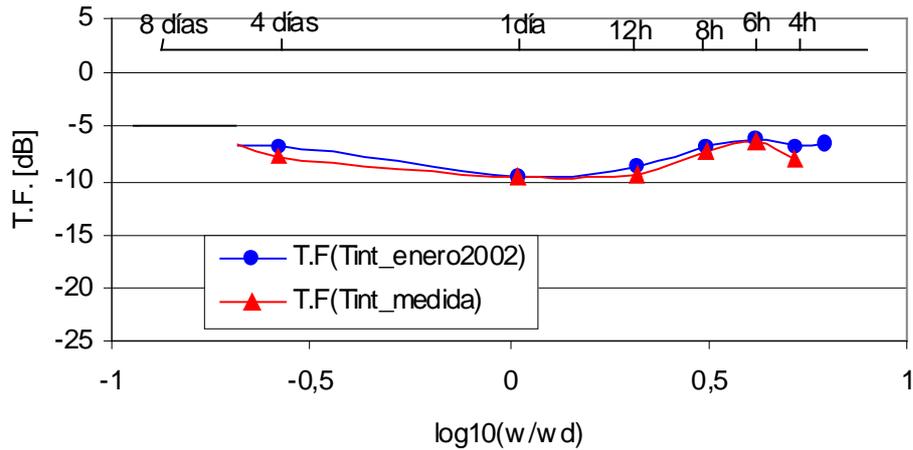


Figura23: Evolución de T.F. de la temperatura interior media. Datos de 8 días en enero 2002 (sin ventilación de largos intervalos de tiempo) y en enero 2003 (con ventilación). Persianas abiertas.

II.4.2 Respuesta de primavera

Durante la estación de primavera, la temperatura del aire exterior es agradable, y los ocupantes no suelen protegerse mucho de las excitaciones exteriores, sobre todo durante las horas del día. A causa de la ubicación del edificio, y de los edificios que le rodean, las horas de incidencia del sol sobre el piso en estudio son más largas en primavera que en invierno (desde las 9h30 hasta las 17h en primavera, y desde las 11h hasta las 16h30 en invierno). Los dos factores influyen directamente sobre el tipo de la respuesta dinámica en el interior. Se han hecho mediciones en el mismo piso durante 8 días, desde el 20 hasta el 27 de marzo de 2003, con la condición de protección persianas abiertas; La figura a continuación presenta la evolución de la respuesta interior para todas las frecuencias. Se observa que las ganancias son prácticamente iguales para todas las frecuencias, las fluctuaciones interiores son de 28,63% de las oscilaciones exteriores en las bajas frecuencias (frecuencia de 4días), de 28,85% en las frecuencias medias (frecuencia de 1 día), y de 26,76% en las altas frecuencias (frecuencia de 8 horas).

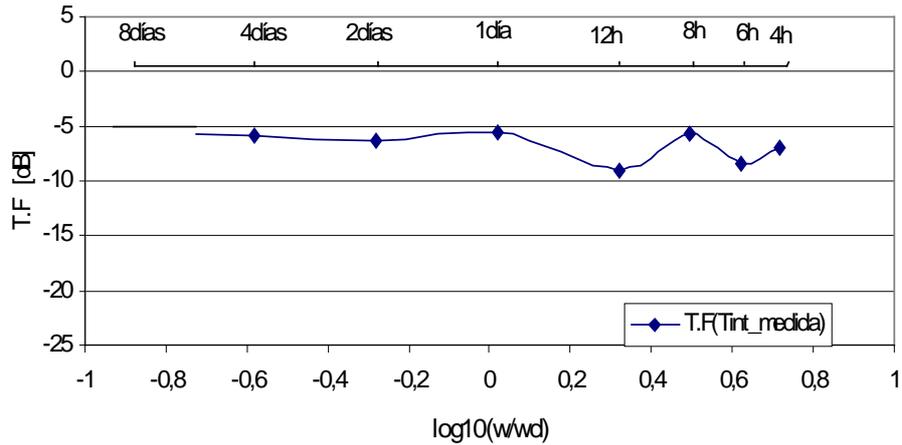


Figura24: T.F.(Tint_medida), datos de 8 días desde el 20 hasta el 27 de marzo 2003. Persianas abiertas.

A la frecuencia de un día, las ganancias interiores son relativamente altas, la radiación solar directa dentro del local es absorbida por la masa interior, en particular por el parquet del suelo, que tiene una baja capacidad térmica, lo cual permite una emisión rápida del calor acumulado durante las horas del sol; de esta manera, el ambiente interior gana calor durante un intervalo prolongado (durante las horas de sol, y luego por el calor emitido por la masa interior). La ventilación diurna, y la conducción de las paredes de la envolvente, también son factores directos sobre la oscilación interior en esa frecuencia.

II.4.3 Comparación de la respuesta interior para diferentes estaciones

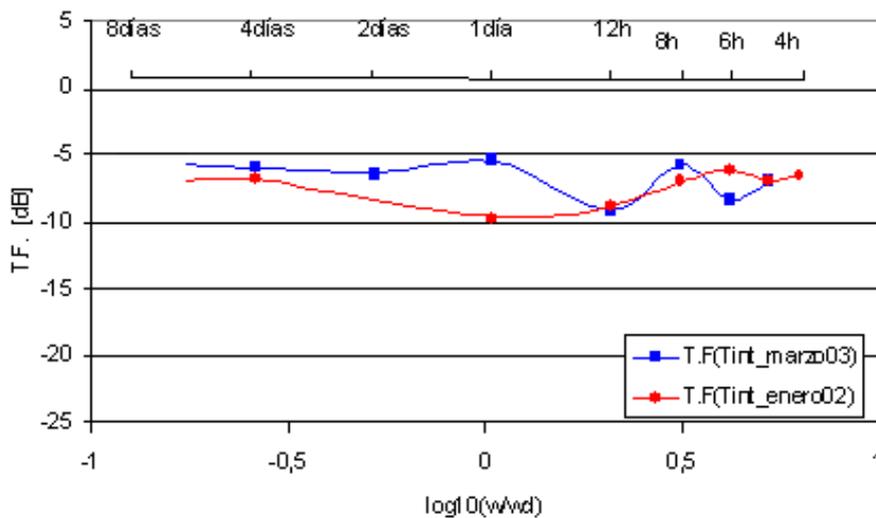


Figura25: Comparación de las respuestas interiores durante la estación de invierno y de primavera. Persianas abiertas

En las bajas frecuencias, y en las frecuencias medias, las ganancias térmicas dinámicas interiores son más importantes en la época de primavera que en la época de invierno. Es el resultado esperado, ya que en primavera los usuarios suelen protegerse menos de las excitaciones exteriores, al no ajustar el cierre de las puertas y las ventanas, permitiendo precisamente el intercambio de calor por masa. Durante el invierno, en cambio, la sensación de frío que provocan los flujos de aire fresco filtrados a través de las aberturas de la envolvente obliga los usuarios de la vivienda a ajustar bien el cierre de las puertas y ventanas.

En las altas frecuencias, hasta la frecuencia *de 8 horas* (la duración de la incidencia del sol dentro del edificio), las oscilaciones son más importantes en primavera que en invierno. También es el resultado esperado, teniendo en cuenta que el calor total ganado por la radiación solar directa es mayor en primavera que en invierno. A partir de la frecuencia de *6 horas*, es difícil justificar las oscilaciones interiores, ya que la influencia de las actividades de los ocupantes (abrir y cerrar las ventanas cambiando la ventilación, ajustar las persianas, tomar un baño caliente, utilizar los electrodomésticos de la cocina, etc.) es primordial para determinar el tipo de la respuesta a estas frecuencias.

II.5 La distribución espacial de la respuesta interior

Continuando con el análisis de la respuesta térmica interior en el mismo piso de mediciones, una exploración que merece la pena analizar, es la distribución espacial de las ganancias que va desde la abertura de la fachada principal (el conjunto de las ventanas que hace 8m^2 de tamaño) hacia el interior del edificio. En el análisis se tendrá en cuenta la condición de protección de la piel del edificio, aprobando así una conclusión completa sobre el comportamiento interior en función de las características protectoras de la envolvente.

En el caso analizado experimentalmente, los puntos de mediciones están situados de manera a formar una línea perpendicular a la fachada principal, con una distancia de separación entre cada dos sondas igual a un metro aproximadamente. Cada sonda de

medición nos permite recuperar la cantidad de la radiación solar y la temperatura del aire al nivel del suelo. En este estudio, se abordará la distribución térmica y, más adelante, se analizará la distribución lumínica.

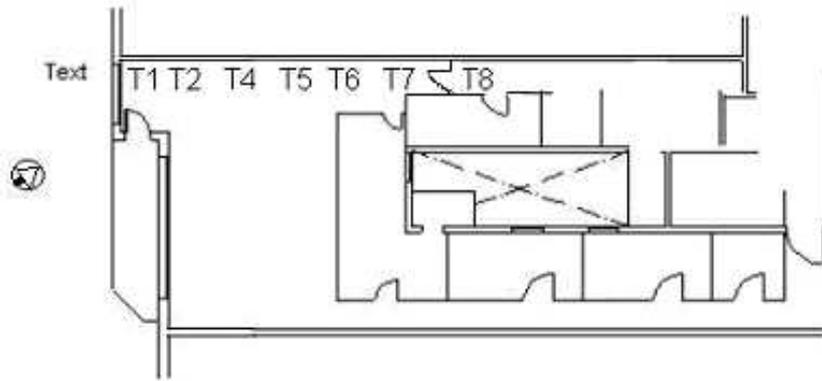


Figure 26: Esquema en planta de la vivienda en estudio.

- T₁ a una distancia de 50 cm de la fachada principal.
- T₂ a 1 m de la fachada principal.
- T₄ a 2 m de la fachada principal.
- T₅ a 3 m de la fachada principal.
- T₆ a 4 m de la fachada principal.
- T₇ a 6 m de la fachada principal.
- T₈ a 8.10 m de la fachada principal.

Empleando el mismo método ya presentado en los gráficos anteriores, se obtiene la función de transferencia (T.F) del sistema a partir de las mediciones de la temperatura del aire exterior e interior. Para el análisis de la distribución espacial, compararemos la función de transferencia para los tres rangos de frecuencias (bajas, medias y altas frecuencias) y construir la figura para todas las sondas interiores respetando un orden de una forma proporcional a la distancia de la abertura principal. El objetivo de este análisis es extraer información sobre la respuesta interior, para cada rango de frecuencias, y probar hasta qué nivel influye la condición de protección de la envolvente sobre la respuesta interior en cada frecuencia, permitiendo así de identificar el elemento y/o el fenómeno físico responsable de las ganancias interiores en cada frecuencia, que nos servirá después mover los elementos adecuados con el objetivo de conseguir condiciones favorables para los ocupantes y mejorar el confort.

II.5.1 Ausencia de la radiación solar directa

II.5.1.1 La respuesta interior para distintas estaciones del año

II.5.1.1.1 La respuesta interior en verano

El primer caso a estudiar corresponde al período de verano, bajando las persianas para impedir que la radiación solar llegue directamente al interior del piso. Las mediciones corresponden a 8 días del mes de agosto desde el 16 hasta el 23 del año 2002. A continuación, la figura muestra la distribución espacial de las ganancias interiores para las frecuencias de 8 días (bajas frecuencias), 1 día (frecuencias medias) y 8 horas (altas frecuencias).

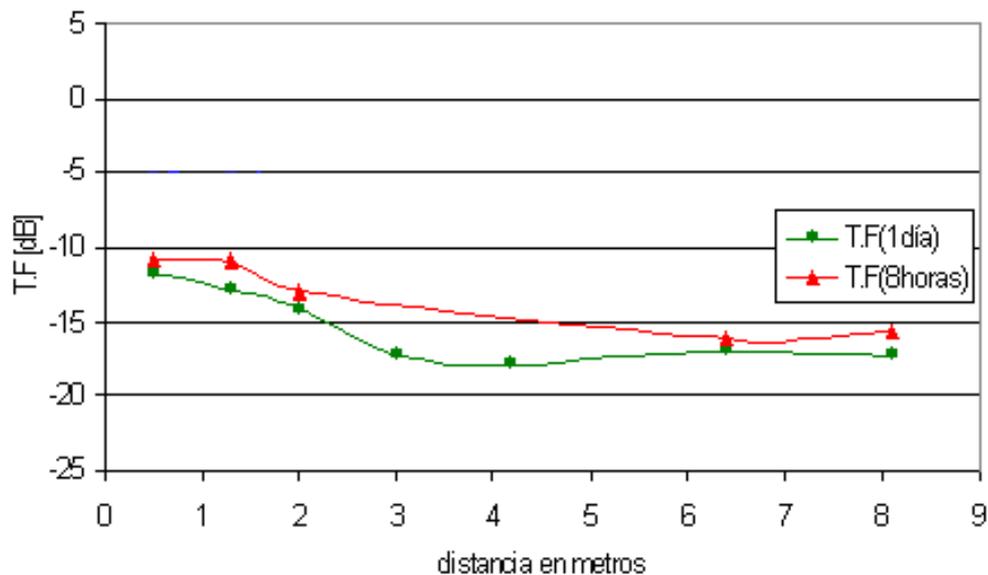


Figura27: Evolución de la respuesta térmica interior en función de la profundidad con respecto a la abertura principal. Datos de 8 días desde el 16 hasta el 23 de agosto de 2002. Persianas cerradas.

Frecuencias medias: una caída en las ganancias en función de la profundidad. Cerca de la ventana, las oscilaciones interiores, son de un 6%, y cuanto más nos alejamos de la ventana, más disminuyen las oscilaciones interiores, consiguiéndose finalmente sólo el 2% de las oscilaciones exteriores.

Altas frecuencias: se repite la misma situación que a frecuencias medias, aunque en este caso, las oscilaciones interiores cercanas a la ventana son de 8% de las fluctuaciones exteriores.

En las frecuencias medias, las características constructivas de la piel (los materiales que forman la piel, el espesor, la resistencia al calor por conducción, y la ventilación en intervalos de tiempo medios) son los causantes de las oscilaciones interiores de la temperatura. Mientras que en las altas frecuencias, la condición de protección de la piel y las actividades de los usuarios son dos factores determinantes sobre la respuesta interior. En este caso, se ha protegido al máximo de la radiación solar directa, y la única ganancia a estas frecuencias es debida al calor intercambiado por la conducción de las paredes, a la ventilación durante intervalos cortos de tiempo, y a los aportes internos aportados por los usuarios y sus actividades dentro del local.

Falta añadir que, las ganancias de las sondas cercanas a la envolvente presentan valores más altos que las situadas a mayor profundidad; Es un resultado lógico, ya que aproximarse a la envolvente significa acercarse a las excitaciones exteriores, y a las infiltraciones de aire y radiación a través de la envolvente. Resumiendo: en verano, cuando se protege del calor directo del día, se reduce mucho las ganancias en las altas frecuencias mientras que el efecto de la protección combinado con la resistencia al calor por conducción de las paredes de la envolvente reduce las oscilaciones de la temperatura interior en las frecuencias medias.

II.5.1.1.2 La respuesta interior en primavera

La segunda serie de mediciones a estudiar corresponde a 12 días de la estación de primavera, desde el 28 de abril hasta el 09 de mayo de 2002; durante las mediciones, se mantuvieron las persianas cerradas día y noche. La Figura a continuación presenta la evolución de la respuesta térmica interior en función de la profundidad para las frecuencias de 12 días, 1 día y 8 horas.

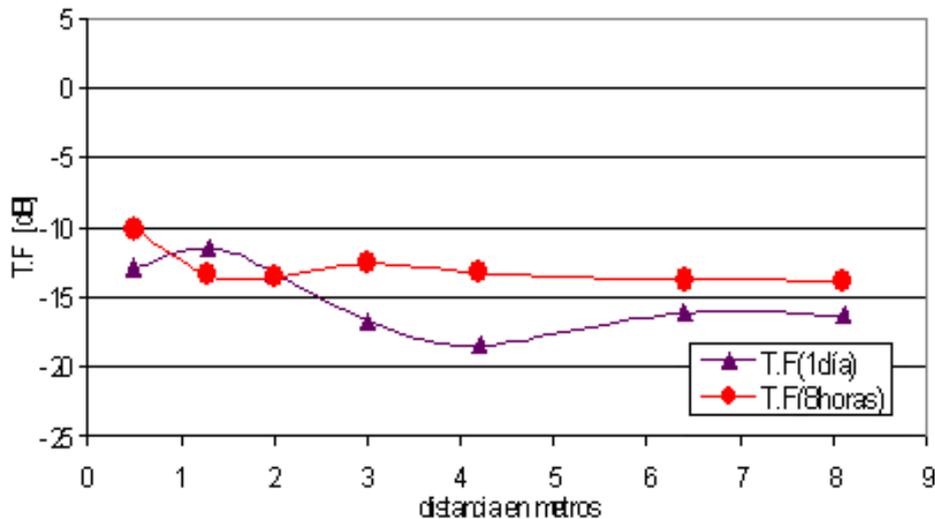


Figura28: Evolución de la respuesta térmica interior en función de la profundidad con respecto a la abertura principal. Datos de 12 días desde el 28 de abril hasta el 09 de mayo de 2002. Persianas cerradas

Aunque las mediciones corresponden a la estación de primavera, la respuesta dinámica interior sigue la misma evolución que el caso de verano.

En frecuencias medias y a altas frecuencias, las ganancias son prácticamente las mismas que en el caso anterior de verano.

Observamos que las fluctuaciones interiores son relativamente más altas para la frecuencia de 8 horas, comparando con las oscilaciones correspondientes a la frecuencia de un día. Es una apariencia lógica, que se puede explicar así: según la ubicación del edificio, y la altura de los edificios que tiene enfrente, le permite recibir poca radiación solar directa durante la estación de primavera, lo cual significa que la cantidad de calor que recibe la fachada principal, incluyendo las persianas, tiene una parte importante de radiación difusa de los edificios enfrente.

Durante las horas del día, y cuando la temperatura del aire exterior es superior a la temperatura del aire interior, el calor absorbido por las persianas se transmite al interior a través de la conducción de las mismas. En cambio, por la noche, cuando la temperatura exterior cae hasta valores más bajos que la temperatura interior, el proceso se invierte, y el piso pierde calor. Cuando la fachada principal del edificio (muros y persianas con los

crisales) recibe radiación solar directa (8 horas aproximadamente en primavera) sube su temperatura, y el proceso de la conducción de calor es del exterior hacia el interior del piso. Por las noches, la temperatura del aire exterior baja considerablemente y el proceso de la conducción esta vez es del interior hacia el exterior (12 horas aproximadamente).

Sin embargo, el flujo de calor que se intercambia con el interior es menor, debido a que las persianas en este caso no sólo impiden que la radiación solar entre directamente al interior, sino que aumentan el aislamiento térmico de la envolvente a raíz de la cámara de aire inmóvil que se forma entre las persianas y el cristal. Por lo tanto, este proceso disminuye las ganancias por conducción, y hace relativamente lentos las ganancias durante el día y las pérdidas durante la noche.

Una parte del calor absorbido por la pared de separación con el exterior durante las horas de sol se emite luego rápidamente (cortos intervalos de tiempo) hacia el interior del edificio, con forma de ondas electromagnéticas largas. Todo esto demuestra las mínimas oscilaciones interiores a frecuencias medias y altas frecuencias y la pequeña diferencia en ganancias que se puede observar entre los dos armónicos de 1 día y de 8 horas.

II.5.1.1.3 La respuesta interior en invierno

La tercera serie de mediciones corresponde a la estación de invierno, siempre con la misma condición de protección de la envolvente, persianas cerradas. Las mediciones fueron tomadas durante 16 días, desde el 25 de febrero hasta el 12 de marzo 2002.

La figura a continuación demuestra la evolución en función de la profundidad de las oscilaciones interiores para las frecuencias de 16 días, 1 día y 8 horas.

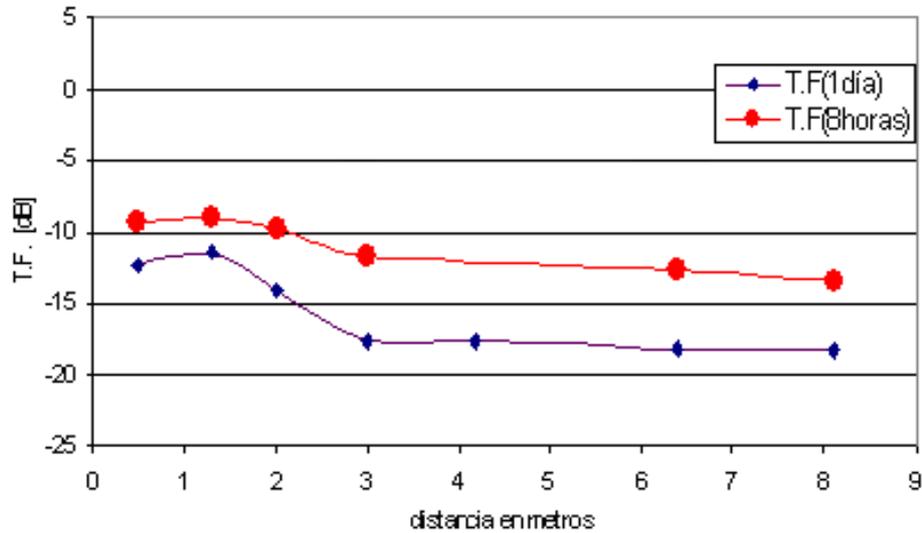


Figura29: Evolución de la respuesta interior en función de la profundidad de la abertura principal. Datos de 16 días desde el 25 de febrero hasta el 12 de marzo 2002. Persianas cerradas

En frecuencias medias, las oscilaciones correspondiendo a las ubicaciones más cercanas de la abertura de la fachada principal son más significativas que aquellas ubicaciones situadas lejos de la abertura. No obstante, en general, las oscilaciones interiores son menores para todas las ubicaciones dentro del piso. Del mismo modo, las persianas juegan un papel aislante, al crear una cámara de aire entre las mismas y el cristal de las aberturas de la envolvente, impidiendo así que el calor intercambiado por conducción sea de gran intensidad. Por lo tanto, las oscilaciones interiores en las frecuencias medias (frecuencia de 1 día) son bajas.

En las altas frecuencias, la ubicación del edificio en la estación de invierno le permite recibir cantidades importantes de la radiación solar incidente sobre su fachada principal, y con un ángulo de incidencia menor, lo cual permite que los muros de separación con el exterior reciban una radiación solar directa durante las horas de sol (7 horas aproximadamente). El calor absorbido por las paredes y las persianas es transmitido por conducción y por radiación difusa al interior del edificio. Inversamente, por la noche, el proceso se hace desde el interior a una temperatura alta, hacia el exterior con bajas temperaturas. La amplitud de oscilación de la temperatura exterior en es más alta en invierno que en primavera, por lo tanto las oscilaciones de la temperatura interior lo son también.

II.5.2 Respuesta interior para distintas estaciones del año y para cada rango de frecuencia

En esta sección, analizaremos la respuesta interior en función de la distribución espacial para cada rango de frecuencias en separado (bajas frecuencias, frecuencias medias, y altas frecuencias). El análisis se hace para las distintas estaciones del año (invierno, primavera y verano). Los datos ampliados a continuación corresponden a tres mediciones hechas en distintas épocas del año 2002. Las mediciones de invierno se han realizado durante 16 días, desde el 25 de febrero hasta el 12 de marzo. Las de verano se han realizado durante 8 días, desde el 16 hasta el 23 de agosto. Las mediciones de primavera se han realizado durante 12 días, desde el 28 de abril hasta el 09 de mayo. Para todas las mediciones, se mantuvieron las persianas cerradas día y noche.

II.5.2.1 La respuesta interior en las frecuencias medias

Entre los datos analizados anteriormente, seleccionaremos aquellas respuestas interiores que corresponden a frecuencias medias para las distintas estaciones el año.

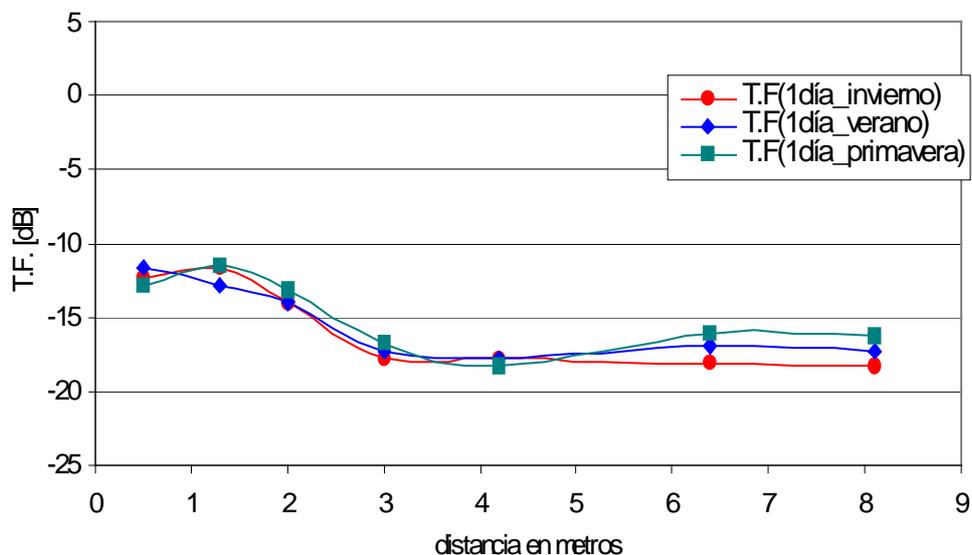


Figura31: Comparación de la respuesta interior en función de la distribución espacial para las épocas de invierno, primavera y verano. Frecuencia de un día. Condición de protección persianas cerradas

Independientemente de la estación del año, las oscilaciones interiores en las frecuencias medias (frecuencia de 1 día) son prácticamente iguales y siguen el mismo orden en cuanto a la distribución espacial con profundidad a la envolvente.

En resumen, a frecuencias medias, la condición de la protección de la piel del edificio es determinante para la evolución de las oscilaciones interiores en estas frecuencias.

II.5.2.2 La respuesta interior en altas frecuencias

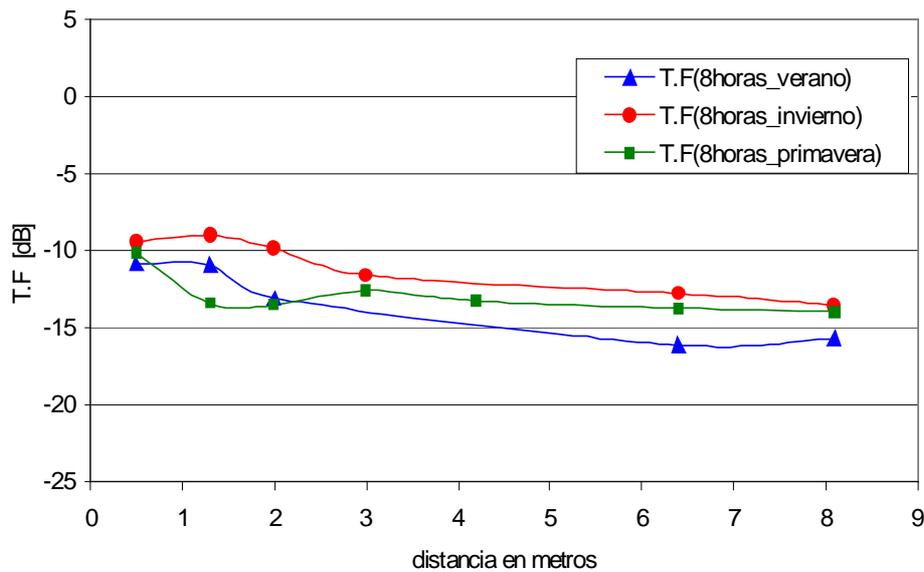


Figura32: Evolución de la respuesta interior en función de la distancia a la envolvente para altas frecuencias. Condición de protección persianas cerradas

La evolución de las oscilaciones térmicas interiores en función de la profundidad sigue la misma forma en todas las épocas del año. En general, las ganancias interiores en las altas frecuencias, en ausencia de la radiación solar directa, son menores.

Comparando los gráficos, se nota un ligero aumento en las oscilaciones para la época de invierno. En cambio, durante la época de verano, cuando esa radiación solar es menor, las oscilaciones en las altas frecuencias lo son también.

En invierno, la intensidad de la radiación solar sobre la fachada sur de la vivienda es alta, lo cual aumenta las probabilidades de infiltraciones hacia el interior aumentando así las oscilaciones en altas frecuencias.

II.5.3 Persianas abiertas, presencia de la radiación solar

II.5.3.1 La respuesta interior para distintas estaciones del año

Para estudiar el efecto de la radiación solar directa sobre la respuesta térmica dinámica interior se han dejado las persianas abiertas durante las horas del día; de esta forma, durante las horas de sol, el piso recibe calor a través de la radiación solar, de la conducción de las paredes de la fachada principal, y a través del intercambio de masa por ventilación. En cambio por las noches, y sobre todo durante la estación de invierno. Las persianas bajadas impiden la pérdida de calor por radiación y disminuyen el calor perdido por conducción ya que las persianas son un buen aislante si forman una cámara de aire inmóvil entre las mismas y el cristal de las oberturas de la envolvente. En esta sección, además de estudiar el efecto de la radiación solar directa, haremos un estudio detallado del efecto producido si las persianas están bajadas por las noches (en invierno) o parcialmente abiertas (en verano o primavera) ya que el calor intercambiado por radiación y ventilación es distinto para ambos casos..

II.5.3.1.1 Respuesta interior en invierno

Se han tomado mediciones en el mismo piso en estudio durante 8 días del mes de enero 2003, desde el 20 hasta el 27. Las persianas se mantuvieron abiertas durante el día y se conservaron cerradas durante la noche. El Figura a continuación presentan la evolución de la respuesta interior en función de la distancia a la obertura principal para las tres gamas de frecuencias (bajas frecuencias, frecuencias medias y altas frecuencias).

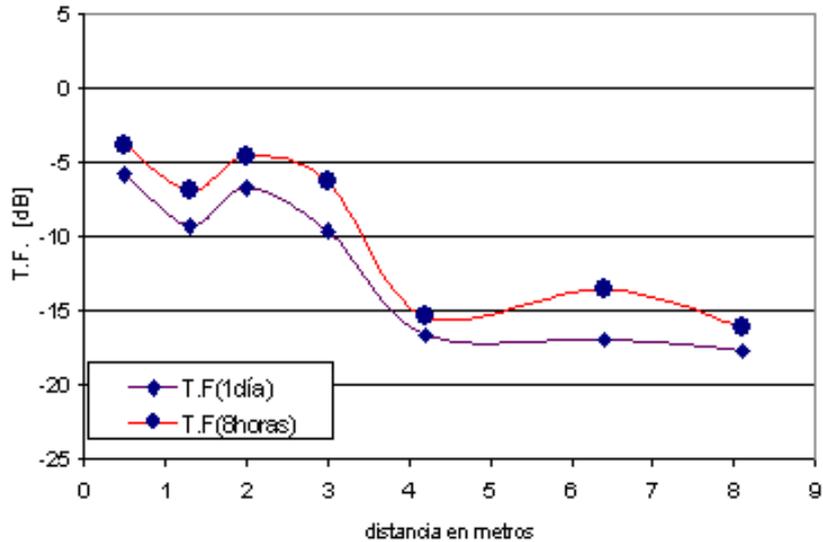


Figura33: La respuesta en profundidad, comparación entre las oscilaciones de bajas, medias y altas frecuencias. Persianas abiertas.

En las frecuencias medias, las ubicaciones espaciales cercanas de la abertura presentan una importante oscilación, en cambio, las oscilaciones disminuyen si nos alejamos de la abertura (sólo un 1.7% a la profundidad de 8 metros). A percibir una caída en las ganancias a la profundidad de 1.3 m debido a que la sonda de mediciones se encuentra protegida de las excitaciones exteriores a causa de su ubicación detrás de una mesa, por consiguiente, forma un ángulo sólido pequeño con la abertura principal



Foto 1: La sonda de medición de la temperatura correspondiente a la distancia 1.3 m de la abertura se encuentra al lado izquierdo de la unidad del ordenador.

En las frecuencias altas, de la misma manera que las oscilaciones en las frecuencias medias, las oscilaciones de la temperatura interior son más importantes para las ubicaciones cercanas a la ventana (41% para la profundidad de 50 cm de la ventana), y van cayendo cuando nos dirigimos al fondo del piso (sólo un 2% para la profundidad de 8 m).

Para todas las profundidades, existe una ligera diferencia en ganancias entre la frecuencia de 8 horas y la frecuencia de un día. Es el resultado esperado debido a que las horas de sol dentro del piso son aproximadamente 8 horas y por lo tanto las oscilaciones del aire interior son de la misma duración.

II.5.3.1.2 Respuesta interior en primavera

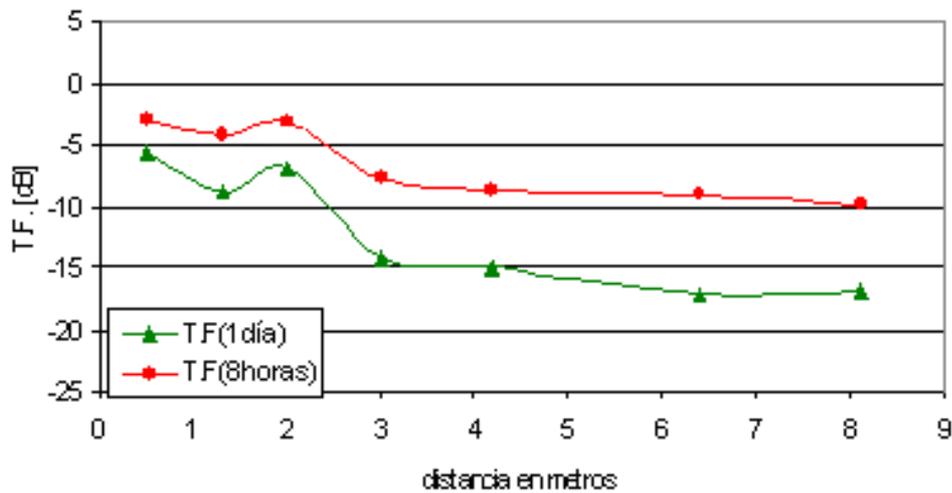


Figura34: Comparación de las oscilaciones en función de la profundidad para los tres rangos de frecuencias; bajas, medias y altas frecuencia. Estación de primavera con persianas abiertas.

En las frecuencias medias, las ganancias espaciales son muy importantes para las ubicaciones cercanas a la envolvente (28% aproximadamente a la distancia 50 cm de la ventana), en cambio las oscilaciones son insignificativas para la mayor profundidad (2% para la distancia 8 m de la abertura principal).

En las altas frecuencias, las oscilaciones interiores presentan valor muy importantes a todas las profundidades, y de mucho más importancia para las menores profundidades (49% aproximadamente a la distancia de 50 cm. de la ventana, y 10,2% a la profundidad de 8 m de la abertura).

La variación de la temperatura interior en el tiempo está relacionada a la vez con la variación de la temperatura exterior y la radiación solar incidente dentro del local. La radiación solar directa influye sobre las ganancias en las altas frecuencias y en las frecuencias medias, ya que el sol calienta las superficies de los elementos de construcción (las paredes y el suelo) y los objetos del equipamiento del piso (mesas, sillones, muebles, etc).

El calor absorbido calienta la superficie de los objetos que intercambian calor a su vez con el aire interior que los envuelve. Es un fenómeno relativamente local si no existe una fuerte ventilación entre las zonas cercanas a la envolvente y el fondo, es decir que las superficies cuya temperatura es alta calientan la temperatura del aire que las rodea, lo cual significa la importancia de las ganancias a menores profundidades donde toca el sol directamente en las frecuencias medias y altas frecuencias.

La temperatura del aire exterior, sin embargo, tiene influencia sobre la temperatura interior a bajas frecuencias. Dicho de otro modo, el ambiente exterior intercambia calor por convección con las superficies exteriores del piso, este calor se transporta al interior por conducción, es decir que la cantidad del calor transmitida al interior del edificio depende de la masa térmica de los muros y a su resistencia al calor. Por lo tanto, el fenómeno es general para todas las paredes de la envolvente, y las oscilaciones de la temperatura interior es casi la misma para todas las posiciones espaciales dentro del edificio.

Los efectos de la inercia térmica se notan a medida que avanzamos al interior del edificio, donde las oscilaciones interiores son prácticamente iguales para todas las sondas situadas lejos de las excitaciones causadas por la radiación solar directa.

II.5.3.1.3 Respuesta interior en otoño

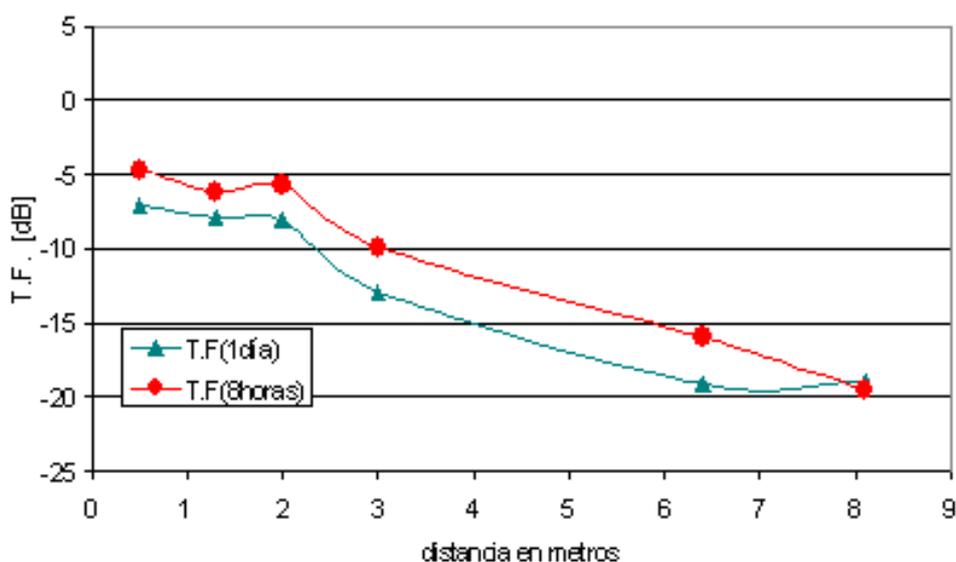


Figura35: Comparación de las oscilaciones en función de la profundidad para los tres rangos de frecuencias; bajas, medias y altas frecuencia. Estación de otoño con persianas abiertas.

En las frecuencias medias, la radiación solar y los efectos de las infiltraciones de aire a través de la obertura principal hacen que las oscilaciones sean importantes cerca de la envolvente, en cambio, a mayor profundidad, las oscilaciones son insignificativas (menos de un 2% de las oscilaciones exteriores).

En las altas frecuencias, la temperatura del aire que rodea las superficies sometidas a la radiación solar directa oscila mucho más que aquella temperatura que esté lejos de la obertura donde no toca el sol. Diferentemente de la respuesta de primavera, las oscilaciones en este caso se amortiguan con la distancia a la envolvente. No se sabe muy bien la causa, pero esta diferencia es debida a unas ganancias en cortos intervalos de tiempo, que muy probablemente son debidas a un intercambio de calor por ventilación en plazos cortos cuando se abren las ventanas.

Resumiendo, en las frecuencias medias, las ganancias son causadas por el calor intercambiado por conducción de las paredes y del calor retenido por la masa interior y más tarde al interior del edificio, después de que estén sometidos a la radiación solar directa. Finalmente, en las frecuencias altas, las ganancias son debidas a la radiación solar directa, y a las ganancias en corto tiempo causadas por los ocupantes de la vivienda.

II.5.4 Respuesta interior para distintas estaciones del año y para cada rango de frecuencia

II.5.4.1 Las características de la respuesta interior en las frecuencias medias

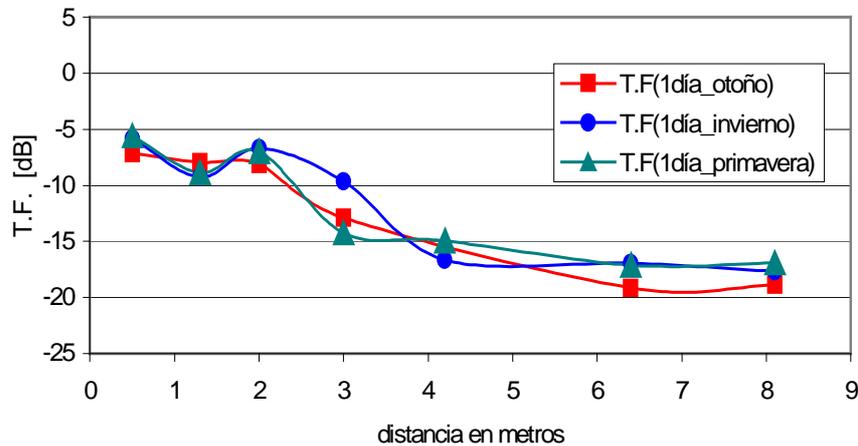


Figura37: Evolución de T.F en función de la distancia en las frecuencias medias. Datos de invierno, primavera y otoño con la condición de protección persianas abiertas.

En las frecuencias medias, las oscilaciones interiores son las mismas independientemente de la estación del año, ya que en las frecuencias medias, las fluctuaciones interiores son debidas al calor por conducción de las paredes de la envolvente, característica que no se ha cambiado durante las tres épocas de las mediciones.

II.5.4.2 Las características de la respuesta interior en las altas frecuencias

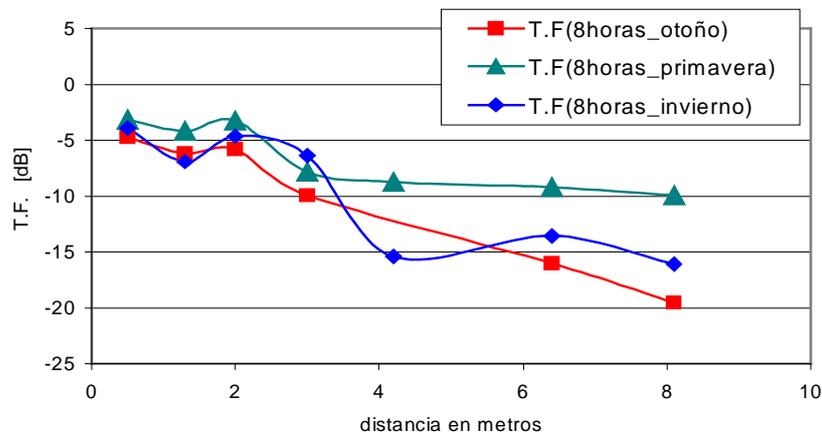
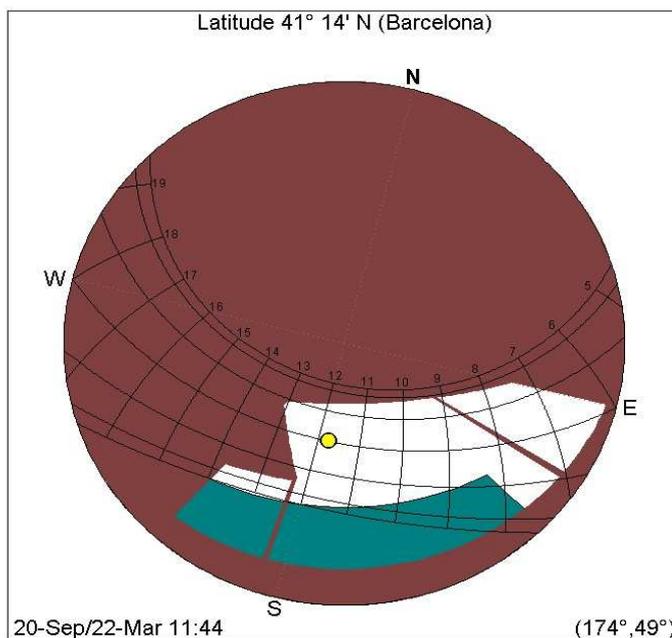


Figura 28: Evolución de T.F en función de la distancia en altas frecuencias. Datos de invierno, primavera y otoño con la condición de protección persianas abiertas.

Las ganancias por la radiación directa dentro del piso son las principales causas de las oscilaciones interiores en las altas frecuencias. Se puede apreciar que en la estación de primavera, las oscilaciones al fondo del piso siguen siendo importantes. Eso es debido a que las horas del sol en el mes de marzo son más largas que en el mes de enero, y que el sol para ambas estaciones está a una altura relativamente baja, lo que permite una incidencia en el fondo del piso, teniendo en cuenta las sombras de los edificios enfrente como demuestra las imágenes de estereografía en las dos estaciones[B. Beckers, L. Masset, 95]. Para más detalles sobre el funcionamiento del programa consulte el anexo 3.



*Figure 39:
Estereografía del piso.
Se ve cómo los edificios
de enfrente hacen
sombra,*

Los edificios de frente hacen más sombra en el mes de enero que en marzo.

II.5.5 Comparación de las ganancias para ambas condiciones de protección

II.5.5.1 Estación de invierno

Para concluir este estudio, una comparación en la respuesta térmica dinámica interior para ambas condiciones de protección *persianas abiertas y persianas cerradas* será de gran utilidad para entender las características del comportamiento térmico interior. En primer lugar

mediremos la diferencia en la respuesta interior, en distintas estaciones del año, para ambas condiciones de protección. En segundo lugar, y para ampliar el análisis, una comparación de las ganancias para cada rango de frecuencias en distintas estaciones nos permitirá evaluar el efecto de la protección de la piel sobre las oscilaciones interiores a cada intervalo de frecuencias, por consiguiente, efectuaremos los cambios adecuados en la construcción de la piel del edificio para optimizar las ganancias interiores.

La primera serie de datos corresponde a mediciones hechas durante un intervalo de 8 días desde el 01 hasta el 08 de enero 2003 con la condición de protección: persianas cerradas, y 8 días desde el 24 hasta el 31 de enero 2002 con la condición de protección persianas abiertas.

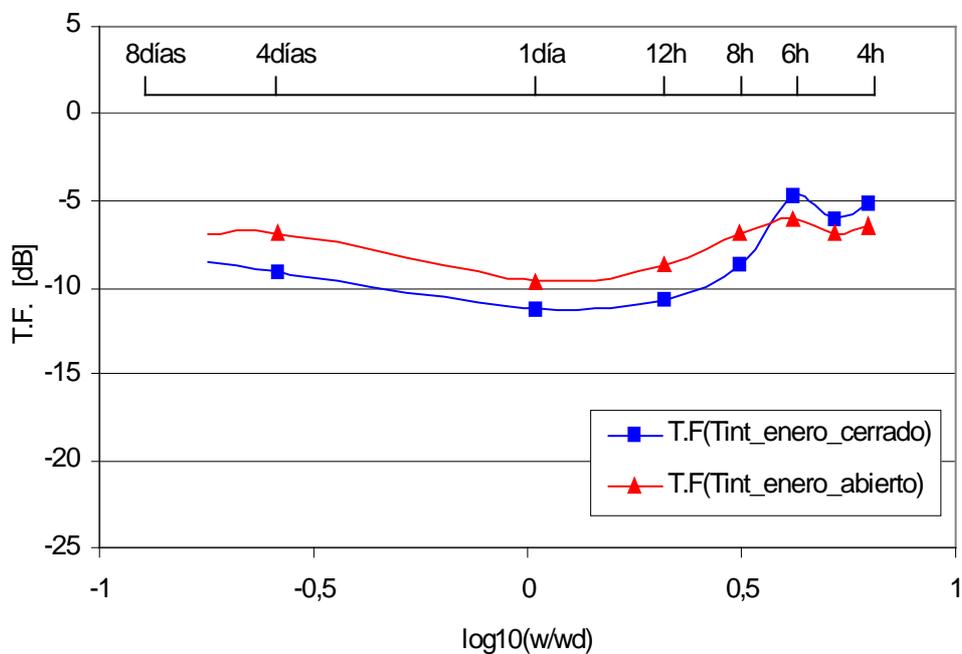


Figura40: Comparación de las oscilaciones interiores para 8 días con persianas cerradas de enero 2003 y 8 días con persianas abiertas de enero 2002.

La radiación solar en el interior es un factor determinante para el aumento de la amplitud de las oscilaciones de la temperatura interior. Por ejemplo, en la frecuencia de 4 días el porcentaje de las oscilaciones ha pasado de 26% en el caso de las persianas abiertas a solamente un 12 % cuando cerramos las persianas. La diferencia en las oscilaciones se nota más en el rango de las frecuencias medias, ya que cerrando las persianas no solamente se impide a la radiación solar que entre, sino las mismas persianas aumentan la resistencia térmica de la piel.

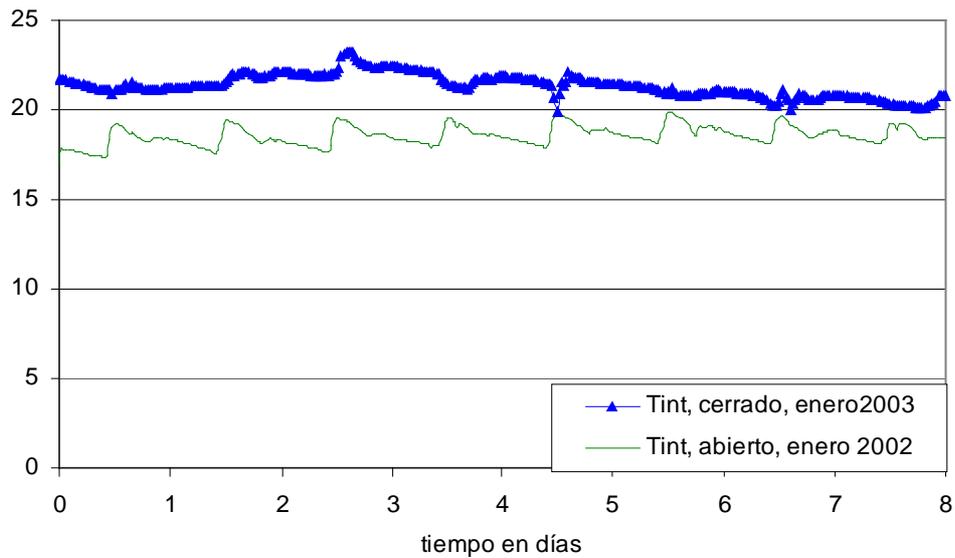


Figura41: Comparación de las temperaturas interiores medias para 8 días con persianas cerradas de enero 2003 y 8 días con persianas abiertas de enero 2002.

La figura de la evolución de la temperatura interior media para los dos casos en estudio demuestra que la amplitud de las oscilaciones es más grande en el caso de presencia de la radiación solar que en su ausencia, si bien existe un pico diario en las ganancias debido a la radiación solar directa en el interior por el caso de la condición de protección *persianas abiertas*.

No obstante, la intensidad útil de la radiación solar incidente sobre el edificio depende del espesor de aire que los rayos traspasan, que es función de la rotación de la tierra sobre su eje, de su revolución alrededor del sol y de la inclinación del eje respecto al plano de revolución. La cantidad de energía solar que llega efectivamente a la tierra depende también del nivel de la transparencia del cielo, de la nubosidad, y del grado de la pureza del aire respecto a las partículas del polvo, del bióxido de carbono y del valor de agua [5].

En invierno, además de que los factores anteriores son de tal manera que la cantidad de la radiación solar incidente sobre el edificio es menor, los edificios de enfrente tienen un efecto más grande e impiden que una gran cantidad de la radiación solar baja de invierno llegue a la vivienda en estudio. Por consiguiente, las ganancias efectivas por radiación solar dentro del piso son relativamente más bajas aunque las persianas se mantuvieron abiertas.

La radiación solar directa tiene un efecto muy importante sobre la amplitud de las oscilaciones de la temperatura interior, sobre todo por el rango de las frecuencias medias. En cambio, en las altas frecuencias, las oscilaciones interiores de la temperatura son debidas a efectos de control efectuados por los propios usuarios de la vivienda como (abrir y cerrar las ventanas durante cortos plazos, aportes internos por el uso de los electrodomésticos, el calor disipado por los ocupantes, etc.).

II.5.5.2 Estación de primavera

La segunda figura a analizar corresponde a datos tomados durante la estación de primavera. Las mediciones son hechas durante 8 días para ambas condiciones de protección, desde el 28 de abril hasta el 05 de mayo 2002 con las persianas cerradas, y desde el 20 hasta el 27 de marzo 2003 con las persianas abiertas. Queda añadir que durante la época de las mediciones y para ambos casos de protección se procuró no abrir las ventanas para intervalos de tiempo prolongados.

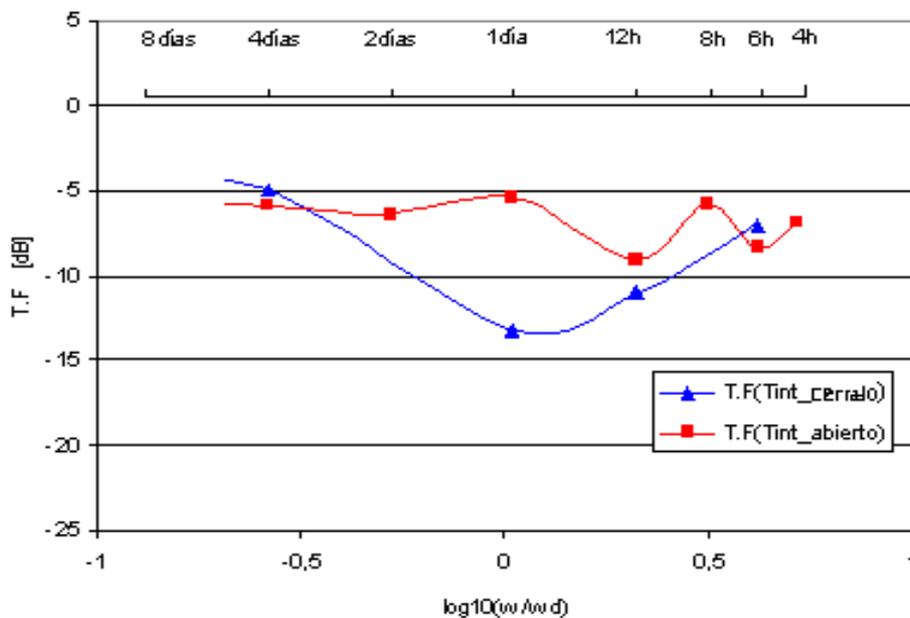


Figura42: Comparación de las oscilaciones interiores para distintas condiciones de protección de la piel. Datos de primavera

Las oscilaciones interiores en las bajas frecuencias son iguales para los dos casos de protección, ya que para ambos casos, las condiciones de ventilación extendida son las

mismas. Se ve una importante diferencia en las ganancias en las frecuencias medias donde las ganancias en la frecuencia de *un día* presenta valores mayores para la condición de protección persiana abierta que en el caso de la persiana cerrada. Es el resultado esperado ya que para la época de primavera, la longitud y la intensidad de la radiación solar incidente sobre el edificio son considerables.

En la misma frecuencia de *un día* las oscilaciones interiores correspondientes al caso de las persianas cerradas son mínimas. Cerrando las persianas no sólo impide la entrada de la radiación solar directa, sino crea una cámara de aire aislante que aumenta la resistencia térmica de la piel.

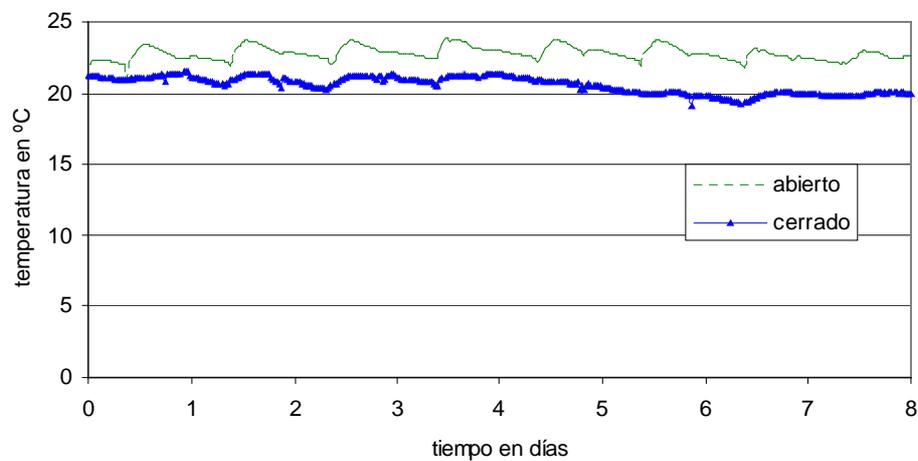


Figura43: *Comparación de las temperaturas interiores medias para ambas condiciones de protección de la piel. Estación de primavera.*

La amplitud de la oscilación de la temperatura interior correspondiente al caso de las persianas abiertas es grande comparando con aquella del caso de las persianas cerradas. A notar un aumento en la temperatura media interior en el caso de las persianas abiertas debido a la captación.

II.5.5.3 Comparación de las oscilaciones para cada rango de frecuencias en separado

Para visualizar mejor el efecto de la radiación solar sobre las oscilaciones interiores, una comparación de los gráficos de la evolución de la T.F para cada intervalo de frecuencias y para cada condición de protección de la piel será de gran utilidad.

La primera serie de datos corresponde a la estación de invierno, se tomaron mediciones durante 8 días bajo dos condiciones distintas de protección de la piel. 8 días desde el 20 hasta el 27 de enero 2003 bajo la condición de protección *persianas abiertas*, y otro intervalo de 8 días desde el 01 hasta el 08 del mismo mes con la condición *persianas cerradas*

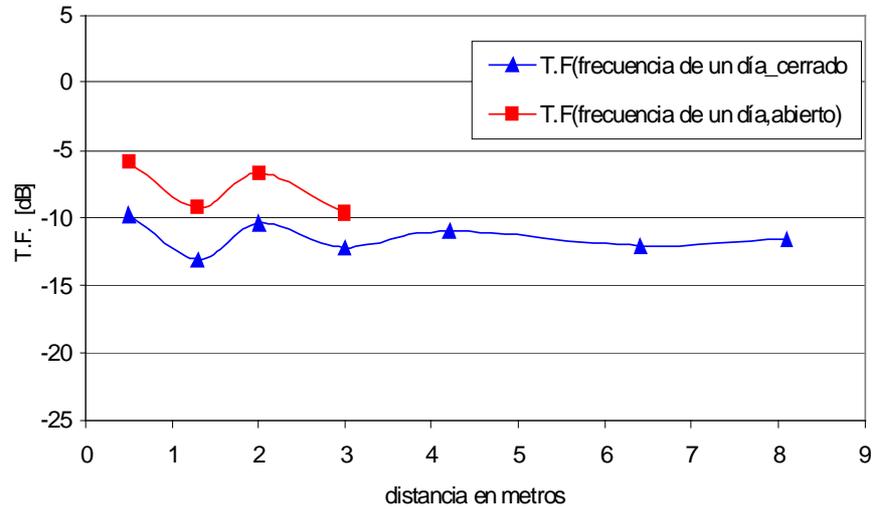


Figura45: Comparación de la evolución de las oscilaciones térmicas dinámicas en función de profundidad en frecuencias medias para ambos casos de protección de la piel

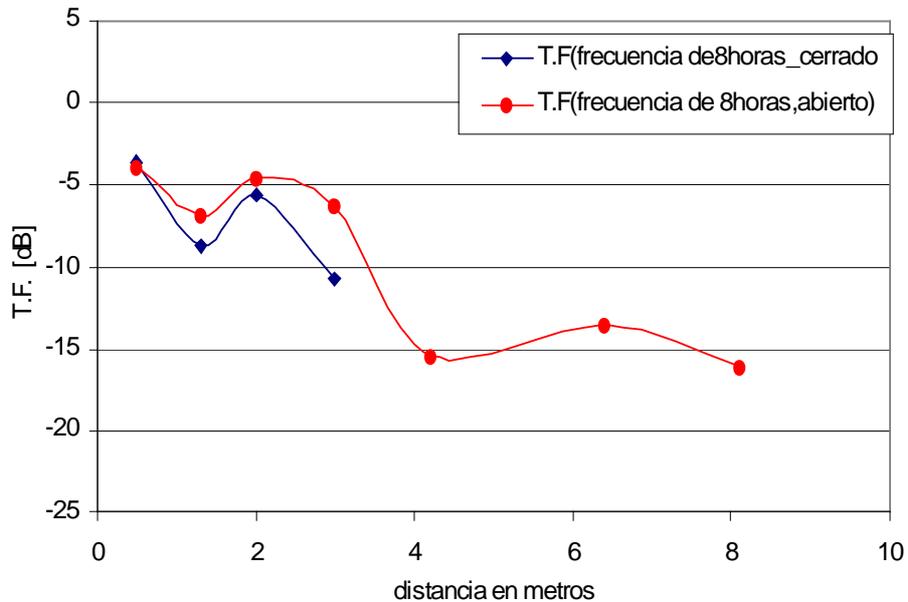


Figura46: Comparación en las oscilaciones interiores para ambos casos de protección de la piel. Altas frecuencias.

La cantidad del calor ganado por el piso durante las horas del sol depende del color de las superficies de incidencia de la radiación solar directa y de las características constructivas de las mismas. En nuestro caso, el suelo es de parquet, se calienta de una forma rápida al recibir la radiación del sol ya que la capacidad térmica de la madera es baja, que a su vez calienta por conducción al aire que esta en contacto, luego el calor se reparte para todo el aire interior a través de la convección. El aire caliente a su vez calienta las paredes y los objetos interiores. De esta manera el calor recibido por la radiación solar del día llega a calentar todas las superficies interiores que son de una inercia térmica media, el calor acumulado se emite luego en las bajas frecuencias y las frecuencias medias.

En las frecuencias medias, las ganancias son debidas básicamente al calor intercambiado por conducción y al calor por ventilación durante intervalos de tiempos medios. En la figura de las ganancias correspondiente a la frecuencia de *un día* se ve que las oscilaciones interiores en el caso de las persianas abiertas son importantes para una distancia cercana a la envolvente comparando con el caso de las persianas cerradas. Mientras que estas ganancias son minúsculas cuando nos dirigimos al espacio de mayor profundidad. En ambos casos de protección el calor intercambiado por conducción durante las noches es el mismo ya que las persianas se mantienen cerradas en los dos casos. Mientras que durante el día, las persianas reducen el intercambio de calor por conducción si forman una cámara de aire inmóvil con el cristal de las ventanas. Esta característica y el hecho que siempre existen más infiltraciones de aire si las persianas se mantienen abiertas hacen que las oscilaciones interiores a menor distancia de las oberturas sean más grandes en el caso de protección de las persianas abiertas, que el caso de las persianas cerradas. En cambio a mayor profundidad, la única oscilación interior es debida al calor intercambiado por la conducción de las paredes y a una posible ventilación del patio interior (infiltraciones).

En las altas frecuencias, las ganancias interiores son debidas esencialmente al calentamiento del aire por la radiación solar durante las horas del día, y a las actividades de los usuarios. En la figura de comparación entre ambos casos de protección se ve que las oscilaciones a menor profundidad correspondientes al caso de persianas abiertas son casi igualadas en el caso de las persianas cerradas, mientras que a mayores profundidades han desaparecido las oscilaciones correspondientes al caso de las persianas cerradas, lo que significa que las fluctuaciones a estas posiciones espaciales son insignificantes. Es el resultado esperado ya que a menor distancia de las oberturas, siempre existen infiltraciones de rayos solares y

ventilación que aumentan o disminuyen la temperatura del aire en contacto, mientras que a mayores profundidades las oscilaciones interiores en el caso de las persianas cerradas son insignificantes a causa de la debilidad de las infiltraciones.

II.5.6 Análisis de diferentes tipos de la excitación exterior

Cuando la radiación solar (compuesta por longitudes de onda corta) incide sobre una ventana atraviesa el vidrio con facilidad, pero al incidir sobre los materiales del interior del ambiente estos se calientan, y generan radiación de onda larga, que no puede atravesar el vidrio, por lo tanto queda atrapada en el interior del ambiente.

Este fenómeno se repite mientras exista radiación solar incidiendo sobre la ventana aumentando, por lo tanto, la temperatura en el interior del ambiente.

Durante los días que el sol esta oculto tras las nubes el efecto invernadero sigue produciéndose, con la salvedad que la cantidad de radiación solar recibida resulta mucho menor (y consecuentemente la temperatura interior también) debido a que la capa de nubes produce un efecto de atenuación en esta. En días como estos, la temperatura interior obtenida puede resultar alrededor de 3-4°C por encima de la exterior [11].

El vidrio simple posee un coeficiente de pérdidas energéticas 3 veces superior a un muro de ladrillo común de 30 cm de espesor, por lo tanto a igualdad de superficies, y por cada grado de diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, el vidrio perderá tres veces más energía que el muro. Si realizamos un balance energético en una ventana durante un día de invierno, veremos que cuando el sol incide sobre la ventana la cantidad de energía que ingresa es superior a la que se pierde por transmisión, pero cuando el sol se oculta este balance comienza a resultar negativo.

En efecto, ¿qué pasa por las noches de invierno? Ya no hay ingreso de radiación por que el sol se ocultó, y como la temperatura exterior disminuyó más rápidamente que la interior, la cantidad de energía que se pierde por transmisión resulta mucho mayor. Llego el momento entonces de colocarle a la ventana un aislamiento adicional que limite las pérdidas al exterior, que se logra cerrando persianas o cortinas de enrollar y corriendo

cortinas interiores, acciones que en su conjunto pueden lograr que las pérdidas al exterior a través de la ventana se reduzcan alrededor de un 40%.

Esto mismo sucede en una ventana que no reciba sol durante el día, por eso resulta importante una buena orientación hacia el sol, y en caso de no poder lograrse esta, disminuir la superficie vidriada para limitar las pérdidas. Otra solución posible es aumentar la cantidad de vidrios en la ventana (doble o triple vidriado) pero, si bien se reducen las pérdidas por transmisión, también se reducen las ganancias por radiación.

Durante el verano la naturaleza nos ayuda. En esta época la trayectoria del sol es mas alta, por lo tanto el ángulo de incidencia sobre una ventana es mayor, y como la cantidad de radiación que atraviesa el vidrio es inversamente proporcional a este ángulo, la cantidad de radiación que puede atravesar el vidrio resulta menor que en invierno, a pesar que la cantidad de radiación solar en esta época resulta mucho mayor. Además al tener una trayectoria alta, el solo hecho que la ventana se encuentre ubicada al filo interior del muro puede resultar suficiente para que se encuentre protegida de la incidencia de la radiación solar directa, y en caso de resultar insuficiente, un pequeño alero puede resolver el inconveniente, dando como resultado que esta ventana prácticamente no reciba sol directo durante el día con lo cual el problema esta resuelto.

Para estudiar el efecto de la radiación solar directa y difusa sobre la evolución de la temperatura del aire interior se ha seguido el proceso de dejar las persianas y las cortinas subidas durante el día y cerrarlas por la noche. A continuación analizaremos una serie de condiciones de protección y su repercusión sobre la respuesta interior.

II.5.6.1 La respuesta interior para un día nublado con persianas cerradas (estación intermedia)

El tipo de las excitaciones exteriores influye de una forma directa o indirecta el margen de las oscilaciones interiores de temperatura. Uno de los fenómenos importantes a estudiar es el efecto de la radiación solar difusa sobre la respuesta interior. Por ello, se han hecho mediciones bajo condiciones dadas de la protección de la envolvente durante días nublados. A continuación analizaremos el efecto de la radiación solar difusa sobre la

respuesta interior con la condición de protección “persianas cerradas”. Las mediciones corresponden al 29 de marzo 2002.

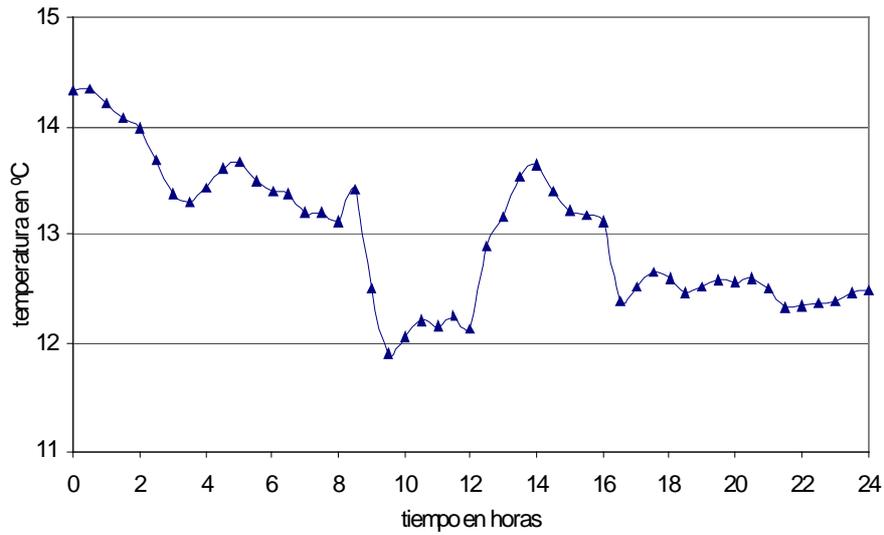


Figura47: Evolución de la temperatura exterior para un día nublado 11 de mayo 2002

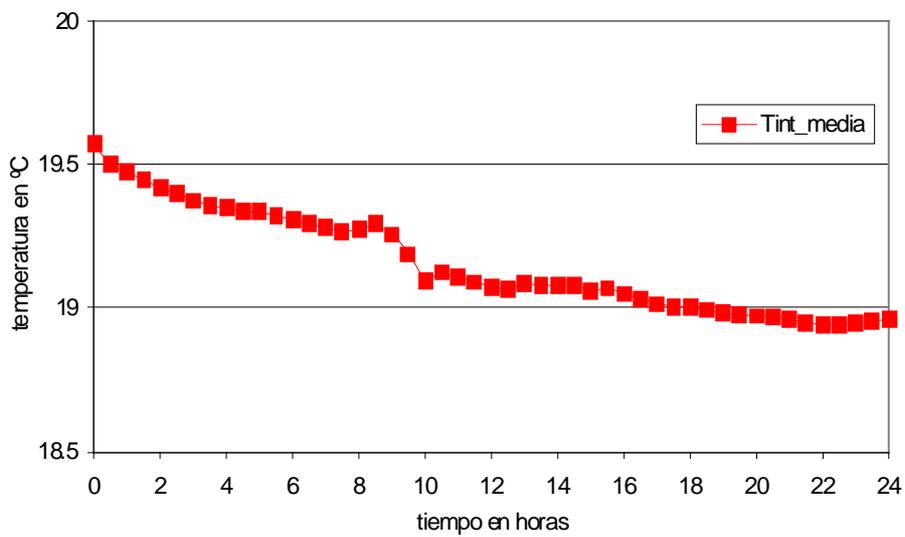


Figura48: Evolución de la temperatura interior media para un día nublado con las persianas cerradas. 11 de mayo 2002.

La oscilación de la temperatura interior cada 12 horas es aproximadamente de 0.25 °C, mientras que la exterior es de aproximadamente 1 °C. Es decir que a esta frecuencia la temperatura interior oscila la cuarta parte de la temperatura exterior.

En el análisis frecuencial se verán mejor las oscilaciones a cada rango de frecuencia.

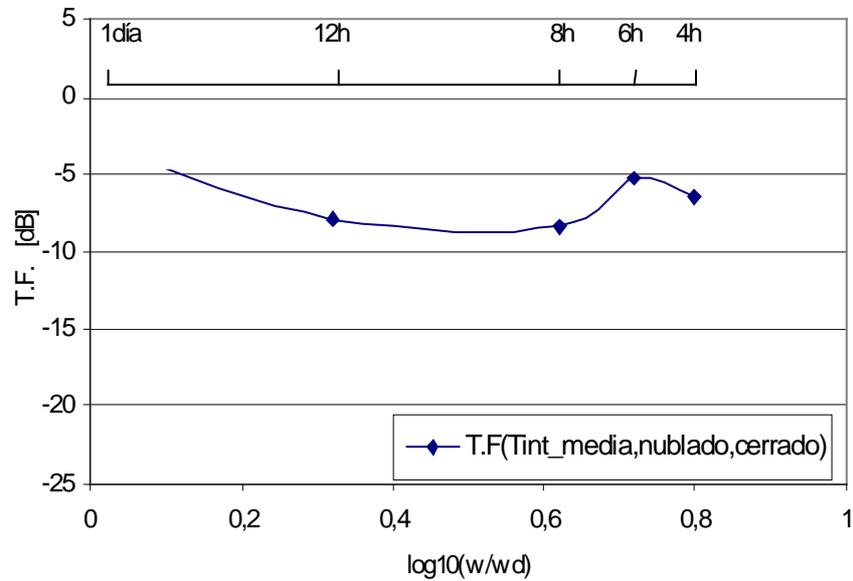


Figura49: Evolución de las oscilaciones interiores para un día nublado con persianas cerradas. 11 de mayo 2002

Analizando la figura de la evolución de las fluctuaciones interiores se aprecia que la oscilación máxima corresponde a la frecuencia de 6 horas que corresponde a un 31% de las oscilaciones exteriores, mientras tanto, las oscilaciones mínimas corresponden a la frecuencia de 12 horas (16%). Es el resultado esperado ya que la oscilación de la temperatura exterior es mínima, y por lo tanto la excitación exterior también lo es. En las medias frecuencias (frecuencia de 12 horas) las oscilaciones interiores son debidas al intercambio de calor por conducción de las paredes y por la ventilación durante intervalos medianos de tiempo.

A partir de la frecuencia de 8 horas se observa un aumento en las oscilaciones interiores (en altas frecuencias). En las frecuencias altas, las oscilaciones interiores son debidas a cambios hechos al nivel de la envolvente por los usuarios.

II.5.6.2 La respuesta interior para un día nublado con persianas abiertas (estación de invierno)

De la misma manera, se han hecho mediciones en la misma vivienda en estudio durante un día bajo la condición de protección persianas abiertas y para un día nublado, las mediciones corresponden al 15 de noviembre 2002.

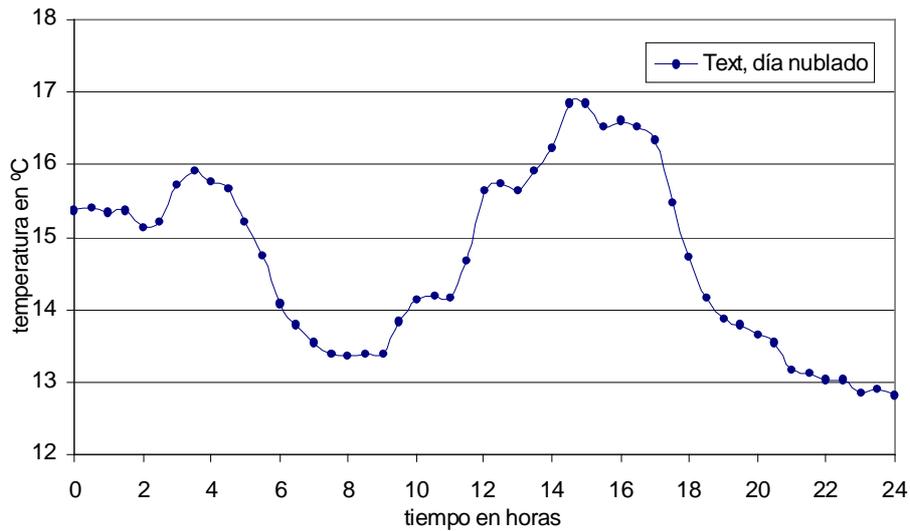


Figura50: Evolución de la temperatura exterior. Un día nublado (15 de noviembre de 2002).

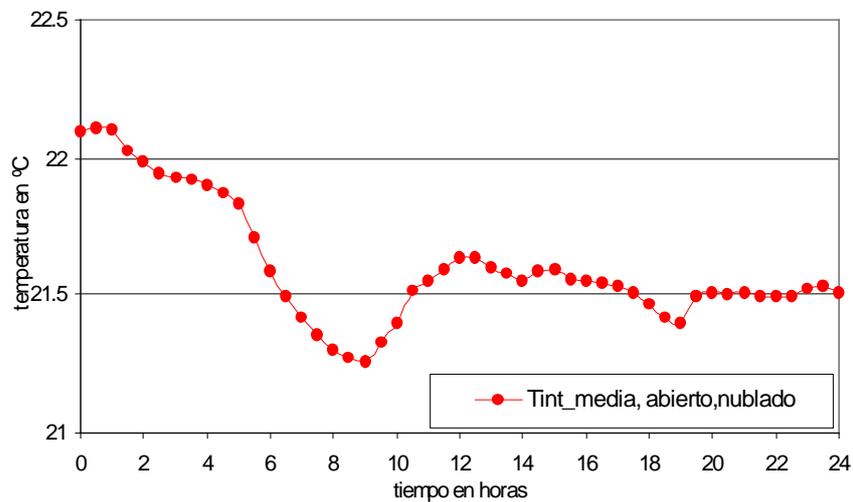


Figura51: Evolución de la temperatura interior. Un día nublado con las persianas abiertas (15 de noviembre de 2002).

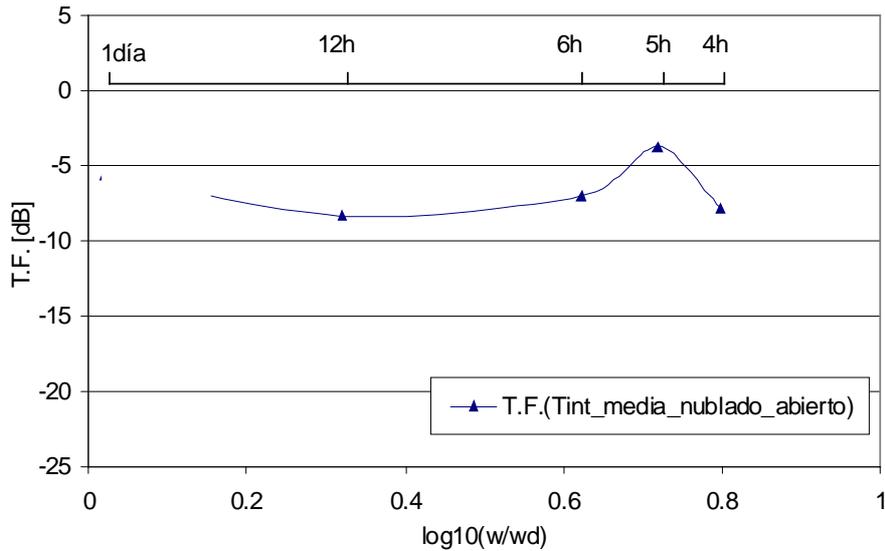


Figura52: Evolución de las ganancias interiores para un día nublado con las persianas abiertas.

Para la frecuencia de 12 horas, las oscilaciones interiores son aproximadamente una sexta parte de las oscilaciones interiores (un 15%). Se ve un pico de ganancias a la frecuencia de 5 horas que corresponde a un 42% de las oscilaciones exteriores. La importancia de las oscilaciones interiores a altas frecuencias en este caso es debida a la radiación difusa de largas longitudes de onda que atraviesa el cristal y calienta las superficies interiores de la vivienda, que a su vez, calientan el aire en contacto y de esta forma aumentar las ganancias interiores aunque no haya una radiación directa.

II.5.6.3 La respuesta interior para un día soleado con persianas cerradas (invierno)

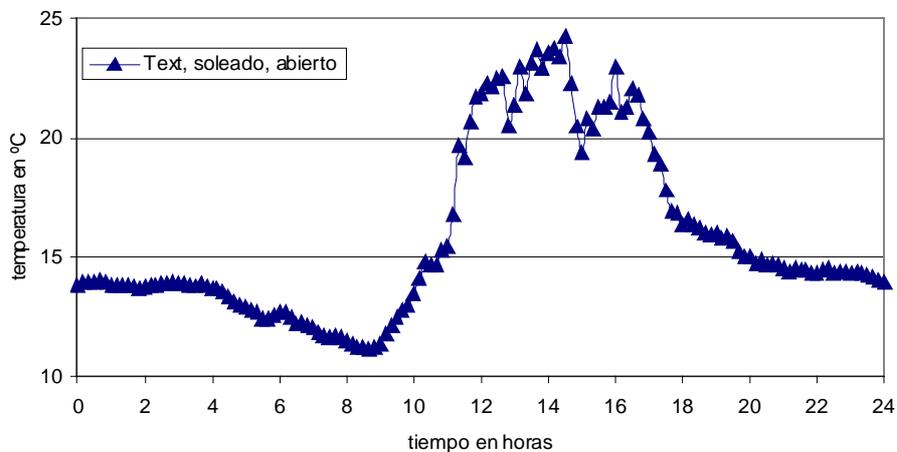


Figura53: Evolución de la temperatura exterior par el día 23 de febrero 2003, un día soleado.

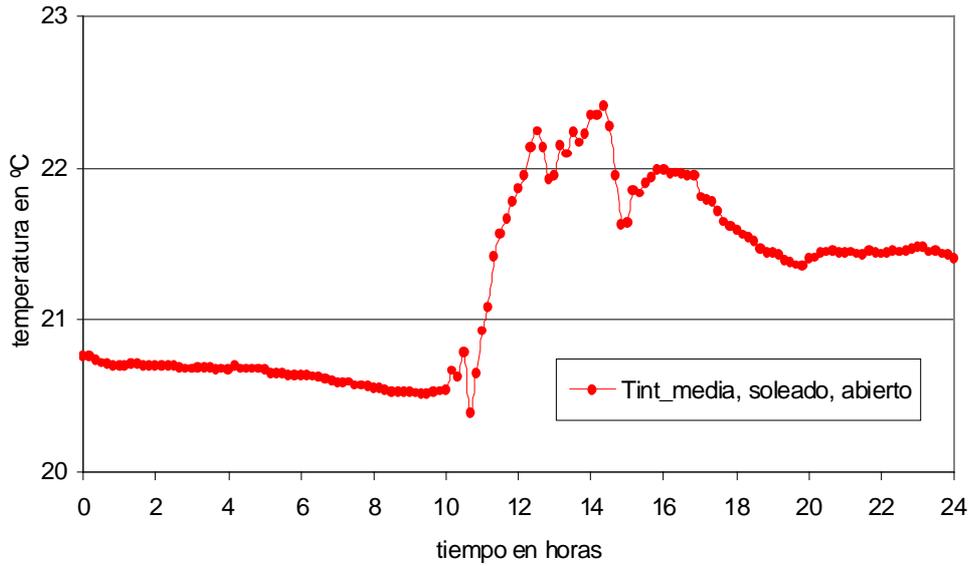


Figura54: Evolución de la temperatura interior media par el día 23 de febrero 2003, un día soleado con persianas abiertas.

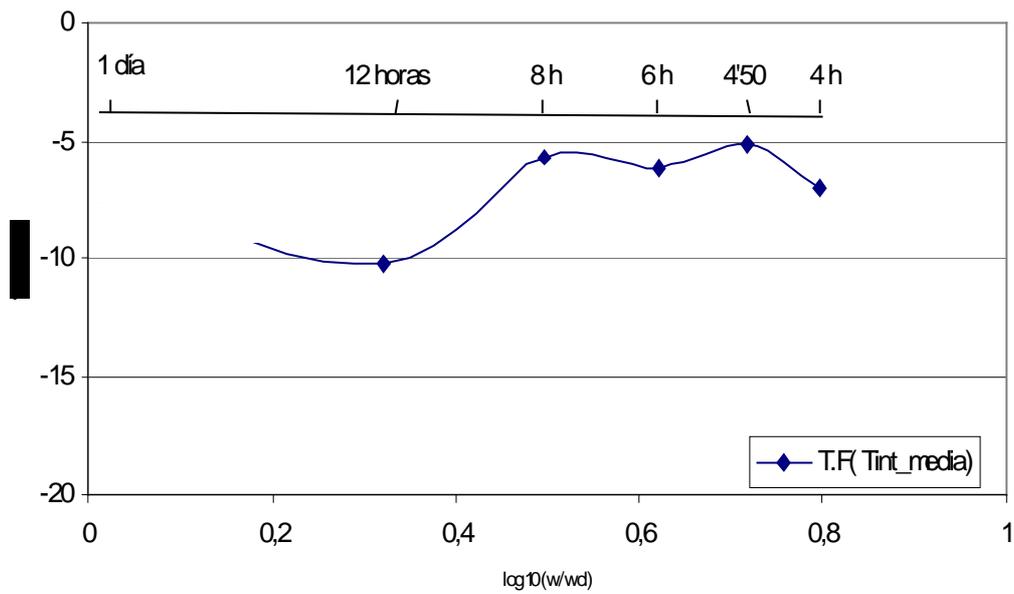


Figura55: Evolución de las oscilaciones interiores para un día soleado con la condición de protección: persianas abiertas. 23 de febrero 2003

En este caso las oscilaciones interiores a la frecuencia de 12 horas son de 10%, mientras que las oscilaciones son de aproximadamente 30% a altas frecuencias (8 horas hasta 5 horas). Se ve claramente que la radiación solar directa tiene un efecto esencial sobre las ganancias dinámicas a altas frecuencias. En cambio a las frecuencias medias (1 día) las

oscilaciones interiores dependen más del espesor y la resistencia de la piel de la envolvente a las fluctuaciones exteriores.

II.5.6.4 La respuesta interior para un día soleado con las persianas cerradas (verano)

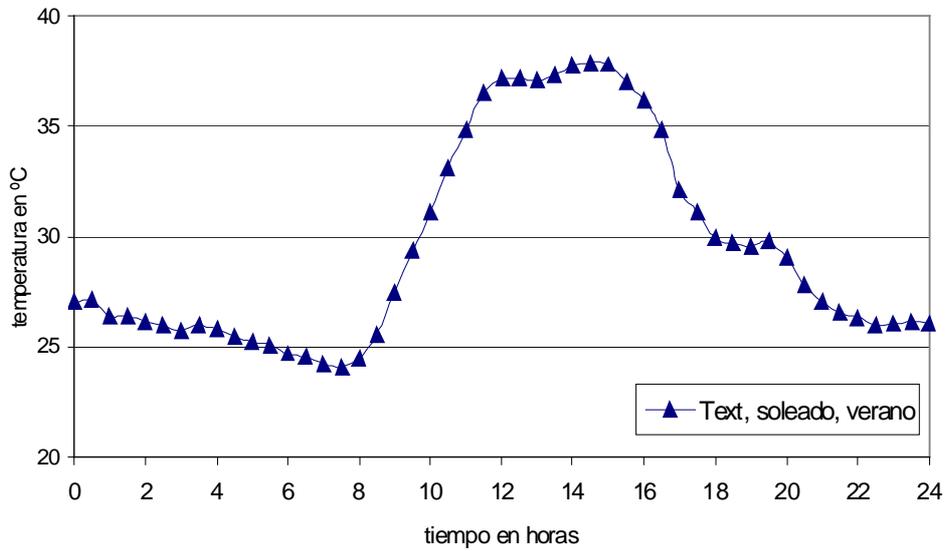


Figura56: Evolución de la temperatura exterior para el 17 de agosto 2002, día soleado.

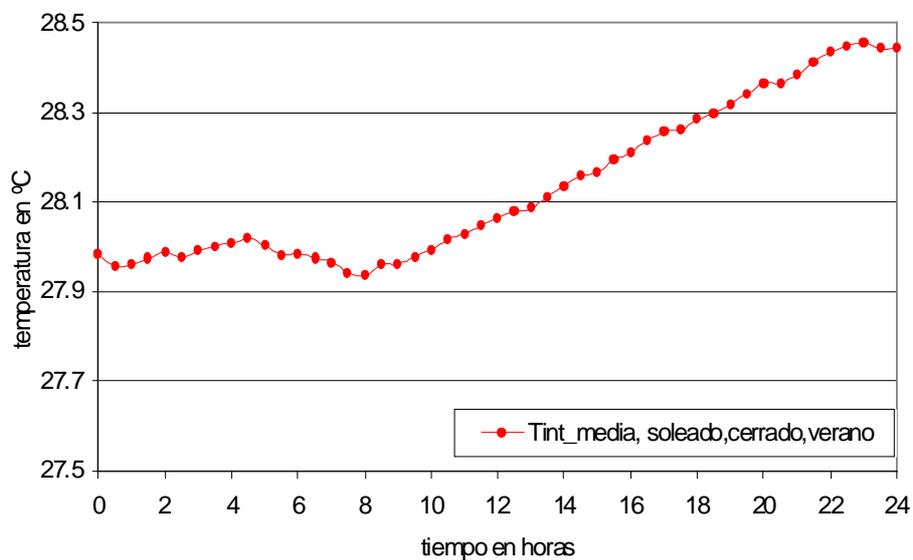


Figura57: Evolución de la temperatura interior para el 17 de agosto 2002, día soleado con persianas cerradas.

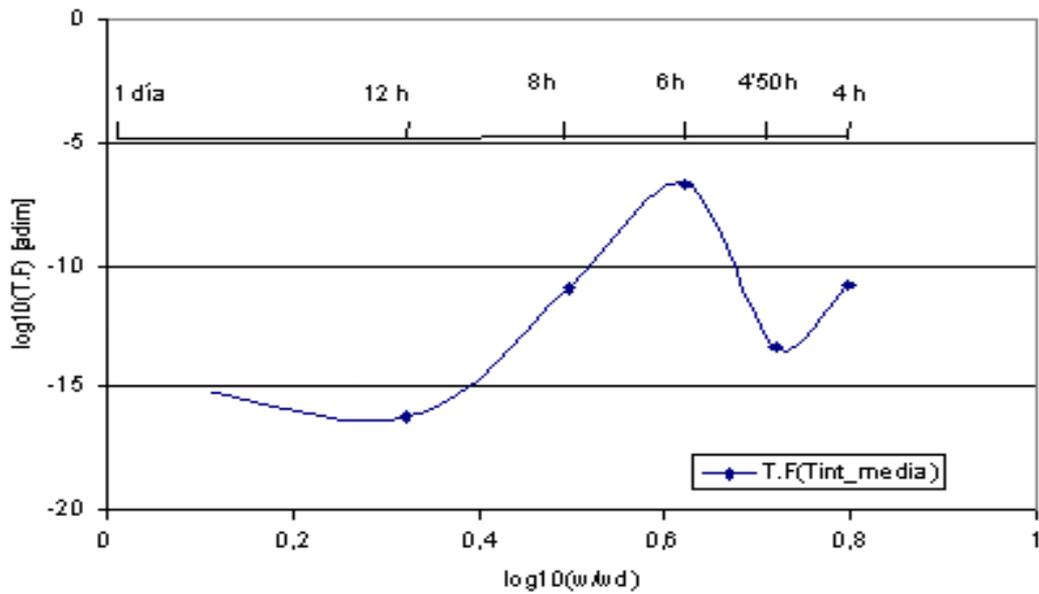


Figura58: Evolución de Función de Transferencia para un día soleado con las persianas cerradas. 17 de agosto 2002

Las fluctuaciones interiores en las frecuencias medias (frecuencia de 12 horas) presentan valores mínimos de oscilaciones (3%) debido a que para la época del año, los usuarios procuran aislarse al máximo de las fluctuaciones exteriores cerrando las ventanas y las persianas de una forma que asegura suavizar todas las infiltraciones de radiación y carga térmica en el interior, de este modo las persianas además de frenar la radiación solar, aumenta la resistencia al calor por conducción al formar una cámara de aire inmóvil. Entretanto las oscilaciones en altas frecuencias presentan valores más altos (21% para la frecuencia de 6 horas) debido a que la radiación solar incide sobre la fachada principal de la vivienda es absorbida por las superficies de separación interior y exterior y que una parte de esta radiación absorbida se emite al interior, lo cual provoca un aumento en las ganancias a estas frecuencias. En general, las oscilaciones para todas las frecuencias son bajas.

II.5.7 Relación entre la distribución espacial de la radiación solar y la respuesta interior

II.5.7.1 Introducción

Los motivos principales para incluir la iluminación natural dentro del diseño de la vivienda, hacen referencia al ahorro energético, relacionado con la reducción de las necesidades de luz artificial en los edificios y la contribución para mejorar el confort lumínico.

Para hacer un buen uso de la luz natural dentro de los edificios, los puntos clave que hay que remarcar son la introducción de luz natural, en forma directa o reflejada, en todos los espacios habitados; la gradación de la luz en cada espacio de la vivienda, en función de la actividad que se va a realizar; la protección de aberturas, de manera que sea posible reducir la luz en caso de sobrecalentamientos y demasiada luz (deslumbramiento), y la disposición de las aberturas, de manera que se pueda captar la luz desde dos o más orientaciones diferentes. Esto es importante en verano, cuando hay **que sombrear aberturas orientadas al sur y al oeste, para no vernos obligados a utilizar luz artificial en pleno día** [12].

En el mundo de la arquitectura, el aprovechamiento de las condiciones climáticas y los recursos naturales existentes, en especial la energía solar para minimizar el consumo energético de un edificio, se conoce como arquitectura bioclimática.

La arquitectura bioclimática, o arquitectura solar pasiva, se refiere a las aplicaciones en que la energía solar se capta, se guarda y se distribuye de forma directa, es decir, sin mediación de elementos mecánicos. Se trata de diseñar y aportar soluciones constructivas, que permitan que un edificio determinado capte o rechace energía solar, según la época del año, a fin de regularla de acuerdo a las necesidades de calefacción, refrigeración o de luz. En estos casos, el aprovechamiento de la radiación que llega al edificio se basa en la optimización de la orientación; la definición de volúmenes y aberturas de los edificios; la selección de materiales apropiados, y la utilización de elementos de diseño específicos y adecuados. Los principios de esta arquitectura están en el mismo diseño:

- El entorno climático
- La forma, orientación y distribución del edificio
- Los cierres, el aislamiento y la inercia térmica

El entorno climático, por su influencia directa en el confort térmico, es el primer factor a tener en cuenta a la hora de concebir un proyecto de arquitectura bioclimática. El entorno físico está directamente relacionado con el climático y se refiere al emplazamiento de la vivienda. Los principales factores, son:

- **Altitud:** la temperatura atmosférica disminuye alrededor de 0.5 cada 100 m de altura en promedio.
- **Distancia al mar:** el mar hace de regulador térmico; suaviza las oscilaciones de temperatura, eleva el nivel de humedad, y crea regímenes especiales de vientos, denominados brisas marinas y de tierra.
- **Orografía:** los sitios más elevados están más ventilados; reciben más radiación solar, y tienen menos humedad que los valles y depresiones.
- **Proximidad a vegetación:** la vegetación hace de regulador térmico y de humedad, frena el viento y actúa como filtro de polvo, ruido y contaminantes.
- **Emplazamientos urbanos:** presencia de microclimas, con aumento de temperatura y contaminación, y posibles obstrucciones de la insolación entre las diferentes construcciones vecinas.

II.5.7.2 La forma, orientación y distribución

La forma de un edificio interviene de manera directa en el aprovechamiento climático del entorno, esto a través de dos elementos básicos: la superficie y el volumen. Con relación a la superficie de la vivienda, por los intercambios de calor entre el exterior y el interior de un edificio, a mayor superficie más capacidad para intercambiar calor entre exterior e interior. El volumen del edificio está directamente relacionado con la capacidad para almacenar energía: a más volumen, más capacidad para almacenar calor. Una manera de cuantificar la relación entre la forma de un edificio y su capacidad para intercambiar calor con el exterior, es tomar en consideración el factor de forma, que es el cociente entre la superficie del edificio y su volumen. Para climas fríos conviene un pequeño factor de forma, entre 0.5 y 0.8, mientras que para climas cálidos conviene uno grande, superior al 1.2.

Otro aspecto que interviene en el mecanismo de intercambio energético entre la vivienda y el exterior, es el color de la fachada. Los colores claros en la fachada de un edificio facilitan la reflexión de la luz natural y, por lo tanto, ayudan a repeler el calor de la insolación. Contrariamente los colores oscuros facilitan la captación solar.

La orientación de un edificio determina su exposición al sol y a los vientos. La orientación sur de un edificio, por ejemplo, es la más favorable en los climas mediterráneos [13].

II.5.7.3 Comparación entre distintos tipos de protección

Es muy importante estudiar la relación entre la distribución espacial de la radiación solar y la evolución de las ganancias en profundidad. En esta sección analizaremos esta concordancia bajo dos condiciones de protección de la envolvente: *persianas abiertas*, y *persianas cerradas*.

Se trata del mismo piso del análisis anterior, se han hecho mediciones de la radiación solar y la temperatura del aire a lo largo del piso respecto a la obertura de la fachada principal. En el análisis se procura que las mediciones corresponden a un día soleado para poder estudiar el efecto de la radiación solar sobre la respuesta interior. Para mostrar la consecuencia de la altura del sol sobre la evolución de la temperatura del aire interior proponemos estudiar la repercusión en verano (sol alto) y en invierno (sol bajo), con ambas condiciones de protección “persianas cerradas y persianas abiertas”. En los gráficos que siguen medimos la distribución espacial de la radiación solar con la repartición de las ganancias térmicas dinámicas en el interior.

II.5.7.3.1 Respuesta en invierno con persianas abiertas

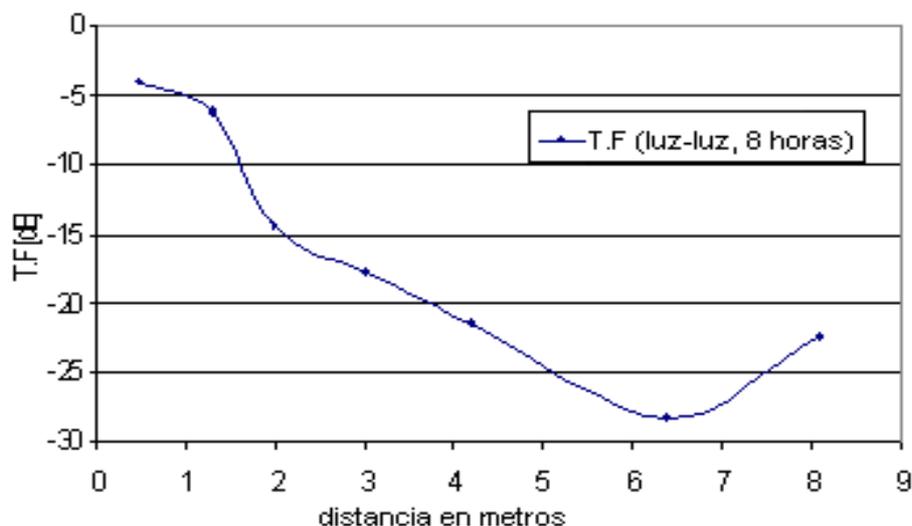


Figura59: Evolución espacial de la función de transferencia radiación-radiación. 14 de enero 2004 un día soleado bajo la condición de protección: persianas abiertas

Para todas las profundidades, las oscilaciones de la radiación solar en el interior son más importantes para la frecuencia de 8 horas. El porcentaje de las oscilaciones para esta frecuencia es de 100% a las distancias cercanas a la envolvente (menos de 1.5m), es el resultado esperado ya que por la época del año (invierno) el sol toca la fachada sur del edificio durante aproximadamente 8 horas diariamente lo que hace que la radiación en el interior sea de la misma oscilación que la exterior a esta frecuencia de 8 horas. Se ve una caída en las oscilaciones para todas las frecuencias a partir de la distancia de 2 m.

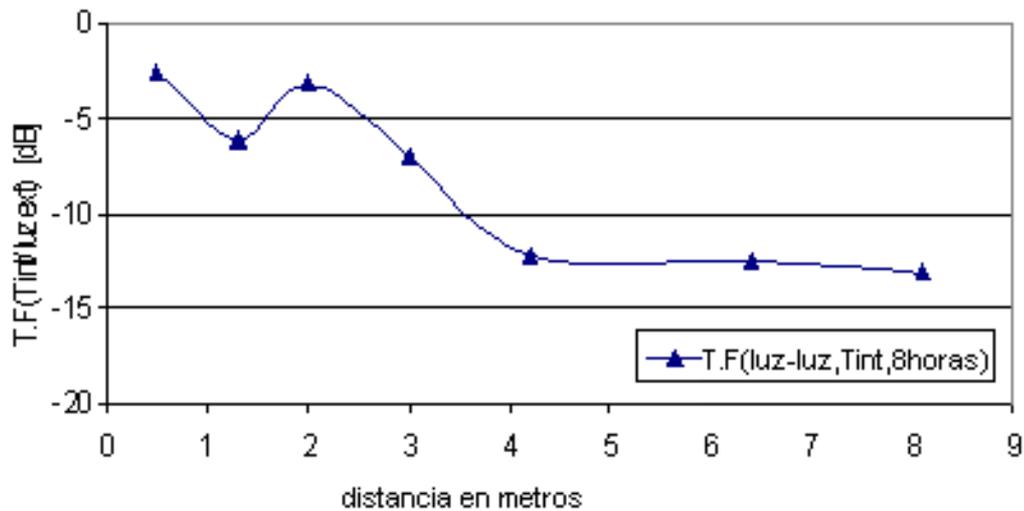


Figura60: Evolución de la función de transferencia de la temperatura interior con relación de la radiación solar directa. Un día soleado con persianas abiertas. 14 de enero 2003

Para la T.F(temperatura-radiación), las oscilaciones interiores para todas las profundidades son más altas para la frecuencia de 8 horas. De la misma forma se ve una clara caída en las oscilaciones a partir de la distancia de 3m de la obertura principal. En este caso las oscilaciones de la temperatura interior sólo alcanzan un 30% de las oscilaciones de la radiación exterior. Esto se puede explicar que la radiación solar al penetrar en el interior del local necesita un tiempo para calentar el aire interior y así aumentar las oscilaciones de la temperatura, (además que una gran parte de este calor se disipa también hacía el exterior).

II.5.7.3.2 Respuesta en invierno con persianas cerradas

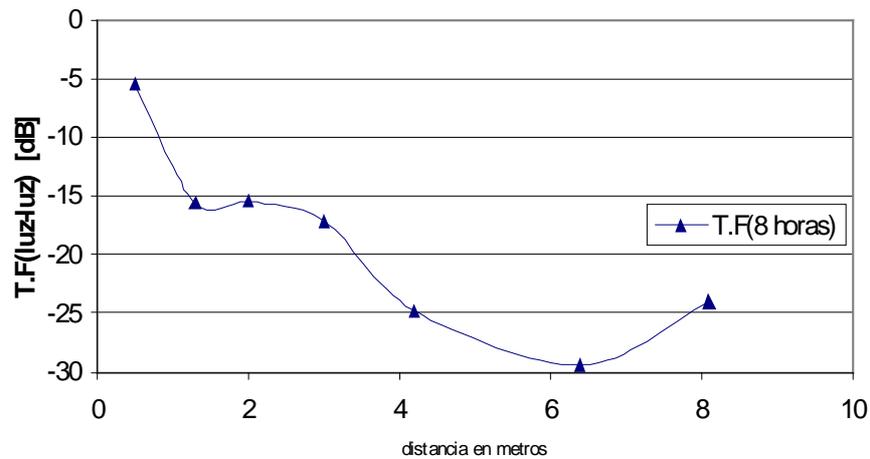


Figura61: Evolución de la T.F($luz-luz$) para un día soleado de invierno con las persianas cerradas. 03 de enero 2003

La oscilación de la luz interior ha caído mucho de la distancia 0.5 m de la ventana a 1.30 m, a partir de la distancia de 3 metros, las oscilaciones ya son mínimas (0.3 %) para la distancia de 4 metros. La condición de protección persianas cerradas hace que las infiltraciones de la radiación en el interior sean mínimas, pero siempre existen infiltraciones de luz a través de las ventanas aunque se mantengan cerradas las persianas.

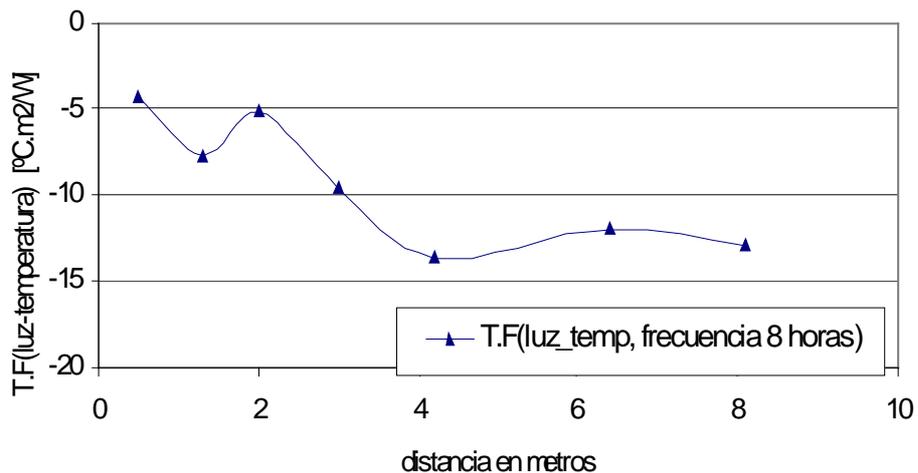


Figura62: Evolución de la T.F(radiación-temperatura) para un día soleado de invierno con las persianas cerradas. 03 de enero 2003

La evolución de la oscilación de la T.F(radiación-temperatura) sigue la misma ley ya que cuanto más alejamos de la abertura principal menos son las fluctuaciones interiores de la temperatura. Se aprecia que el porcentaje de las oscilaciones interiores de la temperatura es más grande en el caso de T.F(radiación-temperatura) que T.F(radiación-radiación), esto se puede explicar por el hecho que la temperatura interior no solamente depende de la cantidad de la radiación que recibe del exterior, sino de otras fuentes de calor como la convección y la conducción, sin olvidar los aportes internos causados por los ocupantes. La evolución de las oscilaciones interiores para la frecuencia de 8 horas se encuentra siempre encima de las oscilaciones correspondientes a un día y a 6 horas, ya que el trayecto solar de invierno es de aproximadamente de 8 horas de duración.

II.5.7.3.3 Respuesta en verano con persianas abiertas

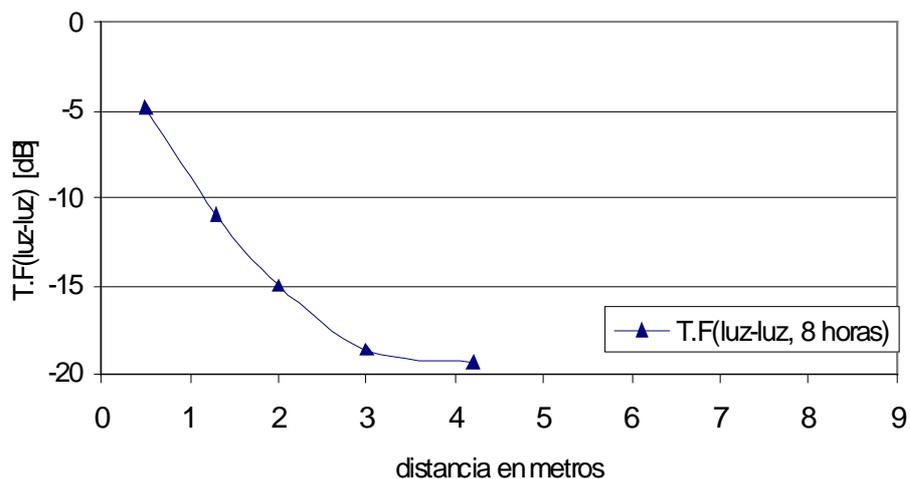


Figura63: Evolución de T.F(radiación-radiación) para un el 24 de septiembre 2002 soleado y con persianas abiertas. Oscilaciones para la frecuencia de 8 horas.

La oscilación de la radiación solar en el interior cae de una forma continua al pasar de posiciones cercanas a la abertura principal al interior del piso. Se observa una ausencia de las oscilaciones a mayores profundidades debido a que los valores obtenidos por la transformada de Fourier son insignificantes, lo cual indica La trayectoria solar de verano es más alta, lo cual significa que la radiación solar no penetre con mayor profundidad en el interior como se puede ver en la estereográfica siguiente:

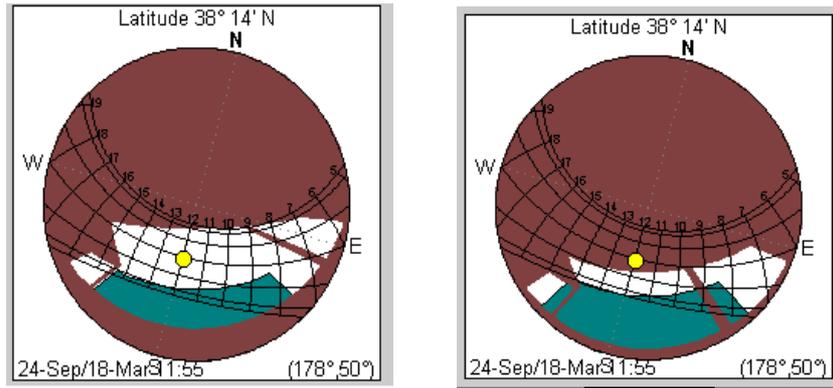


Figura64: La distribución de la radiación solar en el interior de la vivienda para dos sondas de medición (izquierda a 1 m y la derecha a 2 m de la abertura principal).

La duración de las horas del sol en el interior para el mes de septiembre es aproximadamente 8 horas a la distancia de menos de un metro de la abertura. De la estereografía se ve claramente que en esta poca del año el sol no llega a traspasar una distancia de aproximadamente 1,5 al interior de la vivienda, por lo tanto, la oscilación de la radiación a mayores profundidades es debido a la luz difusa y reflejada por las paredes y el suelo interior. Se aprecia que, a todas profundidades, existe una coincidencia en las ganancias para las frecuencias de 8 horas y 6 horas, esto se explica por el hecho que las oscilaciones de la radiación interior son debidas más a la radiación solar difusa que es alrededor de 6-8 horas.

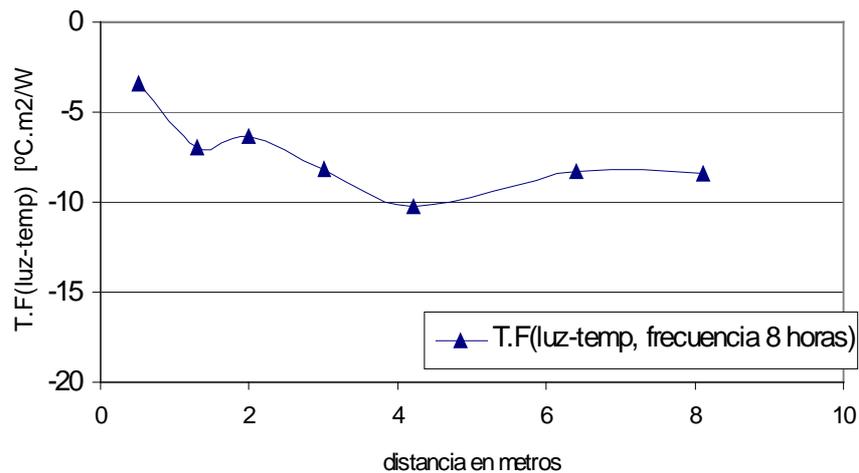


Figura65: Evolución de T.F (radiación-temperatura) para un día soleado de otoño con persianas abiertas. 24 de septiembre 2002.

En este caso, las oscilaciones de la temperatura interior siguen atenuando al dirigirse de la obertura de la envolvente hacia el interior, aunque esta vez, la magnitud de la caída de las oscilaciones es menor. Las ganancias correspondientes a la frecuencia de un día, a todas las profundidades, son mayores comparando con las frecuencias de 8 horas y 6 horas. Esto se explica por el hecho que las oscilaciones interiores de la temperatura en este caso es debido más al calor intercambiado por la conducción de las paredes de separación con el exterior, por transmisión de las superficies transparentes y por los flujos de aire intercambiados por la ventilación. Mientras que el interior gana menos calor por la radiación directa ya que esa última no llega a penetrar en el fondo del edificio por la causa del sol alto de verano. Por lo tanto, las ganancias interiores no siguen la misma ley de la distribución espacial de la radiación solar.

II.5.7.3.4 Respuesta en verano con persianas cerradas

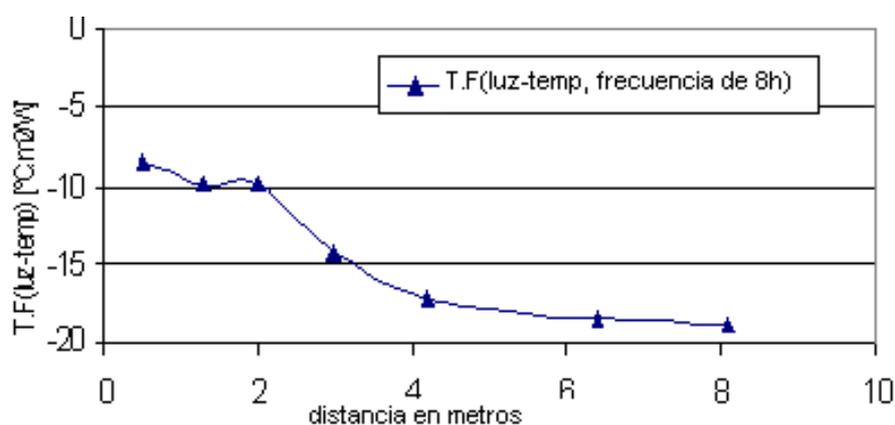


Figura66: Evolución de la T.F.(radiación-temperatura) para el 08 de agosto 2002, con persianas cerradas. Oscilaciones correspondientes a la frecuencia de 8 horas.

Las fluctuaciones interiores para la frecuencia de 8 horas presentan una caída a partir de la distancia de 2 metros. En general las ganancias interiores son minúsculas debido a la protección de la radiación solar directa. No se ha podido analizar la figura de la evolución de la T.F.(radiación- radiación) ya que las oscilaciones internas de la radiación solar son insignificantes (persianas cerradas). En general, se ve una analogía clara entre la distribución espacial de la radiación solar en el interior de la vivienda y la evolución de la temperatura interior en presencia de la radiación solar en el interior (condición de protección persianas abiertas). Mientras que esta concordancia se pierde en ausencia de la radiación solar, ya que en este último caso, el interior gana y pierde calor más por conducción y ventilación que por la radiación.

III. Valoración de la respuesta dinámica de la segunda vivienda

III.1 Introducción

Para un análisis realista de la influencia de las perturbaciones ambientales exteriores sobre la respuesta interior del edificio, se requiere el estudio de distintos tipos de tipología de edificios, donde se deben considerarse los siguientes aspectos físicos:

1. Orientación del edificio, situación del local a analizar con respecto a:
 - Puntos cardinales: efectos de la radiación solar directa y difusa.
 - Estructuras permanentes próximas: efectos de sombra de los edificios que le rodean.

2. Características constructivas del edificio:
 - La masa térmica interior.
 - La masa térmica de la envolvente de la piel
 - Tamaño de las oberturas en la envolvente.
 - Área total de la fachada principal.
 - El volumen total del local en estudio.
 - Color de las paredes acumuladoras de calor.

3. Actividades y ocupantes:
 - Número de ocupantes.
 - Tiempo de ocupación y naturaleza de su actividad.
 - Los aportes internos comprenden el horario del funcionamiento.
 - Ventilación, el número de renovaciones hora.
 - La acostumbre de los ocupantes frente a la protección de las perturbaciones ambientales exteriores.

Estos parámetros son muy diferentes de una vivienda a otra. Por este fin, y para ampliar el análisis, se han hecho mediciones de temperatura y radiación en otro tipo de vivienda. Una parte de este trabajo de investigación consiste en medir la temperatura y la luz natural exterior, de un espacio intermedio (galería) e interior.

Para hacer las mediciones reales, se ha seleccionado la galería ya que es muy representativa de diversos tipos de viviendas, y también porque es un elemento muy característico de la ciudad de Barcelona. Se ha escogido una galería situada en la primera planta de un edificio de l'Eixample de Barcelona, concretamente a la calle Aragón, 346, entre Girona y Bailén



Figura 1: fachada a la calle Aragón, interior de la galería y interior del despacho

La galería tiene una orientación sur-este. Esta finca sólo tiene dos habitaciones por planta, que van de la calle hacia el patio interior, pero en este caso el piso se ha dividido en dos despachos: uno exterior que da a la calle Aragón, y uno que da al interior. Las mediciones se hicieron en esta parte del piso, concretamente en la galería y la sala en que sigue como se ve en el dibujo de la planta.

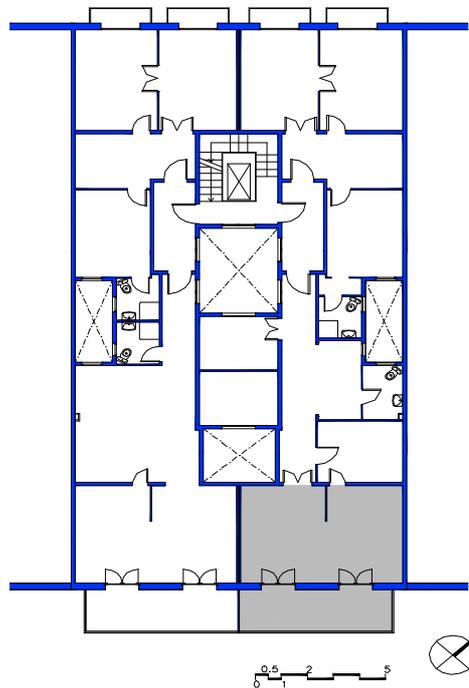


Figura 2: Planta del primer piso de la casa de Aragón, 346. Las dos habitaciones longitudinales, habituales a la tipología de la zona, se han dividido en dos despachos. El despacho y la galería donde se han efectuado las mediciones están tramados en color gris

Esta galería es un ejemplo clásico, suportada por una estructura metálica; está cerrada con carpintería de madera practicable. El muro y el balcón que separan la galería vidriada del espacio interior don elementos de fachada, tal como se puede observar en el dibujo

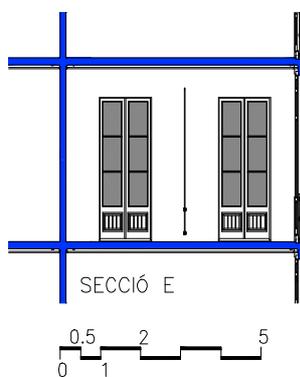


Figura 3: desde la galería hacia el interior

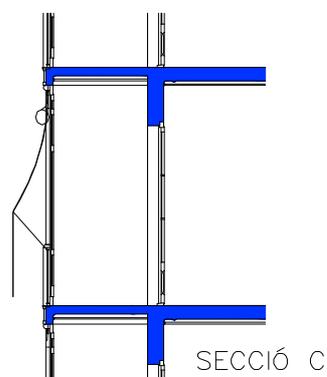


Figura 4: desde el interior de la galería

La galería no se hace servir para funciones estables, no hay personas que la ocupan, y los ocupantes conocen muy bien el funcionamiento ambiental de este espacio y se hace una gestión correcta. Esto significa que en el invierno se suben las persianas enrolladas exteriores para captar radiación y en verano se bajan para protegerse de la radiación.

III.2 Colocación de los puntos de medición

Los sensores se colocan de una manera que se puede obtener la luz y la temperatura en el sentido del ancho de la galería (5.80 m) y en profundidad (1.90 m). También se colocan sondas en el espacio interior, en profundidad (4.50 m) y se mide la temperatura exterior. La situación espacial intenta producir las menores molestias posibles a los usuarios y al mismo tiempo medir los puntos que tienen una significación para el análisis. La nomenclatura de cada sensor se mantiene en los diferentes períodos de medición y es la que se muestra en el gráfico. Se ha de recordar que cada punto dibujado puede tener sensores de temperatura y la luz, pero no es así en todos los casos.

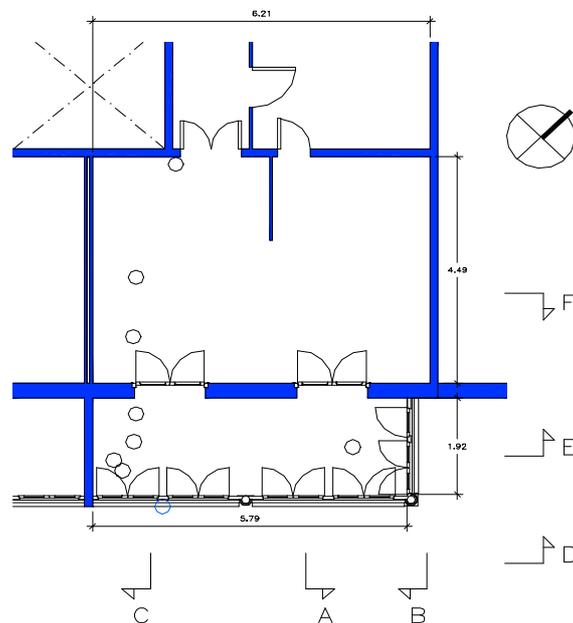


Figura 5: Planta del despacho y de la galería donde se han efectuado las mediciones.

Las sondas y los gráficos correspondientes se nominan:

- EXTERIOR **EX** Situada al exterior, al centro de la galería.
- GALERÍA **E** Situada a la parte ESTE de la galería, hacía el exterior.

GALERÍA E2	Situada a la parte ESTE de la galería, hacía el interior.
GALERÍA W1	Situada a la parte OESTE, tocando el muro de separación con la galería simétrica, también hacía el exterior.
GALERÍA W2	Situada a la parte OESTE, unos 60 cm más hacia el interior.
GALERÍA W3	Situada a la parte OESTE, tocando el muro que separa la galería del interior.
INTERIOR1 I1	En el espacio interior, a unos 80 cm del muro que le separa de la galería.
INTERIOR2 I2	En el mismo espacio interior, a unos 2.5m de profundidad, siempre a la franja oeste.
INTERIOR3 I3	Al fondo de todo el espacio interior, al lado de la puerta de acceso.

III.3 Análisis y resultados

III.3.1 Respuesta interior con persianas abiertas

La primera serie de datos corresponde a 9 días desde el 14 hasta el 22 de octubre de 1999. La condición de protección consiste en subir las persianas enrolladas de la galería y así permitir la entrada de la radiación solar directa. Como se puede ver en la figura de la evolución de la radiación solar y la temperatura exterior, durante todos los días de las mediciones hacia sol.

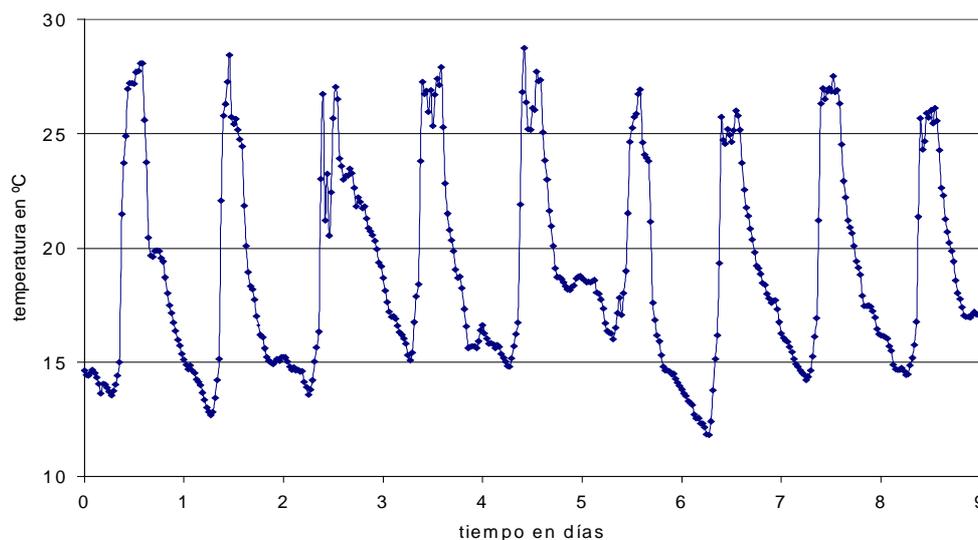


Figura6: Evolución de la temperatura exterior durante el periodo de las mediciones.

Datos extraídos de las mediciones hechas en situ.

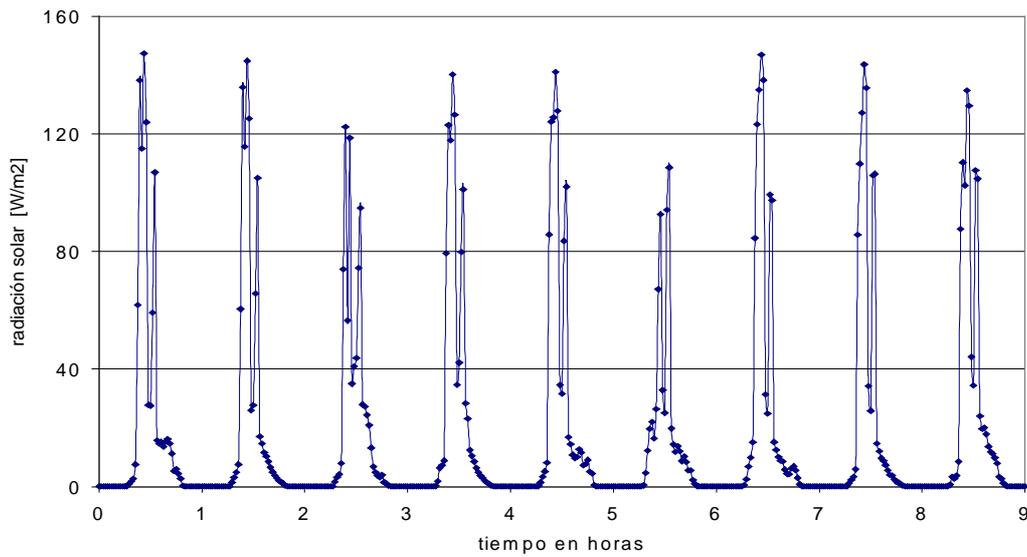


Figura7: Evolución de la cantidad de la radiación exterior durante la misma época de las mediciones.

La oscilación de la temperatura exterior es de aproximadamente 14°C , donde se ve que la evolución es bastante uniforme para todos los días. Lo mismo se puede decir de la radiación exterior ya que hacia sol durante todos los días de las mediciones.

A continuación se hace ver la evolución de las temperaturas de la galería y las dos temperaturas interiores.

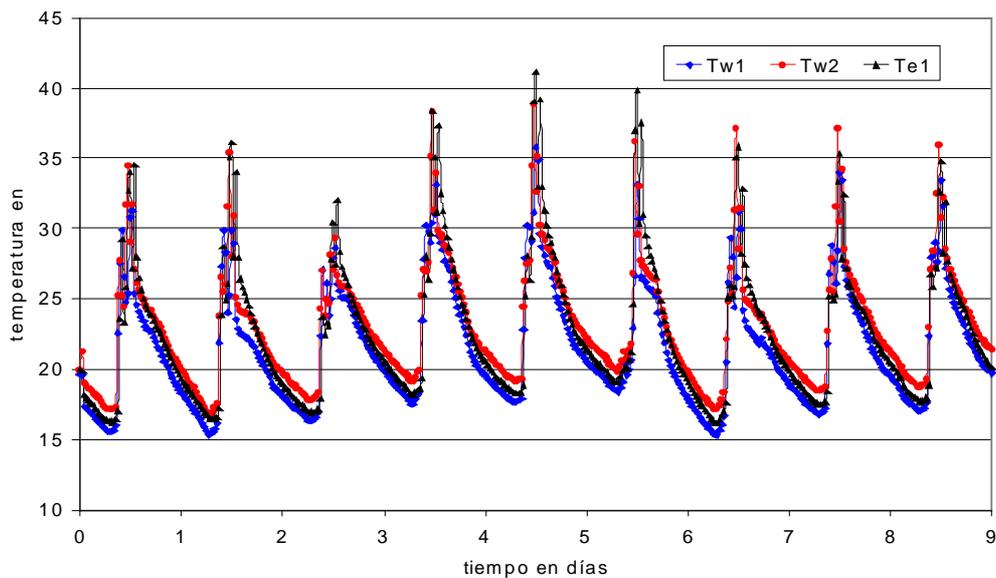


Figura8: Evolución de las temperaturas T_{w1} , T_{w2} y T_{e1} en la galería para el mismo período de mediciones.

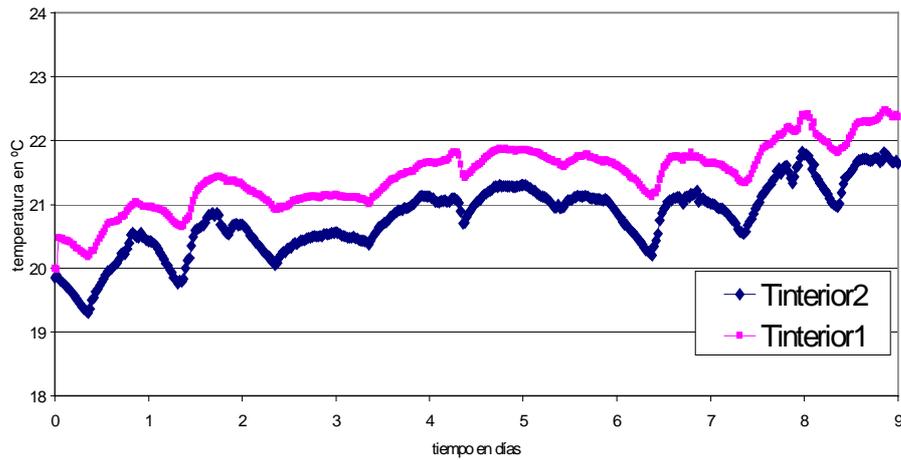


Figura 9: Evolución de las temperaturas $T_{interior1}$ y $T_{interior2}$

Como se puede ver a través de la evolución de la temperatura en la galería, la amplitud de oscilación para algunas sondas (T_{w2}) llega a ser más de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la oscilación en el interior apenas llega a $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ de amplitud. En este caso la galería juega un factor acumulador de calor, ya que la radiación solar de longitudes de ondas cortas atraviesa el cristal y calienta la superficie de la galería que a su vez disipa calor pero esta vez de longitudes de ondas largas que son impenetrables al cristal y así se acumula el calor dentro de la galería.

Analizando los mismos datos en el campo de frecuencias se puede ver el efecto de la radiación solar directa y a qué frecuencias se manifiesta más.

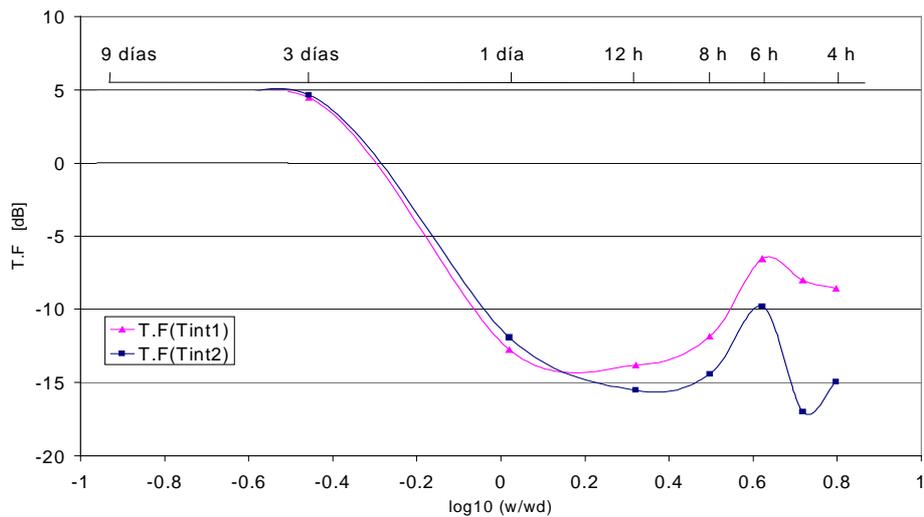


Figura10: Evolución de T.F para 9 días desde el 14 hasta el 24 de octubre 1999. Las oscilaciones de las temperaturas interiores. Persianas abiertas, soleado

La condición de protección “persianas abiertas” se refiere a subir las persianas enrolladas de la galería y dejar pasar la radiación directa.

El área vidriada de la galería es de aproximadamente 28 m², lo cual significa que las ganancias y las pérdidas son importantes.

En las bajas frecuencias: las oscilaciones interiores son muy importantes y llegan a ser 300% de las oscilaciones exteriores a la frecuencia de 3 días. Durante el día, la radiación solar traspasa el cristal de la galería y calienta el aire y el muro de carga. Debido a que el cristal es opaco a las longitudes de onda largas, el calor se queda atrapado dentro de la galería y sube la temperatura del muro, que por conducción, conduce el calor hacia el interior (despacho). Por las noches, debido al tamaño grande de la superficie vidriada, las pérdidas hacia el exterior son importantes, lo que hace que la masa interior (el muro de carga) disipa calor por radiación hacia el exterior más frío. Ambos fenómenos se hacen de una forma muy lenta, lo que hace que las oscilaciones interiores a las frecuencias bajas son más grandes que aquellas exteriores.

En las frecuencias medias: Las oscilaciones interiores a la frecuencia de un día no alcanzan el 5%, que es un porcentaje muy bajo teniendo en cuenta que las persianas se mantuvieron abiertas. Es el resultado esperado ya que el muro de separación juega un factor filtrado de las oscilaciones exteriores debido a su importante grosor (30 cm) que hace que las perturbaciones exteriores no tienen suficiente tiempo (menos de un día) para llegar al interior.

III.3.1.1 La constante de tiempo del muro

Una forma muy aproximada del cálculo de la constante del tiempo τ de un muro de 30 cm de grosor consiste en calcular todos los flujos de transmisión G_t interior-externo y calcular la masa interior total del piso.

$$\tau = \frac{masa_{total}}{G_t}$$

$$masa_{total} = \sum_i (espesor)_i (1m^2) (densidad)_i (calor\ específico)_i \frac{1}{1m^3\ de\ masa}$$

i es el índice del material que forma la inercia interior.

$$G_t = G_t^i + G_t^e + G_t^d + G_v$$

G_t^i Coeficiente de intercambio por transmisión de la piel hacia el interior

G_t^e Coeficiente de transmisión de la piel al exterior. $W/m^3 \text{ } ^\circ C$

G_t^d Coeficiente de la piel transparente $W/m^3 \text{ } ^\circ C, (t)$

G_v Coeficiente de intercambio por ventilación $W/m^3 \text{ } ^\circ C, (t)$

El cálculo en detalle de los coeficientes de intercambio por transmisión son los mismos del capítulo 5.

Aplicación numérica:

$$masa_{total} = 1.57 \cdot 10^5 \text{ J}/m^3 \cdot ^\circ C$$

Caso de persianas cerradas:

$$G_t = 1.03 \text{ J.s}/m^3 \cdot ^\circ C$$

Y

$$\tau = 1.76 \text{ días}$$

Caso de persianas abiertas:

$$G_t = 1.46 \text{ J.s}/m^3 \cdot ^\circ C$$

Y

$$\tau = 1.24 \text{ días}$$

El cálculo se ha hecho para el mismo muro de la vivienda del análisis actual. Queda señalar que cada tipología de vivienda tiene su propia constante de tiempo y el cálculo considerado en nuestro caso es aproximativo, ya que el objetivo es determinar la relación que existe entre la constante de tiempo y la frecuencia ω .

En las altas frecuencias: las ganancias interiores siguen siendo bajas, con aparición de un pico de ganancias a la frecuencia de 6 horas debido a las actividades de los ocupantes. Pero las oscilaciones interiores a estas frecuencias son puntuales y dependen de la ubicación del punto y cómo le afectan los fenómenos térmicos ocurridos en cortos intervalos de tiempo

(radiación solar directa, ventilación, y ganancias causadas por las actividades de los ocupantes).

Analizando ahora la evolución de las oscilaciones térmicas en la galería, la figura siguiente demuestra la respuesta en la galería para las temperaturas T_{E1} , T_{w1} y T_{w2} .

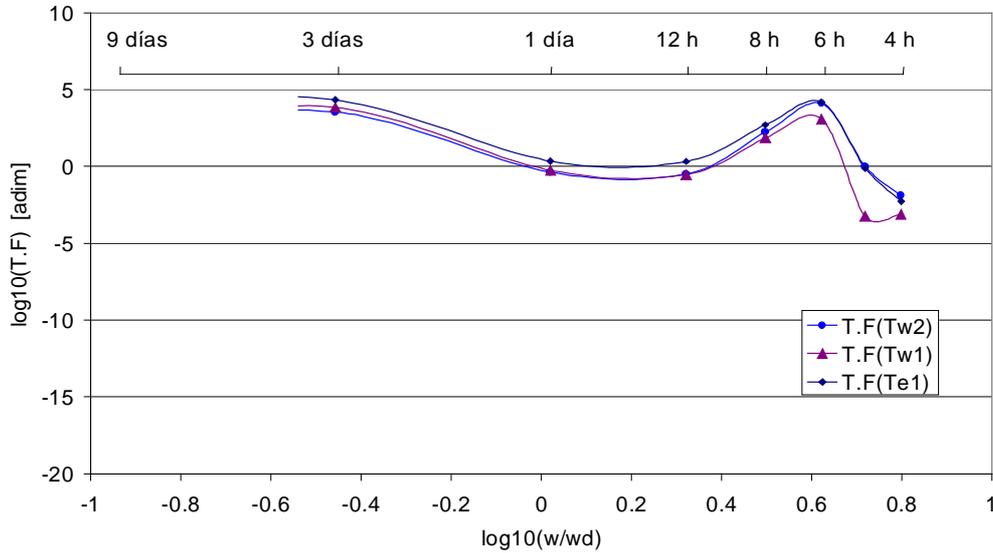


Figura11: Evolución de T.F para 9 días desde el 14 hasta el 24 de octubre 1999. Oscilación de las temperaturas de la galería. Persianas abiertas, soleado

Para todas las frecuencias, las ganancias en la galería son más grandes que las oscilaciones exteriores. En este caso, la galería y el muro interior hacen la función del muro Trombre, donde la radiación solar directa, de longitudes de onda cortas, traspasa el cristal y sube la temperatura de la masa del muro que al aumentar su temperatura irradia calor a longitudes de onda largas que no traspasan el cristal, y así se acrecienta la temperatura del aire atrapado en la galería. Una parte de ese calor es absorbida por los elementos de la construcción y luego emitido por las noches, lo que hace que la temperatura máxima de la galería se encuentra encima del máximo de la temperatura exterior, sin olvidar las pérdidas efectivas por las noches que pueden ser importantes a la hora de hacer el balance de las oscilaciones de la temperatura.

La figura que sigue muestra la evolución de las temperaturas exterior y T_{w2} .

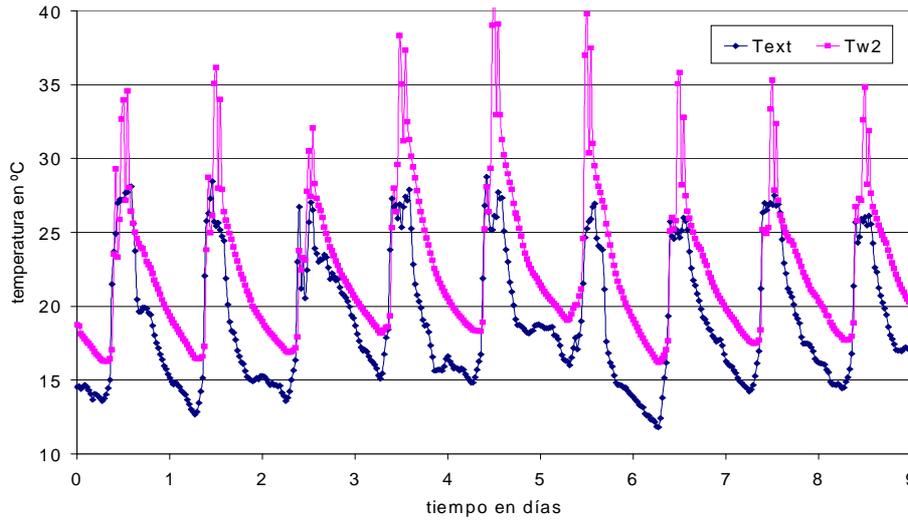


Figura12: Evolución de la temperatura exterior y Tw2 dentro de la galería. Datos de 9 días desde el 14 al 24 de octubre 1999. Las persianas abiertas y todos los días soleados

III.3.2 Respuesta interior con persianas cerradas

La segunda serie de mediciones se ha tomado bajo la condición de protección “persianas enrolladas de la galería cerradas”. El objetivo requerido de este análisis es detectar la relación existente entre la respuesta interior la impermeabilidad de la radicación solar directa. Los Figuras a continuación corresponden a un intervalo de mediciones de 9 días desde el 25 de octubre hasta el 02 de noviembre 1999.

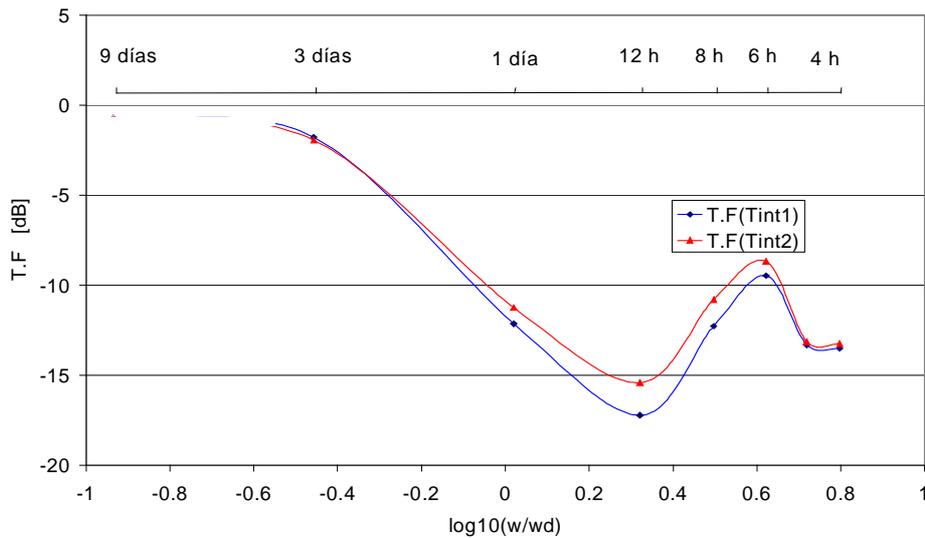


Figura13: Evolución de T.F para 9 días desde el 25 de octubre hasta el 02 de noviembre 1999. Soleado con persianas cerradas

En las bajas frecuencias: las oscilaciones interiores igualan a las exteriores, (63% para la frecuencia de 3 días). Aunque las persianas se mantuvieron cerradas durante el día, la gran área vidriada causa pérdidas efectivas importantes a través de transmisión, lo que hace que las oscilaciones a bajas frecuencias sean importantes.

En las frecuencias medias: las oscilaciones interiores no pasan de 10% de las oscilaciones exteriores, además de impedir que la radiación solar entre, el muro masivo de separación galería-interior absorbe las posibles infiltraciones impidiendo así que lleguen al interior, ya que el tiempo de que estas ganancias traspasen el muro es más largo que el tiempo de las frecuencias medias “2días hasta 12 horas”.

En las altas frecuencias: las ganancias son debidas a fenómenos ocurridos en cortos plazos de tiempo, como la radiación solar directa, la ventilación, los aportes interiores causados por los usuarios, etc. En este caso, la radiación solar directa interviene en el pico de ganancias a la frecuencia de 6 horas (13% aproximadamente), el pico de las ganancias es posiblemente debido a las actividades de los usuarios como abrir las ventanas para una posible ventilación durante las horas de su existencia en el despacho, y también a una posible abertura de las ventanas que dan a la galería lo cual permite una irradiación del calor acumulado en la galería hacía el interior subiendo así más las oscilaciones interiores a esta frecuencia. Básicamente las ganancias a altas frecuencias son debidas al comportamiento de los usuarios respecto a la protección de las fluctuaciones exteriores.

Para completar el análisis, es imprescindible el estudio del comportamiento térmico en la galería con ausencia de la radiación solar directa. La figura que sigue demuestra la evolución de la respuesta de las temperaturas T_{w1} , T_{w2} y T_{E1} para el mismo intervalo de mediciones anterior.

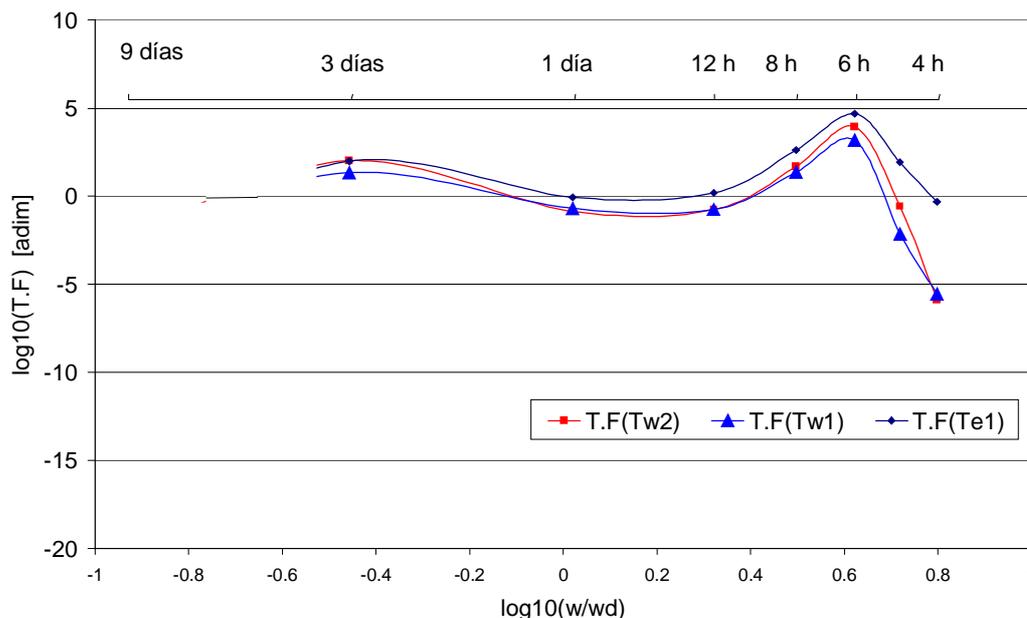


Figura14: Evolución de T.F para 9 días desde el 25 de octubre hasta el 02 de noviembre 1999. Soleado con persianas cerradas.

El comportamiento térmico en la galería es el mismo para todas las sondas, se puede decir que el conjunto “galería” tiene una única función de transferencia que le caracteriza.

Casi para todas las frecuencias, las oscilaciones en la galería son mayores que las oscilaciones exteriores aunque estamos hablando de la condición de protección persianas cerradas, pero siempre con menos oscilación que en el caso de las persianas abiertas como se verá en la figura abajo. Lo cual nos permite decir que la condición de protección persianas cerradas, no afecta de una forma global las oscilaciones en la galería, sino que intervienen otros factores como la transferencia de calor por conducción, la transmisión de las superficies vidriadas, la ventilación, el efecto invernadero que causan las láminas de vidrio de la galería.

En bajas frecuencias: a la frecuencia de 3 días, las oscilaciones en la galería alcanzan un 156% de las oscilaciones exteriores. Porcentaje alto teniendo en cuenta que se protegía de la radiación directa. En este caso las persianas no resisten al calor a bajas frecuencias ya que el espesor de la persiana sólo impide que la radiación solar directa penetre al interior, en cambio, el calor transmitido por conducción y por radiación de longitud de onda larga (persianas calentadas por la radiación solar directa) sigue llegando al interior.

Durante las horas del día el calor recibido en el interior sigue aumentando la temperatura del muro de carga y así la temperatura del aire, subiendo de esta manera los máximos de la temperatura en la galería. Y por la noche, la temperatura exterior baja lo cual genera un flujo de calor, esta vez, de la galería hacia el exterior, esta pérdida de calor hace bajar los mínimos de la temperatura en la galería aunque nunca pasando de los mínimos marcados en el exterior. Las ganancias y las pérdidas obtenidas tienen efecto directo sobre las oscilaciones de la temperatura en la galería para todos los rangos de frecuencias.

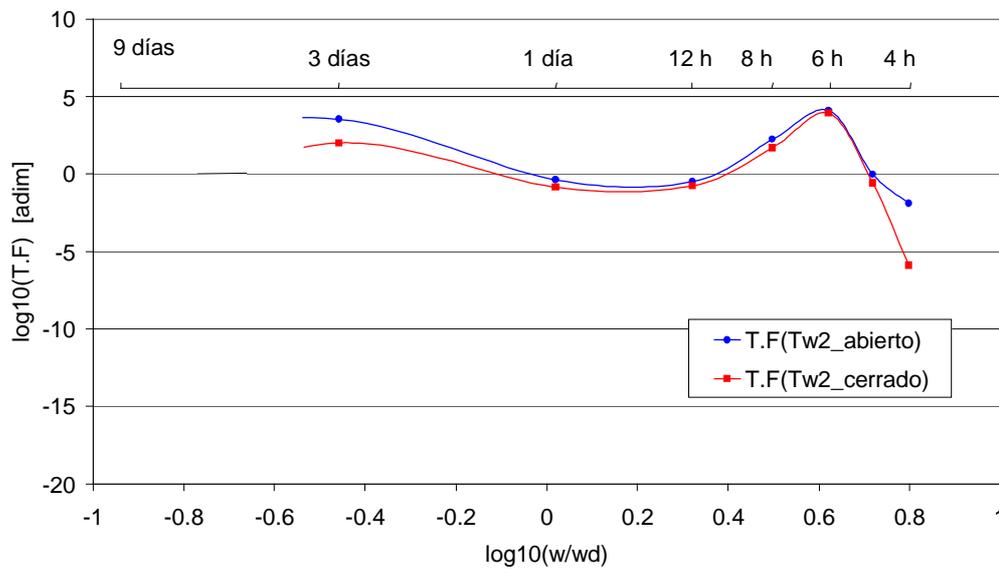


Figura15 Comparación de las oscilaciones en la galería para ambas condiciones de protección persianas abiertas y persianas cerradas. Los datos corresponden a la sonda T_{w2}

Para todas las frecuencias, las oscilaciones son idénticas, aunque se ve un ligero desvío en las gráficas a partir de la frecuencia de 3 días dirigiéndose a frecuencias más bajas. La posible diferencia es debida al efecto de la radiación solar directa, ya que en el caso de protección persianas abiertas, la radiación directa alcanza la masa del muro de separación con el interior aumentando así el calor acumulado que será emitido luego por las noches permitiendo así unas ganancias continuas en la galería, es decir, que durante el día el aire interior se calienta por la radiación solar directa y por ventilación, mientras tanto, por las noches el aire interior sigue recibiendo calor del muro calentado durante las horas del sol, lo cual hace que el ciclo de las ganancias sea largo.

III.3.3 Respuesta interior para los días nublados

Uno de los casos importantes a analizar es el comportamiento interior para los días nublados, el objetivo examinar el efecto de las pérdidas a través del cristal de la galería sobre las oscilaciones interiores. Las mediciones corresponden a 4 días desde el 03 hasta el 06 de octubre 1999.

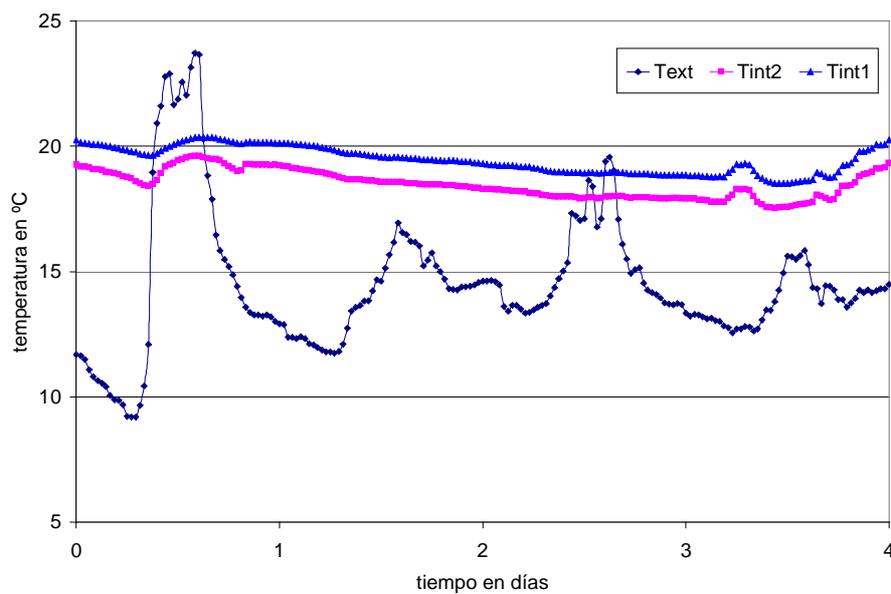


Figura16 Evolución de la temperatura exterior y las temperaturas interiores en función del tiempo. Datos de 3 días desde 04 hasta 06 de octubre 1999. Persianas abiertas y todos los días nublados.

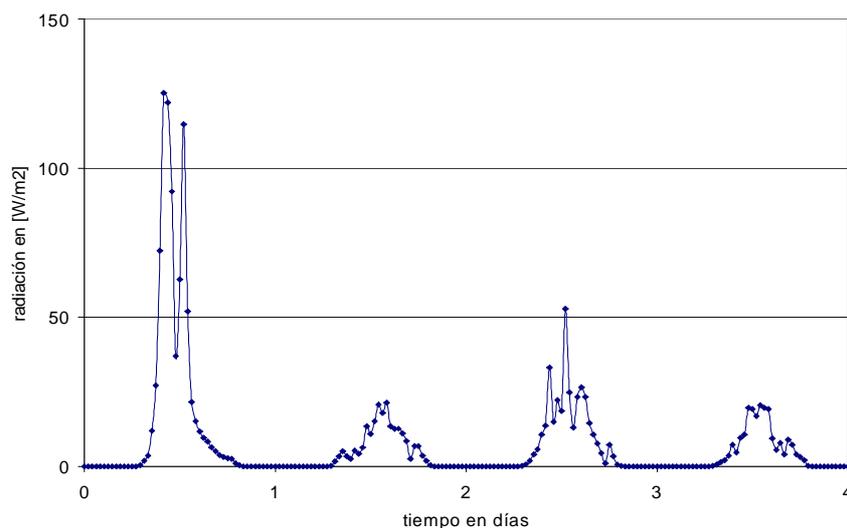


Figura17 Evolución de la radiación solar exterior en el tiempo. Datos de 3 días desde 04 hasta 06 de octubre 1999.

La oscilación de la temperatura en el interior es muy suave y tiende a ser plana, mientras que la temperatura exterior no presenta mucha variación en el ciclo día-noche. La radiación solar es muy baja comparando con un día soleado donde la radiación alcanza 110 W/m^2 .

En la figura que sigue analizaremos los efectos de la ausencia de la radiación solar sobre la respuesta en el interior y en la galería.

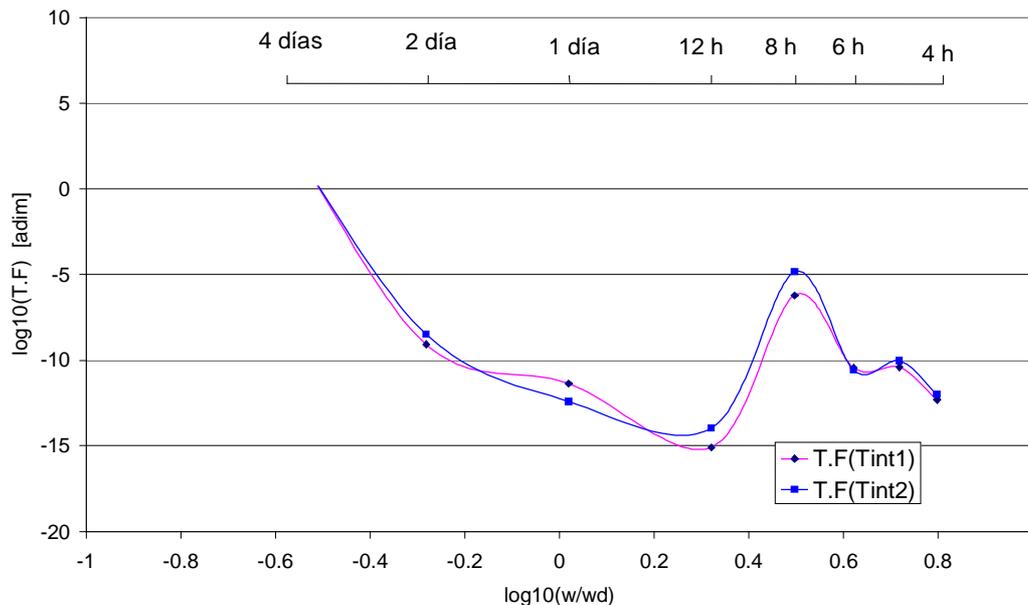


Figura18: Evolución de las oscilaciones interiores, datos para 3 días desde el 03 hasta el 06 de octubre 1999. Nublado con persianas abiertas

Como se puede ver a través de la figura de la función de transferencia, las oscilaciones interiores se hacen más importantes cuando nos dirigimos a bajas frecuencias. Como hemos dicho antes, las oscilaciones interiores son debidas a dos fenómenos: la captación y la pérdida. En este caso la captación es mínima a causa de la ausencia de la radiación solar directa, lo cual abre una gran ventaja a que el flujo de calor se dirige del interior hacia el exterior formando así pérdidas considerables. No obstante, las oscilaciones interiores a la frecuencia de un día y 12 horas siguen siendo las mismas que en el caso de la presencia de la radiación solar directa.

La cantidad de calor que atraviesa el espesor del muro de separación con la galería depende de los materiales que constituyen ese último, y el tiempo suficiente para que el calor pase del exterior al interior dependa de la constante de tiempo del muro, que es el tiempo que tarda el calor de traspasar el muro. En este caso, la constante es más grande

que un día lo cual impide que lleguen las oscilaciones a través de la conducción del muro a las frecuencias medias.

A altas frecuencias, las oscilaciones interiores vuelven a ser importantes, y se ve un pico de ganancias a la frecuencia de 6 horas de aproximadamente 31% de las oscilaciones exteriores. Eso es debido como se ha dicho antes a las actividades de los ocupantes como abrir y cerrar las ventanas permitiendo de esta forma un posible intercambio de calor por ventilación durante cortos plazos de tiempo.

En general, cuando se elimina el efecto de la radiación solar directa, la respuesta en el interior suele ser la misma en todas posiciones, ya que la presencia de la radiación produce franjas caloríficas al calentar el sitio donde incide provocando de esta forma zonas de distintas oscilaciones de temperatura, lo cual se puede ver anteriormente, sobre todo en altas frecuencias.

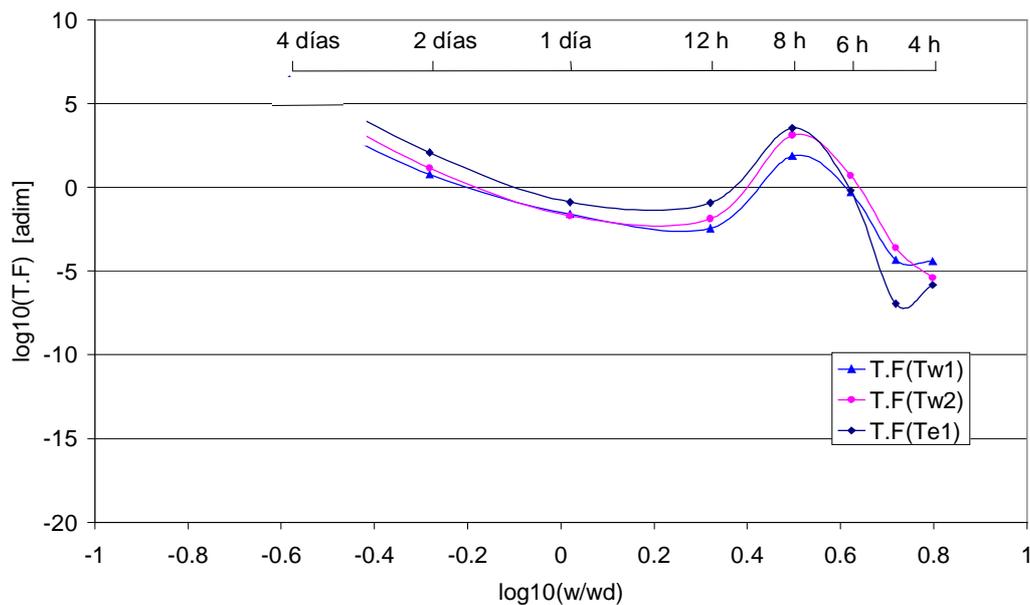
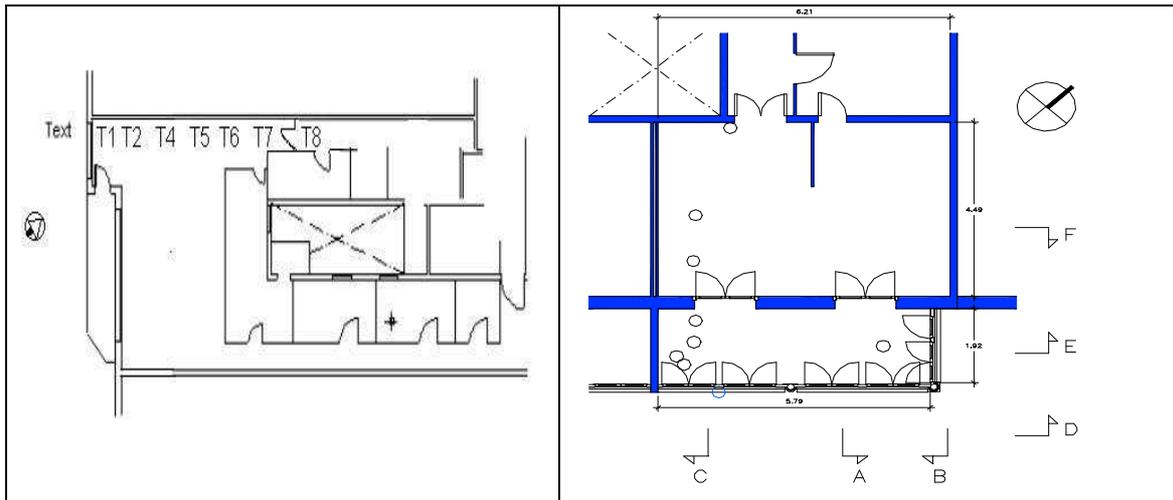


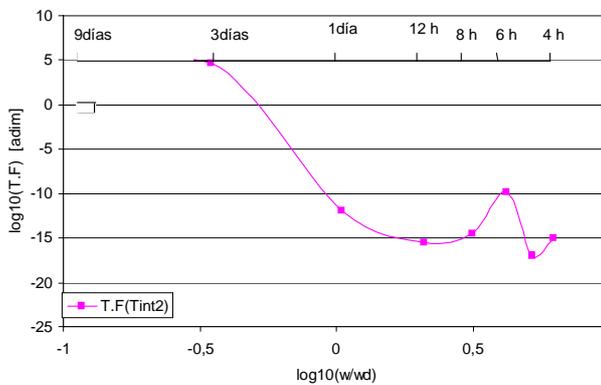
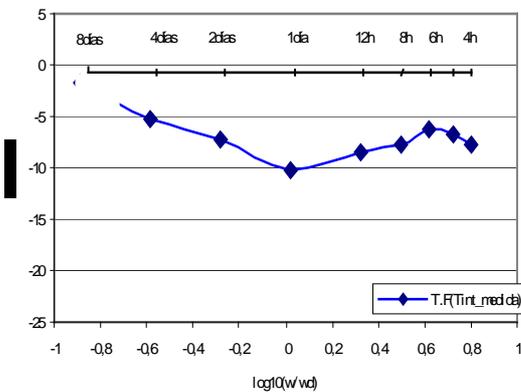
Figura19: Evolución de T.F para 3 días desde el 03 hasta el 06 de octubre 1999. Nublado con persianas abiertas

Las oscilaciones en la galería, para todas las frecuencias, siguen siendo altas aunque se trata de días nublados. La superficie vidriada de la galería hace que el intercambio de calor por transmisión sea alto, provocando de esta forma una oscilación interior considerable.



Condición de protección **Persianas Abiertas**

Condición de protección **Persianas Abiertas**



En general, el ambiente interior se ve afectado por las fluctuaciones exteriores. La T.F(ω) presenta valores entre -5 dB y -10 dB. Es decir que el porcentaje de las oscilaciones de la temperatura interior en su valor máximo es de un 30% de las oscilaciones exteriores a las frecuencias de *4 días* y de *6 horas*, mientras que el mínimo de las oscilaciones se registra a la frecuencia de *un día* “10%”. La característica de la envolvente con una gran obertura vidriada al sur permite una captación casi a lo largo de todo el día, lo cual aumenta las oscilaciones de la temperatura interior para todas las

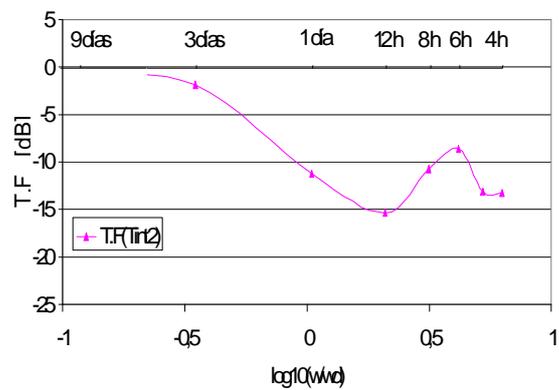
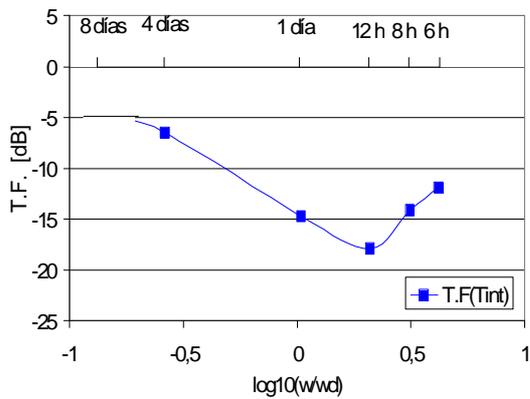
El ambiente interior se ve más afectado en las bajas frecuencias que en las frecuencias medias y altas frecuencias. La característica de la vivienda teniendo una galería al sur le permite una importante captación y el muro grueso que separa la galería del interior almacena el calor captado. Este proceso genera unas ganancias significativas en el interior y de larga duración. Estas ganancias se traducen en el porcentaje de las oscilaciones interiores en las bajas frecuencias “más de 300% de las oscilaciones exteriores Para la frecuencia de *3 días*”. Las oscilaciones interiores caen de una forma brusca pasando de las bajas frecuencias a las

temperatura interior para todas las frecuencias. En las altas frecuencias se nota más el efecto de la radiación solar directa ya que se ve un pico de ganancias a la frecuencia de 6 horas que es la duración del sol en el interior para la época de las mediciones “diciembre”.

frecuencias medias, así pues la frecuencia de un día presenta sólo un valor de 5% de las oscilaciones de la temperatura exterior. Se puede decir que la galería con el muro de captación ha cambiado radicalmente la respuesta térmica interior comparando con la primera vivienda.

Condición de protección **Persianas Cerradas**

Condición de protección **Persianas Cerradas**



Cuando se bajan las persianas, las oscilaciones de la temperatura interior se amortiguan bastante. Se nota la diferencia en la respuesta interior entre este caso y el caso anterior de las persianas abiertas, ya que las fluctuaciones en las frecuencias medias y altas frecuencias han disminuido mucho y en este caso presentan valores mínimos “2% para la frecuencia de 1 día”. Se puede decir que las características de la envolvente y la presencia de la obertura transparente son parámetros importantes que afectan las condiciones de protección de las excitaciones exteriores.

Cuando se bajan las persianas de la galería bajan las oscilaciones interiores de la temperatura, sin embargo, comparando con el caso anterior con persianas abiertas, no se nota un cambio muy visual sobre todo en las frecuencias y altas frecuencias. En las bajas frecuencias, las oscilaciones interiores han bajado mucho comparando y el porcentaje de las oscilaciones es de 70% para la frecuencia de 3 días. Se puede decir que galería juega un factor determinante para la captación solar que se almacena en la masa del muro interior, el cual hace la función de un filtro de las excitaciones exteriores de medias y altas frecuencias (constante de tiempo del muro es superior a un día).

IV. Modelización numérica

IV.1 Introducción

El estudio del comportamiento térmico en edificios mediante programas de simulación numéricas se ha transformado en una herramienta indispensable para enfrentar problemas en el diseño de edificios energéticamente eficientes. El avance realizado en este aspecto se refleja en la gran variedad de programas de simulación disponibles actualmente en el mercado. Algunos de ellos analizan la conducta térmica del edificio en estado estacionario, lo cual puede ser de utilidad en las primeras etapas de diseño. Por otro lado, existen programas que ofrecen modelos simplificados, con la ventaja de ser más fáciles de usar pero con la desventaja de una menor exactitud en los resultados. Otros, precisan una entrada de datos extremadamente detallada, con lo cual su uso en estructuras grandes se vuelve difícil.

Cada vez se hace más importante pronosticar la energía y el funcionamiento ambiental de los edificios y de los sistemas HVAC en el diseño arquitectónico, en el manejo y la administración de los estudios [43], así como probar y evaluar las estrategias y algoritmos de control en la Administración de Energía y Sistemas de Control (EMCS*) [44-45] utilizando modelos de simulación. El análisis avanzado de la energía y la técnica de la simulación dinámica en edificios y sistemas HVAC facilita unas herramientas de conveniente costo y de bajos propósitos. Varios modelos dinámicos y programas de simulación, los cuales son convenientes para usar y presentar las características dinámicas, son la base para las aplicaciones prácticas. Sin embargo, a veces, los modelos o programas son demasiado difíciles para el uso práctico. Por consiguiente, es de gran importancia el desarrollo de programas y modelos matemáticos simples, de alta eficacia, flexibles, fáciles de usar y numéricamente estables.

La mayor parte de los programas de simulación se utilizan para evaluar los requerimientos energéticos anuales y la función de los equipos de acondicionamiento de aire. En estos casos, la temperatura interior de los locales fluctúa dentro de un rango fijo de confort, como por ejemplo, en el uso de acondicionadores con termostatos. El uso de este tipo de equipamiento no es tan frecuente en países menos desarrollados, debido a que la mayoría

* EMCS: Energy Management and Control Systems

de la población, de bajos ingresos económicos, no están en condiciones de adquirirlos. Se hace necesario entonces contar con programas que permiten que la temperatura interior varíe libremente de acuerdo a las condiciones climáticas y a las características del edificio.

Existen modelos dinámicos detallados cuyos resultados son muy exactos, pero la entrada de datos de esta clase de programas suele ser generalmente complicada, prácticamente durante las etapas más tempranas de diseño en que muchas veces deben tomarse decisiones decisivas.

Algunos programas han sido diseñados como programas detallados que a su vez son útiles en la etapa de prediseño, y hacen que el nivel de complejidad en la entrada de datos sea una elección del usuario, quien puede simplificar el edificio (en las primeras etapas de diseño) o utilizar un modelo detallado de acuerdo a las necesidades del momento. Otros permiten ajustar datos medidos, lo cual es muy útil para estudiar el edificio bajo diferentes condiciones climáticas o con diferentes alternativas constructivas. Estos programas son lo suficientemente flexibles como para permitir que el usuario agregue, quite o modifique locales, materiales, geometría y ubicación del edificio, o sus datos climáticos y meteorológicos.

La evaluación energética y de condiciones de confort de los edificios es muy importante en la fase de tomar decisiones de diseño durante el proceso del proyecto arquitectónico. Siempre cuando hay buen código para realizar evaluaciones de edificios de los cuales se dispone de datos completos (proyectos acabados o edificios existentes), cuando se necesita realizar una evaluación de edificios en su fase inicial de construcción, o bien cuando se quiere comprobar diferentes posibles alternativas, la situación es menos fácil. Las principales condiciones a cumplir son: la facilidad de uso, de entrada de datos de interpretación de los resultados, la facilidad de difusión, y la adecuación por los ambientes.

Antes de empezar el análisis y la introducción de los datos hay recomendaciones que deberían ser tenidas en cuenta. Hay que ser cuidadoso a la hora de seleccionar las inercias térmicas (masas de acumulación) que pueden ser despreciadas para simplificar la entrada de los datos. La inercia es importante en todos los edificios, pero más aun en aquellos que

utilizan acondicionamiento solar pasivo. Una selección inapropiada de estas inercias puede ocasionar que los cálculos de temperaturas internas de locales no reflejen claramente la situación real.

Otra recomendación antes de comenzar a simular cualquier edificio es tomarse un tiempo para estudiar detalladamente la geometría y características térmicas del mismo, es decir, para comprender la física del edificio. Una adecuada comprensión previa permite realizar hipótesis que simplifiquen la entrada de datos. Además permite obtener una simulación más acertada y realizar un análisis más satisfactorio de los resultados, facilitando así la identificación de problemas y sus posibles soluciones.

IV.2 Estado de arte

IV.2.1 ARCHISUN

Uno de los programas utilizados ampliamente es el ARCHISUN[46], que ha sido desarrollado en el marco del Programa Europeo Thermie, utiliza la ubicación, clima, entorno, usos del inmueble, forma y materiales de construcción, también se aplica a edificios existentes. Este sistema abre la puerta a una certificación europea de la calidad energética de los edificios.

ARCHISUN es una herramienta de diseño global estructurada en cinco grandes apartados independientes:

- Ubicación: parámetros básicos del edificio, volumen, ocupación y uso. La altitud y la distancia del mar, junto al grado de urbanización de la localización en estudio se aplican como correcciones a los datos medios del clima para la zona. Es también posible incorporar directamente los datos reales del clima para un proyecto particular cuando se conocen.
- Entorno: se indican gráficamente los elementos que rodearán al edificio, también el nivel de ruido ambiental, luz natural, etc.

- Forma: se definen las proporciones del edificio, en planta y alzado.
- Piel: informa sobre los datos de aislamiento, transparencia y peso. Archisun evalúa los intercambios energéticos con el exterior y los resultados ambientales.
- Interiores: se define aproximadamente el peso, el color, las paredes.

El cálculo del calor se hace según las ecuaciones de la conservación y de la transferencia del calor, en un modelo representativo que considera contribuciones solares directas al interior del edificio, contribuciones solares en la piel pesada (opaca y masiva), la generación interior o la disipación, y transferencias directas del interior al exterior (ventilación y transferencia a través de las superficies de cristal, y la colección de energía solar directa en el interior), y también transferencia del interior al exterior a través de las paredes sólidas. También se considera la inercia térmica de la piel y del interior.

El cálculo se puede realizar fácilmente una vez que se conozcan las condiciones exteriores (temperatura, radiación, ventilación, etc.). Los cálculos se hacen en el espacio de frecuencias utilizando la transformada de Fourier y la inversa de la transformada de Fourier para obtener la temperatura interior.

Los algoritmos son utilizados para introducir los valores de los parámetros que intervienen en las ecuaciones básicas. Estos algoritmos permiten el cálculo de los parámetros en cada caso en función de los datos climáticos y arquitectónicos elegidos por el usuario.

Además de los cálculos de temperatura, el programa también da un cálculo aproximado del comportamiento lumínico y acústico del edificio. Calcula además el consumo de otras energías que térmicas (iluminación artificial, el gas, agua caliente, aplicaciones eléctricas, etc.). Las indicaciones para el comportamiento lumínico (con la luz natural) se obtienen usando las características (climáticas) exteriores, la capacidad para la captación de la luz natural, y las características de la dispersión y de la absorción de la luz interior.

En el primer nivel del programa, el usuario introduce los datos básicos del edificio: volumen, ocupación y uso. Con información más exacta de superficies y coeficientes, que también intervienen en el funcionamiento energético, se pueden evaluar inmuebles ya construidos.

En el apartado *Entorno* se indican gráficamente los elementos que rodearán al edificio: obstáculos sólidos, superficies de agua y vegetación. Estas indicaciones corrigen los datos climáticos del apartado anterior. El nivel de ruido de la zona y la luz natural también importan, por las actuaciones que provocarán en el inmueble. En este momento del proceso ya es posible conocer el consumo energético (electricidad y gas) por metro cúbico edificado y año en kilowatios / hora (aire acondicionado, calefacción, luz artificial, agua caliente sanitaria y cocina).

En el menú de *Forma* se definen las proporciones del edificio, en planta y alzado; el programa da todos los detalles de los muros externos en las diferentes orientaciones. La pantalla del apartado *Piel* informa sobre los valores generales de las superficies y de sus tipos, con los datos de aislamiento, transparencia y peso, entre otros. Archisun evalúa los intercambios energéticos con el exterior y los resultados ambientales. Por último, en el menú de *Interior* se definen aproximadamente el peso, el color, las paredes, las conexiones internas y los datos detallados para cada piso. Otras pantallas permiten la aplicación de la energía solar (conductos de iluminación o células fotovoltaicas). Los resultados obtenidos la temperatura interior en el tiempo, algunas indicaciones del consumo energético y también algunas indicaciones sobre la iluminación y el comportamiento acústico.

También es posible pedir datos más particulares, como la evolución de temperaturas según el tiempo y la avería del consumo energético por estaciones, y también es posible recuperar los datos de la entrada (los datos climáticos y datos de la tipología del edificio en su estado actual).

IV.2.2 SIMEDIF

SIMEDIF es un programa para el diseño y simulación del comportamiento térmico en edificios con acondicionamiento natural y calefacción [47]. El programa permite simular el comportamiento térmico de edificios con muchos locales a fin de evaluar el comportamiento de los mismos frente a determinadas variaciones climáticas y detectar de esta manera problemas de falta de confort (sobrecalentamiento o bajas temperaturas) con posibilidad de introducir ganancias internas.

Las hipótesis realizadas son las siguientes:

- El flujo de calor a través de paredes es unidimensional
- La transferencia de calor entre las superficies de paredes, muros de agua y tabiques es de naturaleza convectiva.
- No se tienen en cuenta factores de forma para calcular el intercambio de energía radiante entre superficies.
- Se supone conocida la distribución de temperaturas en el edificio al momento de comenzar el cálculo.
- La radiación solar que incide en una superficie es distribuida uniformemente en toda la superficie.

El edificio es dividido en locales. Un local es una zona del edificio que puede ser considerada isoterma (es decir, un local puede estar construido por varias habitaciones de un edificio, como puede ser parte de una habitación). Cada local tiene una única temperatura cuya evolución temporal es determinada por el programa, a partir de los datos del edificio, materiales, ubicación, orientación, temperatura ambiente y radiación solar del periodo que se desea simular. Estos locales están conectados unos con otros y con el exterior mediante elementos que tienen las características térmicas de algunos de los siguientes grupos:

- Acumulación y transferencia de calor por conducción, como en el caso de paredes de ladrillo, adobe, etc. Estos elementos se denominan *paredes*.

- Acumulación en una masa con temperatura uniforme, como en el caso de los *muros de agua*, en los que debido al proceso de mezcla (por convección natural) el agua se considera a temperatura uniforme.
- Transferencia de calor sin acumulación, como en el caso de placas de madera, poliestireno expandido, etc. Estos elementos se denominan *tabiques* y *ventanas*.
- Transferencia de calor por convección, como en el caso de aberturas en paredes que permiten intercambio de aire entre dos locales por convección. Estos elementos se denominan *puertas* (intercambio de aire bidireccional) y *ventanillas* (intercambio de aire unidireccional).

IV.2.3 programas de AEF

Los programas de AEF (análisis por elementos finitos) permiten obtener soluciones aproximadas de problemas que sean susceptibles de ser representados por un sistema de ecuaciones diferenciales. En ingeniería, la mayoría de los procesos actuales están definidos de dicha forma, por lo que dichos programas nos permitirán obtener productos de calidad superior a un menor costo, o para mejorar procesos existentes, o para estudiar el fallo de un componente estructural o un equipo.

Existen en la actualidad numerosos programas de análisis por elementos finitos, tales como ANSYS, ABAQUS, COSMOS, PATRAN, NASTRAN, STRUDI, CAPEIPE, Energy Plus [48], TRANSYS [49,50], DOE-2 [51] y IDA-ICE program [52-53], etc. Estos programas son muy útiles para hacer análisis de respuestas térmicas de estructuras y componentes tales como motores de combustión interna, recipientes de presión, intercambiadores de calor, hornos, etc.

Por ejemplo ANSYS está concebido para el análisis de piezas aisladas. Incluye las herramientas de cálculo necesarias para realizar análisis de tensiones, deformaciones, de transferencia de calor, modales y optimización de forma. Sus capacidades básicas son dirigidas al campo de ingeniería como, el análisis lineal de resistencia y rigidez de los metales, aplicación automática de cargas y condiciones de contorno complejo, simulación

paramétrica, etc. Además del análisis en estos campos, ANSYS ofrece otros tipos de simulaciones como transferencia de calor, convección dependiente de la temperatura y la condición térmica dependiente de la temperatura.

Los métodos de factor respuesta y métodos de CTF (Conduction Transfer Function) son las aproximaciones actuales ampliamente usadas para resolver la ecuación de conducción de calor. Para la energía de los edificios y los programas de simulación de los sistemas HVAC, el programa simulador LOADS in DOE-2 calcula las ganancias y las pérdidas de calor por conducción a través las construcciones de los edificios utilizando los métodos de factor respuesta [54-56]. Este programa (LOADS in DOE-2) calcula los factores respuesta adoptados por ASHRAE [57]. BLAST utiliza ambos métodos para efectuar un análisis completo de la transferencia de calor a través de las paredes [58-59]. *HVACSIM*⁺ [60], TRANSYS [61], IBLAST and EnergyPlus [62] adoptan la función de transferencia por conducción para evaluar las ganancias y las pérdidas de calor a través de las construcciones de los edificios. Las mayores ventajas de estos métodos residen en que no se consideran métodos numéricos en el sentido de las técnicas de diferencias finitas, y no necesitan que las condiciones en los límites sean periódicas y lineales.

IV.2.4 Los modelos de simulación térmica en edificios.

Además de estos programas mencionados anteriormente, existen otros modelos de simulación donde el objetivo es siempre de determinar y calcular las cargas interiores de energía en edificios.

Los modelos de simulación térmica en edificios son una herramienta eficaz a la hora de determinar las ganancias y las pérdidas térmicas a través del bloque del edificio. Son también muy problemáticos a causa de que los flujos de calor en los edificios son un proceso complicado involucrando la conducción de calor a través de los muros, la convección y la radiación interior, la convección y la radiación exterior, la penetración de la radiación a través de las superficies transparentes, el calor disipado por los

electrodomésticos interiores y los ocupantes. Varios autores han tratado el tema y su aplicación. Clarke ha desarrollado una descripción gráfica de varias rutas de transferencia de calor, logrando una excelente discusión de varias publicaciones [63]. Clarke ha procesado el desarrollo de cuatro generaciones de modelos térmicos. Estos métodos se diferencian en su mayor parte en el procedimiento de sus modelos de conducción de calor a través la envolvente. En [64] se presenta una extensión altamente simplificada del modelo de Mathews, Richards y Lombard [65], el cual es basado sobre un riguroso tratamiento del proceso de la conducción. El método se basa en representar la totalidad de las zonas de la envolvente con la distribución de los flujos de calor.

Los modelos térmicos para los diseñadores de edificios pueden intentar de procesar los flujos de calor en los edificios desde le principio. Eso requiere detallar los conocimientos de la tipología y el ambiente; y también unos aceptables conocimientos de la transferencia de calor de los usuarios del modelo. Otra aproximación es asumir que estos pocos detalles están disponibles para modelar los aspectos más importantes. La posterior aproximación es viable si las respuestas obtenidas son suficientemente válidas para fijar las características pasivas del diseño [66], como el tamaño de las ventanas y la orientación. Sin embargo, para la predicción del comportamiento dinámico de los sistemas HVAC, las dinámicas de las zonas de respuesta térmica son importantes. El sencillo método resuelve los problemas de conducción a través de juntar todas las masas térmicas en un solo nodo [65, 67, 68, 69, 70,71].

La predicción del comportamiento de los sistemas ambientales de los edificios ha sido planeada al principio por Lord y Wilson [72]. Las bases de las originales predicciones son aquellas de la conservación de masa (ecuación de continuidad) y de energía, cooperativamente con la evaluación de la proporción de las ecuaciones teóricas de transferencia. Los modelos de análisis en edificios son obligatoriamente simplificados que los modelos fundamentales. Existen muchos modelos y software de aplicación. Clarke ha analizado el estado de arte de estos modelos en 1989 [65]. Otros como Winkelmann [73] y Tuddenham [74] han desarrollado nuevos modelos. También puede verse [75, 76,77] y la perspectiva de Newton, James y Bartholomew [78]. Todos estos métodos intentar resolver los fundamentales problemas del análisis térmico en edificios:

- Se debe calcular la transmisión de calor a través de la envolvente de los edificios. Eso exige la solución de la ecuación de conducción, que es una ecuación diferencial de segundo grado en las coordenadas del tiempo y el espacio; con las adecuadas condiciones al límite.
- Se debe calcular también el balance térmico interior. En el balance energético interior se tiene en cuenta de la transferencia de calor entre el aire interior y las superficies interiores, la carga por ventilación y aire acondicionado, también a través de las cargas interiores por conducción, la carga por la radiación interior así como la penetración a través de las ventanas. Algunos autores han simplificado el cálculo introduciendo conceptos de temperatura interior efectiva o radiante [79, 80, 81,82].

IV.3 Breve descripción del método de cálculo

El edificio a simular se considera como un local con dos temperaturas incógnitas: temperatura de la piel de separación con el exterior y la temperatura interior cuyas evoluciones en el tiempo son determinadas por el modelo, conociendo los datos constructivos y la ubicación espacial y temporal del edificio, la variación de la temperatura exterior y la radiación solar en el período a considerar.

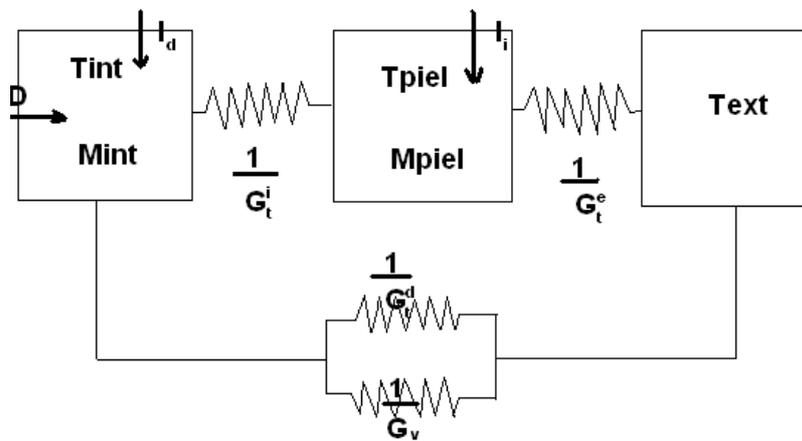
El interior está térmicamente conectado con el exterior a través de paredes, ventanas, etc. cuyas características particulares se especifican en detalle durante el ingreso de datos. La temperatura exterior y la radiación solar pueden ser medidas por las sondas de captación empleadas para el interior, o bien se facilita su obtención a través del servicio meteorológico de la zona donde se hace el cálculo. En nuestro caso, una parte de los datos exteriores han sido recuperados mediante datos de la estación meteorológica de cataluña [83] ya que en muchas ocasiones las sondas exteriores dejan de funcionar correctamente debido a los cortos circuitos causados por la lluvia, la humedad, etc.

El método de cálculo consiste en un esquema de diferencias finitas explícito avanzando a intervalos de tiempo Δt , donde Δt es un submúltiplo de una hora. Conocidos los valores en un instante t , el modelo determina los valores en $t+\Delta t$. El uso de un esquema en diferencias finitas implica que el paso de tiempo Δt debe ser elegido lo bastante pequeño como para que no aparezcan oscilaciones en las soluciones numéricas. En nuestro caso, un Δt de 10

minutos ha sido suficiente para asegurar la estabilidad de la solución. Queda añadir que el cálculo se resuelve de una forma iterativa, lo cual significa que la simulación necesita un tiempo hasta lograr la convergencia.

El interior está en contacto térmico con el exterior mediante “elementos” tales como paredes, ventanas, tabiques y ventanilla. Cada uno de ellos tiene características térmicas especiales y entre todos es posible describir la mayor parte de las alternativas habituales.

$$\begin{aligned} \text{Interior} \quad m_i \frac{dT_i}{dt} &= D + I_d - G_t^i(T_i - T_p) - (G_t^d + G_v)(T_i - T_e) \\ \text{Skin} \quad m_p \frac{dT_p}{dt} &= I_i - G_t^e(T_p - T_e) - G_t^i(T_p - T_i) \end{aligned}$$



Dibujo 1: esquema equivalente del modelo numérico

$$T_i(t + \Delta t) = \frac{\Delta t}{m_i}(I_d + D) + \left(1 - \frac{\Delta t}{m_i}(G_t^i + G_t^d + G_v)\right)T_i(t) + \frac{\Delta t}{m_i}G_t^i T_p(t) + \frac{\Delta t}{m_i}(G_t^d + G_v)T_e(t)$$

$$T_p(t + \Delta t) = \frac{\Delta t}{m_p}I_i + \frac{\Delta t}{m_p}G_t^i T_i(t) + \left(1 - \frac{\Delta t}{m_p}(G_t^i + G_t^e)\right)T_p(t) + \frac{\Delta t}{m_p}G_t^e T_e(t)$$

T_e Temperatura exterior °C, (t)

T_p Temperatura de la piel °C, (t)

T_i Temperatura interior °C, (t)

G_t Coeficiente de intercambio térmico por transmisión.

G_tⁱ es el coeficiente de intercambio por transmisión de la piel hacia el interior

$$G_t^i = \frac{1}{V_h} \cdot \sum_i \sum_j S_{ij} K_{ij}^i$$

donde

V_h el volumen habitable

S_{ij} superficie del área de intercambio

$$K_{ij}^i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{fpa}{K_c}} \text{ coeficiente de transmisión interior}$$

fpa es 0.5 si el aislante se encuentra en el medio de la piel, 0.9 para el aislante al interior de la pared y 0.1 si el aislante se coloca al exterior de la piel.

$$K_c = \frac{1}{\left(\frac{K}{\text{espesor}} - \frac{1}{h_e} - \frac{1}{h_i} \right)}$$

donde K es la conductividad en W/m °C

G_t^e Coeficiente de transmisión de la piel al exterior. W/m³ °C

$$G_t^e = \frac{1}{V_h} \sum_i \sum_j S_{ij} K_{ij}^e \cdot \alpha_i$$

donde $K_{ij}^e = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{(1-fpa)}{K_c}}$ es el coeficiente de transmisión exterior

α_i Es un coeficiente que depende de la orientación, ubicación y la estación del año, que oscila entre 0.7 y 1.1

G_t^d Coeficiente de la piel transparente $W/m^3 \cdot ^\circ C, (t)$

$$G_t^d = \frac{1}{V_h} \sum_i \sum_j S_{ij} K_i \cdot \alpha_i$$

donde K_i es el coeficiente por transmisión de la piel transparente.

S_{ij} la superficie total de la piel transparente.

G_v Coeficiente de intercambio por ventilación $W/m^3 \cdot ^\circ C, (t)$

$$G_v = 0.29 \text{ rh}$$

donde rh es el volumen horario de intercambio de aire[14] en $m^3/(m^3h)$

valores típicos: Enero = 0.25 - 2.5 Julio = 6 - 12

m_i Masa térmica interior $J/m^3 \cdot ^\circ C$

$$m_i = \frac{\sum_i V_i \rho_i c_{e_i} ct}{V_h}$$

V_i volumen de los materiales interiores en m^3

ρ_i densidad en kg/m^3

c_{e_i} calor específico en $J/^\circ C.kg$

$c_e = 4186$ para el agua y $c_e = 840$ para la mayoría de los materiales.

ct factor de valoración de la acción de la masa i , para el ciclo considerado [82].

$ct \approx 0.6$

m_p masa térmica de la piel $J/m^3 \text{ } ^\circ C$

$$m_p = \frac{\sum_i V_i \rho_i c e_i ct}{V_h}$$

V_i volumen de los materiales de la piel en m^3

La mitad de los muros de separación entre el interior – exterior se considera como masa interior y la otra como masa de la piel.

I_i ganancias solares indirectas $W/m^3, (t)$

$$I_i = \frac{R_v f S_{muro}}{V_h} \frac{1/h_e}{\frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} + \frac{espesor}{K_{muro}}}$$

donde R_v es la radiación solar en un plano vertical al sur en W/m^2

f factor de inclinación que depende de la época del año

I_d ganancias solares directas $W/m^3, (t)$

$$I_d = S_{vs} R_v f a$$

S_{vs} es la superficie equivalente de ventana en m^2/m^3

a factor de transmisión de la superficie vidriada

D ganancias internas $W/m^3, (t)$

$$D = \frac{\sum_i n_i e_i n h_i}{24.V_h}$$

n_i número de elementos que desprenden calor

e_i energía que desprende cada elemento (W)

$n h_i$ número de horas diarias de funcionamiento

IV.4 Aplicaciones

Como aplicaciones, vamos a tratar de reconstruir las temperaturas interiores en ambas viviendas del análisis del capítulo anterior. Durante las mediciones se ajustaron los parámetros ambientales siguientes: la radiación en el interior, las actividades de los usuarios y las ganancias internas con una buena aproximación. En cambio, ha sido menos evidente controlar bien la ventilación al no disponer de aparatos para la medición de las renovaciones de aire. El parámetro de la ventilación ha sido introducido de una forma aproximada basada en la descripción de los usuarios frente a las renovaciones.

Los parámetros ambientales exteriores como la temperatura y la radiación solar han sido extraídos de las mediciones hechas *in situ*. Para que el programa arranque necesita una temperatura interior inicial $T_i(t = 0)$ y $T_p(t = 0)$, se escogen como temperaturas iniciales la temperatura exterior al tiempo $t = 0$, lo cual significa que el cálculo necesita un tiempo para establecer y converger. Como se ha mencionado antes, el paso de tiempo seleccionado para todo el cálculo es $\Delta t = 600s$, ese intervalo de tiempo se ha escogido de una manera que las variaciones de la temperatura exterior y radiación solar sean lo suficientemente grande para que el cálculo del flujo de calor por conducción de las paredes sea significativo. Se han hecho pruebas de cálculo con un intervalo de tiempo múltiple $\Delta t = 1200s$ y el cálculo es casi similar.

Las masas interiores se han calculado de una forma aproximada calculando el espesor de los muros de carga y de los tabiques interiores, a todo esto se le añade la masa de los muebles, el suelo y el techo. A la hora del cálculo se tiene en cuenta la ubicación de las

oberturas ya que una ubicación norte por ejemplo no permite recibir radiación solar directa, es decir, que se separaron los dos tipos de ventanas según su orientación para la captación directa.

IV.4.1 Primera aplicación

En la Figura 2 se muestra un esquema en planta de la vivienda en estudio. El piso de características geométricas simples, está conformado por un local rectangular de 8.2m por 7.5 m y de 3 m de altura. Las paredes están construidas con un muro simple de 15 cm de espesor con cámara de aire. La planta del piso consta de una platea de hormigón armado sobre cual se colocó un pavimento de madera (parquet). El local cuenta con una fachada principal de 18 m² de área, donde 8.6 m² son ventanas de simple vidriado. Todas las ventanas cuentan con una protección exterior “persianas”. La vivienda a estudiar se ubica en la ciudad de Barcelona, el clima es de influencia mediterránea, el período caluroso es más largo, y tiene amplitudes térmicas mayores, la ubicación sur de la vivienda le permite una captación importante durante el invierno. En cambio, está relativamente protegida del sol alto de verano.

La existencia de ambos períodos (frío y caluroso) hace necesario que los estudios de simulación se lleven a cabo para ambas estaciones de modo que las conclusiones de este trabajo sean representativas del clima mediterráneo. No fue posible llevar a cabo el análisis en todas las estaciones del año debido a falta de datos de mediciones efectuados *in situ*.

En esta primera parte de estudio, analizaremos la fluctuación de la temperatura interior con incidencia de radiación solar directa. Las ganancias internas son más altas en invierno aunque no se utilizó ningún tipo de elemento que genere energía en el interior, pero debido a la gran superficie de contacto con las viviendas que le rodean y a la posible calefacción de los vecinos hace que la vivienda gane calor por conducción a través de los muros de separación.

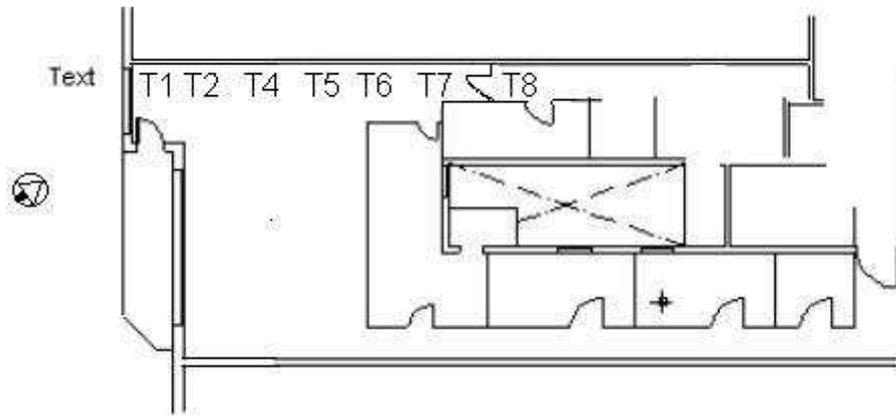


Figura 2: dibujo en planta de la vivienda de mediciones

T ₁ a una distancia de 50 cm de la fachada principal.	T ₆ a 4 m de la fachada principal.
T ₂ a 1 m de la fachada principal.	T ₇ a 6 m de la fachada principal.
T ₄ a 2 m de la fachada principal.	T ₈ a 8.10 m de la fachada principal.
T ₅ a 3 m de la fachada principal.	

IV.4.1.1 Presencia de la radiación solar directa

IV.4.1.1.1 Invierno

La primera serie de datos corresponde a 20 días desde el 14 de enero hasta el 02 de febrero de 2003. Durante las mediciones se mantuvieron las persianas abiertas durante todas las horas del sol.

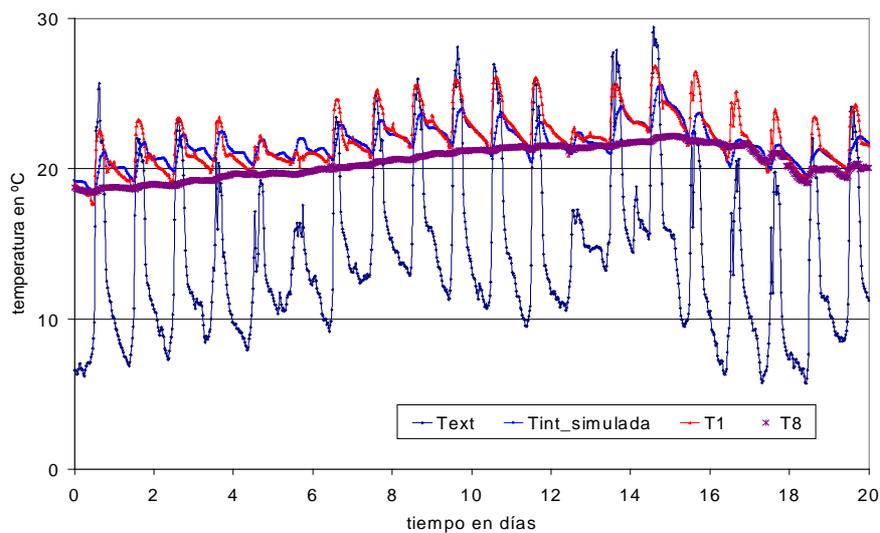


Figura3: Evolución de la temperatura exterior, la temperatura interior simulada y las temperaturas interiores medidas T1 y T8

Como se puede ver a través d la figura, la evolución de la temperatura interior simulada es muy similar a las temperaturas interiores, sobre todo a la temperatura registrada en las sondas en el centro de la vivienda, mientras que la temperatura T8 que se encuentra al fondo oscila muy poco debido a que el efecto de la radiación solar directa no llega. La temperatura T1 que está solo a 50 cm de la obertura principal oscila más debido a la proximidad de las fluctuaciones exteriores.

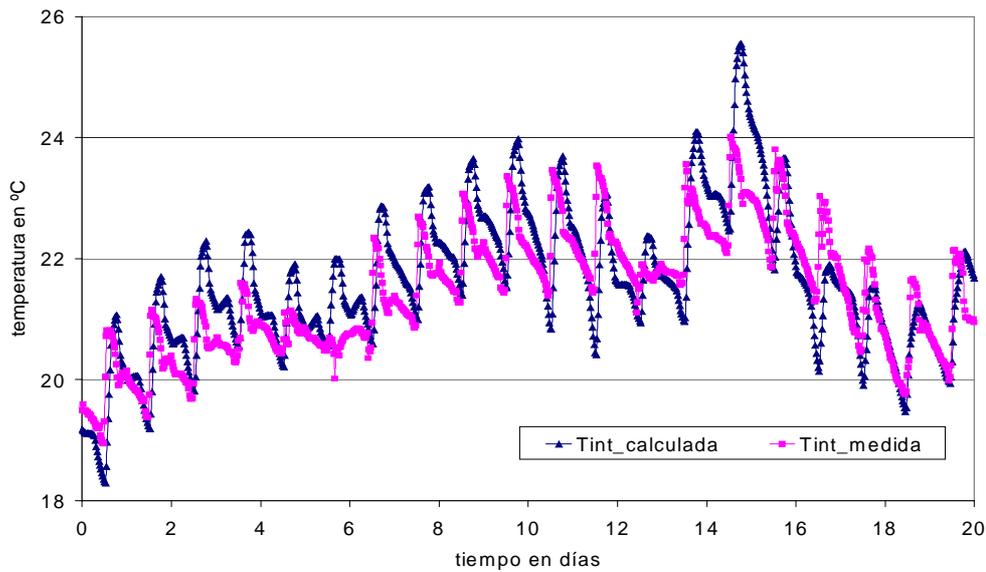


Figura 4: Comparación entre la temperatura interior media y la temperatura interior simulada. Datos de 20 días desde 12 de enero hasta 02 de febrero 2003

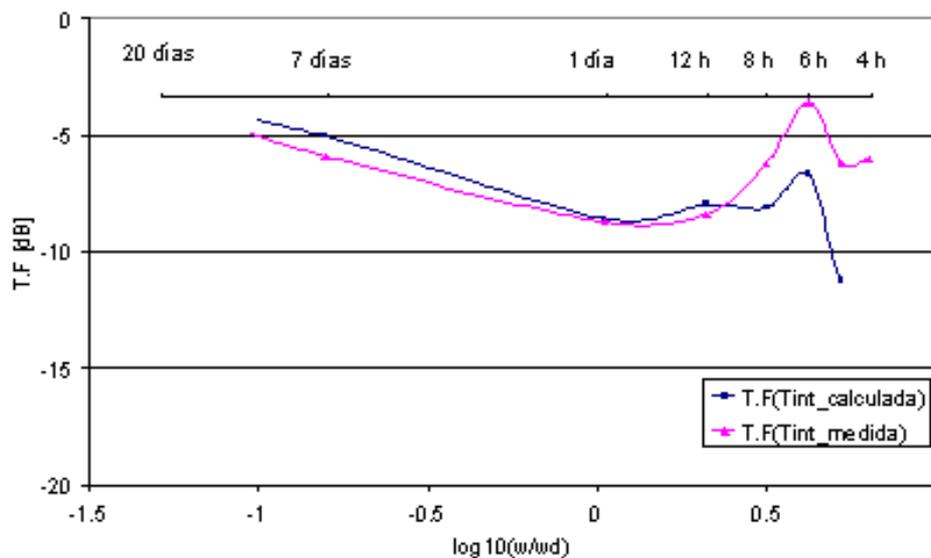


Figura5: Evolución de la función de transferencia interior y simulada. Datos de 20 días desde 12 de enero hasta 02 de febrero 2003. Persianas abiertas

Se observa una buena concordancia entre la temperatura interior media y la temperatura interior simulada. Analizando los valores de cada 30 minutos, en el 70% de los valores la diferencia es menor a 1°C, en el 100% de los casos, la diferencia es menor de 2°C. En general coinciden mucho los máximos y los mínimos, pero el objetivo de este cálculo no es caer al 100% sobre los datos medidos, ya que la temperatura en el interior varía de un punto a otro sobre todo si se dejan abiertas las persianas permitiendo así una entrada de la radiación solar parcialmente en el interior, lo cual genera una diferencia de temperaturas de una posición a otra.

La intención es llegar a construir la función de transferencia del local y compararla con la medida, ya que las diferencias en oscilaciones durante cortos plazos de tiempo (intervalos menores que 4 horas) no intervienen en el diagrama frecuencial donde la frecuencia más alta es de 4 horas.

La figura de la función de transferencia (figura nº 5) correspondiente a la temperatura interior media. Esa temperatura se ha calculado haciendo la media de la función de transferencia de todas las sondas interiores. La fluctuación de la temperatura en el interior depende de la posición espacial de la sonda de mediciones y del ángulo sólido que forma con la obertura de la fachada principal y su exposición a las corrientes de aire generalizadas por la ventilación. Cuanto más es grande el ángulo sólido más importantes son las fluctuaciones de la temperatura interior. Debido a que la vivienda está ocupada, varias sondas se han colocado entre los muebles de una forma que no les permite recibir directamente las variaciones exteriores (sondas detrás de la mesa del ordenador, detrás de la puerta de acceso al comedor, etc.). Por lo tanto, y para ajustar bien la asimilación entre las dos funciones de transferencia medida y simulada, compararemos la función de transferencia interior simulada con la función de transferencia media haciendo un promedio entre todas las sondas interiores.

En las bajas frecuencias y en las frecuencias medias, la concordancia entre la figura analítica y la simulada es casi total. Las oscilaciones en las bajas frecuencias son debidas a la influencia de la masa térmica interior y de la piel, y a las ganancias estáticas debidas a largos intervalos de ventilación. En este cálculo se evito ventilar para intervalos largos de tiempo, eso nos facilita mucho el cálculo evitando de esta forma las consecuencias de la ventilación.

Las únicas oscilaciones a bajas frecuencias son debidas entonces a la influencia de la inercia térmica.

Las oscilaciones en las frecuencias son debidas básicamente a la resistencia térmica de las paredes de separación con el exterior. Las características de los muros de separación con el exterior son conocidas, lo cual nos permite controlar las fluctuaciones interiores a estas frecuencias.

No obstante, en las altas frecuencias, las fluctuaciones son debidas a la radiación solar directa, a los usuarios y sus actividades y a la ventilación de corto plazos de tiempo. En esta zona, no existe una gran concordancia entre los resultados numéricos y experimentales.

Debido a la presencia de la radiación solar directa en el interior, a la ventilación y a las actividades de los usuarios (usando los electrodomésticos, agua caliente, y abriendo y cerrando las ventanas y persianas, etc.) es muy difícil controlar todos estos parámetros a la vez.

Nuestro objetivo, no es simular las oscilaciones debidas a las actividades de los ocupantes, pero a determinar los elementos arquitectónicos responsables sobre las fluctuaciones interiores. El usuario es un factor muy importante por su capacidad de cambiar la respuesta interior a altas frecuencias, con todo esto nos falta más información sobre las ganancias debidas al intercambio de calor por radiación y la capacidad acumuladora de los elementos interiores de la radiación solar directa.

En el interior, la energía solar penetra a través de la ventana tocando y calentando partes de las paredes interiores y el suelo. Las superficies captadoras ceden el calor por conducción al aire en contacto, y por radiación a todas las superficies que le rodean. Este proceso dura un tiempo hasta alcanzar el equilibrio térmico entre todas las superficies.

El tiempo necesario para alcanzar el equilibrio depende de las características constructivas de cada material (inercia, capacidad térmica y el color de los materiales). Una superficie

altamente reflectante se calienta poco al sol, mientras que las superficies absorbentes de calor pueden alcanzar temperaturas extremadamente altas. Por lo tanto, es difícil calcular en cada instante el calor cedido por las superficies captadoras al aire interior.

IV.4.1.1.1.1 La capacidad calorífica efectiva y su efecto en altas frecuencias.

La capacidad térmica, la facultad de almacenar calor, es una importante calidad de los materiales de construcción. En general, la capacidad térmica es aproximadamente proporcional a la masa. Grandes cantidades de materiales densos contendrán grandes cantidades de calor. Se mide la capacidad termal como la cantidad de calor requerida para hacer subir de un grado la temperatura de una unidad de volumen o de peso de un material. La correcta evaluación de la capacidad calorífica de los materiales constructivos y del edificio en su conjunto es de suma importancia, ya que incide sobre el análisis de los aspectos dinámicos de su respuesta térmica.

En la mayoría de los modelos de comportamiento térmico simplificados, la capacidad calorífica se asume como constante, dependiendo exclusivamente de las propiedades térmicas y físicas de los materiales, áreas superficiales y espesores, distinguiéndose en algunos casos si la masa térmica pertenece a la envoltura o es interior[91].

La capacidad calorífica efectiva de un elemento construido depende sin embargo de una serie más amplia de factores, como las propiedades térmicas y físicas de los materiales componentes, las superficies expuestas, el espesor de la masa térmica y su ubicación en el conjunto (envolvente o partes interiores), y además de las condiciones ambientales en el exterior e interior del elemento. Justamente, el concepto cobra particular importancia cuando la temperatura interior al edificio es variable [92] ya que depende del fuerte intercambio de flujos térmicos entre el aire y las masas térmicas [93]. La capacidad calorífica física total (cuasi-estática) de una masa térmica es mayor que su capacidad efectiva, en un determinado instante, de almacenar calor.

La capacidad calorífica efectiva C_f de un muro siempre es menor a la capacidad calorífica global C_0 . En los edificios, depende de la duración de la excitación térmica exterior, sólo

una parte de esa capacidad calorífica global entra en reacción, se refiere a la capacidad calorífica efectiva.

En las bajas frecuencias (largos intervalos de tiempo), el cociente $\frac{C_f}{C_0}$ es prácticamente igual a la unidad. En las altas y medias frecuencias, la capacidad calorífica efectiva es cada vez menor. La formula que explicaremos a continuación [Irene Marincic, 35] sólo sirve para frecuencias no muy bajas. Así pues, la capacidad calorífica efectiva no puede ser nunca mayor que la estática.

$$C_f = \sqrt{\frac{2 \lambda \rho c}{\omega}} S$$

$$C_0 = \sqrt{\frac{\lambda \rho c e^2}{\alpha}} S$$

donde ω es la frecuencia, S la superficie, ρ la densidad, c el calor específico, λ la conductividad térmica, e el espesor y α la difusividad térmica.

$$\frac{C_f}{C_0} = \sqrt{\frac{2 \alpha}{\omega e^2}}$$

material	espesor (m)	α (m^2 / s)
ladrillo	0.30	4.33 E-07

$$\omega = \frac{2 \cdot \Pi}{d \cdot 86400}$$

donde d es el número de días.

	ω [rad / s]	$\frac{C_f}{C_0}$	$10 \log_{10} \left(\frac{C_f}{C_0} \right)$ [dB]
8 días	9.08 E -06	1	0
4 días	1.81 E -05	1	0
2 días	3.63 E -05	0.77	-1.13
1 día	7.26 E -05	0.54	-2.67

12 horas	1.45 E -04	0.38	-4.20
8 horas	2.18 E -04	0.31	-5.08
6 horas	2.90 E -04	0.27	-5.68
5 horas	3.63 E -04	0.24	-6.19
4 horas	4.36 E -04	0.22	-6.57

Como se puede ver a través de la tabla, en las bajas frecuencias, el valor del cociente $\frac{C_f}{C_0}$ es prácticamente igual a uno. Sin embargo, en las altas frecuencias, el valor del cociente es inferior a la unidad, lo cual aumenta el valor en decibelios.

El modelo utilizado en la simulación numérica es temporal y carece de la interpretación frecuencial. Es decir, que no se ha tenido en cuenta la capacidad calorífica efectiva sino solamente la global. Corrigiendo los datos obtenidos añadiendo, a cualquier gráfico simulado, la diferencia en decibelios del efecto de la capacidad calorífica efectiva, el aspecto final quedará como a continuación.

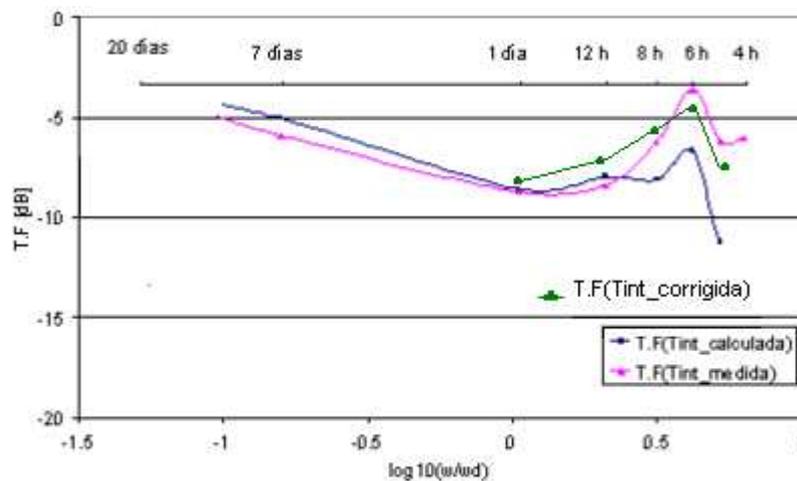


Figura5-A: Evolución de la función de transferencia interior y simulada. Datos de 20 días desde 12 de enero hasta 02 de febrero 2003. Persianas abiertas

La utilización de la corrección de la capacidad calorífica que depende de la frecuencia [35] nos ha permitido ajustar aún más el modelo numérico sobre todo en las altas frecuencias donde se manifiestan más los efectos de la capacidad calorífica efectiva. Existen varias investigaciones sobre el tema. [P.E. Ergatis et autres,94] atribuye la variación en

transmisión térmica de un muro a una dependencia de la conductividad térmica con la temperatura. Es la misma idea aplicada más arriba, aunque nosotros preferimos el punto de vista según el cual, en un tiempo corto, no hay tiempo suficiente para calentar todo el grueso de un muro.

Queda descartar que la importancia del cálculo con la capacidad calorífica “variable” sirve para aproximar cuando los elementos discretos del modelo térmico son “grandes”. Con otras palabras, se puede decir que si se afina el modelo, es menos relevante tomar que la capacidad calorífica depende de la frecuencia. Por lo tanto las tres formas de razonamiento (Irene, Archisun, el modelo utilizado en esta tesis) son correctos.

La segunda serie de mediciones corresponde a un intervalo de 10 días desde el 01 hasta el 10 de febrero 2003. Con presencia de la radiación solar directa en el interior.

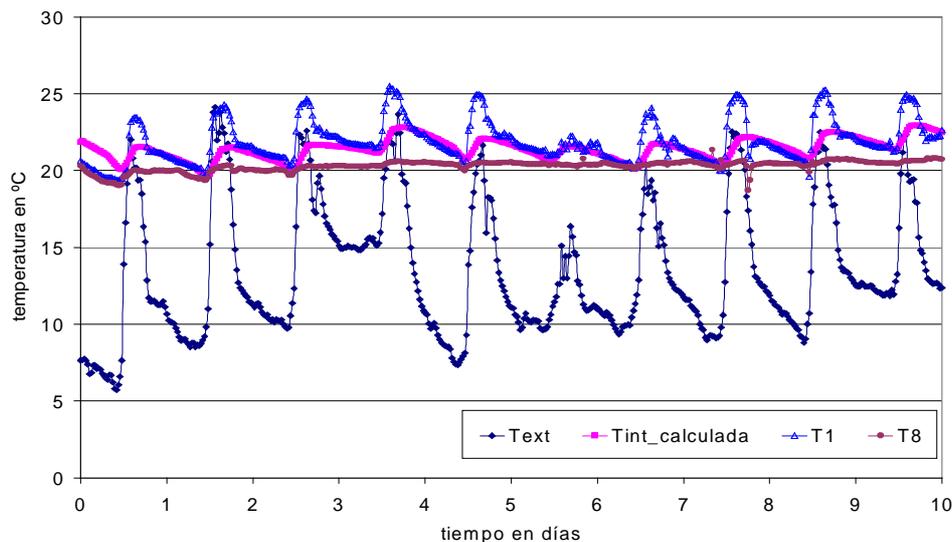


Figura6: Evolución de la temperatura exterior, de las temperaturas interiores T1, T4 y T8 y de la temperatura Tint_simulada, datos de 10 días desde 01 hasta el 10 febrero 2003

En esta figura se observa que, el acuerdo es suficientemente bueno (dentro de 2°C con T1 y 1°C con T4) salvo para la T8, la cual presenta oscilaciones muy bajas ya que la sonda se encuentra al fondo del local y está bien protegida de las oscilaciones provenientes del exterior.

El acuerdo no puede ser total, debido a que los datos de la temperatura y la radiación solar exterior fueron tomados cada 10 minutos, y la variación de estos dos parámetros, sobre todo la radiación, entre cada dos mediciones consecutivas puede ser amplia, por consiguiente esa variación no cuenta a la hora de calcular la temperatura interior con el modelo numérico.

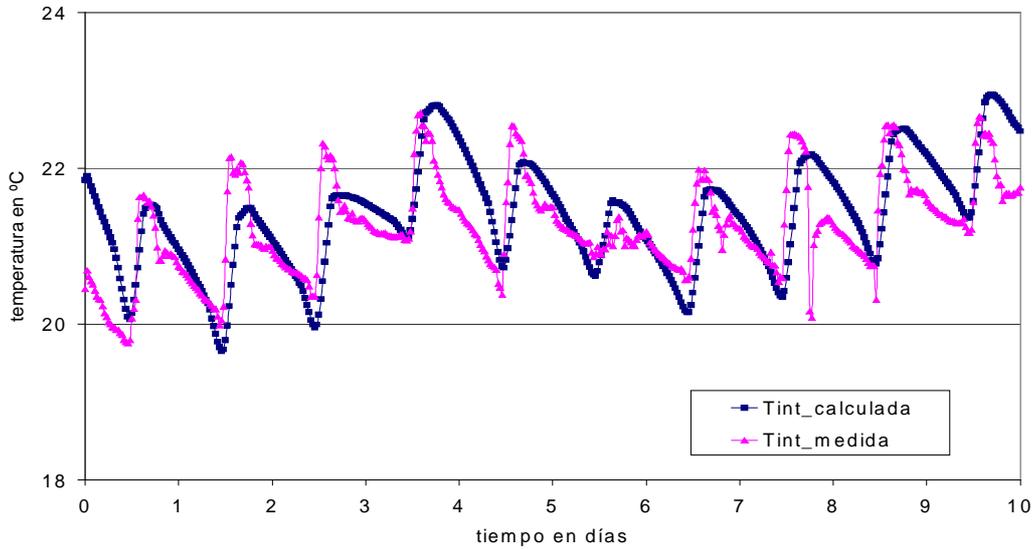


Figura7: Evolución temporal de las temperaturas interiores simulada y medida

La concordancia entre los datos medidos y los datos simulados es alta.

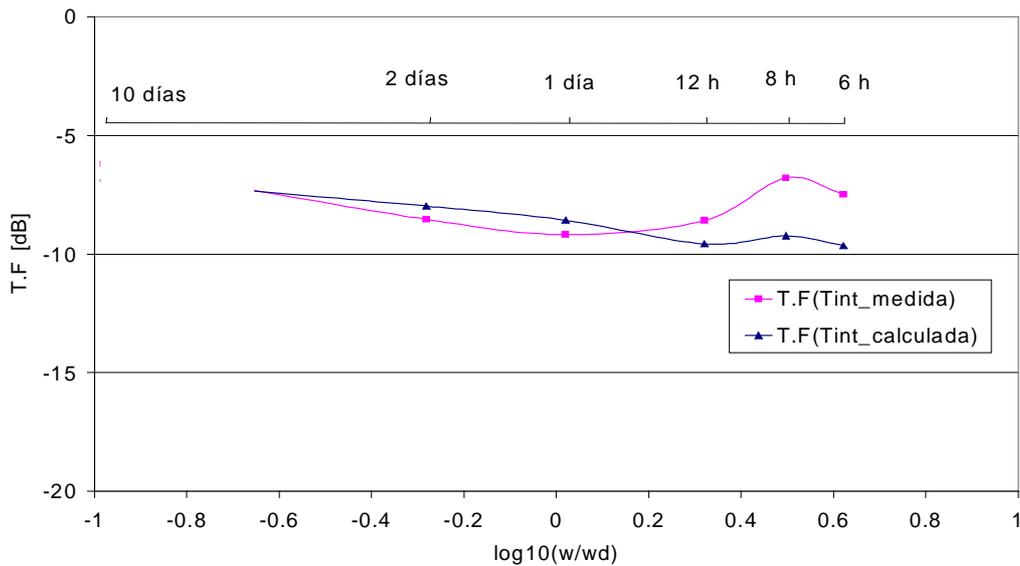


Figura8: Evolución de las funciones de transferencia medida y simulada. Datos de 10 días con presencia de la radiación solar directa.

De la misma forma, se nota una concordancia grande de las oscilaciones en las bajas frecuencias y en frecuencias medias, menos coherencia de las oscilaciones en las frecuencias altas. Sin embargo, en la figura de la evolución temporal la diferencia no se puede visualizar completamente. Como se ha dicho antes, la diferencia en las ganancias en las altas frecuencias es debida a las actividades de los usuarios y sobre todo al efecto que tiene la radiación solar sobre el gradiente de temperatura en el interior respecto a la profundidad. A menos profundidad más oscilación de la temperatura interior.

La tercera serie de datos corresponde a 8 días desde el 01 hasta el 08 de febrero 2002. La condición de protección persianas abiertas.

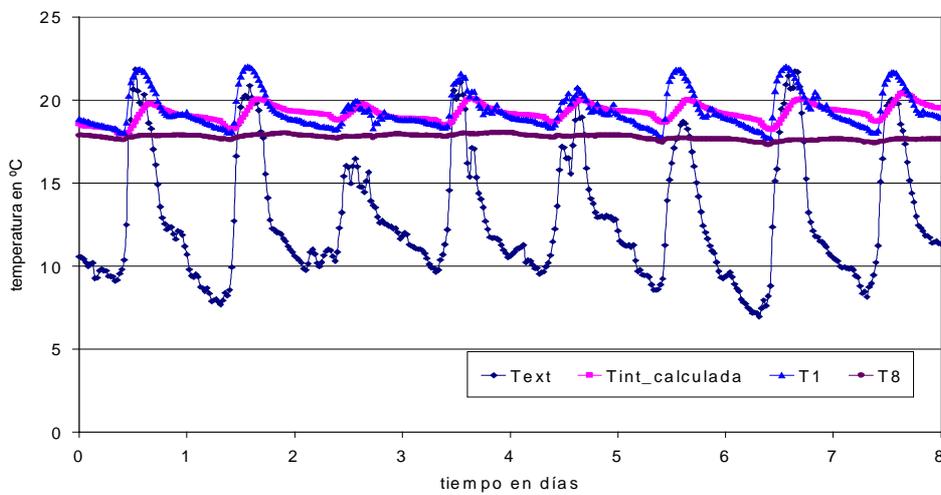


Figura9: Evolución de la temperatura exterior, de las temperaturas interiores T1, T4 y T8 y de la temperatura Tint_simulada, datos de 8 días desde 01 hasta el 08 febrero 2002

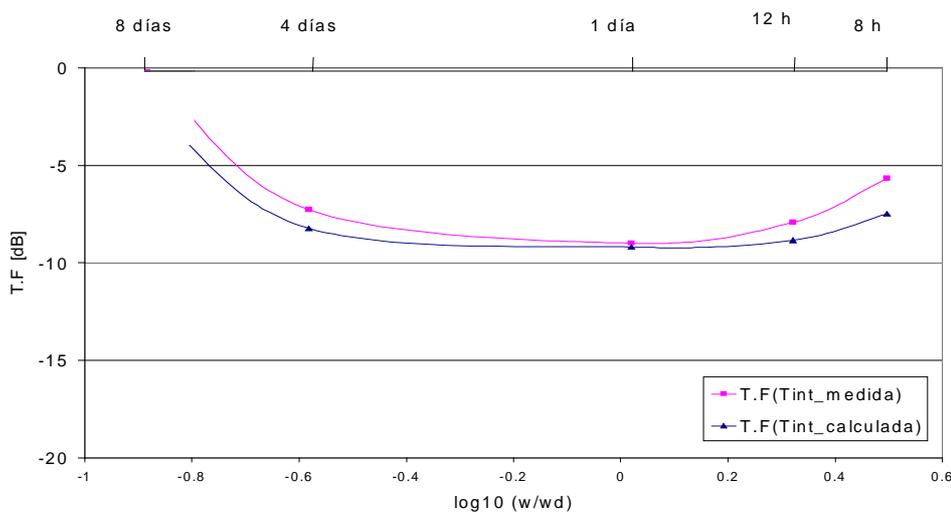


Figura10: Evolución de las funciones de transferencia medida y simulada. Datos de 8 días con presencia de la radiación solar directa.

Una vez más se ve la concordancia entre los resultados numéricos y experimentados. Se ve una ausencia de las oscilaciones en altas frecuencias a partir de la frecuencia 6 horas. Los resultados obtenidos por el modelo numérico no han sido lo suficientemente significativos para construir la función de transferencia, ya que la oscilación interior es mínima y el error de cálculo del cociente salida / entrada es grande y no se puede tener en cuenta como valor representativo. Por la misma razón mencionada antes: en las altas frecuencias las ganancias son debidas a fenómenos ocurridos en cortos plazos de tiempo donde intervienen directamente los usuarios.

IV.4.1.1.2 Primavera

Para ampliar el análisis, hemos hecho una serie de mediciones en la estación de primavera para ver el efecto de la radiación solar y la ventilación, sobre todo que en la primavera los usuarios suelen proteger menos de las fluctuaciones exteriores abriendo las ventanas durante el día y una parte de la noche.

Esta característica de protección de la envolvente hace que las oscilaciones interiores sean mas complicadas en simular, sobre todo a altas frecuencias, ya que es difícil controlar la radiación solar y la ventilación a la vez sin olvidar el efecto que tienen los usuarios sobre este sistema de control cambiando, mutuamente y sin ninguna frecuencia determinada, las condiciones de la piel.

No se ha podido hacer mediciones dejando las persianas abiertas durante intervalos de tiempo largos (8 días) en la época de verano debido a las molestias que pueden llevar los usuarios por la causa de la radiación solar en el interior.

La serie de mediciones a continuación corresponden a 8 días desde el 24 hasta el 31 de marzo de 2003. Durante las mediciones se mantuvieron las ventanas abiertas durante largas horas del día.

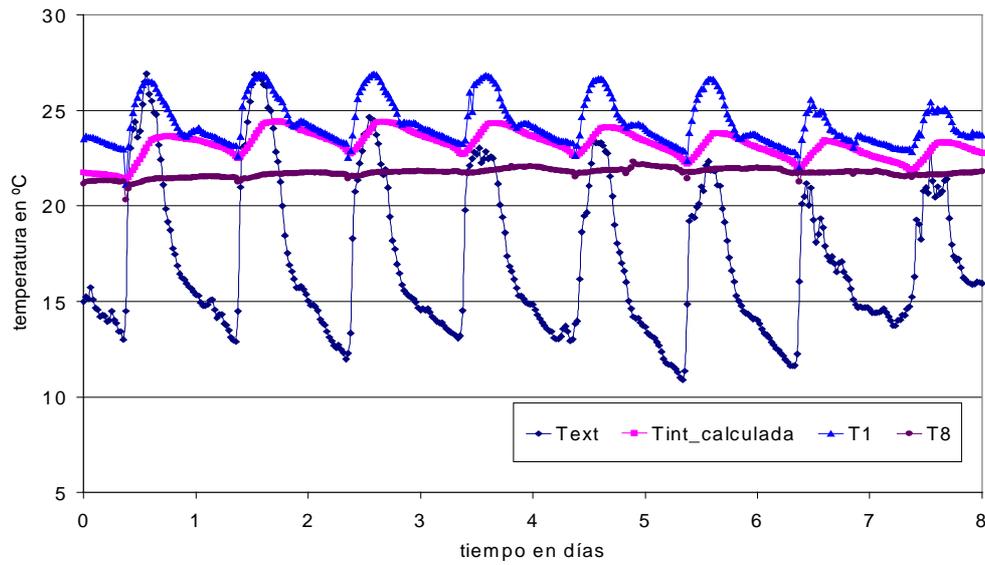


Figura11: Evolución temporal de las temperaturas exterior, interior reconstruida, T1, T4 y T8. Datos de 8 días desde el 24 hasta el 31 de marzo 2003

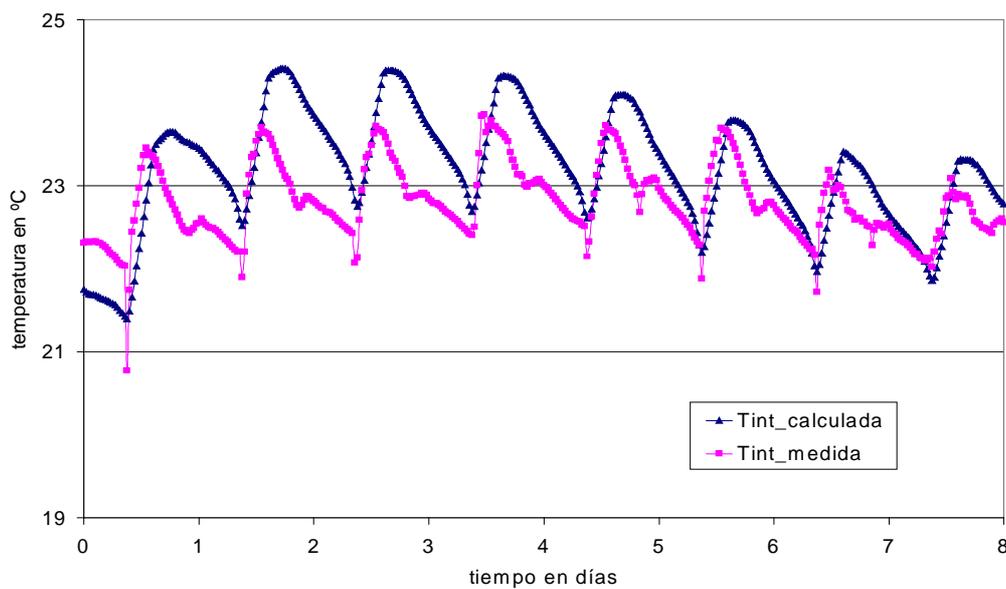


Figura12: Comparación entre la temperatura interior simulada y la temperatura media

Como se puede ver, la coherencia entre las dos figuras es grande, lo cual demuestra la eficacia del modelo numérico utilizado. En este cálculo hemos ampliado la ventilación a la hora de la presencia de los ocupantes en la vivienda. Los usuarios tienen un horario bien definido, entre semana suelen estar todo el día fuera, salen de la vivienda a las 07:00-08:00

de la mañana y vuelven por la tarde a partir de las 19:00, entonces, para las horas de la mañana los ocupantes suelen abrir las ventanas (una hora aproximadamente), y por las tardes (2 horas aproximadamente). El sistema de control adquirido tiene influencia sobre la evolución de la temperatura interior y se puede ver en la figura temporal cuando baja la temperatura simulada a valores mínimos en las primeras horas de la mañana. Durante el día, y para la totalidad de los días de medición, se dejó una ventana parcialmente abierta.

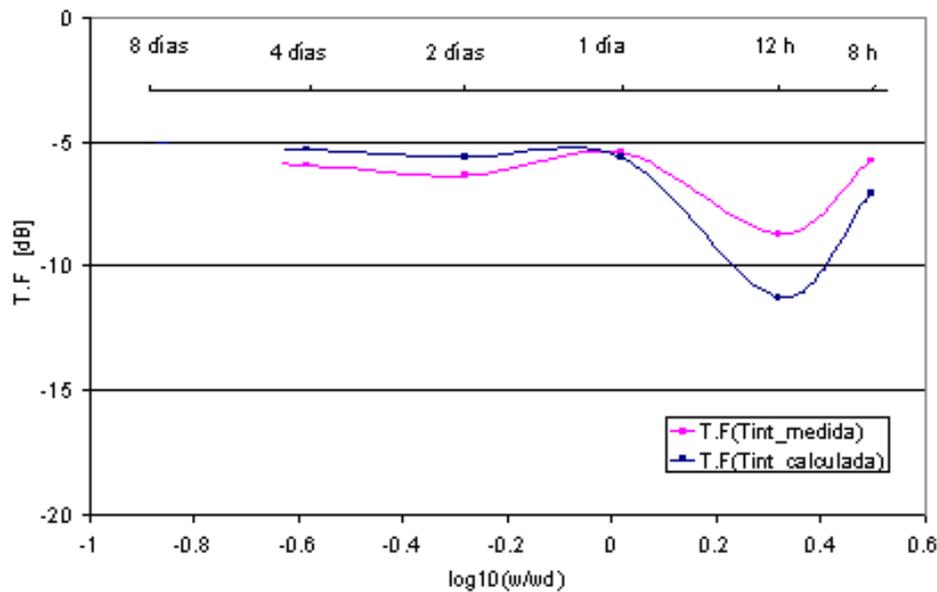


Figura13: Comparación de la Función de Tránsito simulada y medida. Presencia de la radiación solar directa en el interior.

En las altas frecuencias, la diferencia es todavía mayor comparando con los casos anteriores. Es el resultado esperado sabiendo además del efecto de la radiación solar directa, durante la época de las mediciones se dejaron las ventanas abiertas en cortos plazos de tiempo. Estas dos características de protección perturban las oscilaciones a altas frecuencias, son difíciles de manipular sobre todo la ventilación que no se ha podido medir a falta de aparatos compatibles con el sistema de adquisición de datos utilizado.

IV.4.1.2 Ausencia de la radiación solar directa

En esta segunda parte del análisis, hemos impedido que la radiación solar directa entre al interior bajando las persianas durante las horas del sol. En este caso resulta más conveniente determinar las oscilaciones de la temperatura interior calculada con el modelo

numérico, ya que se elimina el efecto de la radiación solar sobre la evolución de la temperatura interior.

IV.4.1.2.1 Respuesta en invierno

Las mediciones fueron tomadas en el mismo local anterior, el intervalo de mediciones corresponde a 11 días del mes de febrero 2003 desde el 12 hasta el 22. Se mantuvieron las persianas cerradas día y noche.

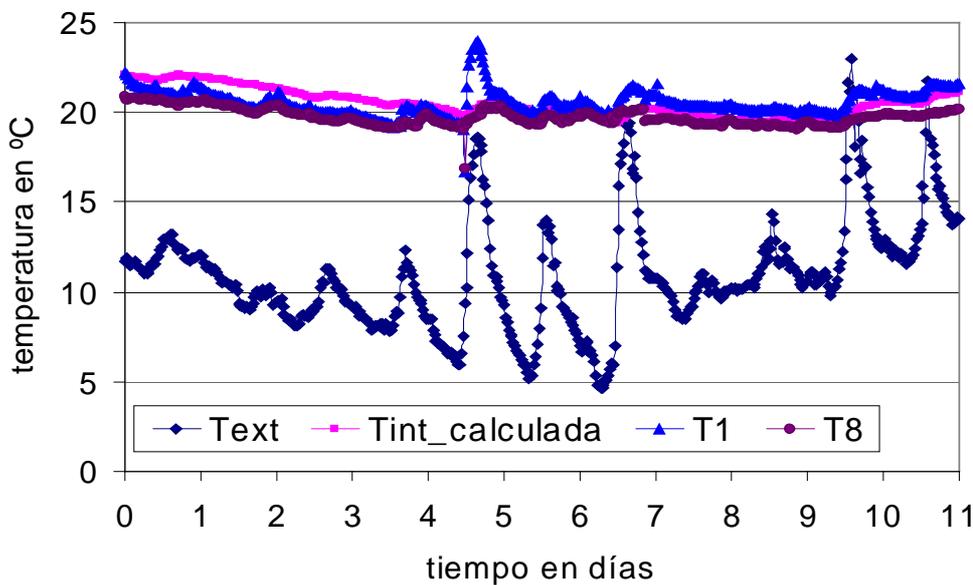


Figura14: Evolución temporal de las temperaturas exterior, interior reconstruida, T1, T4 y T8.

Datos de 11 días desde el 12 hasta el 22 de febrero 2003. Persianas cerradas día y noche

Independientemente de la ubicación espacial de las sondas, la temperatura en el interior oscila de la misma forma y suavemente, salvo algunos picos donde es relativamente alta al medio día. La temperatura interior simulada oscila de la misma forma y tiende a ser plana donde el margen de diferencia con las temperaturas interiores medidas no alcanza 1 °C.

La vivienda cuenta con una inercia térmica media, lo cual le permite conservar una temperatura relativamente constante si se protege muy bien de las fluctuaciones exteriores. Los muros de separación con el exterior cuentan con una cámara de aire y aíslan bastante bien el calor por conducción. Debido a la ausencia de la radiación solar en el interior, el intercambio de calor por radiación y convección es mínimo.

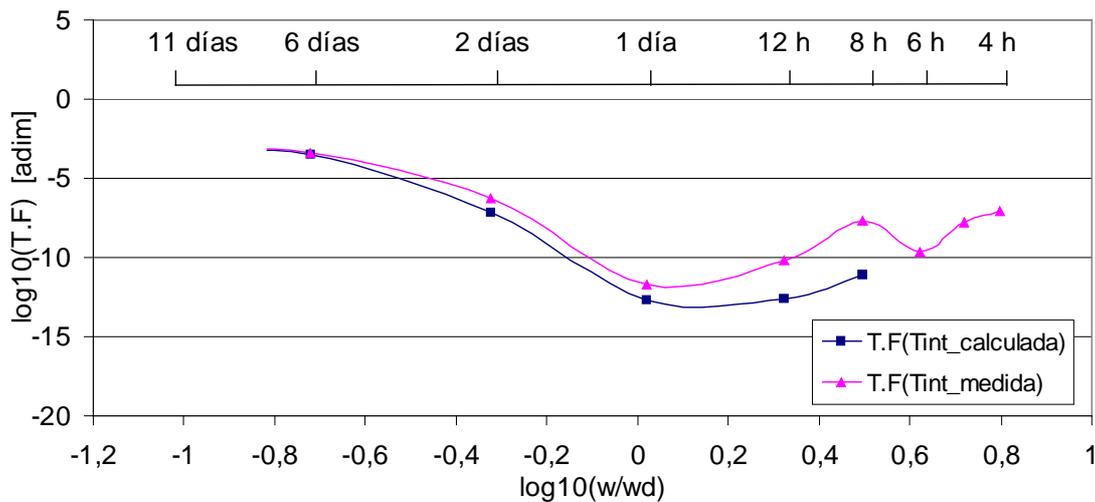


Figura15: Comparación de la Función de Transferencia simulada y medida. Ausencia de la radiación solar directa en el interior. Respuesta en invierno

La respuesta dinámica interior persigue la misma evolución. Una caída en las ganancias de bajas frecuencias hasta la frecuencia de un día la cual presenta el valor más suave de las oscilaciones de todo el espectro. Lo mismo que para el caso de protección de la piel “persianas abiertas” las dos funciones de transferencia, la medida y la simulada demuestran una buena concordancia en las medias y bajas frecuencias (hasta la frecuencia de un día). En las altas frecuencias, se nota una separación de los dos Figuras, y a partir de la frecuencia de 8 horas desaparece la función de transferencia simulada.

En las bajas frecuencias, comparando con la evolución de las oscilaciones interiores para el mismo mes de febrero pero con las persianas abiertas (Figura13) no se nota ninguna diferencia en las ganancias. Podemos decir que, la tipología y el diseño de la vivienda hacen que, la radiación directa no influye las fluctuaciones interiores a bajas frecuencias.

En las frecuencias medias, las oscilaciones interiores son más bajas aunque no con muchos grados de diferencia comparando siempre con la misma figura anterior (Figura13). Se puede decir que, la radiación solar directa empieza a tener efecto sobre las oscilaciones interiores a partir de las frecuencias medias.

En las altas frecuencias, las oscilaciones interiores vuelven a recuperarse un poco debido a los intercambios de calor en cortos plazos de tiempo.

En invierno, la orientación sur de la vivienda le permite una captación solar muy importante. La condición de protección “persianas cerradas” impide a que la radiación tenga una

influencia directa sobre la evolución de la temperatura interior. Sin embargo, el color gris de las persianas permite una captación importante.

Dichas persianas absorben el calor y ceden una parte de este calor al exterior, pero al mismo tiempo ceden la otra parte al interior bajo forma de ondas electromagnéticas de largas longitudes de onda. Ese calor llega con un retraso al interior, y su intensidad depende de la capacidad térmica de los materiales de la persiana y de hasta qué nivel es aislante la cámara de aire formada con el cristal al cerrar las ventanas.

Durante el intervalo de las mediciones no se registró altos niveles de radiación solar exterior como indica la figura siguiente:

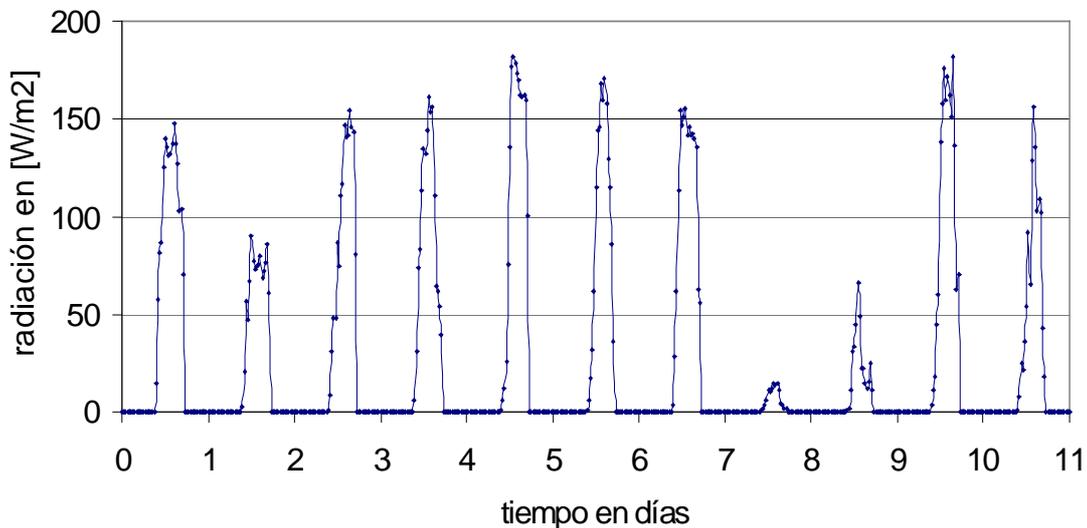


Figura16: La radiación solar exterior durante la época de las mediciones. Los datos han sido registrados por la sonda de mediciones colocada en el exterior.

Cuantitativamente, los efectos térmicos de las ventanas y de sus sistemas de protección dependen sin duda de las dimensiones de estas ventanas respecto a las dimensiones del espacio interior a calentar por la penetración de la radiación solar. Sin embargo, otros factores tienen una influencia sobre los efectos de las ventanas y de sus protecciones, tales como las condiciones de ventilación y las propiedades termo físicas de los materiales [5].

IV.4.1.2.2 Respuesta en primavera

La figura a continuación corresponde a mediciones hechas en la estación de primavera

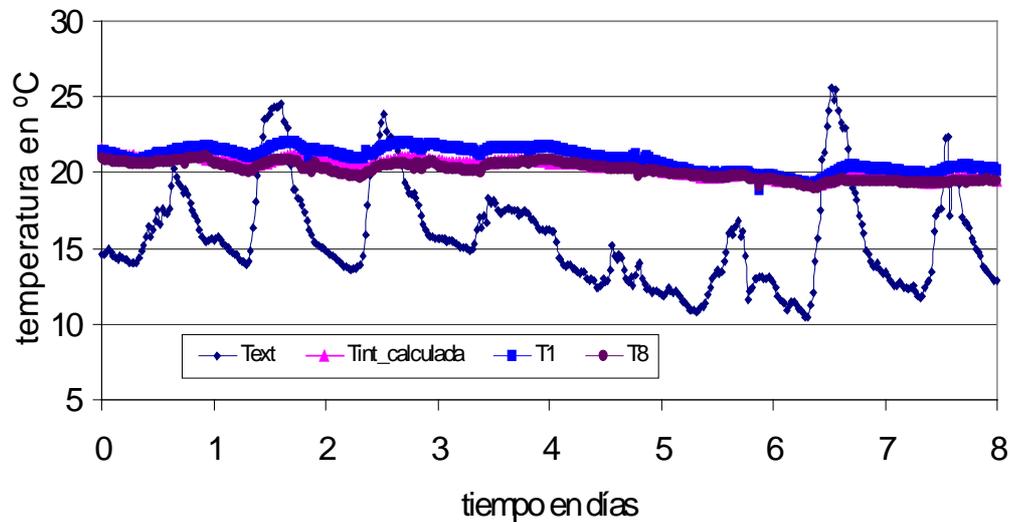


Figura16: Evolución temporal de las temperaturas exterior, interior reconstruida, T1, T4 y T8. Datos de 8 días desde el 28 de abril hasta el 05 de mayo 2002. Persianas cerradas durante el día.

Las temperaturas interiores oscilan muy poco y tienden a ser planas para todo el intervalo de las mediciones, y no se ve una diferencia clara entre las temperaturas más cercanas a la obertura con aquellas que se encuentran más al fondo. La temperatura interior simulada pega perfectamente con el nivel de oscilación de las temperaturas medidas.

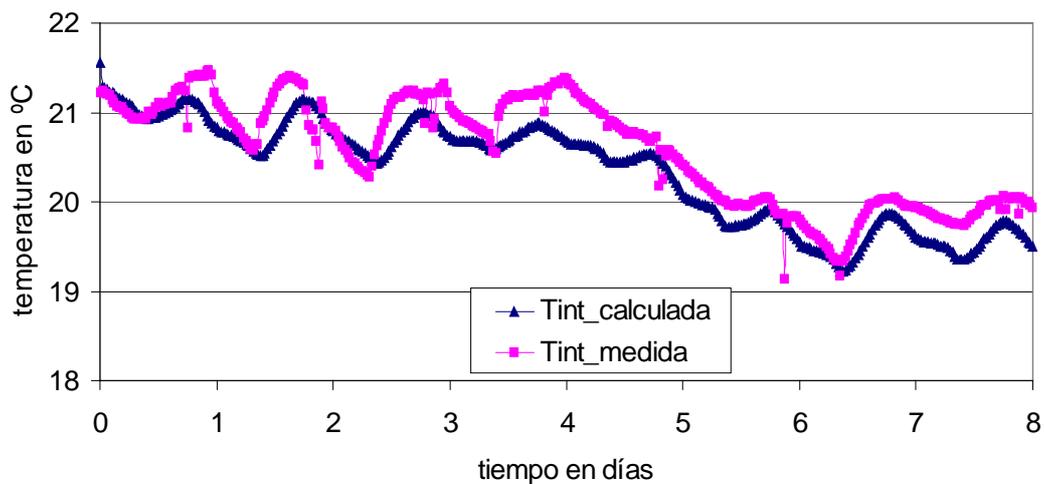


Figura 17: Comparación entre las dos temperaturas: media y simulada

El margen de diferencia entre las dos temperaturas es mínimo y no supera 0.5°C en los casos extremos. El cálculo numérico ha sido más preciso en este caso debido a que no hubo muchos factores que influyen la oscilación de la temperatura interior. La concordancia en las oscilaciones se verá mejor al analizar la figura en el campo de frecuencias.

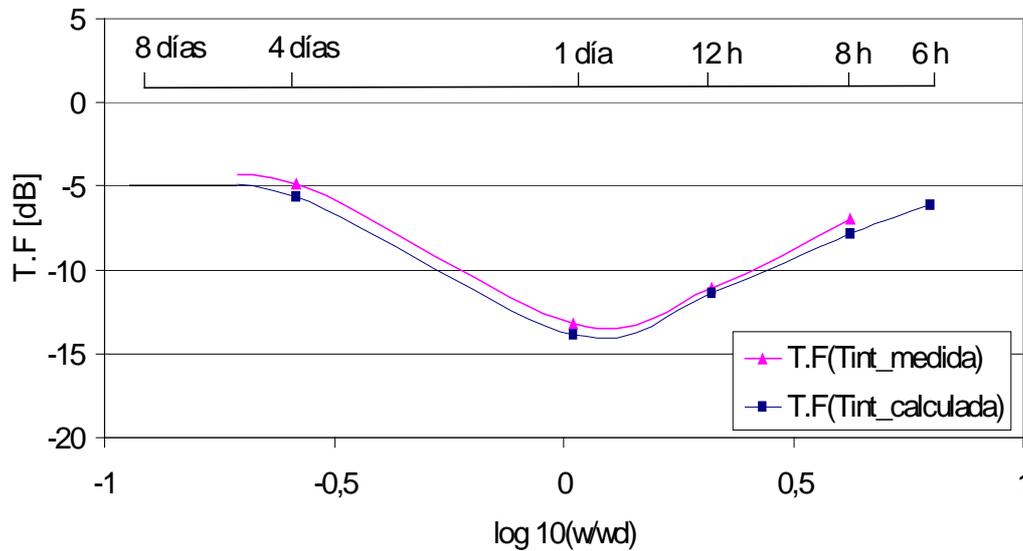


Figura18: Comparación de la Función de Transferencia simulada y medida. Ausencia de la radiación solar directa en el interior. Respuesta en primavera

La concordancia en este caso es 100% para todas las frecuencias. En la figura de la función de transferencia medida, se ve la desaparición de las oscilaciones a las frecuencias de 8 horas y de 5 horas. La amplitud de la transformada de Fourier de la temperatura interior media a estas frecuencias ha dado valores menores al mínimo que se puede utilizar para construir la función de transferencia.

Comparando con la respuesta dinámica interior de invierno, en las bajas frecuencias, las oscilaciones interiores de invierno (Figura13) demuestran valores más altos que en el caso de primavera. En el invierno, el sol se encuentra en una posición más baja permitiendo de esta manera a la fachada sur de la vivienda una captación importante. De un lado, la parte no vidriada absorbe la radiación incidente y luego emite este calor al interior su forma de ondas electromagnéticas de longitudes de ondas largas. De otra parte, en la época de invierno, los usuarios suelen utilizar la calefacción, en esta situación, los posibles aportes internos en las bajas frecuencias (continuos) son debidos al calor que transmiten las paredes

de contacto con las otras viviendas. Estos dos fenómenos son las posibles causas de la diferencia en las oscilaciones en las bajas frecuencias entre ambas estaciones. En cambio, en las frecuencias medias, no se nota una gran diferencia en las ganancias entre las dos estaciones. En las altas frecuencias, en primavera las oscilaciones interiores vuelven a ser importantes. En primavera, los usuarios suelen protegerse menos de las fluctuaciones exteriores dejando por ejemplo las ventanas abiertas durante algunas horas. Las ventanas protegidas y abiertas producen oscilaciones consideradas en la temperatura interior. Esto es debido no solamente a la proporción de la ventilación más elevada, pero también a una resistencia térmica menor a aquella del cristal [5].

IV.4.1.2.3 Respuesta en verano

Las mediciones de verano corresponden a un intervalo de 10 días. Durante las mediciones se mantuvo las persianas cerradas durante todas las horas del sol.

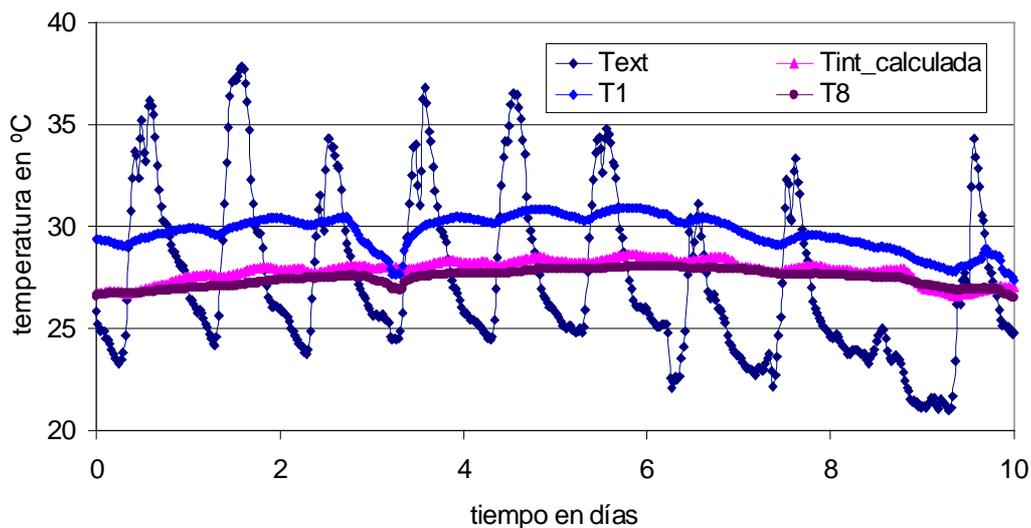


Figura19: Evolución temporal de las temperaturas exterior, interior reconstruida, T1, T4 y T8. Datos de 10 días desde el 16 hasta el 25 de agosto 2002. Persianas cerradas durante el día.

Aunque hemos evitado la entrada de la radiación solar directa al interior observamos que las temperaturas más cercanas a la fachada principal presentan valores más altos (aproximadamente un promedio de 30°C para la temperatura T1 a 50 cm. de la ventana), y cuando más nos acercamos al fondo del edificio la temperatura baja (un promedio de 26°C aproximadamente para la temperatura T8 a 8.10 m de la envolvente). También se observa

una oscilación más alta para las sondas cercanas a la obertura principal comparando con las temperaturas lejanas las cuales presentan oscilaciones muy suaves tienden a ser planas.

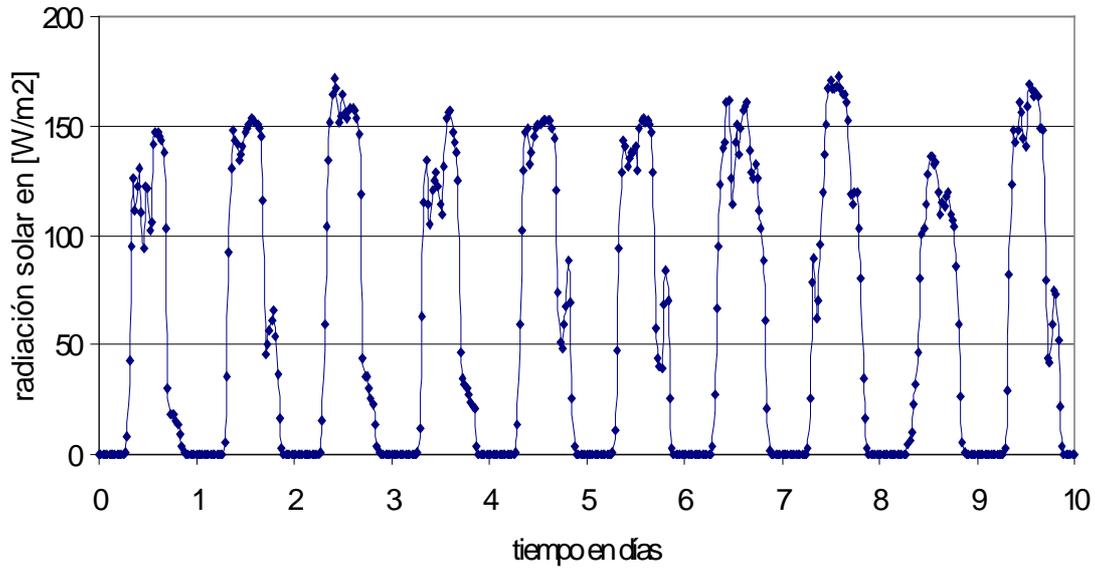


Figura20: La radiación solar exterior para el mismo intervalo de mediciones

En verano, la intensidad de la radiación solar es alta, y su incidencia sobre las persianas cerradas permite que estas absorban grandes cantidades de calor que luego emiten una parte de ese calor al interior. Igualmente, la costumbre de los usuarios en dejar las ventanas abiertas durante las primeras horas de la mañana y por la noche, permite una oscilación más grande de las temperaturas interiores, sobre todo las más cercanas a la ventana.

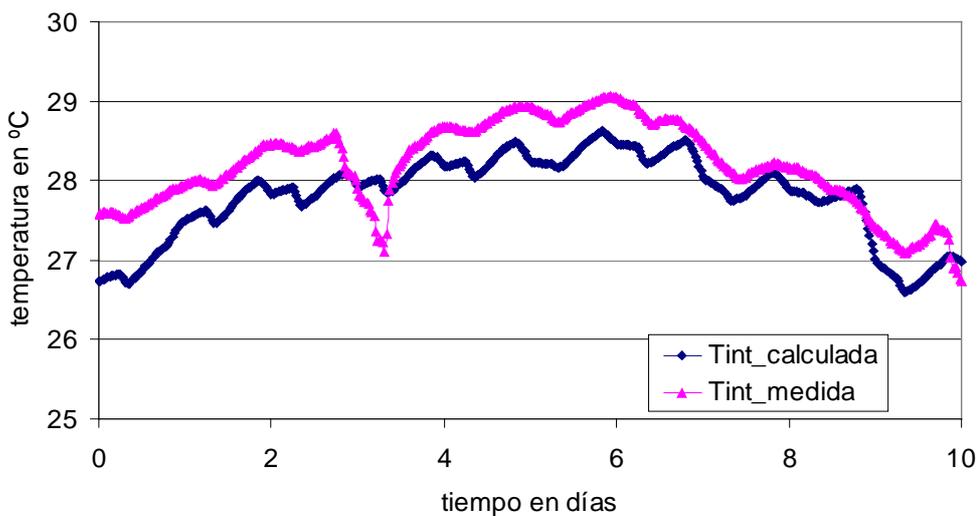


Figura21: Comparación entre las dos temperaturas: media y simulada

La compatibilidad entre las dos temperaturas interiores media y simulada es grande, salvo en algunos puntos donde la temperatura medida baja bruscamente como por ejemplo la noche del cuarto día de las mediciones. Ese descenso es debido posiblemente a una elevada proporción de la ventilación nocturna. En el modelo numérico no hemos supuesto el fenómeno, por eso la temperatura interior simulada no sigue la misma evolución en este punto.

La compatibilidad se ve aun más al comparar las dos figuras de la función de transferencia simulada y medida.

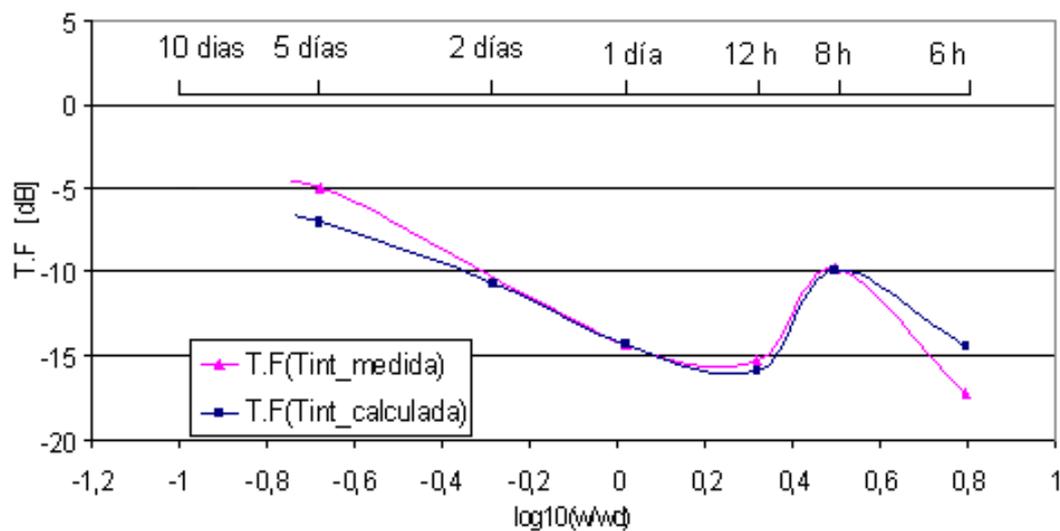


Figura22: Comparación de la Función de Transferencia simulada y medida.
Ausencia de la radiación solar directa en el interior. Respuesta en verano.

Independientemente de la estación del año, la repartición de las oscilaciones por las frecuencias bajas, medias y altas sigue la misma ley. La concordancia es grande en este caso.

En la figura siguiente analizaremos con detalles las comparaciones entre las tres funciones de transferencias invierno-verano-primavera y destacar la influencia de las excitaciones exteriores sobre la respuesta interior.

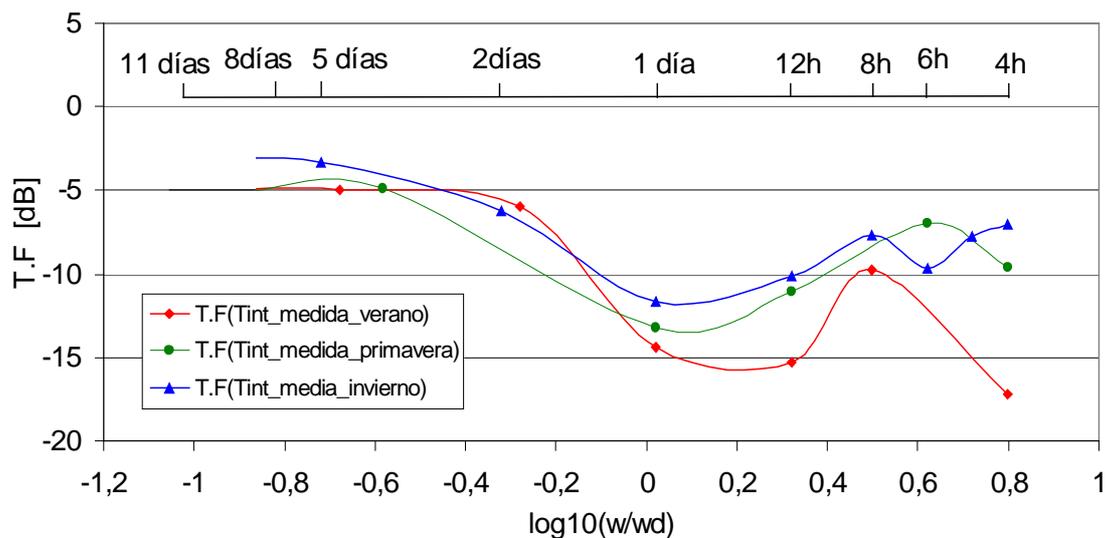


Figura23: Comparación de la respuesta dinámica interior para las estaciones: invierno, primavera y verano. Condición de protección persianas cerradas.

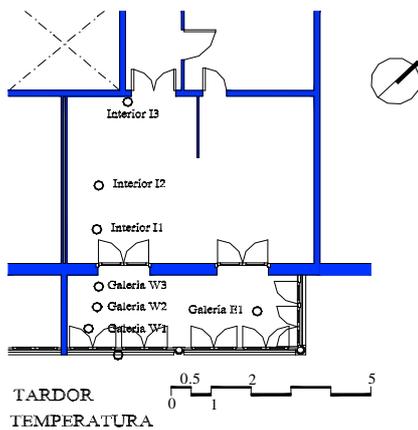
La vivienda no muestra una gran resistencia al calor de bajas frecuencias. Se puede decir que, la gran parte de las oscilaciones interiores son debidas al calor intercambiado a bajas frecuencias. Concluyendo, los cambios climáticos alrededor del año no afectan la respuesta interior en las bajas frecuencias. Y para protegerse de las fluctuaciones exteriores en las bajas frecuencias habrá que efectuar cambios en las características constructivas de la vivienda subiendo la masa térmica interior y de la piel. En el próximo capítulo analizaremos este tema detalladamente.

En las frecuencias medias, observamos una ligera oscilación para la época de invierno comparando con las de verano y primavera. En verano, las oscilaciones a estas frecuencias son mínimas. Se puede decir que, con el prototipo de la vivienda se protege más del calor de verano que del frío de invierno. Con otras palabras, los usuarios están mentalizados a protegerse del calor más que el frío, sin olvidar que las fugas de frío en invierno perturban más rápido las temperaturas interiores que los flujos de aire de verano cargados de calor.

En las bajas frecuencias, las oscilaciones correspondientes a la estación de verano siguen siendo mínimas debidas, como hemos dicho antes, a la procuración de los usuarios de protegerse de los rayos de sol y de los flujos de aire caliente del día. En cambio se ve una considerable recuperación en la estación de primavera (*frecuencia de 6 horas*) ya que el ambiente exterior es agradable y se suele dejar alguna ventana abierta durante horas lo cual provoca una aportación más en altas frecuencias.

IV.4.2 Segunda aplicación

El segundo caso a estudiar es el mismo piso de la calle Aragón. Las características constructivas del piso son distintas del caso anterior debido a la presencia de la galería y al muro de carga de separación galería – interior. El local es un despacho, lo que nos permite determinar con aproximación las horas que los ocupantes permanecen dentro. Otra característica importante a marcar es la ausencia de ningún tipo de ventilación nocturna pues el local permanece inhabitable por la noche. Esta característica de los usuarios facilita el cálculo numérico, ya que durante las horas de noche podemos considerar que la proporción de la ventilación es constante.



Las sondas y los gráficos correspondientes se nominan:

EXTERIOR EX Situada al exterior, al centro de la galería.

GALERÍA E Situada a la parte ESTE de la galería, hacia el exterior.

GALERÍA E2 Situada a la parte ESTE de la galería, hacia el interior.

GALERÍA W1 Situada a la parte OESTE, tocando el muro de separación con la galería simétrica, también hacia el exterior.

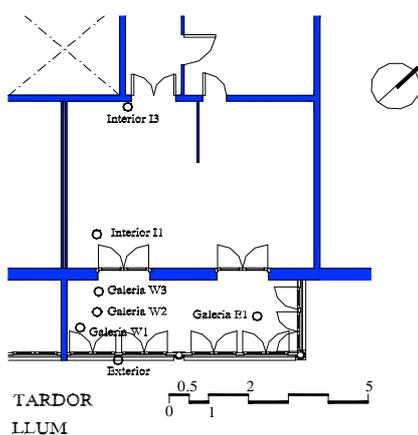
GALERÍA W2 Situada a la parte OESTE, unos 60 cm más hacia el interior.

GALERÍA W3 Situada a la parte OESTE, tocando el muro que separa la galería del interior.

INTERIOR1 I1 En el espacio interior, a unos 80 cm del muro que le separa de la galería.

INTERIOR2 I2 En el mismo espacio interior, a unos 2.5m de profundidad, siempre a la franja oeste.

INTERIOR3 I3 Al fondo de todo el espacio interior, al lado de la puerta de acceso.



Dibujo 2: Distribución espacial de las sondas de medición

IV.4.1.1 Presencia de la radiación solar directa

IV.4.1.1.1 Respuesta en invierno

Las mediciones fueron tomadas en la galería y en el despacho con incidencia de la radiación solar directa. La primera serie de mediciones se tomó durante 9 días del 14 hasta el 22 de octubre 1999. La temperatura exterior y la radiación solar sobre la horizontal se tomaron con las sondas de captación colocadas como indica las siguientes fotos. La sonda de temperatura se ubicó de una forma que no le toquen los rayos directos de sol.



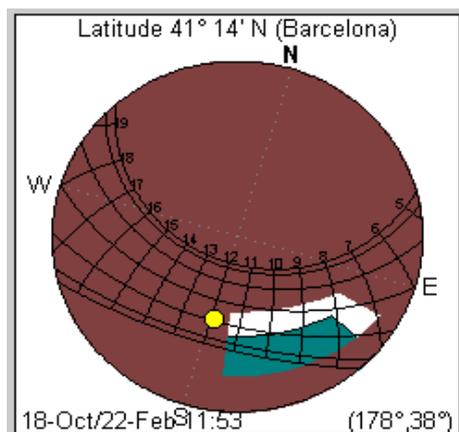
Foto 1: Colocación de la célula fotovoltaica para la captación de la radiación solar



Foto 2: Ubicación de la sonda de la temperatura exterior

La ubicación sur del piso le permite una captación importante de la radiación solar directa. La galería casi tiene la misma función que un muro Trombe al dejar pasar, a través del cristal, la radiación solar de cortas longitudes de onda e impedir la salida del calor emitido por el muro de carga interior y los objetos que se encuentran en la galería debido a la opacidad del vidrio al calor emitido a largas longitudes de ondas. El calor absorbido por el muro será cedido al interior a través de la conducción.

Al determinar la ubicación y las horas de incidencia de sol sobre la galería del piso, calcularemos las dimensiones de las aberturas, la masa térmica interior y de la piel, el volumen interior total, las fuentes de calor interior, ajustar la ventilación y calcular la duración de la radiación solar en el interior.



Dibujos 3: Estereografía para un día soleado del mes de octubre con las persianas abiertas. La sonda de medición es la correspondiente a la sonda Tinterior1. El sol toca durante pocas horas de la mañana debido a las pequeñas superficies vidriadas del muro de carda con la galería.

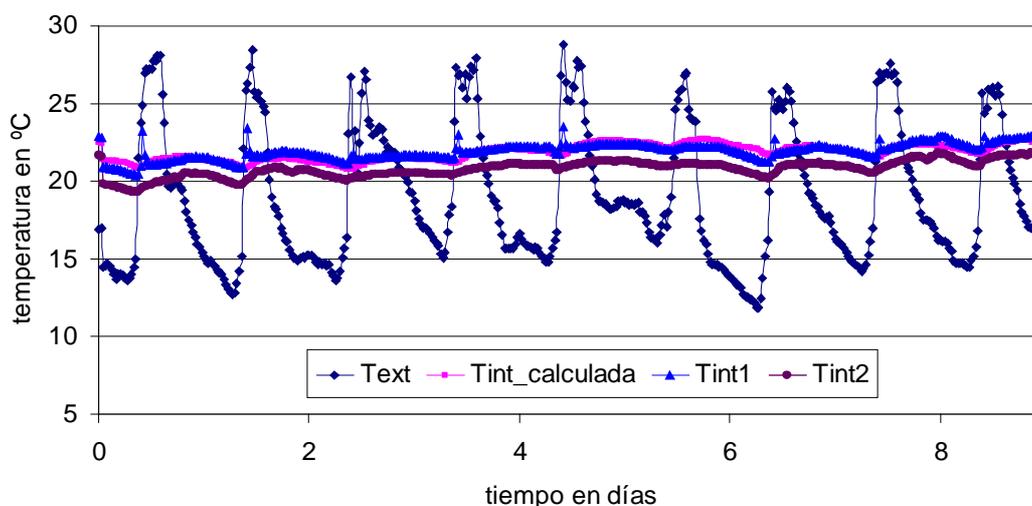


Figura 24: Evolución temporal de las temperaturas exterior, interior reconstruida, Tinterior1 y Tinterior2. Datos de 9 días desde el 14 hasta el 22 de octubre 1999. Persianas abiertas durante el día.

Debido a las pocas horas de sol en el interior y a la gran masa térmica del muro de separación con la galería, la oscilación de la temperatura en el interior tiende a ser suave y de un pico día noche de menos de un grado. Un pico diario en las ganancias corresponde a la temperatura Tinterior1. Ese aumento brusco es debido a que los rayos directos de sol tocan la sonda de medición durante un breve tiempo. Se ve una ganancia de aproximadamente 1.5°C en la temperatura Tinterior1 comparando con la Tinterior2. Esa ganancia es debida a que la sonda 1 recibe calor del muro calentado por la radiación y por los rayos de sol que llegan a tocar la zona y posiblemente que la sonda 2 está más protegida de las fluctuaciones exteriores (detrás del despacho). La temperatura interior simulada sigue la misma evolución de las temperaturas interiores.

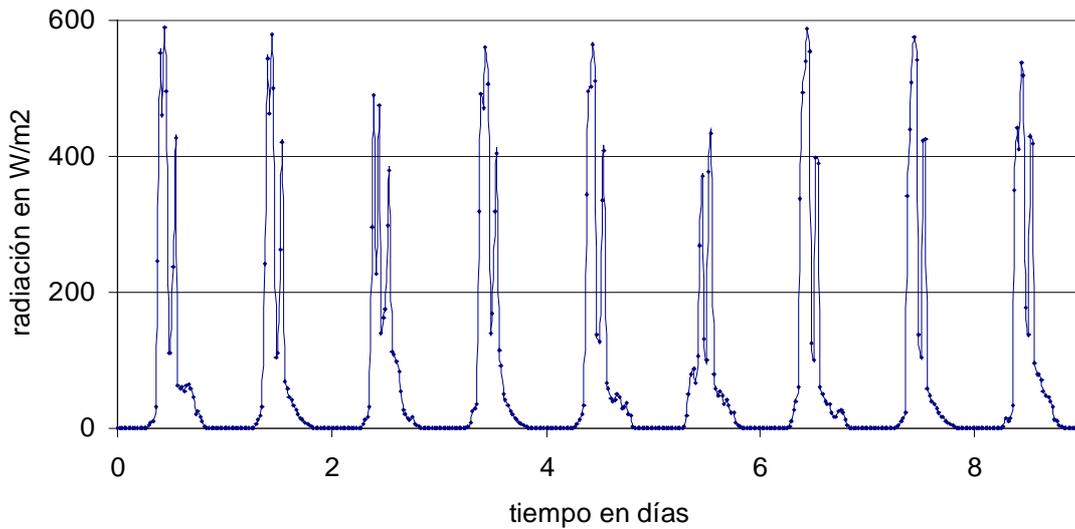


Figura25: Evolución temporal de la radiación solar exterior sobre un plano horizontal. Datos de 9 días desde el 14 hasta el 22 de octubre 1999.

La radiación solar presenta valores iguales casi para todos los días de las mediciones, los valores registrados son similares a los registrados normalmente para la misma época del año (octubre). Una vez obtenidos los datos en el tiempo, construiremos la función de transferencia en función de las frecuencias. la figura siguiente nos muestra esa evolución interior para las dos sondas interiores y comparando con la función de transferencia simulada.

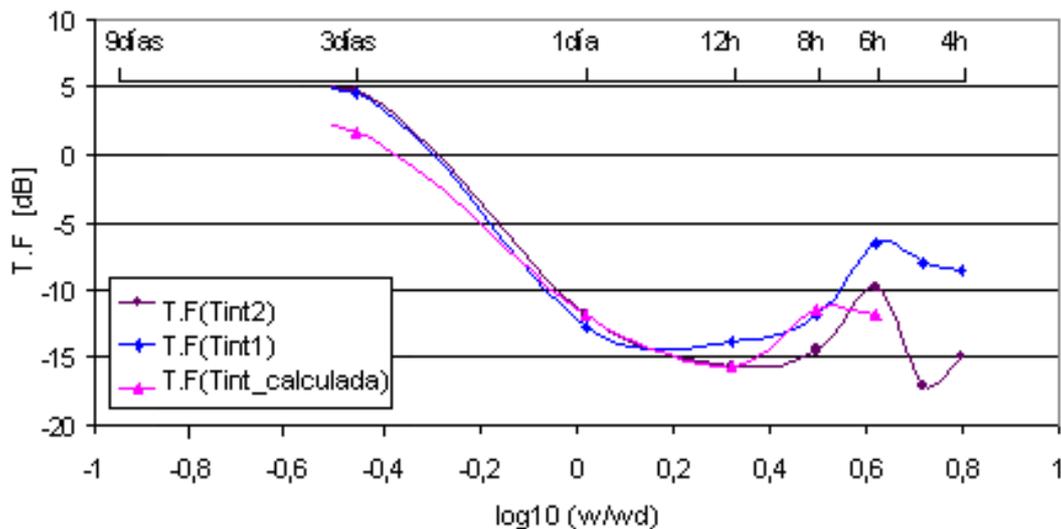


Figura26: Comparación de la función de transferencia simulada con las correspondientes a Tinterior1 y Tinterior2. Datos de 9 días desde 14 hasta el 22 de octubre 1999. Persianas de la galería abiertas.

La concordancia entre la figura de la T.F(Tint_calculada) y los Figuras de T.F(Tint1) y T.F(Tint2) es muy alta.

En las bajas frecuencias, las oscilaciones interiores son más altas que las exteriores. En la frecuencia de 3 días las oscilaciones interiores son un 316% de las oscilaciones exteriores. Esto nos puede parecer raro siendo que el interior está separado del exterior de una lámina de vidrio y de un muro de carga de un espesor de 30cm. En este caso, las oscilaciones interiores en las bajas frecuencias son debidas a la radiación solar, es decir, la galería con el muro de carga en este proceso hacen la función de un muro Trombe.

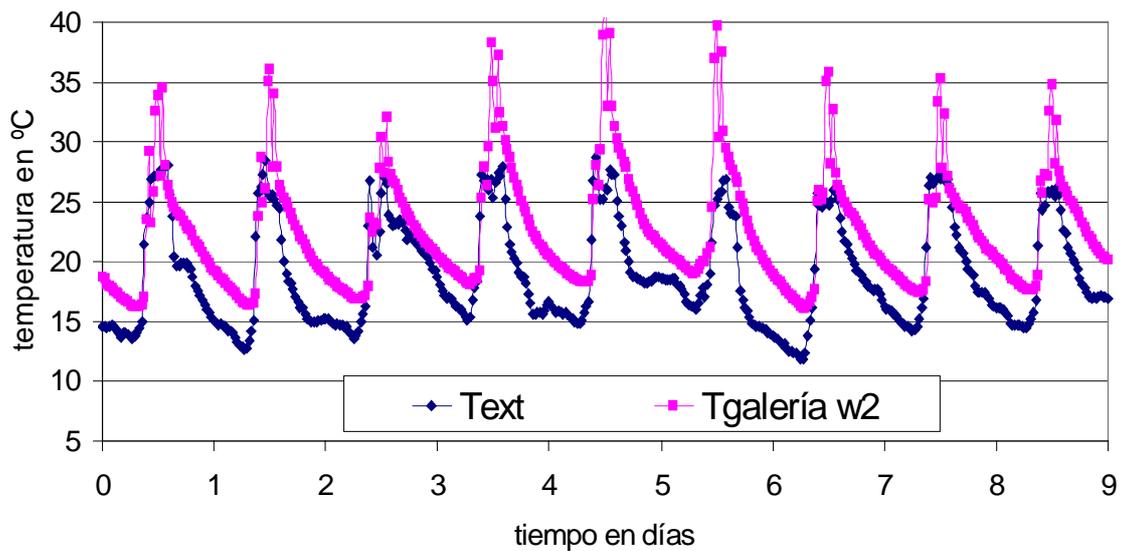


Figura27: Comparación entre las oscilaciones de la temperatura exterior y la temperatura galería oeste.

La temperatura del muro sube al recibir la radiación solar directa y empieza a irradiar hacia el espacio de la galería. A causa del cristal de la parte externa de galería el calor emitido por el muro (largas longitudes de onda) se queda atrapado en el interior subiendo así la temperatura del aire encontrado en el espacio de la galería. Por lo tanto sigue subiendo la temperatura del muro. El calor acumulado por el muro sigue su viaje hacia el interior atravesando los 30 cm. que hace de espesor antes de llegar al interior. Llamamos a la constante de tiempo del muro el tiempo que necesita una excitación de una cara del muro para llegar a la otra cara, y depende del espesor del muro y de su resistencia al calor por conducción. De esta forma, debido a que el proceso se repite diariamente, la onda de calor que llega al interior es casi continua. El ambiente interior recibe un calor por conducción casi estático, lo cual demuestra el aumento de las oscilaciones en las bajas frecuencias.

En las frecuencias medias, las oscilaciones interiores son muy bajas, en la frecuencia de *un día*, las oscilaciones interiores son solamente un 6% de las oscilaciones exteriores. Debido a que la constante de tiempo del muro es más grande que un día ($\tau = 1,43$ días), entonces el interior no le llega el calor por conducción a la frecuencia de *un día*, y las pocas oscilaciones a esta frecuencia son debidas al intercambio de calor por ventilación y al calor recibido por las dos aberturas vidriadas como se ve en la foto siguiente.



Foto 3: una foto del despacho en estudio con la abertura vidriada hacia el espacio de la galería.

En las altas frecuencias: las oscilaciones interiores vuelven a recuperarse un poco, sobre todo las oscilaciones correspondientes a la sonda 1. Una fluctuación de 25% a la frecuencia de *6 horas*. Es el resultado esperando recordando el pico de ganancias que se repetía cada día al medio día cuando entraba el sol directo en el interior (Figura23). Además de las ganancias por la radiación directa, la ubicación de la sonda 1 le permite un intercambio de calor por ventilación debido a su cercanía de las fluctuaciones de la galería y exteriores.

Para la T.F simulada, se ve una desaparición de las frecuencias mayores a *6 horas* debido al pequeño valor del modulo de la transformada de Fourier a estas frecuencias, y por lo tanto el margen de error al hacer la división aumenta y no se puede tomar como significativo los valores obtenidos.

IV.4.1.1.2 Respuesta en primavera

La segunda serie de datos a analizar corresponde a 8 días desde el 19 hasta el 26 de mayo 1999. Durante las mediciones se mantuvieron abiertas las persianas de la galería.

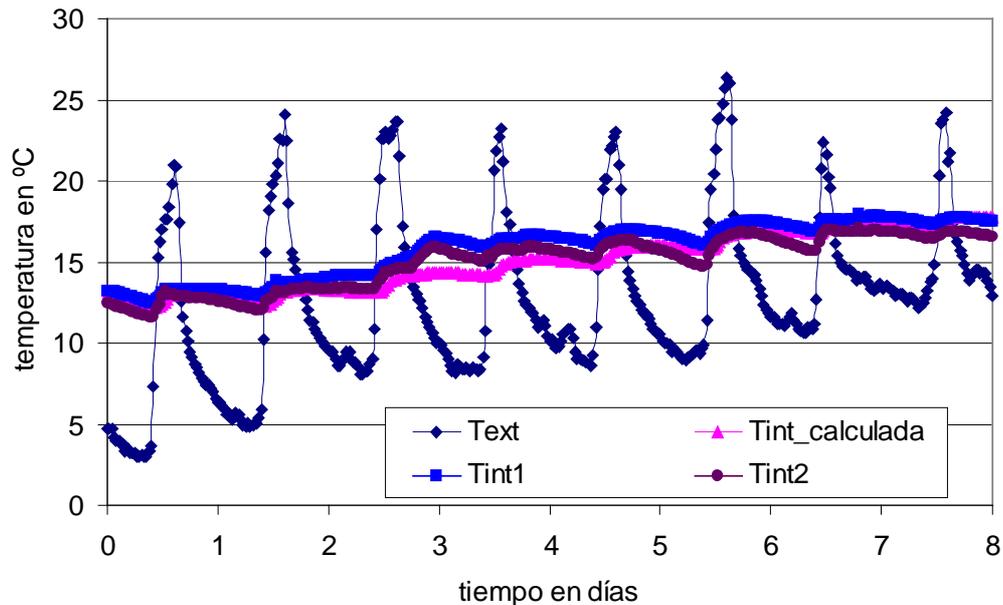
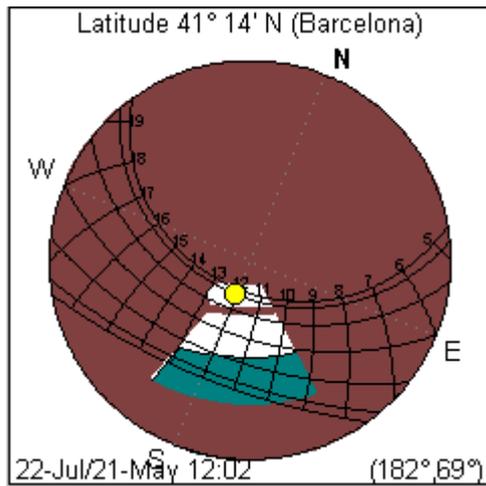


Figura28: Evolución temporal de las temperaturas exterior, interior reconstruida, Tinterior1 y Tinterior2. Datos de 8 días desde el 19 hasta el 26 de mayo 1999. Persianas abiertas durante el día.

La oscilación de la temperatura interior es suave. La concordancia es alta entre la temperatura interior simulada y las temperaturas interiores medidas. En mayo el sol es más alto y entra menos al interior. La galería esta vez está más protegida de los rayos altos a causa del techo opaco. Por lo tanto, los rayos de sol en el interior son casi nulos, lo cual hace que el ambiente interior tiene casi una misma temperatura. Es decir, y según la figura temporal, no hay mucha variación entre las temperaturas interiores 1 y 2, la diferencia es de menos de 1°C.



Dibujo 4: Estereografía para el 21 de mayo, soleado y con las persianas abiertas. La sonda de medición es la correspondiente a la sonda Tinterior1.

El sol alto casi no entra debido a las pequeñas superficies vidriadas del muro de carda con la galería.

Analizando lo que hemos dicho en el campo de frecuencias se verá más claro todos los fenómenos.

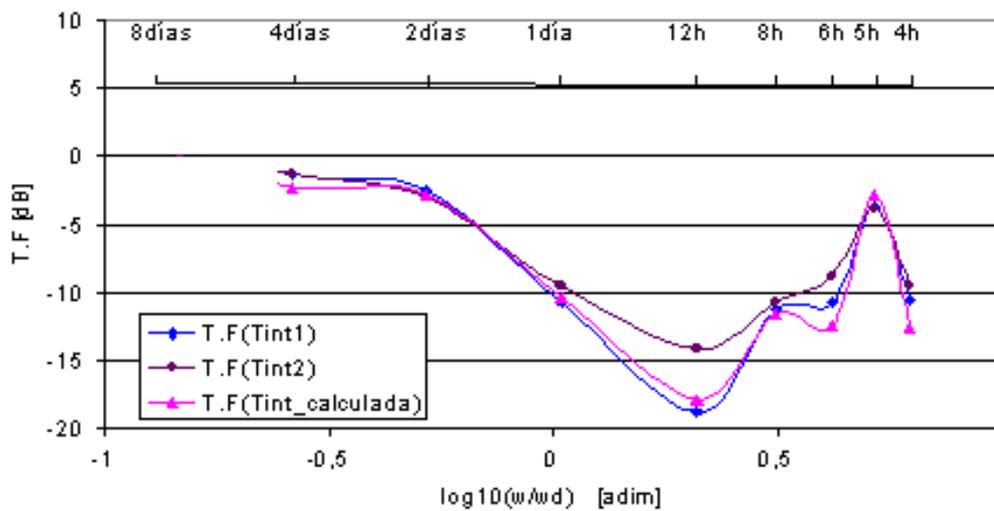


Figura29: Comparación de la función de transferencia simulada con las correspondientes a Tinterior1 y Tinterior2. Datos de 8 días desde 19 hasta el 26 de Mayo 1999. Persianas de la galería abiertas.

En las bajas frecuencias, las oscilaciones interiores son mayores y llegan a ser aproximadamente un 130% de las oscilaciones exteriores a la frecuencia de 8 días. En cambio, las oscilaciones a la frecuencia de 4 días han bajado comparando con el caso anterior y son aproximadamente de un 63% de las oscilaciones exteriores. Aunque las persianas de la galería se dejaron abiertas, el sol alto de mayo no llega penetrar mucho en la galería, y eso se ve en la evolución de la temperatura dentro de la galería. La temperatura en

la galería no alcanza los mismos máximos que en el caso de invierno, pero se puede observar que el mínimo está siempre encima del mínimo exterior.

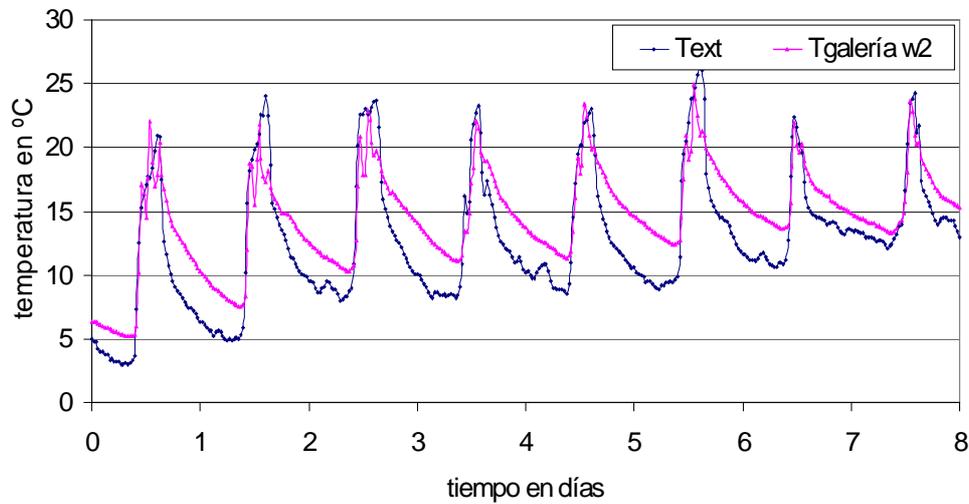


Figura30: Comparación entre las oscilaciones de la temperatura exterior y la temperatura galería oeste.

En las frecuencias medias, las oscilaciones interiores son mínimas. Es el resultado esperado por las mismas razones dichas en el caso anterior a causa de la constante de tiempo del muro de carga que es más larga que un día. Las oscilaciones a estas frecuencias son debidas a las ganancias por ventilación en intervalos de tiempo medianos y por conducción de las paredes menos gruesas.

En las bajas frecuencias, las oscilaciones interiores vuelven a ser más importantes, llegan hasta un 56% de las oscilaciones exteriores a la frecuencia de 5 horas. Estando en la época de primavera, una ventilación durante el día siempre es agradable. Las ganancias interiores a estas frecuencias son debidas a fenómenos ocurridos en cortos plazos de tiempo.

IV.4.1.2 Ausencia de la radiación solar directa

Las mediciones esta vez fueron tomadas con la condición de protección persianas cerradas. Se mantuvieron las persianas de la galería cerradas durante todo el día impidiendo así que la radiación solar penetre al interior. Las mediciones corresponden a 9 días desde el 02 de

octubre hasta el 02 de noviembre de 1999. Durante la época de las mediciones hacía sol y la temperatura exterior presenta amplitudes diarias de 13 °C aproximadamente.

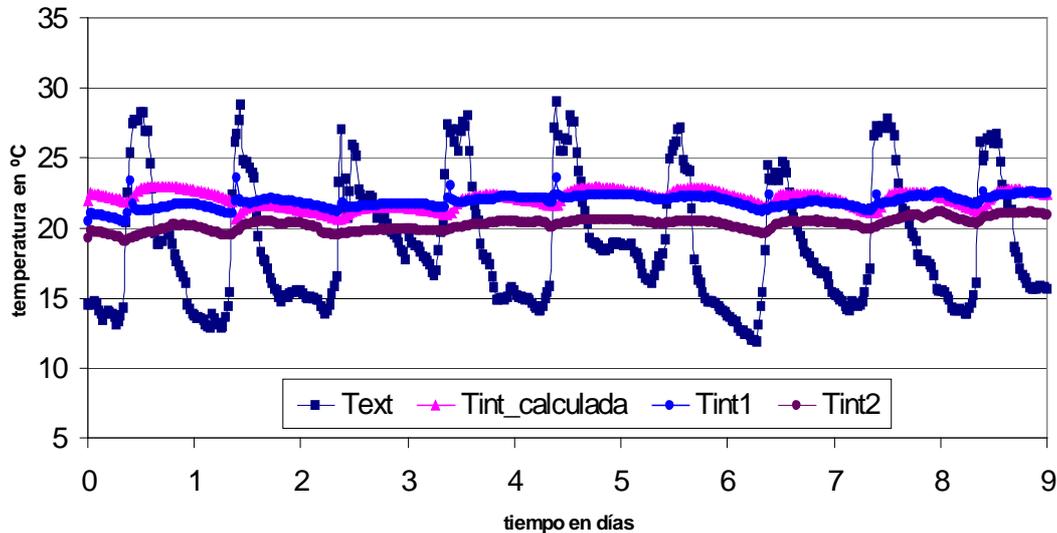


Figura31: Evolución temporal de las temperaturas exterior, interior reconstruida, Tinterior1 y Tinterior2. Datos de 9 días desde el 25 de octubre hasta el 02 de noviembre 1999. Persianas cerradas durante el día.

La temperatura interior presenta unas oscilaciones casi idénticas a las oscilaciones de temperatura en el caso de persianas abiertas. La poca radiación que toca el interior en el caso de las persianas abiertas no influye demasiado las fluctuaciones interiores. La concordancia entre la figura experimental y simulada es buena. Observando bien las figuras, se ve que la temperatura interior sigue subiendo cuando la temperatura exterior empieza a bajar. Ese desfase es debido a que el interior recibe el calor de una forma indirecta a través de los muros por la conducción y la emisión de calor por los objetos interiores después de absorber el calor de las horas de sol.

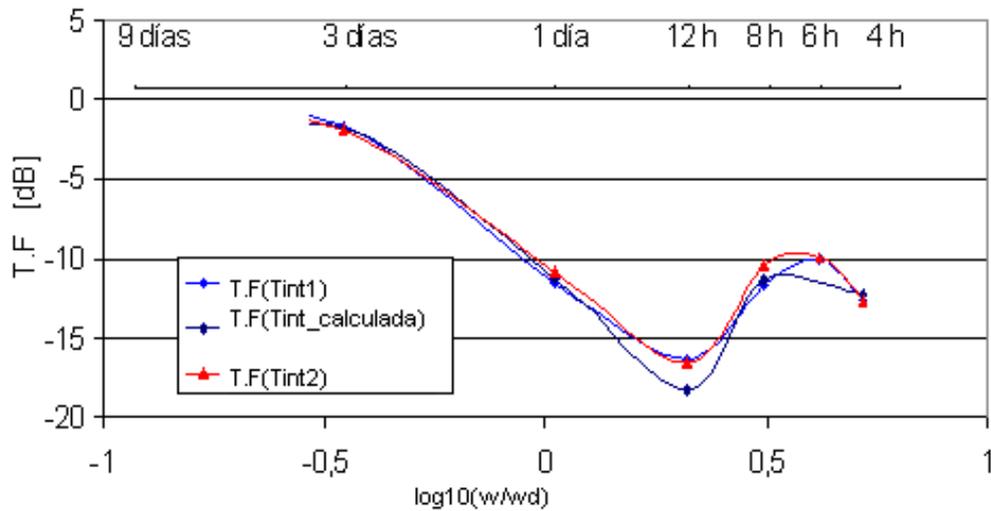


Figura32: Comparación de la función de transferencia simulada con las correspondientes a $T_{interior1}$ y $T_{interior2}$. Datos de 9 días desde el 25 de octubre hasta el 02 de septiembre 1999. Persianas de la galería cerradas.

Siendo que las persianas estaban cerradas, la galería sigue recibiendo calor a través de la radiación de las persianas calentadas por el sol directo. El calor que entra sigue atrapado en el interior y calienta así la masa interior. Por las noches, al tener las persianas cerradas, las pérdidas efectivas por transmisión hacia el exterior se disminuyen como demuestra la figura siguiente.

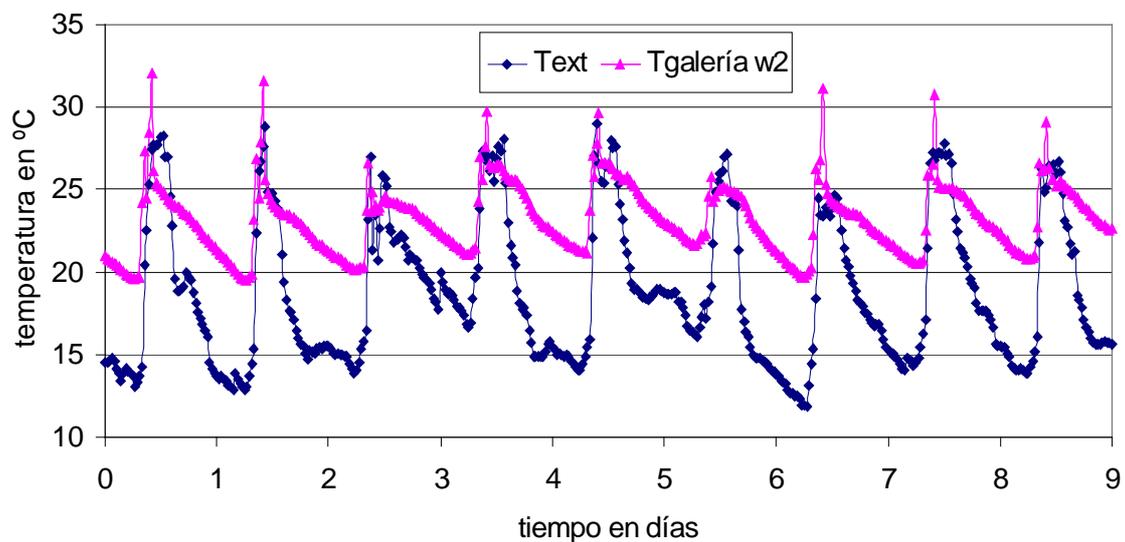


Figura33: Comparación entre las oscilaciones de la temperatura exterior y la temperatura galería oeste.

Este aumento de la temperatura en la galería, como se ha explicado antes, es el responsable de las oscilaciones altas en las bajas frecuencias.

En las frecuencias medias, no se nota un gran cambio comparando con el caso de las persianas abiertas. Las oscilaciones a estas frecuencias siguen siendo bajas (menos de 2% de las oscilaciones exteriores a la frecuencia de 12 horas).

Se puede decir para el piso en estudio que, independientemente de la condición de protección de la envolvente, el intercambio de calor en las frecuencias medias no se hace con gran intensidad. En las altas frecuencias, la compatibilidad entre la figura simulada y experimental es mayor, y las oscilaciones vuelven a ser más significativas (13% aproximadamente).

IV.4.1.3 Respuesta interior para días nublados

La última serie de datos a tratar en este capítulo corresponde a 4 días nublados con las persianas abiertas, el objetivo es ver el efecto que tienen las pérdidas efectivas del piso hacia el exterior por la ausencia de la radiación directa. Las mediciones se hicieron desde el 03 hasta el 06 de octubre 1999.

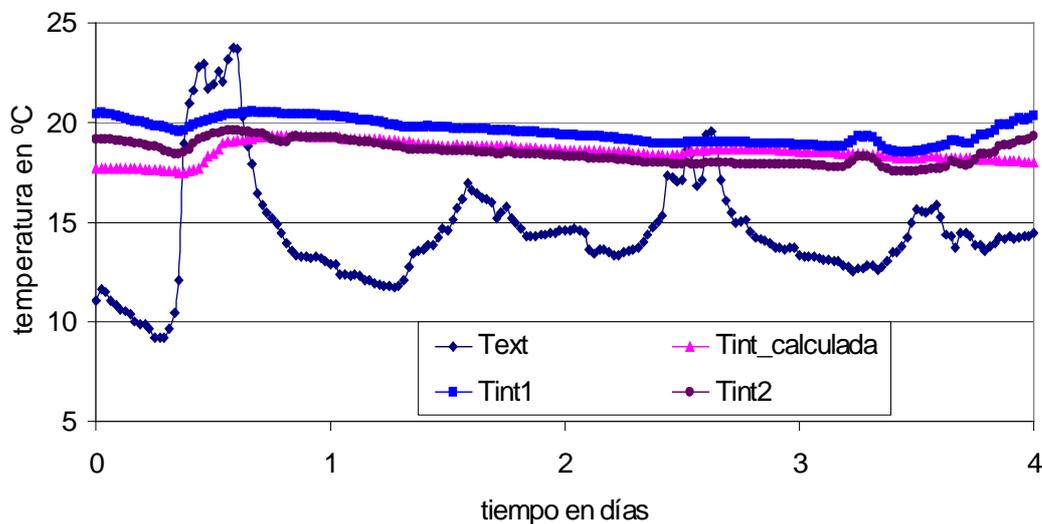


Figura34: Evolución temporal de las temperaturas exterior, interior reconstruida, Tinterior1 y Tinterior2. Datos de 4 días desde el 03 hasta el 06 de octubre 1999. Días nublados con persianas abiertas.

La temperatura en el interior oscila de una forma muy suave y tiende a ser plana. La concordancia entre las figuras experimentales y simuladas es grande. La evolución de la

temperatura exterior en este caso es más suave y presenta picos de variación día- noche de unos 5 °C aproximadamente.

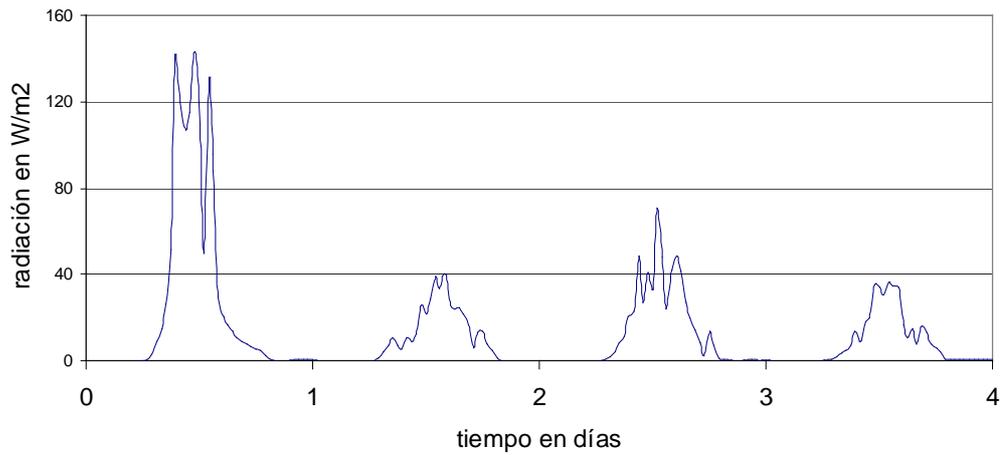


Figura35: Evolución de la radiación solar exterior para un plano horizontal. Datos de 4 días desde el 03 hasta el 06 de octubre 1999. Todos los días nublados

En la figura a continuación se ve la cantidad de la radiación solar en W/m2 para un plan horizontal. Comparando con los días soleados (más de 600 W/m2 al medio día), en este caso la radiación presenta valores muy bajos.

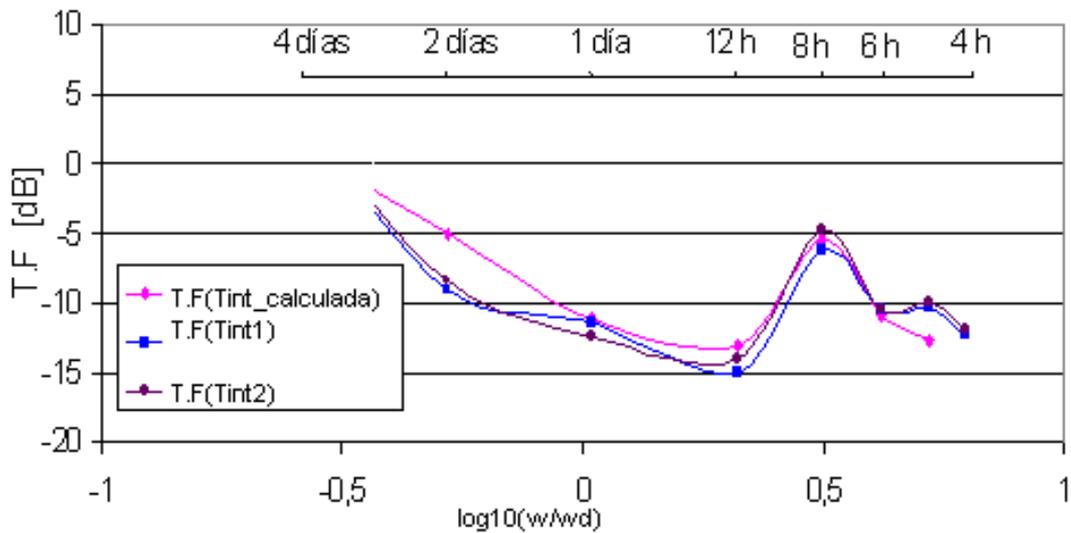


Figura36: Comparación de la función de transferencia simulada con las correspondientes a Tinterior1 y Tinterior2. Datos de 4 días nublados desde el 03 hasta el 06 de octubre 1999. Persianas de la galería abiertas.

En la frecuencia de 4 días las oscilaciones llegan a ser de 56% de las oscilaciones exteriores, que es la más alta de todas las oscilaciones. El proceso de las ganancias esta vez tiene un proceso reverso, y el flujo de calor tiene más intensidad desde el interior hacia el exterior. Debido al grueso del muro el proceso es lento y las pérdidas se hacen en las bajas frecuencias. Las oscilaciones de la temperatura en la galería son muy parecidas a las oscilaciones exteriores. Lo cual indica que la galería sigue acumulando calor por radiación difusa.

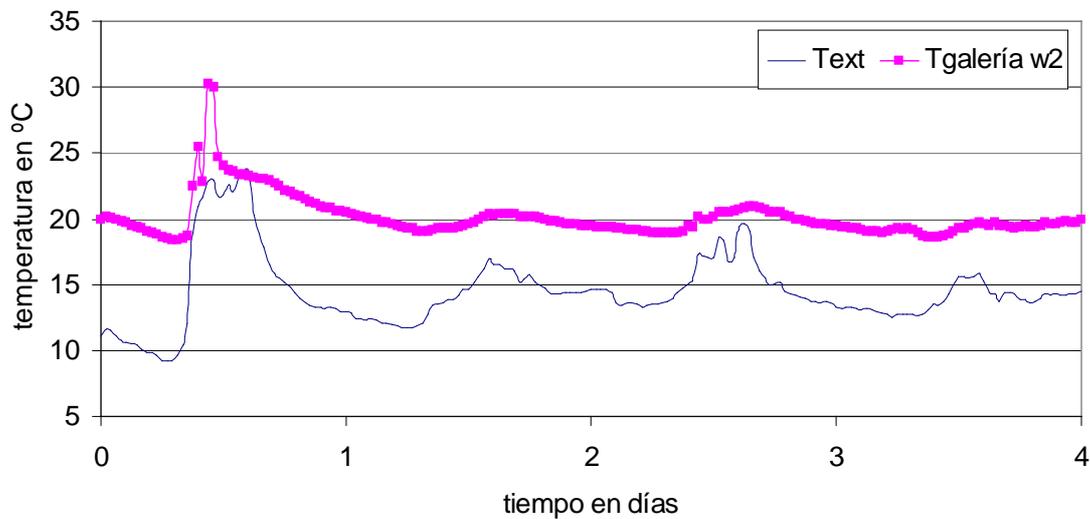


Figura37: Comparación de la evolución de las temperaturas exterior y T_{w2}

En las frecuencias medias, las oscilaciones siguen siendo bajas (5% para la frecuencia de 12 horas), sin embargo, no son tan bajas como en el caso anterior de las persianas cerradas (menos de 2% a la misma frecuencia). Al tener las persianas abiertas día y noche, las pérdidas efectivas aumentan, lo cual hace más las oscilaciones interiores más altas en este caso.

En las altas frecuencias, las oscilaciones vuelven a ser importantes, y alcanzan un máximo a la frecuencia de 8 horas 32% aproximadamente.

V. Sensibilidad de la respuesta interior a los parámetros del modelo numérico

V.1 Introducción

Una de las características de la arquitectura moderna es el amplio uso de las superficies vidriadas en las fachadas de los edificios. La utilización de estructuras de bajo peso (baja inercia térmica) entrena una considerable evolución de los cocientes entre los ambientes interiores y el clima exterior, y los problemas de confort son presentes.

La envolvente de un edificio separa el espacio interior del ambiente exterior y con la misma modificamos o eliminamos los efectos directos de los parámetros climáticos tal como la temperatura ambiental exterior, la humedad relativa, el viento, la radiación solar, la lluvia, etc. Esta envolvente es tradicionalmente compuesta de dos tipos de materiales, opacos y transparentes, sin olvidar que a veces se utilizan materiales translúcidos.

Cuantitativamente, el efecto de la envolvente depende de su espesor y de las propiedades termo físicas. Los materiales situados en el espacio interior tales como los tabiques, los muebles, influyen sobre las temperaturas interiores modificando la capacidad calorífica de la estructura considerada y las proporciones de absorción de calor producido directamente o penetrando en la construcción.

Cuando las ventanas de un edificio se encuentran abiertas, se establece un flujo de aire exterior hacia el interior, pero aún cuando estas se encuentran cerradas, ofrecen una débil resistencia a los flujos de calor, y el aire puede infiltrarse a través de las juntas entre el cristal y los marcos de las ventanas. A través de los materiales transparentes o translúcidos (vidrio y plásticos) y a través de las ventanas abiertas, la radiación solar penetra y calienta el ambiente interior. La temperatura exterior y las condiciones de la humedad pueden también afectar de una manera directa el ambiente interior, sin olvidar que, cuantitativamente, el efecto del flujo de aire es también función de las propiedades de los materiales.

Antes de hablar de los aspectos cuantitativos de los efectos térmicos de los materiales de construcción, daremos una descripción esquemática para demostrar los flujos de calor y la repartición de las temperaturas relativas para una construcción expuesta a una serie de condiciones climáticas dadas.

En el exterior, la temperatura y la radiación solar obedecen a ciclos de tipo diario y anual; la amplitud de las variaciones depende de la localización geográfica. La temperatura interior sigue el mismo modelo, pero con una cierta modificación que es función de los detalles de la concepción y de la realización [5]. Las principales modificaciones se notan en la amplitud de variaciones y el régimen de las temperaturas máximas y mínimas. Para ilustrar la relación que existe entre las temperaturas exteriores e interiores, vamos a analizar un modelo típico diario.

Antes de la salida del sol, el aire del ambiente exterior y las superficies exteriores de la envolvente de un edificio se encuentran a sus mínimos de temperatura. Después de la salida del sol, la temperatura del aire exterior empieza a subir, llegando a su máximo al medio día. El aumento de la temperatura del aire exterior provoca un flujo de calor sobre las superficies externas de la envolvente del edificio y aumenta su temperatura. La progresión del flujo de calor a través de un muro proveniente de la superficie exterior que está a una temperatura más elevada, puede ser visualizada suponiendo que la envolvente del edificio está dividida en varios fragmentos. El flujo de calor causa en cada fragmento una elevación de la temperatura y el calor utilizado a este efecto se almacena. El calor en exceso es, por consiguiente, transmitido al fragmento siguiente, que es más frío. De esta manera, cada fragmento recibe menos calor y se somete a un aumento de temperatura más débil que el fragmento que le precede. Resulta de esta acumulación de calor por la estructura de la envolvente que la cantidad de calor que alcanza al fragmento interior de todo es más débil que el que llega al fragmento exterior, y que las elevaciones de la temperatura son menores. Cuando la superficie externa alcanza su máximo de temperatura y empieza a enfriarse, el proceso es inverso. Primero, el calor acumulado en el muro viaja en dos direcciones, hacia el interior y hacia el exterior y, después, el flujo entero es expulsado hacia el exterior. En este caso, el proceso puede ser representado como la refrigeración sucesiva de los diferentes fragmentos [5]. De tal forma que los fragmentos del muro son sometidos a un fenómeno cíclico de calefacción y refrigeración.

La amplitud de las oscilaciones internas es más pequeña que aquella a la cual está sometida la superficie externa. El cociente de la amplitud interior sobre la amplitud exterior depende de las propiedades termo-físicas y del espesor de la estructura. Cuando el espesor y la

capacidad térmica de los muros aumenta y que la conductividad térmica de los materiales disminuye, la amplitud de las oscilaciones interiores disminuye (cociente de las amplitudes imperceptible) y el momento donde intervienen los máximos y los mínimos es retardado (desfase más grande).

V.2 Consideraciones generales

V.2.1 Capacidad calorífica y espesor de los muros

Como se ha mencionado antes, la parte externa de la envolvente de una construcción está sometida alternativamente a una calefacción durante el día y una refrigeración durante la noche. El valor de la temperatura de una superficie externa depende esencialmente de su color y de su orientación. Una parte del calor absorbido durante el día calienta la masa del muro y solamente el resto se transmite al interior. El cociente entre el calor absorbido y el calor acumulado en el material depende ante todo de la capacidad calorífica de la envolvente. Es decir del producto de su peso por su calor específico [15]. Así, bajo las variaciones periódicas de las condiciones exteriores, y con un gradiente de temperatura y una resistencia térmica dada, el flujo de calor transferido al interior del edificio decrece cuando la capacidad calorífica de su estructura crece[14].

Por la noche, el calor acumulado por una estructura de gran capacidad calorífica es liberado, lo cual reduce la cantidad de calor pérdida a un nivel inferior a aquello que alcanzaremos con el mismo gradiente de temperatura si hemos considerado solamente la resistencia térmica. Podemos decir que, la capacidad calorífica “modera” la importancia de los flujos entrantes y salientes del edificio, y entonces reduce las fluctuaciones de las temperaturas interiores. Además, introduce una translación temporal en el momento en que intervienen las fases de calefacción y de refrigeración de la temperatura (efecto del desfase).

Una construcción caracterizada por su capacidad calorífica elevada permite entonces, en una proporción considerable, de controlar las condiciones térmicas interiores, sobre todo en las regiones a grandes amplitudes de temperatura diurna y a radiación solar intensa. Más

adelante en este capítulo analizaremos en detalle la influencia de la inercia térmica interior y de la envolvente sobre las fluctuaciones de la temperatura interior.

V.2.1 Color de las paredes exteriores:

El tipo y el color de la superficie externa determinan la cantidad de la radiación solar absorbida por la estructura de la envolvente durante el día, la cantidad de calor pérdida por la radiación de grandes longitudes de onda hacia el espacio durante la noche, y por consiguiente, el régimen de la temperatura de la superficie y del intercambio de calor con la envolvente. En los edificios sin equipamiento de aire acondicionado, el color de las superficies externas es el factor principal que determina el régimen de la temperatura de los muros incidentes a la radiación solar directa, y por consiguiente, condiciona el confort térmico de los ocupantes. El efecto del color exterior sobre la temperatura de los muros de separación expuestos al sol está relacionado con la resistencia térmica y la capacidad calorífica de la estructura de la envolvente. La resistencia térmica y la capacidad calorífica aumentan con el espesor.

V.2.3 Orientación y sus efectos sobre los ambientes interiores

La orientación de un edificio es la dirección hacia la cual da su fachada exterior. La elección de la orientación está sometida a varias consideraciones, tal la vista en diferentes direcciones, las vías, la topografía de la zona, la posición de las fuentes de energía y la naturaleza del clima.

La orientación del edificio afecta el ambiente interior de dos maneras:

- La radiación solar y sus efectos de calentamiento sobre los muros y las piezas orientadas según diferentes direcciones.
- Los problemas de la ventilación respecto a la dirección de los vientos dominantes y la orientación de la construcción.

Tomar en cuenta los dos factores puede conducir a exigencias de orientación contradictorias. Así, en las regiones cálidas, una orientación puede permitir la obtención de temperaturas bajas, mientras que otra permite alcanzar velocidades de aire más elevadas.

La importancia del efecto de la orientación de los muros sobre el ambiente interior depende mucho de la concepción y de las características constructivas del edificio. La orientación tiene un efecto muy claro sobre la ventilación. La ubicación de las ventanas respecto a los vientos dominantes tiene una influencia considerable sobre la ventilación interior. La principal exigencia para que una ventilación sea satisfactoria es de prever oberturas en las fachadas “a los vientos” del edificio que sobre la fachada “bajo el viento”, exigencia confirmada por los estudios en el laboratorio y sobre el terreno. La orientación combinada con el tamaño de las oberturas tiene una influencia directa sobre la captación de la radiación solar directa. Una orientación sur permite una amplia captación, mientras que una orientación norte permite una gran refrigeración por el intercambio de calor por transmisión y por las corrientes de aire fresco del norte a la sombra. Finalmente, no podemos olvidar la importancia de la orientación sobre el aprovechamiento de la iluminación natural. En este capítulo, trataremos en detalle el efecto de la ventilación sobre la evolución de la temperatura y las ganancias interiores.

V.2.4 Ventanas

Cuantitativamente, los efectos térmicos de las ventanas dependen del tamaño de esas respecto al tamaño del espacio interior calentado por la penetración de la radiación solar directa. Sin embargo, existen otros factores que tienen una influencia sobre los efectos de las ventanas y su protección, como las condiciones de ventilación y las propiedades termo-físicas de los materiales. El efecto térmico de una ventana depende mucho de las condiciones de protección. Cuando las ventanas son abiertas y protegidas, la aumentación de sus dimensiones produce temperaturas interiores muy próximas a las temperaturas exteriores. Esto es debido no solamente a las proporciones de ventilación elevadas por el alargamiento de las ventanas, pero también a una resistencia térmica menor de las superficies vidriadas comparando con la resistencia de un muro ordinario. Pero cuando las ventanas no son protegidas, una aumentación de sus tamaños provoca aportes de radiación solar, lo que eleva las temperaturas interiores. El tamaño de esta elevación de temperatura depende de los rayos solares incidentes sobre la ventana.

El efecto de las dimensiones de las ventanas sobre las temperaturas interiores bajo diferentes proporciones de ventilación y con diversos tipos de construcciones ha sido estudiado por A- Loudon en el Centro de Investigación de los Edificios en Inglaterra [16]. En este capítulo, trataremos en detalle el efecto del tamaño de las ventanas sobre la temperatura interior.

Habrà que notar que distintas combinaciones de variables climáticas y parámetros de la construcción del edificio pueden ser repartidos en niveles según amplios criterios diferentes, que dependen de los objetivos a los cuales esa combinación es necesaria. La intención de este trabajo es estudiar el efecto de cada variable climática (temperatura exterior, radiación solar, ventilación, etc.) y de cada característica constructiva del edificio (inercia térmica, tamaño de las aberturas, tipo de protección de la piel, ganancias internas, usuario, etc.) sobre la respuesta térmica dinámica interior.

En este capítulo analizaremos la influencia de modificar uno o varios parámetros ambientales (radiación solar, ventilación) sobre la respuesta interior. Al mismo tiempo, observaremos el efecto que tiene el cambio de uno o varios elementos de la construcción (ampliar o reducir el tamaño de los dispositivos de la construcción) sobre las fluctuaciones interiores de la temperatura.

Para lograr este objetivo, hemos efectuado mediciones de temperatura y radiación solar en edificios reales asentando las características constructivas y las condiciones ambientales de las mediciones. El modelo numérico utilizado en el capítulo anterior nos permite descubrir el efecto de los cambios de las variables ambientales o elementos de la construcción sin la necesidad de hacer mediciones para cada condición dada. Los resultados de los cálculos efectuados gracias al modelo numérico son dados para permitir la percepción de la influencia del tamaño de los diferentes materiales y las propiedades termo-físicas de estos sobre la proporción de las oscilaciones interiores de temperatura. Dos tipos de viviendas son considerados en este estudio. Los dos tienen casi la misma orientación, pero son distintos en cuanto a la distribución de la inercia interior y a la forma de la piel de la vivienda.

V.3 Aplicaciones

V.3.1 Vivienda con gran abertura vidriada al sur

La vivienda en estudio es la misma del capítulo 5. El piso es de una topología urbana tradicional, dentro de las características constructivas de la ciudad de Barcelona.

La estructura portante es de hormigón, los muros son de ladrillo y está rodeado por otros pisos similares, con excepción de la fachada principal orientada aproximadamente al Sur (Sur 15° Este.) El piso presenta una gran ventana orientada al sur, de un tamaño total de 8 m², lo que permite un aporte solar considerable.



Diapositiva 1: Foto desde el interior de la vivienda en cuestión. Se ve la gran ventana de la fachada principal y las sondas de mediciones de la temperatura y la radiación en el interior, y el sistema de adquisición de datos

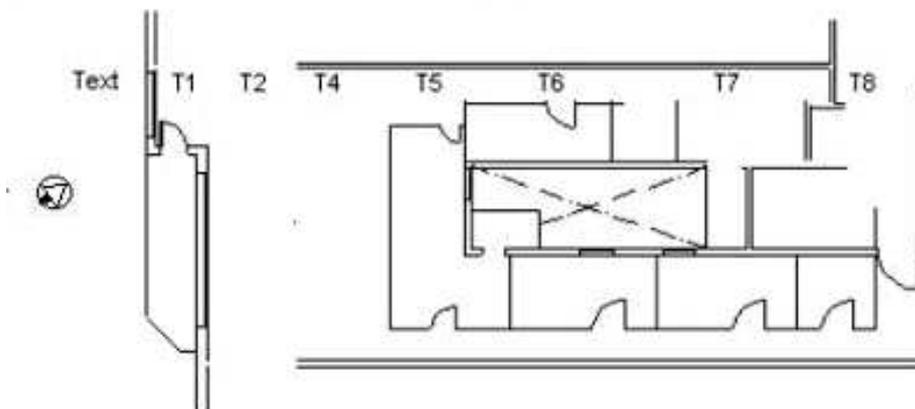


Figura 1: dibujo en planta de la vivienda de mediciones

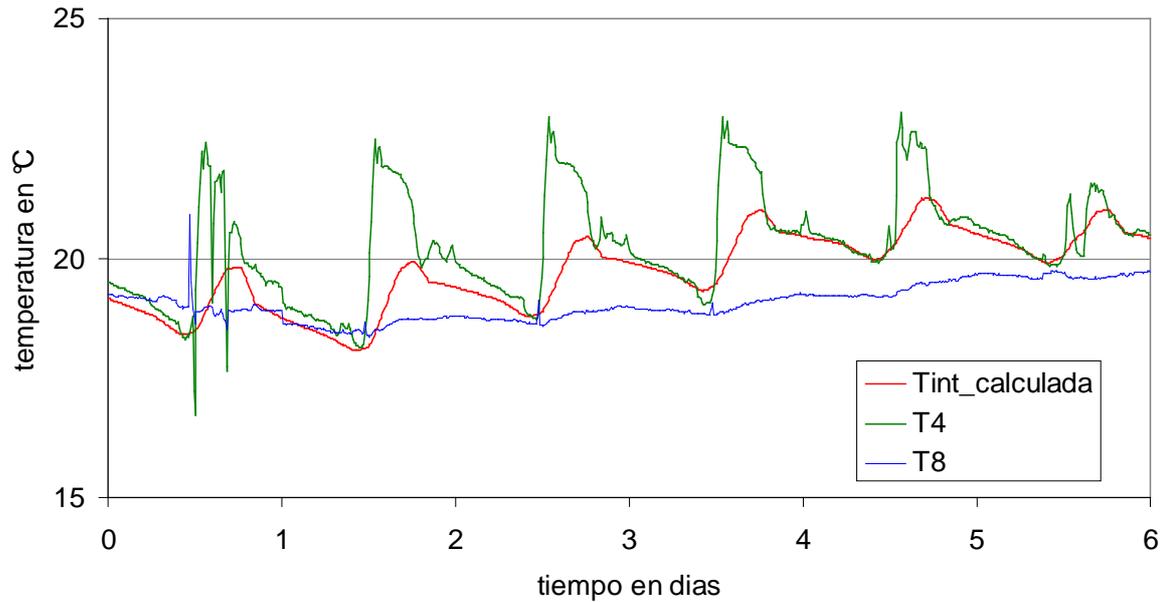
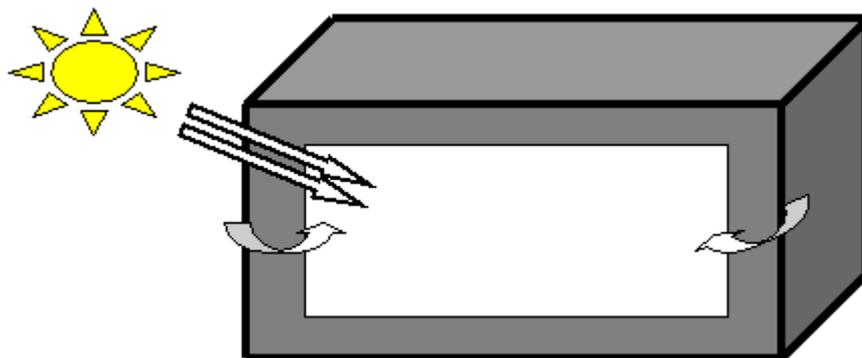


Figura2: Evolución de las temperaturas $T_{int_simulada}$, T_4 y T_8 . Persianas abiertas.

V.3.2 Sensibilidad de la respuesta interior a los cambios: Presencia de la radiación solar

El intervalo de mediciones hechas en el piso corresponde a 6 días desde el 13 hasta el 18 de enero 2003. En esta parte de estudio, se tendrá en cuenta la radiación solar incidente. Es decir que el cálculo se hará con la condición de protección de la fachada principal “persianas abiertas”.



Se ve una diferencia en las oscilaciones de las temperaturas interiores según nos dirigimos de la abertura principal al fondo de la vivienda. A partir de esta observación el análisis que viene será a base de una temperatura interior en promedio.

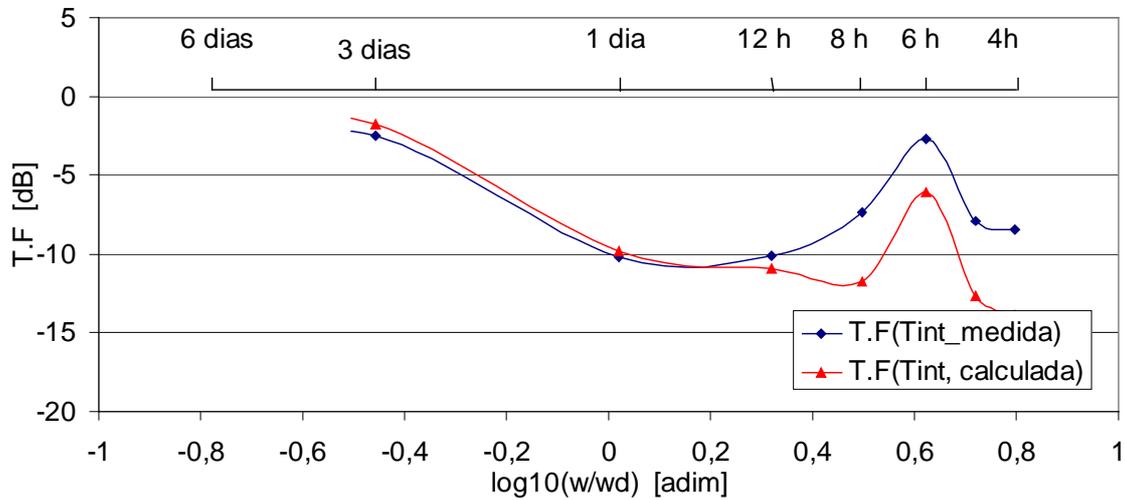


Figura2: Evolución de las funciones de transferencia medida y simulada.

La construcción de la función de transferencia de la vivienda se hizo bajo las condiciones normales de los componentes interiores y de la piel del edificio.

Las figuras construidas después de efectuar los cambios en la construcción del edificio o bien en los parámetros ambientales serán comparadas con las figuras de simulación numérica del caso normal

V.3.2.1 Respuesta interior al multiplicar la inercia interior y de la piel por dos

La inercia térmica tiene un efecto directo sobre las oscilaciones de la temperatura interior. En este primer análisis, trataremos de averiguar cómo puede perturbar el cambio de la inercia interior y de la piel sobre las fluctuaciones interiores a diferentes frecuencias. Los demás parámetros ambientales y constructivos se conservan.

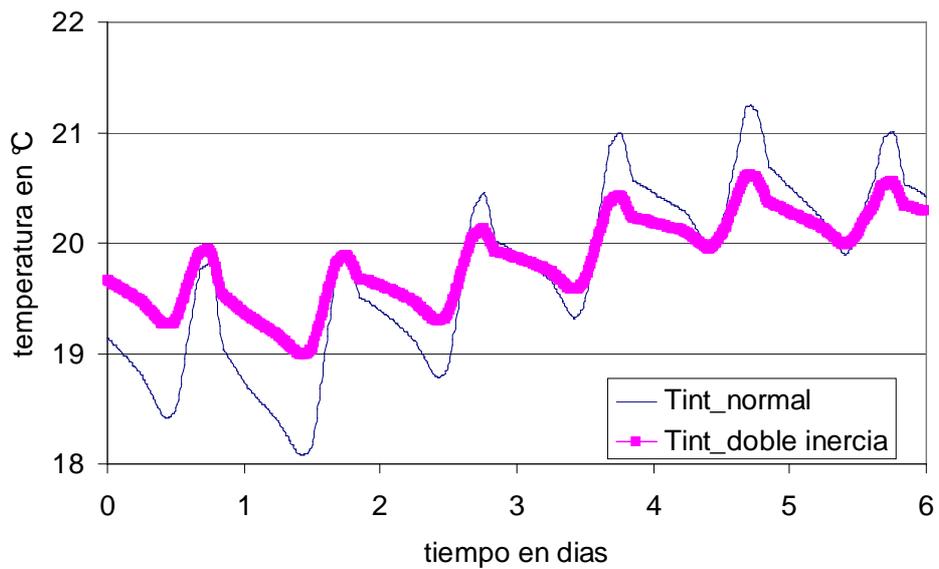
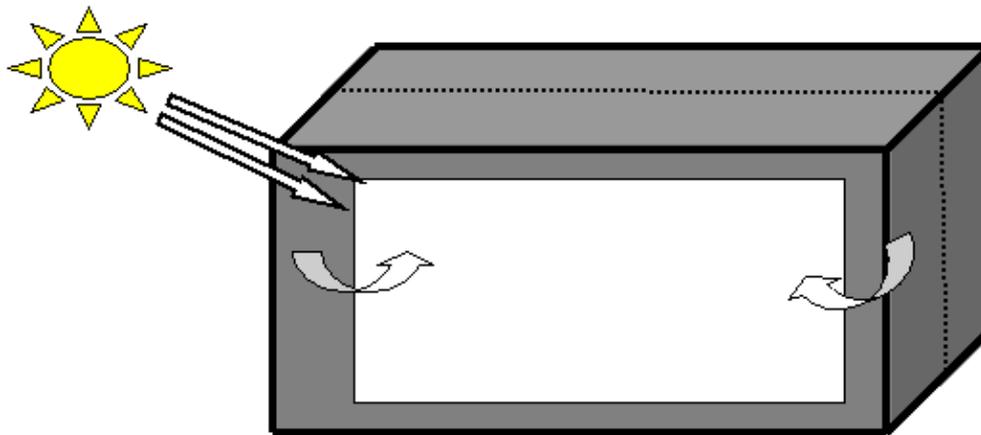


Figura3: Comparación de las evoluciones de las temperaturas interiores simuladas para la inercia normal y para la inercia doble

Al multiplicar la inercia térmica interior y de la piel del edificio, la amplitud de las oscilaciones interiores se ha amortiguado de una forma considerable.

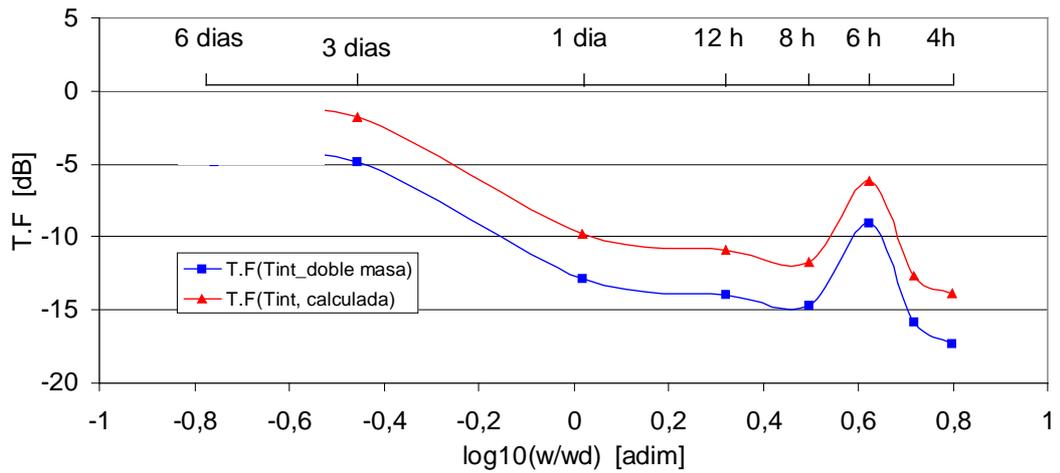
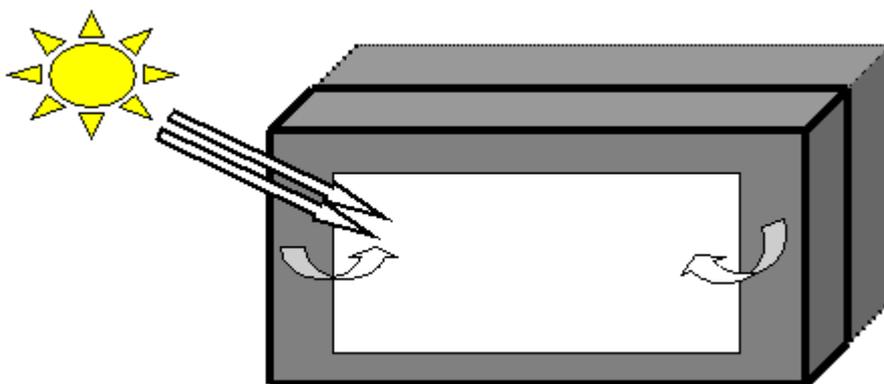


Figura4: Comparación de las funciones de transferencia interiores simuladas para la inercia normal y para doble inercia

El aumento de la inercia térmica ha amortiguado claramente las oscilaciones interiores. El efecto de este cambio se nota para todas las frecuencias. Se han bajado aproximadamente un 50% las fluctuaciones interiores para todas las frecuencias.

V.3.2.2 Respuesta interior al dividir la inercia interior y de la piel por dos



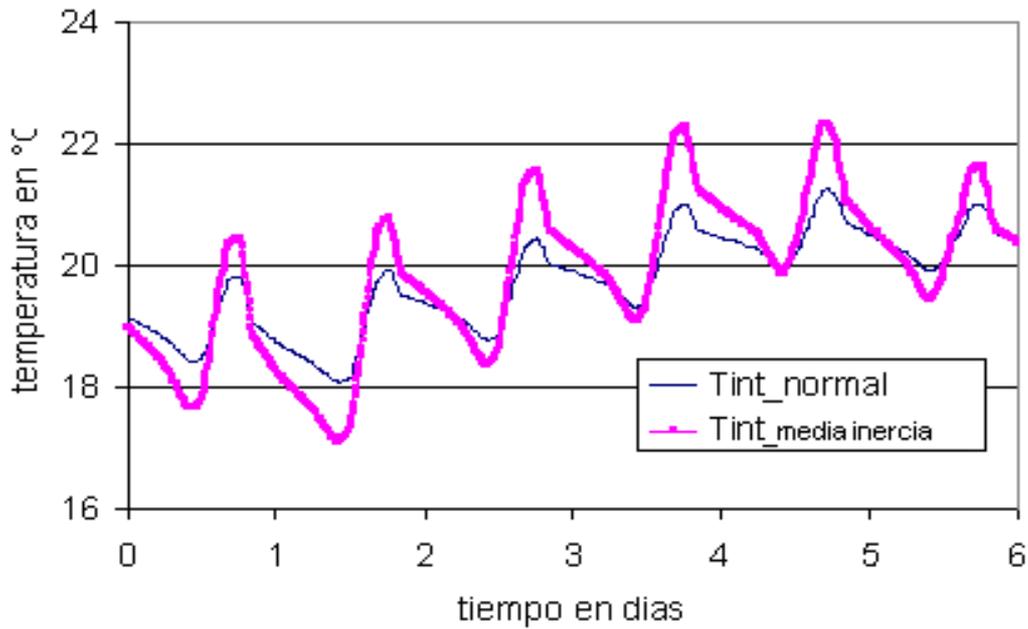


Figura5: Comparación de las evoluciones de las temperaturas interiores simuladas para la inercia normal y para la mitad de inercia.

El segundo análisis consiste en reducir la inercia interior y de la piel a la mitad de lo que es en realidad.

Disminuir la inercia térmica interior hace que la resistencia al calor sea menor, lo cual aumenta la amplitud de las oscilaciones exteriores. Veremos como se refleja esto en el diagrama frecuencial.

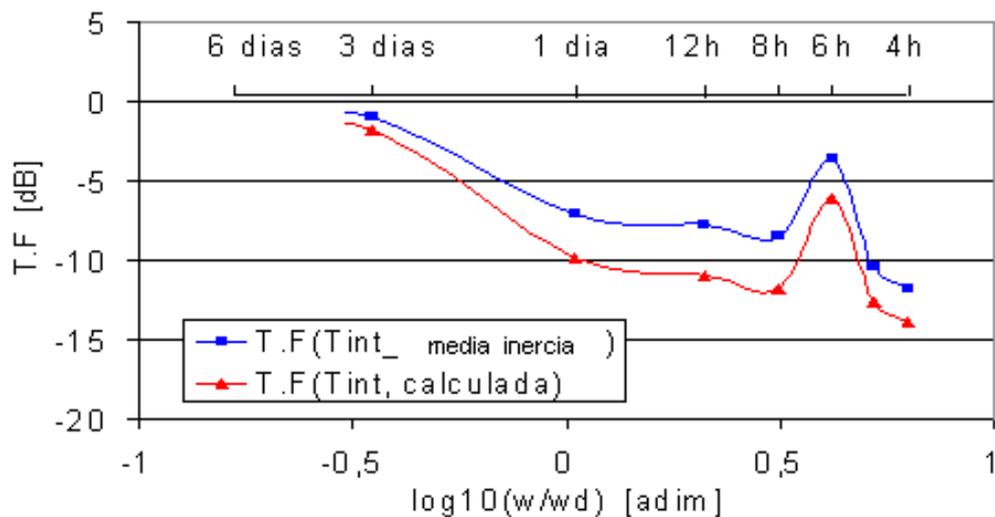


Figura6: Comparación de las funciones de transferencia interiores simuladas para la inercia normal y para la mitad de inercia

Esta vez, la amplitud de las oscilaciones interiores ha crecido. De la misma forma, el efecto es general para todos los rangos de frecuencias, aunque se ve que el porcentaje de los cambios en las oscilaciones es diferente de una frecuencia a otra. En las bajas frecuencias, las oscilaciones interiores han subido un 24 % para la frecuencia de *un día*. En la frecuencia de *3 días* la diferencia es de 13%.

El porcentaje de las oscilaciones va disminuyendo a medida que nos dirigimos de las bajas frecuencias a las frecuencias medias. A la frecuencia de *1 día*, el cambio es de un 9% aproximadamente. La diferencia vuelve a ser importante en las altas frecuencias, donde se registra una subida de más del 19% para la frecuencia de *6 horas*.

V.3.2.3 Dividir la inercia por dos y reducir el tamaño de las ventanas a la mitad

Veremos qué influencia tiene combinar dos características opuestas sobre el porcentaje de las oscilaciones interiores (bajar la inercia aumenta las oscilaciones, y bajar el tamaño de las oberturas las reduce).

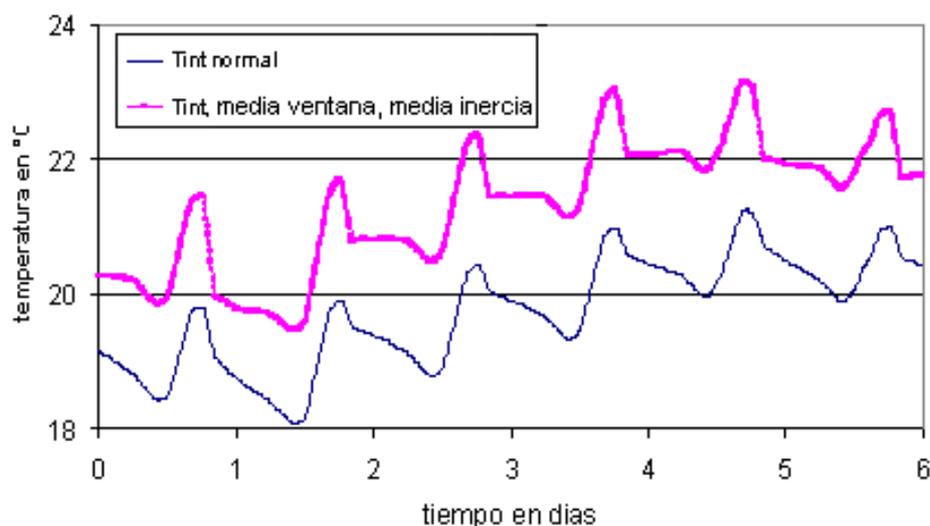
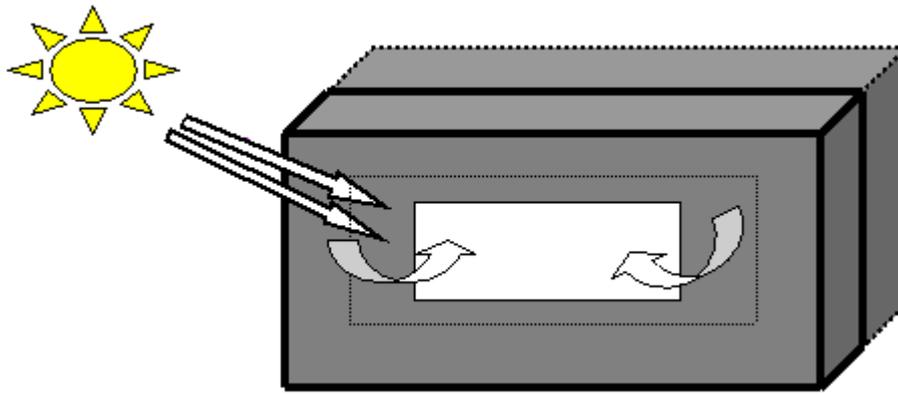


Figura7: Comparación de las evoluciones de las temperaturas interiores simuladas: parámetros interiores sin cambios y mitad ventana combinado con mitad inercia.



La amplitud de las oscilaciones es muy similar en ambos casos, mientras que se observa una translación de aproximadamente 1.5°C de la figura correspondiendo a mitad ventana, mitad inercia. Se puede decir que al disminuir el tamaño de las ventanas, las pérdidas efectivas a través de la baja resistencia del cristal han disminuido también, lo cual implica que la temperatura interior se mantiene más alta.

Con otras palabras, al disminuir el tamaño de las superficies vidriadas, se crecen las ganancias estáticas en el interior a causa de las bajas pérdidas por transmisión del cristal. Sin embargo, la baja inercia interior y de la piel sigue afectando el tamaño de las oscilaciones interiores, aunque no de la misma forma que en el caso anterior (sin modificar el tamaño de las aberturas). El orden de las oscilaciones se verá más claramente analizando los mismos datos en la figura frecuencial.

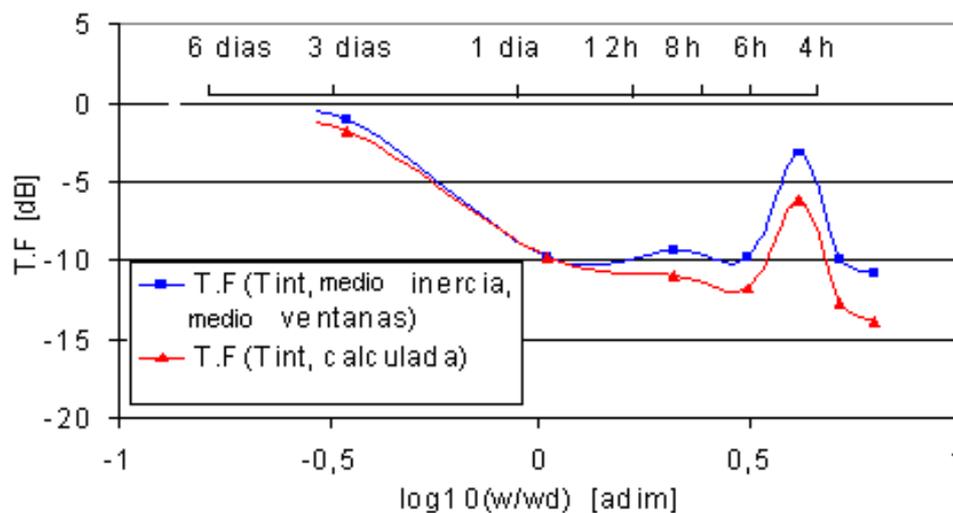


Figura8: Comparación de las funciones de transferencia interiores simuladas para la inercia normal y para la mitad de inercia con mitad ventana

En la figura de la función de transferencia se ve que, en las frecuencias bajas, las oscilaciones siguen siendo las mismas que en el caso de los parámetros normales, hasta la frecuencia de *un día*. A partir de la frecuencia de *12 horas* las oscilaciones interiores empiezan a subir y notamos una diferencia de aproximadamente 23.5% más en la frecuencia de *6 horas*. La diferencia sigue siendo importante para todas las frecuencias que vienen después.

Se puede decir que la condición de disminuir la inercia térmica interior, de la piel a la mitad y el tamaño de las ventanas hasta la mitad crea un aumento importante de las temperaturas interiores, mientras que la amplitud de las oscilaciones sigue siendo igual sobre todo en las bajas frecuencias.

Reducir la inercia térmica interior afecta la resistencia de la vivienda al calor, y las oscilaciones suelen ser más importantes. Sin embargo, cuando hablamos de reducir el tamaño de las ventanas es decir reemplazar un parte de las superficies transparentes con muros opacos; las pérdidas efectivas por las superficies vidriadas disminuyen no sólo por el intercambio por transmisión sino también por la resistencia térmica de las paredes opacas que es más grande que la resistencia de las láminas de vidrio, y por consiguiente el intercambio de calor con el exterior va bajando a causa del aumento de la resistencia de las paredes exteriores. El calor ganado por la radiación solar directa (durante la simulación se consideró la presencia de la radiación solar directa) queda atrapado en el interior y, de esta forma, crecen las ganancias estáticas interiores.

Es una buena manera para aumentar las ganancias estáticas interiores y al mismo tiempo conservar casi el mismo nivel de la amplitud de las oscilaciones interiores.

V.3.2.4 Multiplicar la inercia por dos y dividir el tamaño de las ventanas por dos

Si fijamos la misma característica de la inercia térmica del caso anterior, y reducimos el tamaño de las ventanas a la mitad, veremos el efecto que puede tener sobre la respuesta interior al disminuir las superficies captadoras de la radiación directa del día y también al disminuir las pérdidas efectivas por transmisión de las superficies vidriadas.

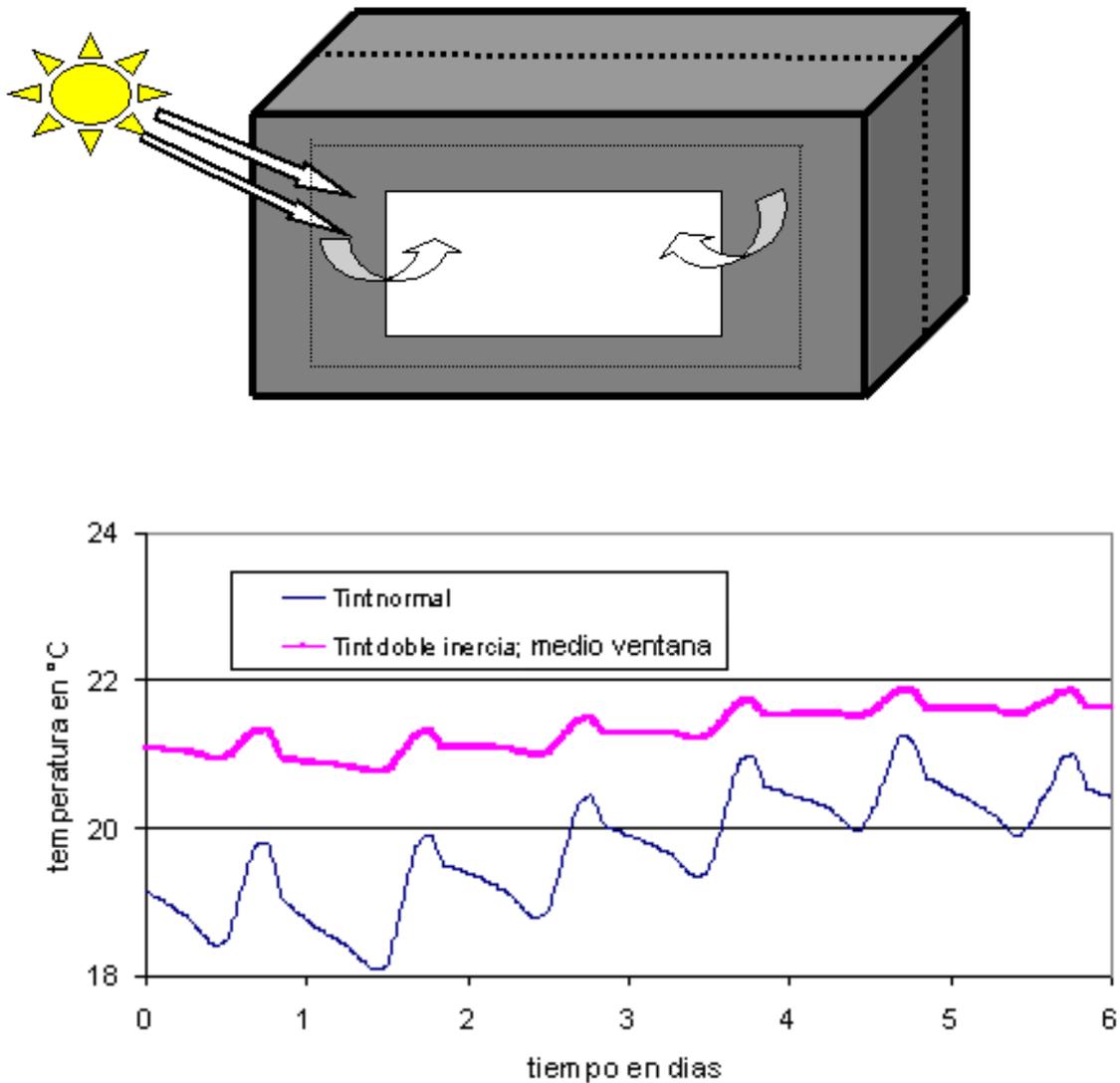


Figura13: Comparación de las evoluciones de las temperaturas interiores simuladas: parámetros interiores sin cambios y mitad ventana combinado con doble inercia.

La amplitud de oscilación de la temperatura interior es muy baja. Se ve un salto en las ganancias estáticas, la temperatura interior ha subido casi dos grados centígrados. Se puede decir que al disminuir el tamaño de las ventanas disminuyen las pérdidas de calor hacia el exterior, y el calor ganado por la radiación solar directa durante las horas del sol se queda atrapado y absorbido por la masa interior.

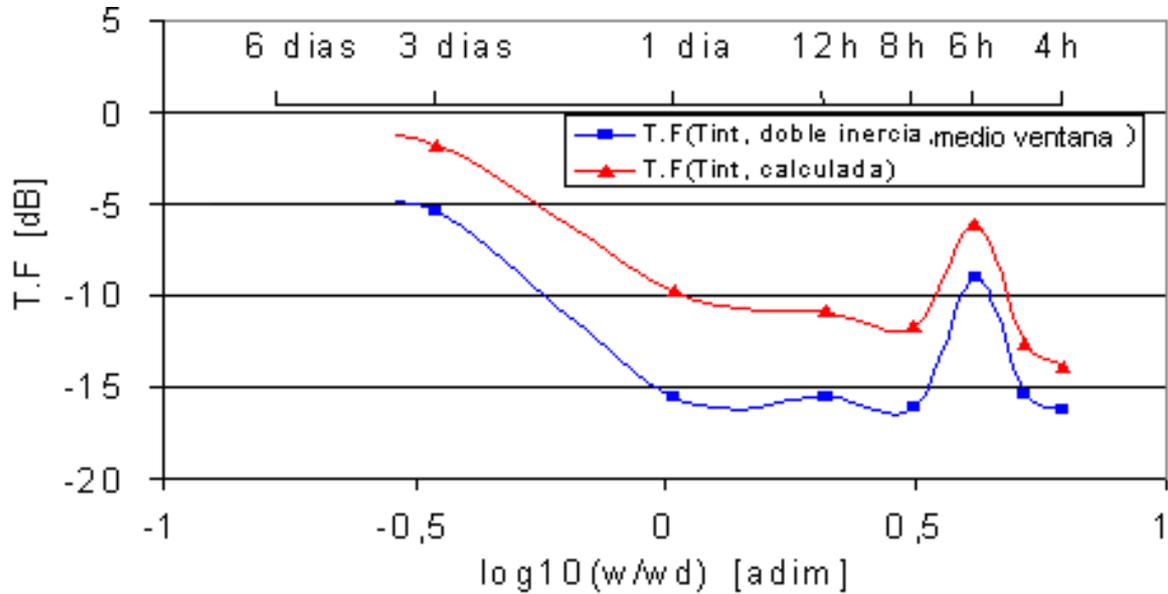


Figura19: Comparación de las funciones de transferencia interiores simuladas para la inercia normal y para la doble inercia con mitad ventana

En el gráfico frecuencial se ve claramente la amortiguación en las amplitudes debido a la reducción del tamaño de las ventanas a la mitad. La gran diferencia en las oscilaciones se ve en las bajas frecuencias donde la amplitud ha bajado un 37% comparando con el caso normal a la frecuencia de 6 días. En las frecuencias medias, la amplitud sólo ha bajado un 7.6% para la frecuencia de 1 día. La diferencia en las oscilaciones sigue siendo menor si nos dirigimos a altas frecuencias, aproximadamente un 10% a la frecuencia de 6 horas.

Cuando reducimos el tamaño de las ventanas, aumentamos la proporción de la superficie opaca de la fachada principal, por lo tanto se aumenta la resistencia al calor por conducción. Es lo que explica la baja amplitud de oscilación en las frecuencias medias. Del mismo modo, en las frecuencias altas, al disminuir el tamaño de las ventanas se impide la penetración de grandes cantidades de radiación solar directa, y también se impide el escape fácil y rápido del calor acumulado durante el día soleado. Estas dos características crean una menor oscilación en las altas frecuencias.

V.3.2.5 Conservar la misma inercia y dividir el tamaño de las ventanas por dos

Para notar mejor el efecto del tamaño de las ventanas sobre el nivel de las oscilaciones interiores, hemos conservado la misma inercia interior y de la piel, y hemos reducido el tamaño de las ventanas a la mitad.

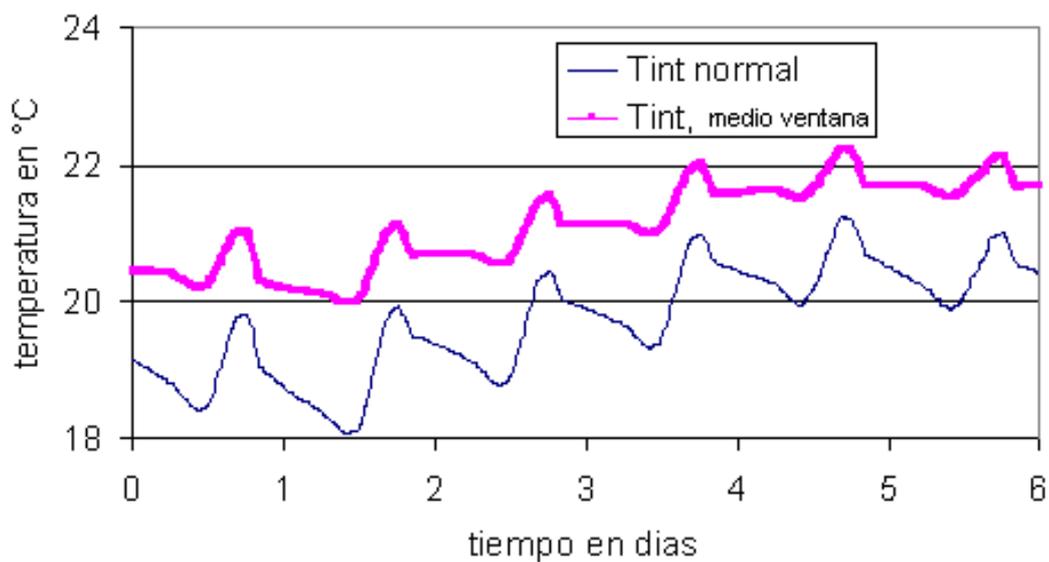
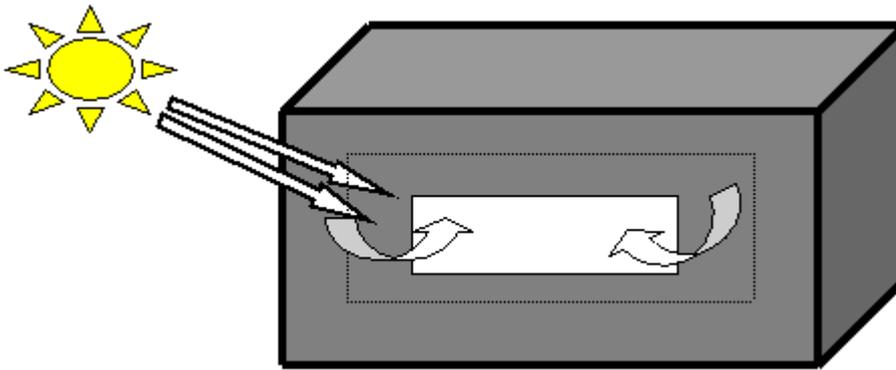


Figura15: Comparación de las evoluciones de las temperaturas interiores simuladas: parámetros interiores sin cambios y mitad ventana combinado con inercia normal.

Las ganancias estáticas han subido de aproximadamente un 1°C cuando hemos reducido el tamaño de las ventanas a la mitad. Como se ha dicho antes, al reducir la superficie transparente de la piel, reducimos las pérdidas efectivas hacia el exterior, ya que para la época del año, las horas de sombra son mucho más grande que las horas del sol, y el ambiente exterior, sobre todo durante las noches, es muy frío, lo cual provoca un flujo de pérdidas a través la conducción y transmisión de las superficies acristaladas.

La amplitud de oscilación es menor debido a la reducción del tamaño de las aberturas y, por consiguiente, una reducción en el tamaño de las ganancias por radiación directa.

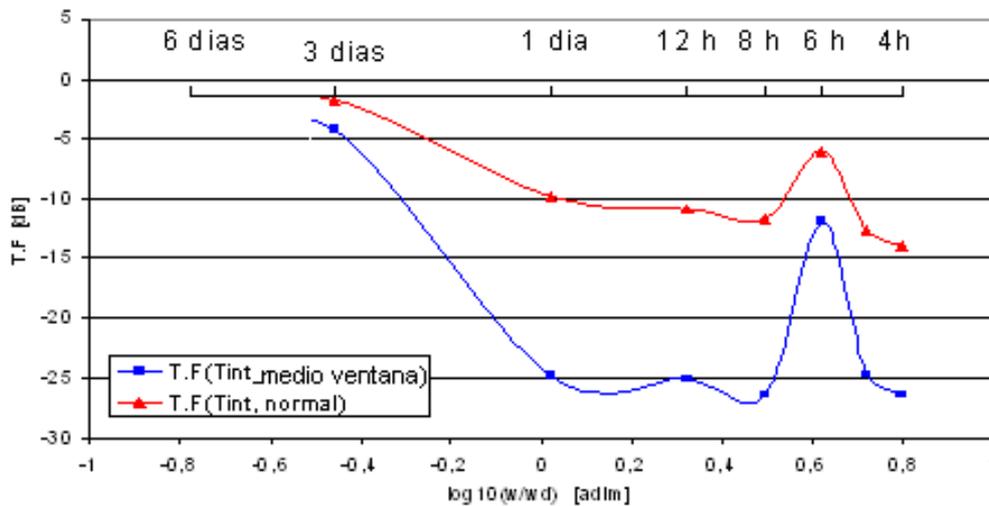


Figura16: Comparación de las funciones de transferencia interiores simuladas para la inercia normal y para la inercia normal con mitad ventana

Analizando la figura en el campo de frecuencias, se puede decir que, para el tipo de la vivienda, al reducir el tamaño de las aberturas a la mitad y conservar todos los otros parámetros constantes, reducimos el porcentaje de las oscilaciones a las frecuencias medias, mientras el orden de las oscilaciones interiores conserva la misma amplitud en las bajas frecuencias y altas frecuencias.

V.3.2.6 Conservar la misma inercia y orientación norte

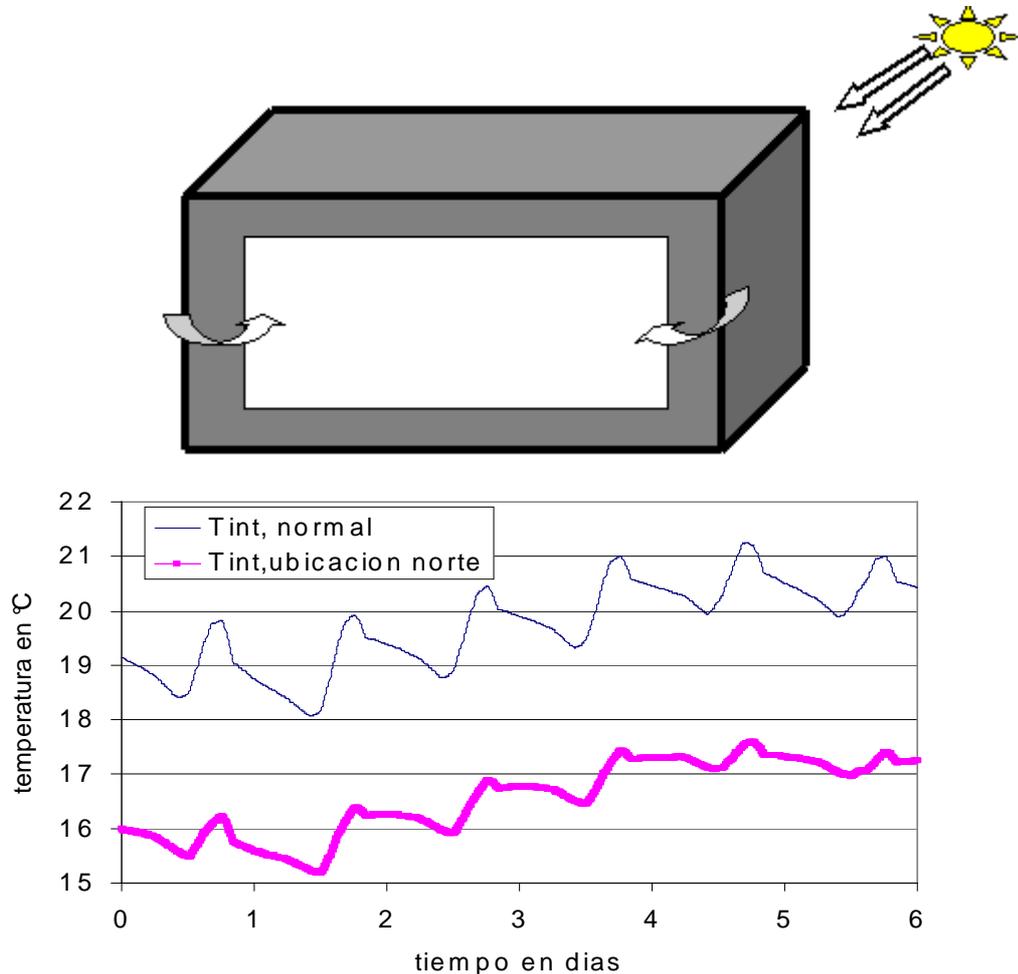


Figura19: Comparación de las evoluciones de las temperaturas interiores simuladas: parámetros interiores sin cambios y inercia normal con orientación norte (ausencia de la radiación solar directa).

Hasta hora, sólo hemos cambiado los parámetros de la inercia y el tamaño de las ventanas. En este nuevo caso, trataremos de ver el efecto que tiene la ausencia de la radiación solar directa sobre las fluctuaciones interiores. En el modelo numérico hemos fijado la hipótesis de que la vivienda no le toca el sol directo, y conservamos el mismo tamaño de las ventanas. Esta característica de control no permite que el interior reciba calor por radiación directa, pero sigue perdiendo calor por transmisión.

La hipótesis de la fachada norte del edificio significa además que no hay penetración de la radiación solar en el interior, no toca el sol en toda la fachada, por lo tanto eliminamos también las ganancias internas por conducción de las paredes de la piel.

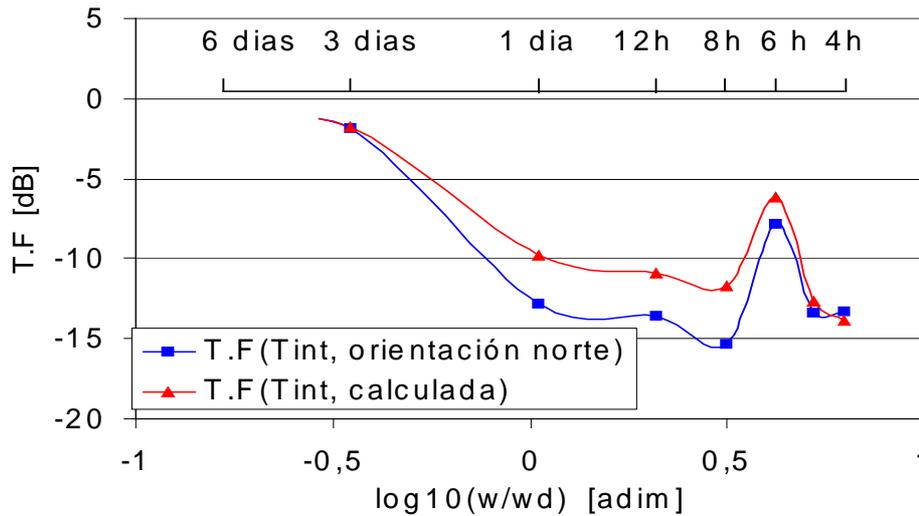
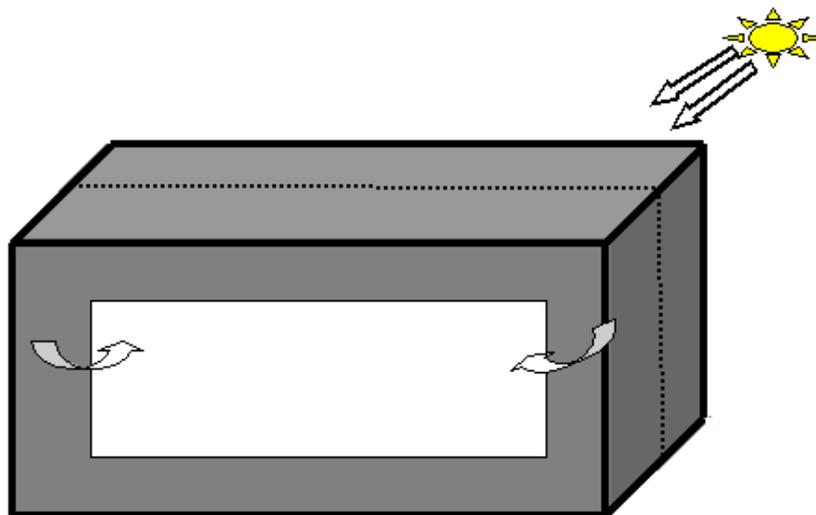


Figura20: Comparación de las funciones de transferencia interiores simuladas para la inercia normal y para la inercia normal con orientación norte de las ventanas

La radiación solar diaria no afecta directamente las bajas frecuencias, y en el gráfico frecuencial se ve claramente que las dos amplitudes de oscilación son idénticas para las frecuencias de 6 días y 3 días. Sin embargo, en las frecuencias medias, se empieza a notar una caída en las oscilaciones de un 10% aproximadamente para la frecuencia de 1 día. Las oscilaciones en las frecuencias medias son debidas, en este caso, a la ventilación y a las pérdidas por conducción de las paredes. En las altas frecuencias, se nota una ligera caída en las ganancias ya que no hemos eliminado el calor ganado por la radiación directa. Se puede decir que la radiación solar directa sube las oscilaciones de las frecuencias medias.

V.3.2.7 Multiplicar la inercia por dos y sin radiación solar directa



Si se multiplica la inercia térmica interior y de la piel por dos, y se elimina la radiación solar directa, se amortiguará la amplitud de las oscilaciones interiores a causa de la inercia, y bajarán las ganancias estáticas por impedir la captación directa.

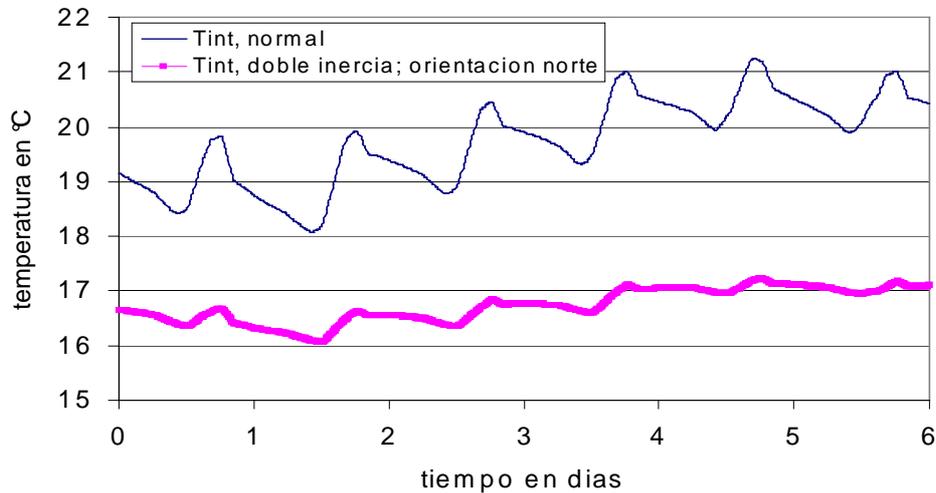


Figura21: Comparación de las evoluciones de las temperaturas interiores simuladas: parámetros interiores sin cambios y doble inercia con ausencia de la radiación solar directa (orientación norte).

Las nuevas oscilaciones de la temperatura interior son muy suaves, la diferencia en las ganancias estáticas es de aproximadamente 2°C. Es la misma diferencia registrada en el caso interior (Figura19) cuando se calculó la temperatura interior sin ninguna captación solar.

El único cambio se puede registrar entre los dos casos, que al multiplicar la inercia interior por dos, disminuyen las amplitudes de las oscilaciones y la temperatura en el interior no reacciona de una forma muy directa a los cambios diarios de la temperatura exterior.

Para apreciar mejor el efecto de la ausencia de la radiación solar y la del aumento de la inercia térmica interior sobre el porcentaje de las oscilaciones interiores, analizaremos los mismos datos en el espacio frecuencial.

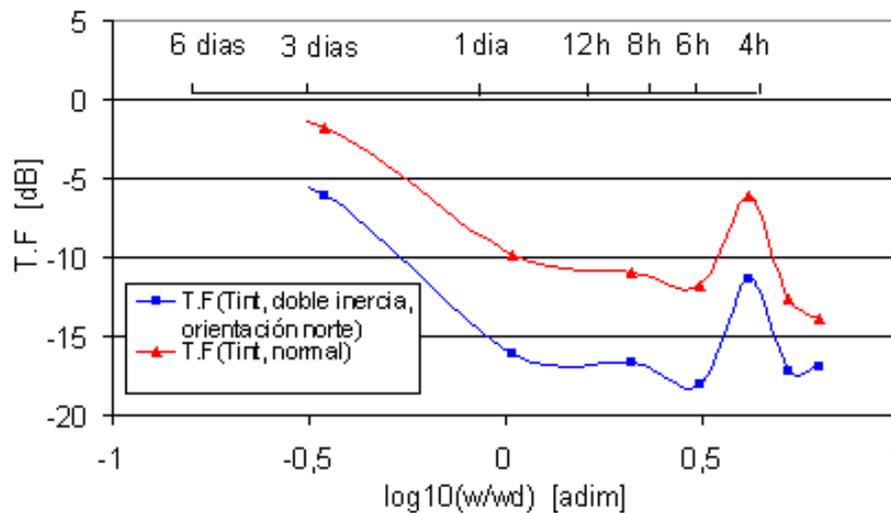


Figura22: Comparación de las funciones de transferencia interiores simuladas para la inercia normal y para la doble inercia con ventanas orientadas al norte.

La diferencia entre este caso y el caso de la orientación norte con la inercia normal reside en la amplitud de las oscilaciones y su distribución para todos los rangos de frecuencias. Como se esperaba, al aumentar la inercia interior y de la piel, las oscilaciones interiores disminuyen, pero además de esto se ve que las amplitudes interiores han disminuido para todas las frecuencias, se nota una translación de la curva de la función de transferencia hacia abajo (valores logarítmicos más negativos).

De esta comparación podemos concluir que la modificación del tamaño de las aberturas de la fachada principal afecta de una forma muy especial las oscilaciones correspondientes a las frecuencias medias. Las modificaciones en el tamaño de la inercia afecta, por lo tanto, todas las frecuencias. Al reducir el tamaño de las aberturas vidriadas, disminuyen las pérdidas por conducción y por transmisión hacia el exterior, lo cual permite un aumento en las temperaturas estáticas interiores y viceversa.

V.3.2.8 Dividir la inercia por dos y sin radiación solar directa

Para completar el análisis del efecto de la inercia térmica combinado con la ausencia de la radiación solar, esta vez hemos reducido la inercia interior y de la piel a la mitad y hemos conservado el tamaño de las ventanas con la misma orientación norte.

Evidentemente, las oscilaciones interiores aumentarán por construcción ligera y por la pobre resistencia a las fluctuaciones exteriores. Mientras, que el efecto de la orientación norte y la pérdida por las ventanas persiste, lo cual provoca una disminución de la temperatura media interior como se verá en la figura 23.

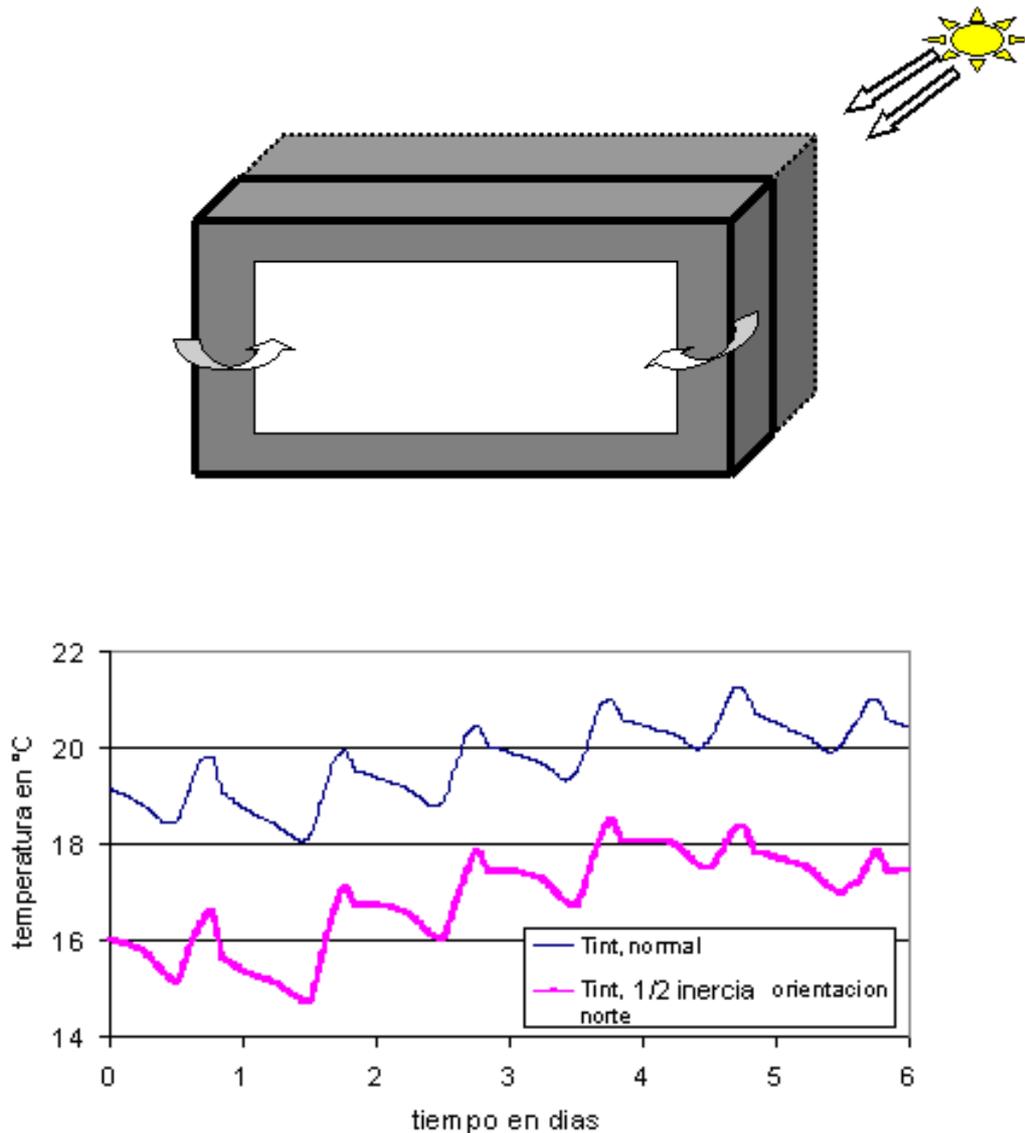


Figura23: Comparación de las evoluciones de las temperaturas interiores simuladas: parámetros interiores sin cambios, mitad inercia con la orientación norte.

Bajar la inercia térmica interior y cambiar la orientación sur por la orientación norte es una buena solución para conservar las mismas oscilaciones interiores y bajar la temperatura media interior 3 grados por debajo de la registrada.

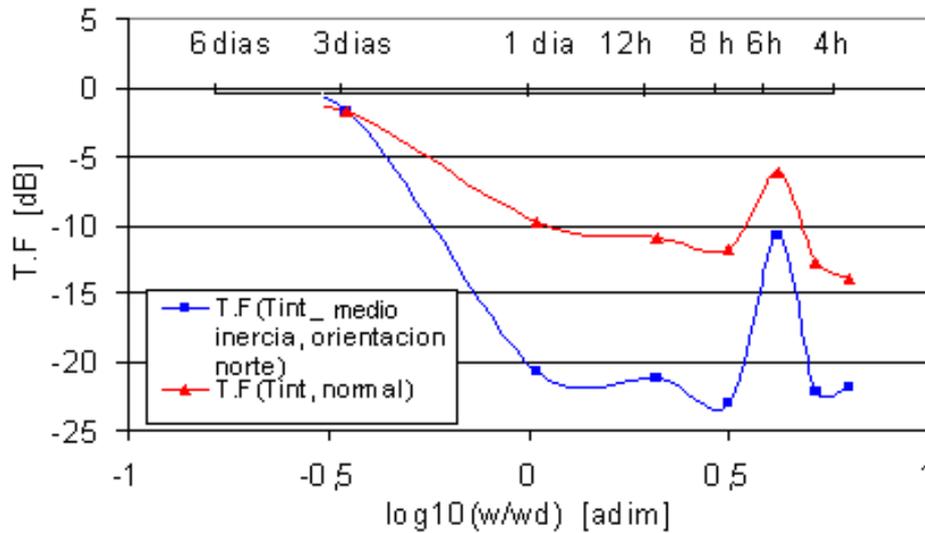


Figura24: Comparación de las funciones de transferencia interiores simuladas para la inercia normal y para mitad inercia con ventanas orientadas al norte.

Comparando las dos figuras, se ve una coincidencia en las oscilaciones para las frecuencias medias y altas, mientras que se nota una diferencia en las oscilaciones en las bajas frecuencias, (un 23.15% de diferencia aproximadamente a la frecuencia de 6 días). Es el resultado esperado, ya que no hubo ningún cambio en el tamaño de las aberturas de la piel, y por lo tanto, las oscilaciones en las frecuencias siguen siendo las mismas.

En las altas frecuencias, las pérdidas por transmisión son las mismas que en el caso de inercia normal, y las oscilaciones son debidas al calor intercambiado y causado por las actividades de los usuarios.

V.3.2.9 Dividir la inercia y el tamaño de las ventanas por dos con orientación norte

Otra posibilidad de edificio ligero con la mitad de ventanas orientadas al norte. La oscilación interior aumenta mientras que las pérdidas estáticas disminuyen.

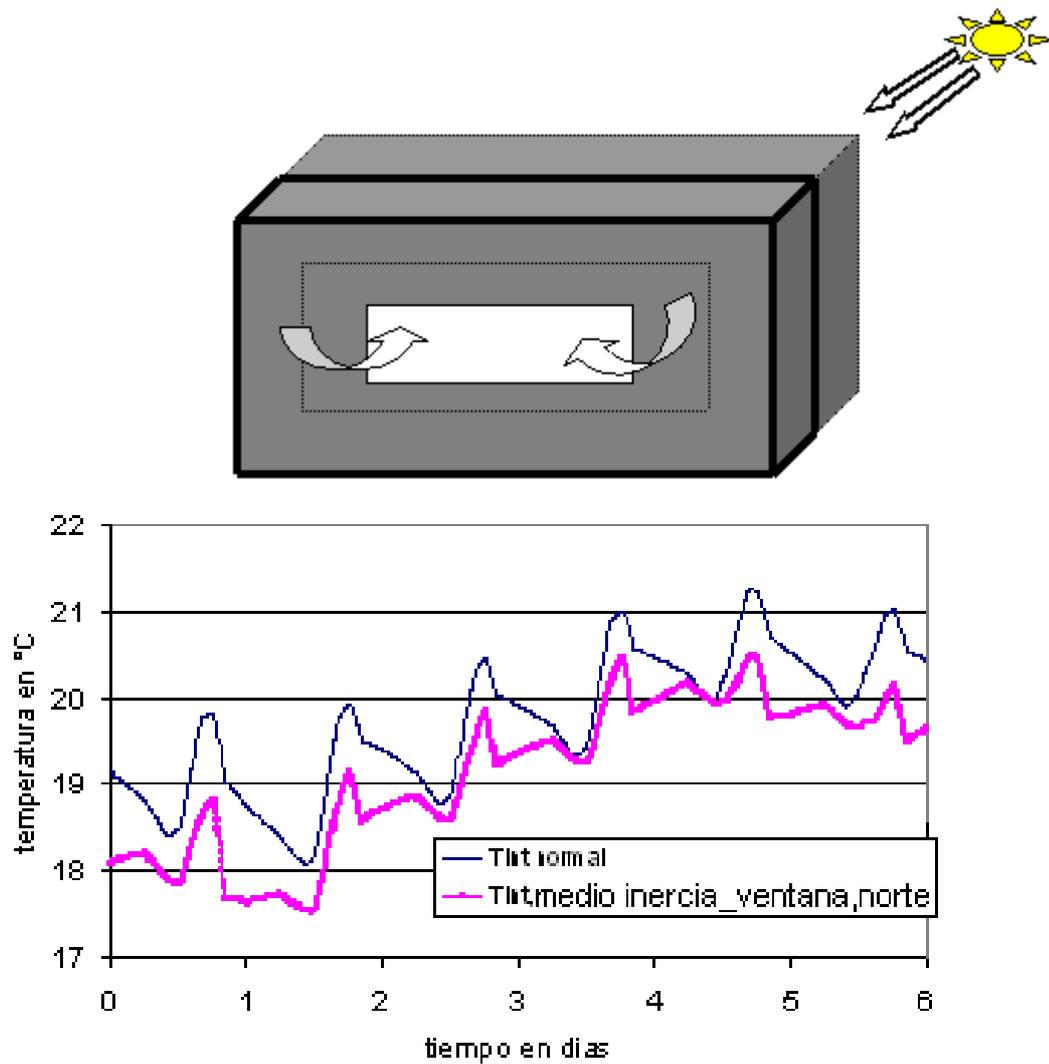


Figura25: Comparación de las evoluciones de las temperaturas interiores simuladas: parámetros interiores sin cambios y mitad inercia y mitad ventana con ausencia de la radiación solar directa

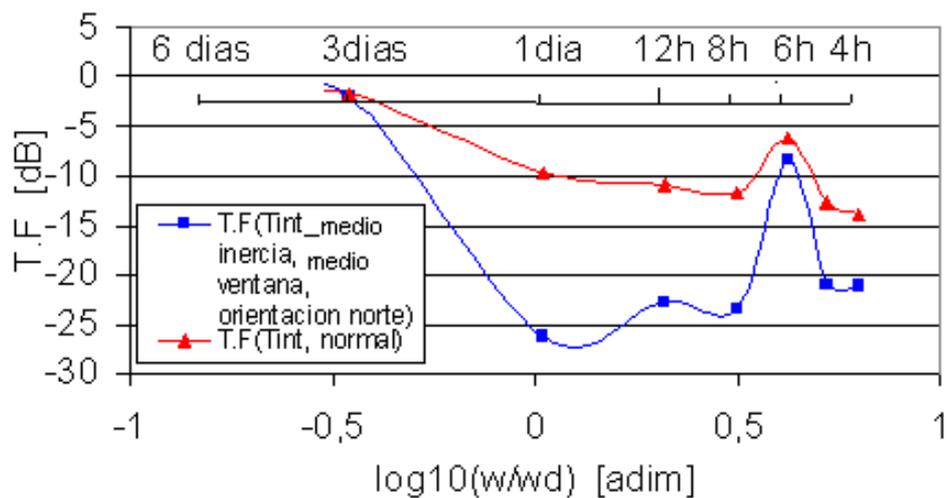


Figura24: Comparación de T.F simuladas: 1) Parámetros normales.2) Mitad inercia, mitad tamaño de ventana y ventanas con orientación norte.

No se nota una gran diferencia en las oscilaciones interiores para los dos casos. Sin embargo, las ganancias estáticas interiores siguen siendo menores a causa de la eliminación de los aportes por radiación directa (orientación norte).

Podemos decir que la combinación efectuada al nivel de la construcción de la vivienda no permite grandes cambios en la respuesta interior dinámica, sobre todo si el objetivo es protegerse de la radiación solar en los días cálidos.

V.3.2.10 Multiplicar la inercia por dos, dividir el tamaño de las ventanas por dos con orientación norte

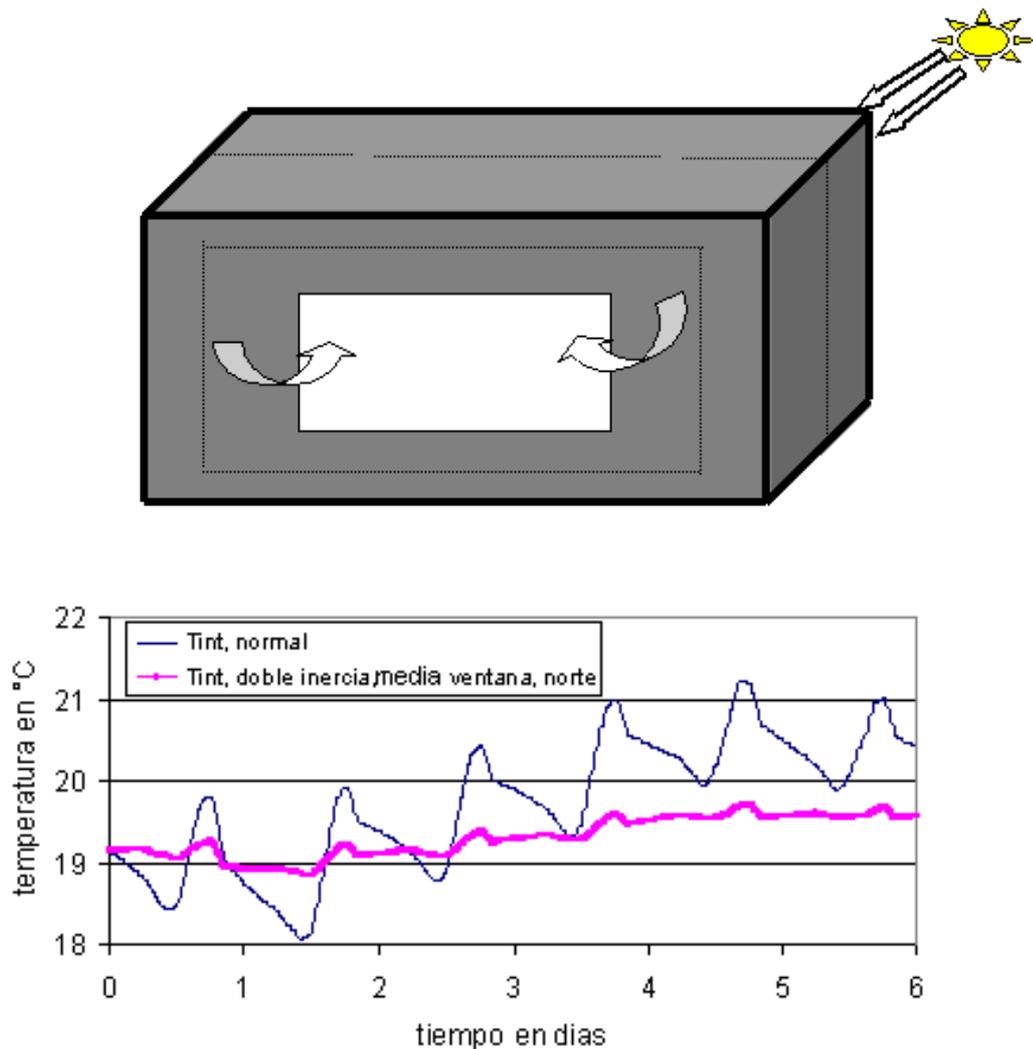


Figura25: Comparación de las evoluciones de las temperaturas interiores simuladas:1) parámetros interiores sin cambios,2) doble inercia, mitad ventana con ausencia de la radiación solar directa

En el último caso a analizar antes de pasar a la condición de protección persianas cerradas, trataremos de obtener una idea de cómo es la respuesta interior al combinar una inercia grande con pequeñas aberturas y orientación norte. El ejemplo podría ser útil si la idea del control que se requiere es protegerse de un ambiente caluroso donde las horas de sol son largas.

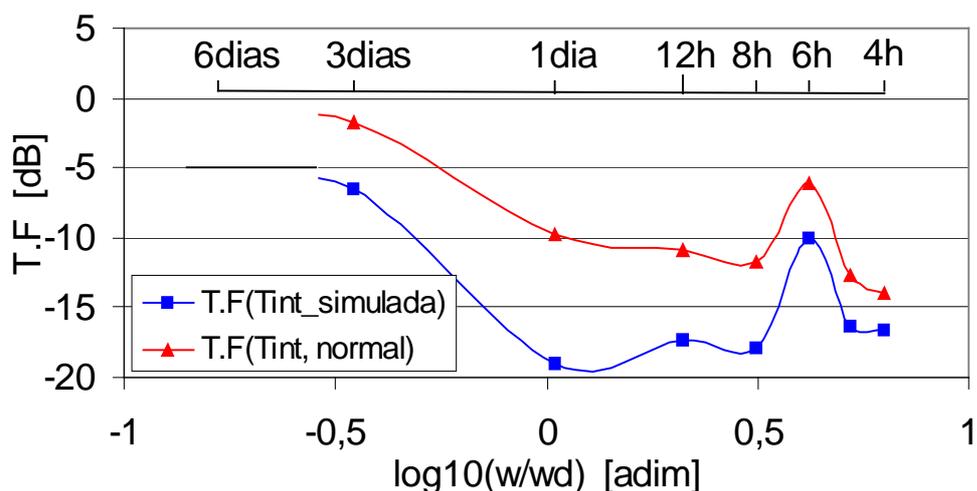


Figura24: Comparación de T.F simuladas: 1) Parámetros normales.2) Doble inercia, mitad tamaño de ventanas con orientación norte.

Al aumentar la inercia térmica del interior y de la piel, se aumenta la resistencia al calor, y las excitaciones exteriores se filtran más. Si aumentamos la resistencia térmica, significa que estamos alargando la constante del tiempo de todo el muro de separación con el exterior. En este caso, la curva de la función de transferencia en las bajas frecuencias necesita más tiempo para llegar al punto que las oscilaciones interiores sean igualadas a las exteriores. Esto se ve claramente en la figura anterior al observar que la función de transferencia se traslada enteramente a valores logarítmicos más negativos. Las oscilaciones interiores a la frecuencia de 6 días han bajado de un 63 % en el caso normal, hasta 22% cuando hemos multiplicado la inercia interior por dos.

En las frecuencias medias, disminuir el tamaño de la superficie vidriada significa reemplazar una parte de las ventanas por un muro opaco, lo cual aumenta la resistencia al calor por conducción, y disminuye la transferencia por radiación directa. Estos dos parámetros hacen que las oscilaciones en las frecuencias medias sean mínimas, ya que cómo hemos mencionado antes, las oscilaciones para las frecuencias medias son debidas al calor

intercambiado por conducción de las paredes de separación con el exterior, y a los aportes por ventilación para intervalos medios de tiempo. Las oscilaciones interiores respecto a las exteriores (T.F) para la frecuencia de un día han pasado de un porcentaje de 10 % para el caso normal a solamente un 1 % cuando reducimos el tamaño de las ventanas a la mitad.

La orientación norte del edificio en este caso permite protegerse totalmente de las fluctuaciones debidas a la radiación solar directa. Mantener las persianas abiertas durante el día para una orientación norte significa una pérdida continua del calor interior hacia el exterior, ya que para la época del año (octubre) la temperatura interior se mantiene siempre a niveles más altos en promedio que la temperatura exterior, lo cual permite un flujo de calor del interior hacia el exterior. Por otra parte, reducir el tamaño de las superficies vidriadas disminuye la intensidad de este flujo de calor. Por lo tanto, las oscilaciones interiores no disminuyen de una forma más grave.

V.3.3 Sensibilidad de la respuesta interior a los cambios: Ausencia de la radiación solar

Siguiendo el mismo análisis, y para descartar la diferencia que puede existir en el tipo de la respuesta interior entre analizar la misma vivienda pero con dos condiciones de protección distintas (ausencia y presencia de la radiación directa), es de gran importancia analizar la influencia de los cambios arquitectónicos o ambientales para una condición de protección “persianas cerradas”.

El intervalo de las mediciones es de 8 días y corresponde a la época de primavera desde el 28 de abril hasta el 05 de mayo de 2002. Durante el tiempo de las mediciones, se mantuvieron las persianas cerradas día y noche, aunque de vez en cuando las actividades de los ocupantes cambian esta condición de protección al subir las persianas en breves momentos del día. Estos cambios afectan el tipo de la respuesta interior, pero a la hora de representar las oscilaciones en función de frecuencia, una breve abertura de la persiana no afecta las oscilaciones a la más alta frecuencia (frecuencia correspondiente a 4 horas) que hemos establecido dentro del rango de las frecuencias analizadas.

El resultado del cálculo numérico respetando las condiciones de protección y las características constructivas de la vivienda está presentado en la figura siguiente.

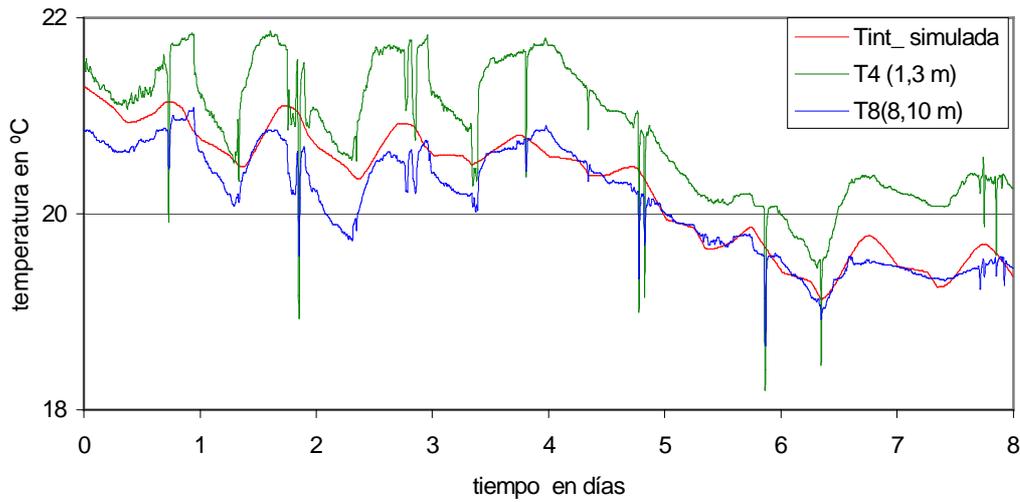


Figura25: Evolución de las temperaturas interiores simuladas, T_4 a 1.3m de la fachada principal y T_8 a 8.10 m

La concordancia es más clara al comparar la temperatura interior simulada con la temperatura interior a máxima profundidad (T_8). Mientras que la temperatura T_4 a una distancia menor presenta amplitudes de oscilación más importantes. Se puede decir que, después de aislar la radiación solar directa con las persianas, sigue existiendo una zona intermedia cercana a la fachada donde la oscilación de temperatura es importante.

Para la sonda T_4 , se ven de vez en cuando unos picos debidos a las actividades de los ocupantes al abrir una ventana o subir la persiana.

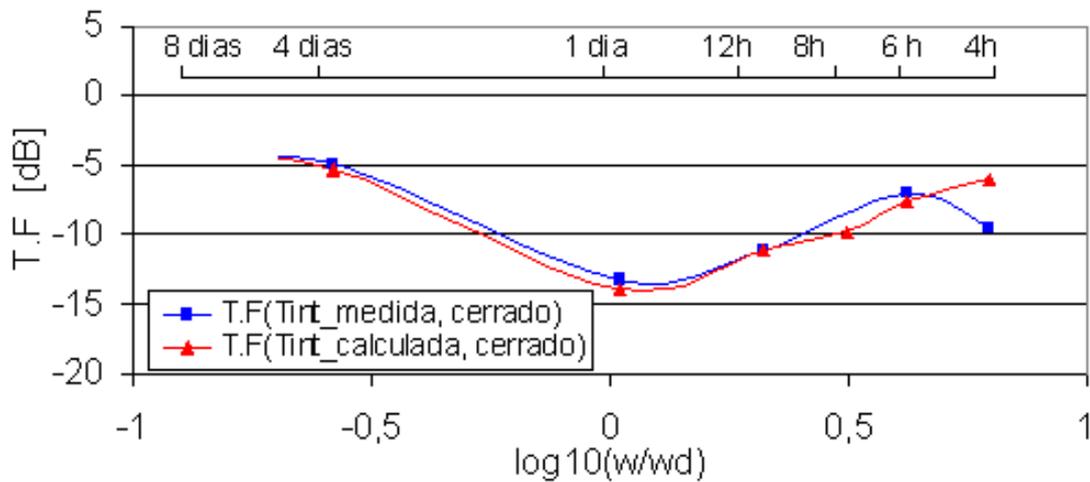


Figura26: Comparación de las Funciones de Transferencia medida y simulada.

Datos de 8 días desde el 28 de abril hasta el 05 de mayo 2002

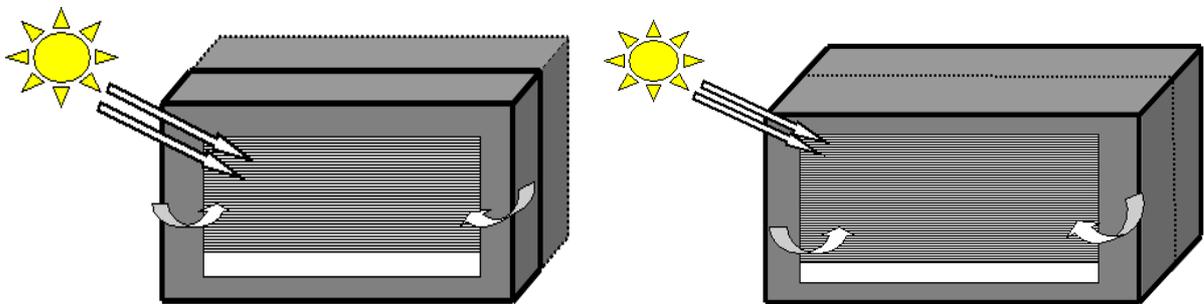
La concordancia entre las dos figuras es buena. Se puede decir que, dentro del rango de las frecuencias elegido para el análisis (8 días hasta 4 horas), el porcentaje de las oscilaciones interiores es casi el mismo, y la diferencia en la amplitud de variación que existe cuando analizamos la figura1 (en función del tiempo) son debidas a la influencia de efectos fuera de este rango de frecuencia.

En este análisis, además de analizar el efecto de los cambios en el ámbito de la construcción del edificio, y el efecto de la orientación, incorporaremos la ventilación que es un factor muy importante a la hora de medir el nivel de las oscilaciones interiores de la temperatura. De la misma forma, iremos cambiando factores tales la inercia interior y de la piel, el tamaño de las aberturas vidriadas, y la proporción de la ventilación y ver el tipo de la respuesta interior.

A continuación, cuando se impide el paso de la radiación solar al interior interesaría saber qué ocurre si:

- Multiplicamos la inercia térmica interior y de la piel sin cambiar los demás parámetros.
- Reducimos a la mitad la inercia interior y de la piel sin cambiar los demás parámetros.
- Multiplicamos la proporción de la ventilación y conservamos los demás parámetros.
- Reducimos la proporción de la ventilación a la mitad y conservamos los demás parámetros.

V.3.3.1 Respuesta para doble inercia y para mitad inercia



De la misma forma que el caso de la presencia de la radiación solar, ahora sin esta última aumentando la inercia interior y de la piel dos veces, y luego bajando la inercia hasta la mitad, la respuesta interior tendrá la forma presentada en la figura que sigue:

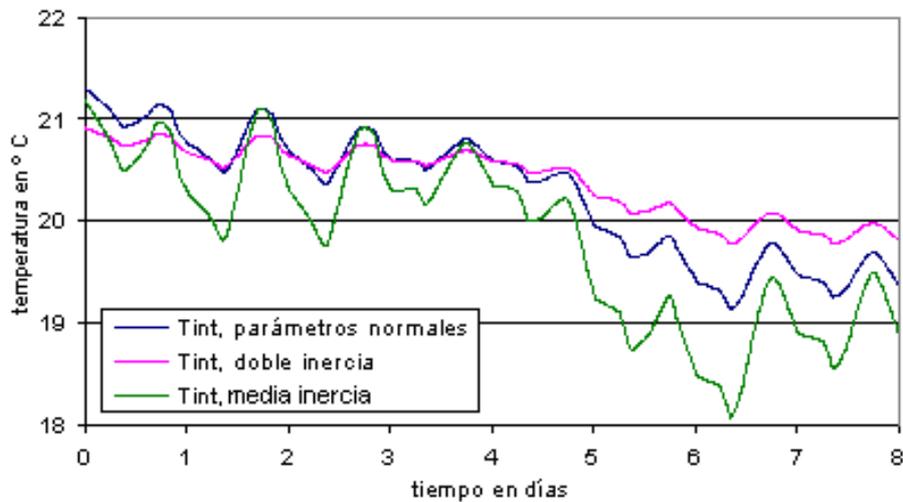


Figura26: Comparación de las temperaturas interiores simulada para: 1) parámetros normales. 2) Multiplicar la inercia térmica por un factor dos. 3) Reducir la inercia térmica a la mitad.

La oscilación diaria de la temperatura del caso de la inercia normal muestra una amplitud de más de 0.5 °C, mientras que la amplitud de las oscilaciones cuando aumentamos la inercia no pasa de 0.25 °C. La amplitud de las oscilaciones es más importante cuando reducimos la inercia térmica interior y de la piel a la mitad, comparando con los dos otros casos. A partir del quinto día, la temperatura interior correspondiente a la inercia normal se desliza de una forma rápida. La caída de la temperatura es aun más grave en el caso de la inercia térmica reducida a la mitad. En cambio, la evolución de la temperatura interior correspondiente a doble inercia se desliza de una forma más suave.

Se puede decir que cuando aumentamos la inercia interior, lo que hacemos es dar más resistencia térmica a la vivienda, y se retiene más el calor absorbido durante las horas del sol que se disipa en el interior después de que baje la temperatura exterior, y recíprocamente si reducimos la inercia.

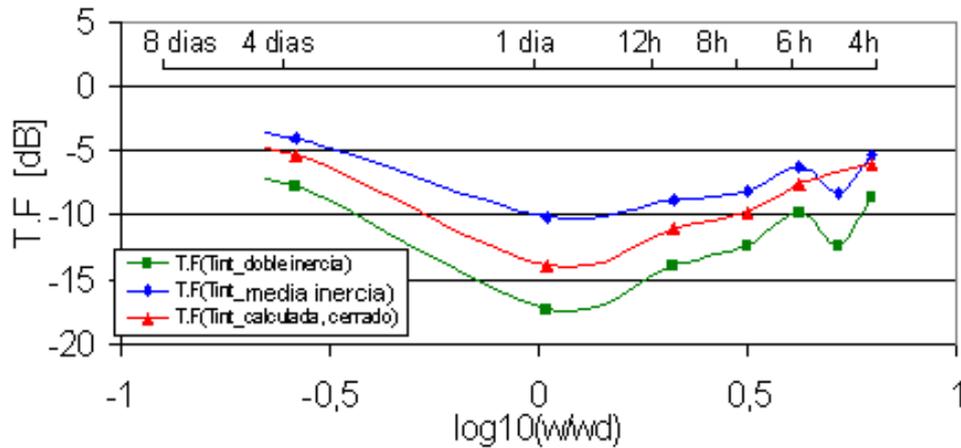


Figura27: Comparación de la Función de Transferencia para los dos casos: 1) Parámetros normales. 2) Doble inercia. 3) Mitad inercia.

Para el prototipo de edificio, independientemente de la condición de la protección de la piel del edificio, la inercia térmica influye de una forma muy directa la amplitud de la respuesta interior para todas las frecuencias. La función de transferencia correspondiente a los parámetros normales está a equidistancia de las dos funciones de transferencia correspondientes a doble inercia y mitad inercia.

Como regla general, se puede decir que existe un factor de proporción entre la amplitud de las oscilaciones interiores y la cantidad de la masa interior y de la piel. El porcentaje de las oscilaciones sube o baja según aumentamos o reducimos la totalidad de la inercia interior respectivamente.

V.3.3.2 Respuesta interior cuando reducimos la ventilación a la mitad y cuando la aumentamos al doble

Después de averiguar el efecto que tienen las modificaciones del tamaño de las aberturas vidriadas y de la inercia térmica interior y de la piel o bien la combinación entre ambas sobre la amplitud de las oscilaciones interiores de temperatura, la sospecha que podemos tener es cuál será el efecto de la proporción de la ventilación sobre las fluctuaciones interiores de

temperatura. Para que se vea el efecto, hemos de conservar constantes todos los parámetros ambientales y de la construcción y modificar solamente la proporción de ventilación.

El piso del análisis cuenta con una ventilación natural por la fuerza del aire y por el gradiente de temperatura entre el interior y el exterior, es decir sin aportes de energía. El inconveniente de la ventilación natural es la dificultad de su regularización, ya que la tasa de renovación en cada momento depende de las condiciones climatológicas y de la superficie de las aberturas de comunicación con el exterior.

Se habla de la ventilación natural cuando no hay aporte de energía artificial para lograr la renovación del aire. Comúnmente, la ventilación natural se consigue dejando abertura en el local (puertas, ventanas, lucernario, etc.), que comunican con el ambiente exterior. La ventilación forzada utiliza ventiladores para conseguir la renovación, es este segundo tipo de ventilación que vamos a imaginar para lograr el control de las renovaciones de aire para el análisis siguiente.

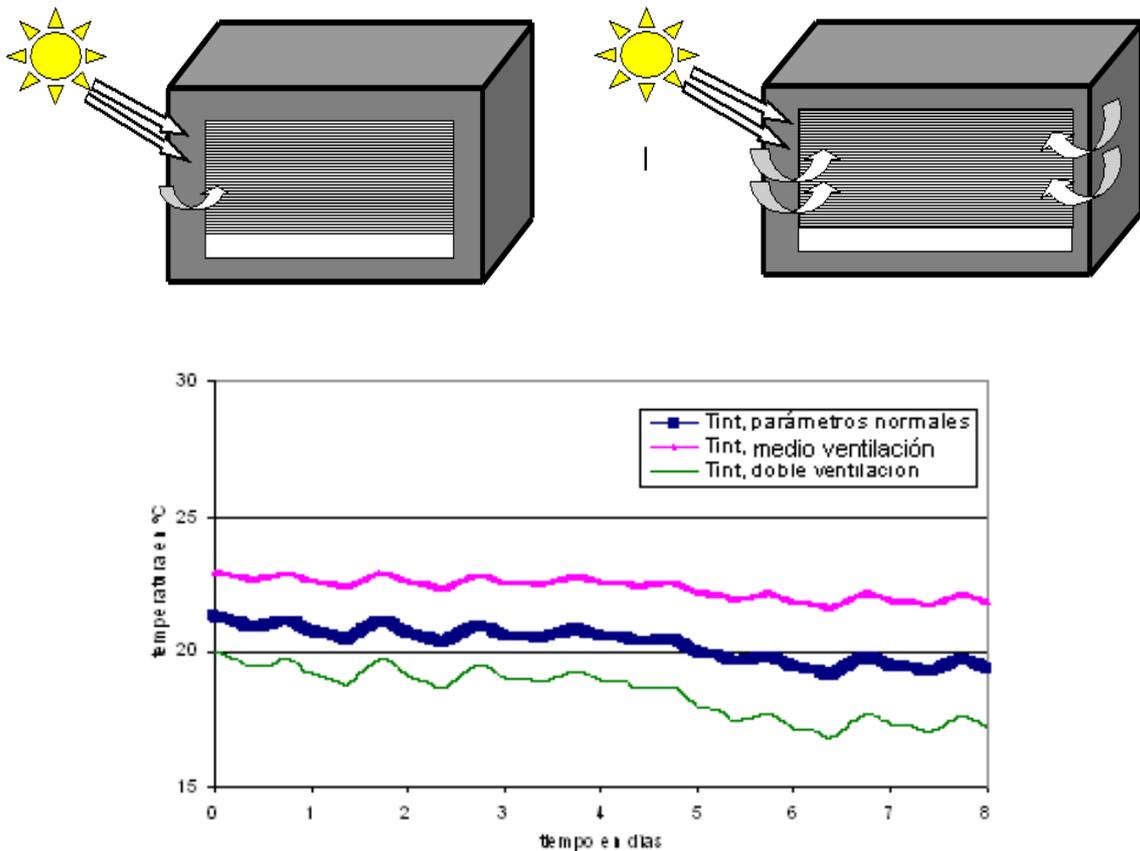


Figura31: Comparación de las temperaturas interiores simuladas para: 1) parámetros normales. 2) parámetros normales con mitad ventilación. 3) parámetros normales con doble ventilación.

Existe un salto de 3 °C aproximadamente entre el caso de la ventilación normal y cuando reducimos a la mitad las renovaciones de aire, y la amplitud de oscilación es de menos de 0.2 °C. Para la época del año (primavera) la reducción de las renovaciones de aire disminuye las pérdidas de calor hacia el exterior, lo cual aumenta la temperatura interior.

Sin embargo, al duplicar la tasa de renovaciones de aire, la temperatura interior disminuye y la amplitud de oscilación aumenta.

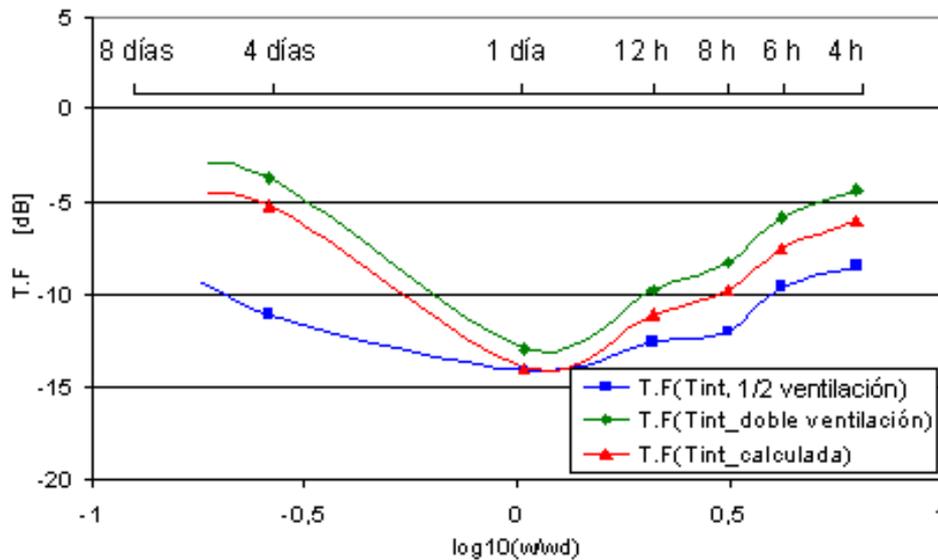


Figura32: Comparación de la Función de Transferencia para los dos casos: 1) Parámetros normales. 2) Mitad ventilación. 3) Doble ventilación.

Cuando se aumenta la tasa de ventilación al doble, la amplitud de las oscilaciones interiores aumenta para todas las frecuencias. Podemos apreciar una diferencia en la relación entre la amplitud de oscilación interior con el exterior de un 8% más que en el caso de los parámetros normales para la frecuencia de 4 días. La diferencia es de sólo 1% para la frecuencia de un día y de aproximadamente 8% para la frecuencia de 6 horas.

Cuando se reduce la tasa de ventilación a la mitad, la amplitud de las oscilaciones interiores disminuye para todas las frecuencias, sobre todo en las bajas y altas frecuencias. En la figura, se observa que la diferencia en la relación entre la amplitud de oscilación interior con el exterior es de 23% más que el caso de los parámetros normales para la frecuencia de 4 días, de 0.77% para la frecuencia de un día y de 7.7% para la frecuencia de 6 horas.

Se puede decir que cuando modificamos la tasa de ventilación, la amplitud de las oscilaciones de la temperatura interior se ve más influida en las bajas y altas frecuencias que en las frecuencias medias. La ventilación juega un factor muy importante a la hora de valorar las fluctuaciones de la temperatura y las ganancias estáticas interiores.

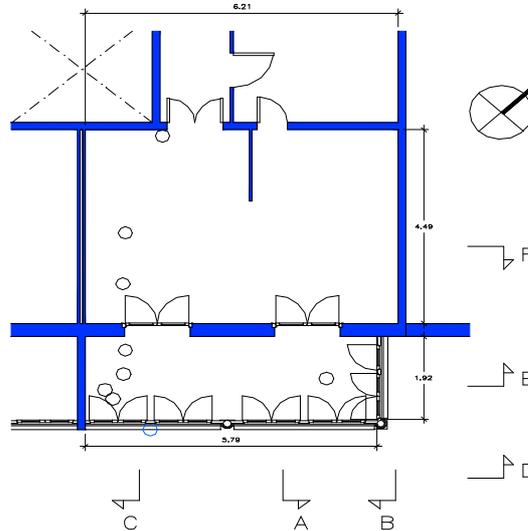
Se han hecho otros análisis sobre la misma línea cambiando algunos parámetros de orientación y al nivel constructivo del edificio y los resultados han demostrado que existe una fuerte relación entre cada cambio al nivel de la construcción del edificio y de sus materiales y la respuesta térmica dinámica interior.

- Reducir la inercia térmica y el tamaño de las ventanas a la mitad.
- Reducir la inercia a la mitad y multiplicar el tamaño de las ventanas.
- Multiplicar la inercia y reducir el tamaño de las ventanas.
- Multiplicar la inercia y el tamaño de las ventanas.
- Conservar la misma inercia y reducir el tamaño de las ventanas.
- Conservarla misma inercia y multiplicar el tamaño de las ventanas.

V.3.4 Vivienda con galería al sur

La segunda vivienda a analizar es la misma de la calle Aragón analizada en el [capítulo 3](#).

Figura37: Planta del despacho y de la galería donde se han efectuado las mediciones.



La vivienda es característica de una galería que separa el ambiente interior del ambiente exterior. El muro de separación galería-interior es de aproximadamente unos 30 cm. de espesor. Se puede considerar como una segunda piel del edificio después de la galería. En este muro van incorporadas dos aberturas vidriadas de un tamaño total de 3 m².

Cuando nos referimos a la condición de protección persianas cerradas es cuando bajamos las persianas de la galería impidiendo así la penetración de la radiación solar directa independientemente del estado de las aberturas del muro de separación con el interior. El piso cuenta con una ventilación natural.

La calidad del análisis reside en destacar la importancia que tiene la distribución espacial de la inercia interior sobre las oscilaciones interiores de temperatura. De la misma forma, el análisis consistirá en modificar parámetros ambientales como la ventilación y la radiación, y elementos de la construcción como la inercia y las aberturas vidriadas para conseguir una idea del comportamiento interior de la temperatura.

La serie de mediciones se ha tomado bajo la condición de protección “persianas enrolladas de la galería cerradas”. Las figuras a continuación corresponden a un intervalo de mediciones de 9 días desde el 25 de octubre hasta el 02 de noviembre 1999.

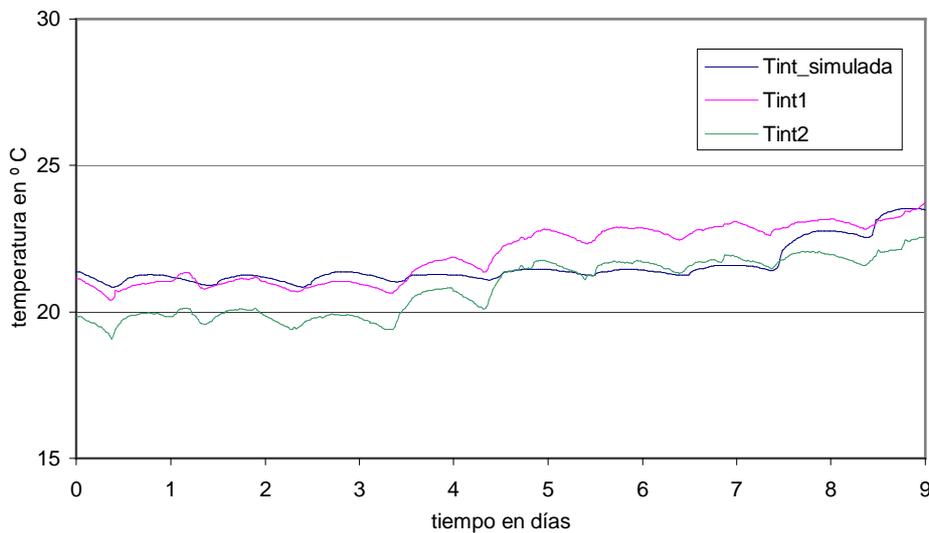
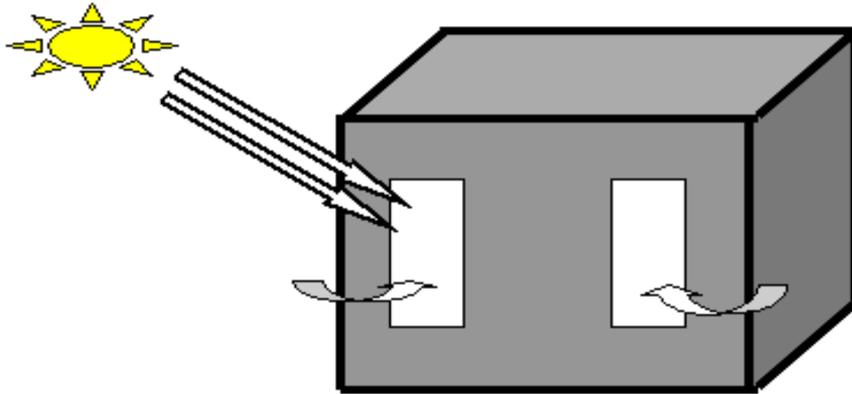


Figura38: Comparación de la temperatura interior simulada, Tint1 (a 80 cm. del muro de separación con la galería) y Tint2 (a 2.5m).

La amplitud de oscilación diaria de la temperatura interior es de menos de 1 °C. Se ve una diferencia de aproximadamente 1 °C entre las temperaturas interiores Tint1 y Tint2. La Tint2 presenta valores mayores a causa de su proximidad a la galería que es un factor acumulador de calor, pues luego este calor se transmite al interior por la conducción y por la ventilación.

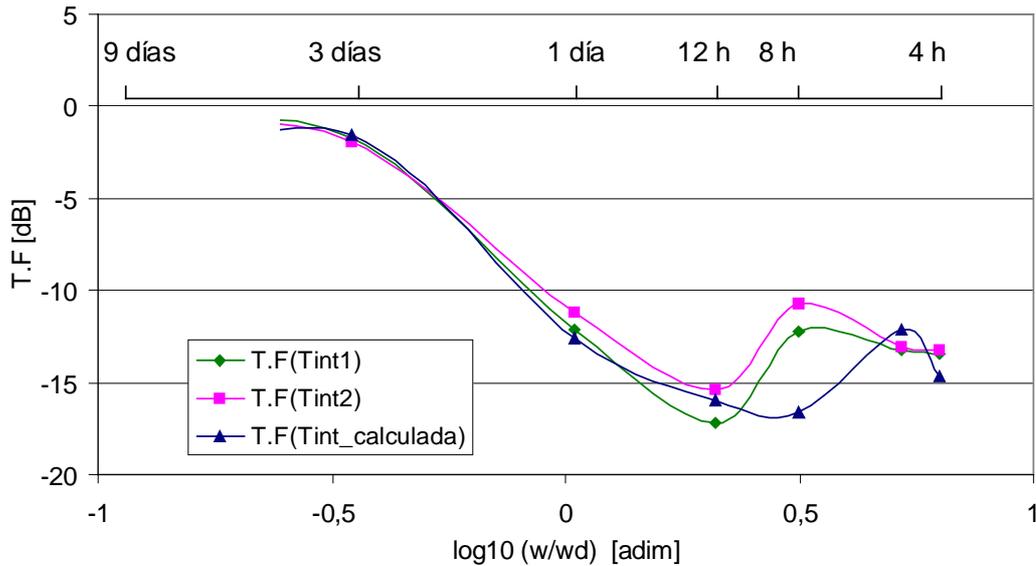


Figura39: Comparación entre la Función de Transferencia simulada, para la sonda Tint1 y para la sonda Tint2

La concordancia en la amplitud de oscilación es grande para las bajas frecuencias y las frecuencias medias, mientras que la de oscilación se perturba en altas frecuencias debido a las actividades de los ocupantes y a fenómenos ambientales que ocurren en cortos plazos de tiempo.

En este análisis averiguaremos el efecto que tienen los siguientes cambios al nivel de la construcción de la vivienda y ventilación sobre la amplitud de las oscilaciones interiores y sobre las ganancias estáticas interiores totales.

- Doble inercia interior y de la piel.
- Mitad inercia interior y de la piel.
- Mitad ventana.
- Doble ventana.
- Mitad inercia interior y de la piel con mitad tamaño de ventanas.
- Mitad inercia interior y de la piel con doble tamaño de ventanas.
- Doble inercia interior y de la piel con doble tamaño de ventanas.
- Doble inercia interior y de la piel con mitad tamaño de ventanas.
- Mitad proporción de ventilación.
- Doble proporción de ventilación.

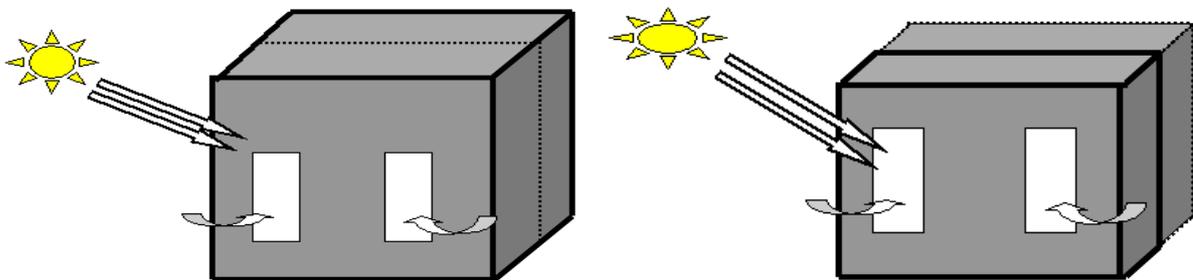
- Doble inercia interior y de la piel con doble proporción de ventilación.
- Doble inercia, mitad tamaño de ventanas y doble ventilación.
- Doble inercia, doble tamaño de ventanas y mitad proporción de ventilación.
- Mitad inercia, doble tamaño de ventanas y doble proporción de ventilación.
- Mitad inercia, Mitad tamaño de ventanas y mitad proporción de ventilación.

V.3.4.1 Respuesta interior cuando duplicando la inercia y cuando la reducimos a la mitad

La vivienda en estudio presenta dos características distintas:

- La galería funciona como un sistema no-lineal ya que no gana de la misma forma que pierde el calor. El cristal de la galería es transparente a las longitudes de ondas cortas (radiación solar) y opaco a las longitudes de ondas largas (calor emitido por fuentes terrestres).
- El grosor del muro de separación galería-interior tiene una constante de tiempo de más de un día, lo cual hace que las excitaciones exteriores de un intervalo de tiempo inferior a un día no se hacen sentir por la amplitud de oscilación de la temperatura interior.

A base de estas dos características, la sospecha que se hace es, hasta qué nivel podría influir el cambio de la inercia interior y de la piel sobre las oscilaciones interiores de la temperatura.



Los resultados del cálculo de la temperatura interior para ambos casos (mitad inercia y doble inercia) están dados por la figura siguiente:

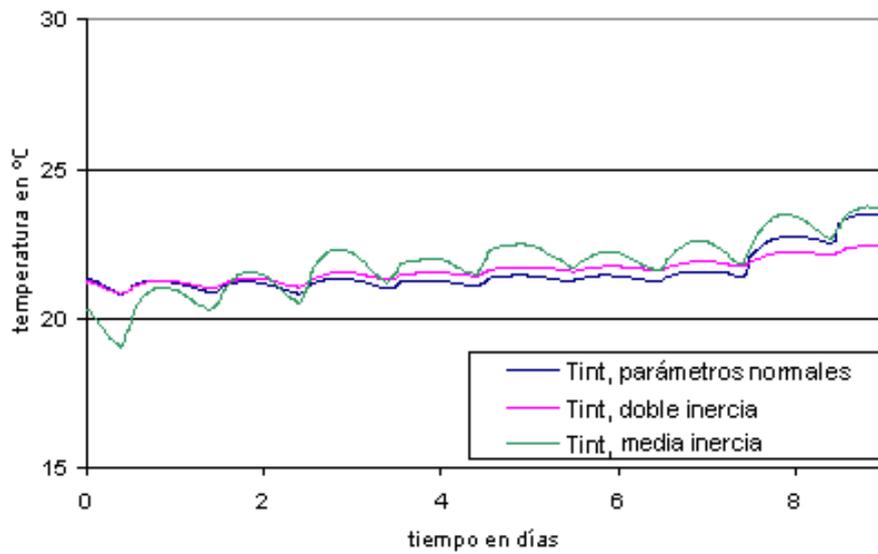


Figura40: Comparación de las temperaturas interiores simuladas: 1) parámetros normales. 2) Doble inercia. 3) Mitad inercia.

Se ve claramente que cuando aumentamos la proporción de la inercia las oscilaciones interiores se amortiguan de una forma considerable. Sin embargo, la amplitud de oscilación aumenta si reducimos la inercia.

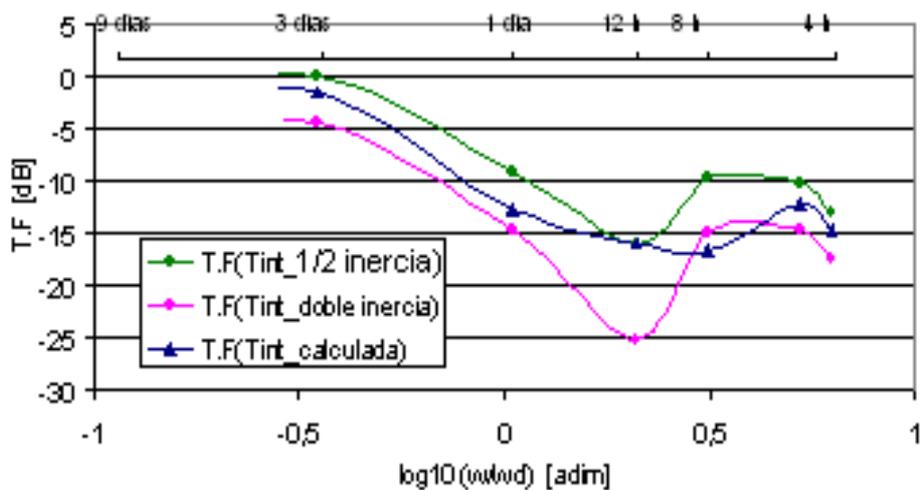


Figura41: Comparación de las Funciones de Transferencia simuladas: 1) parámetros normales. 2) Doble inercia. 3) Mitad inercia.

En las bajas frecuencias y las frecuencias medias, la diferencia en las amplitudes de oscilación es notable, y se ve rotundamente que cuando reducimos la proporción de la inercia, el porcentaje de las oscilaciones interiores se descende. Eso lo podemos observar al comparar el porcentaje de las oscilaciones para la frecuencia de *3 días*, desde 63% para el caso de *los parámetros normales* hasta 31% para *doble inercia*, y del 100% para el caso de *mitad inercia*.

Se observa una caída en las oscilaciones interiores a la frecuencia de *12 horas* cuando aumentamos la inercia interior al doble. Esto significa que al aumentar la inercia (es decir aumentar la inercia interior y del muro de separación con la galería) impedimos más todavía que las oscilaciones exteriores lleguen al interior.

En las altas frecuencias, las oscilaciones siguen la misma ley que en las frecuencias medias y bajas.

Se puede decir que:

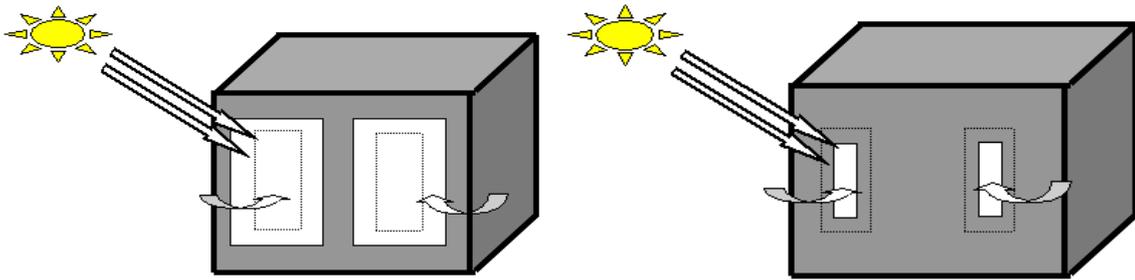
- *El cambio de la proporción de la inercia térmica afecta todas las frecuencias, y la amplitud asciende o descende según si bajamos la inercia o la aumentamos.*
- *La influencia del cambio de las proporciones de la inercia se ve más en las bajas frecuencias que en las frecuencias medias o altas.*

V.3.4.2 Respuesta interior cuando duplicamos el tamaño de las ventanas y cuando lo reducimos a la mitad

Aunque las persianas de la parte exterior de la galería se mantuvieron cerradas durante la época de las mediciones, las oscilaciones de la temperatura en la galería puede llegar a tener amplitudes día-noche mayores que las amplitudes correspondiendo a la temperatura exterior. Debido a la característica térmica del vidrio, el interior de la galería gana más calor de longitudes cortas de lo que pierde por radiación nocturna de elementos de construcción (longitudes de onda largas).

Una característica importante a estudiar es la repercusión que tiene el tamaño de las ventanas en el muro de separación con la galería sobre la amplitud de las oscilaciones interiores, ya que el tipo del espacio intermedio (galería) hace muy interesante saber la

influencia del tamaño de las ventanas del muro interior sobre las fluctuaciones interiores de temperatura.



Cuando hablamos de modificar el tamaño de las aberturas vidriadas nos referimos a las ventanas incorporadas en el muro que separa el interior de la galería.

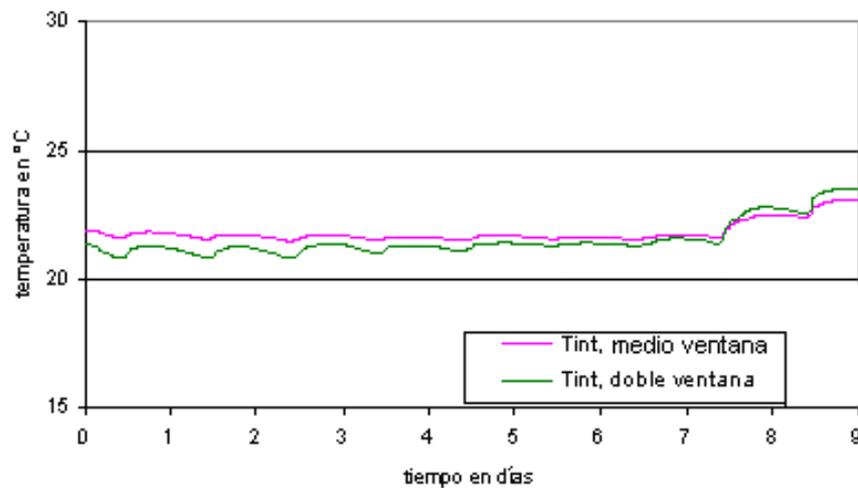


Figura42: Comparación de las temperaturas interiores simuladas: 1) Doble ventana. 2) Mitad ventana.

Debido al diminuto tamaño de las aberturas vidriadas, la temperatura interior sigue siendo la misma aunque aumentemos el tamaño de las ventanas al doble, mientras que se nota un ligero aumento cuando reducimos el tamaño de las ventanas a la mitad. La temperatura interior no se ve demasiado afectado por los cambios de las dimensiones de ventanas, como se puede ver en la figura3.

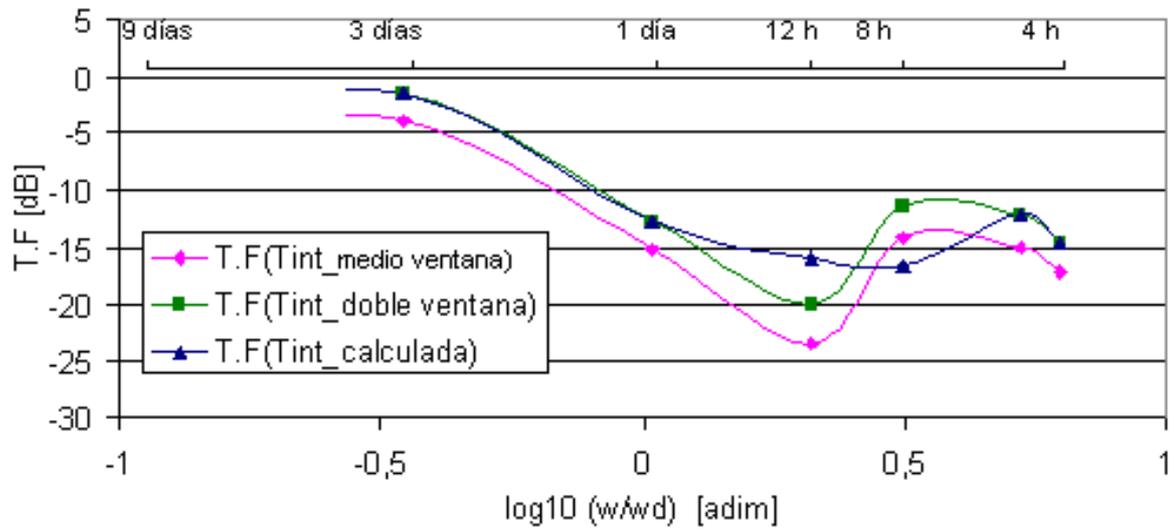


Figura43: Comparación de las Funciones de Transferencia simuladas: 1) parámetros normales. 2) Doble ventana. 3) Mitad ventana.

Si comparamos los casos de *parámetros normales* y *doble ventana* la concordancia entre ellos es perfecta para las bajas frecuencias hasta la frecuencia de *un día*. No se ve ninguna diferencia en las oscilaciones entre los dos casos.

En cambio, se nota una ligera caída en las oscilaciones cuando disminuimos la dimensión de las ventanas a la mitad. Se puede decir que el piso gana de la misma forma independientemente del tamaño de las ventanas cuando cerramos las persianas de la galería, sin embargo, pierde más temperatura si duplicamos el tamaño de estas.

La condición de protección “persianas cerradas” impide que las fluctuaciones debidas al calor ganado por radiación directa lleguen a la galería y por lo tanto al interior de la vivienda. Además de esto, y como se ha dicho antes, debido al pequeño tamaño de las oberturas vidriadas del muro de separación galería-interior, los intercambios de calor por transmisión no son tan importantes para modificar las oscilaciones de la temperatura interior.

V.3.4.3 Respuesta interior para mitad inercia-mitad ventana y mitad inercia-doble ventana

Para ver mejor el efecto que pueden tener el tamaño de las ventanas sobre la respuesta interior, a continuación combinaremos este parámetro con la proporción de la inercia interior y de la piel. La pregunta que se puede hacer es hasta qué nivel puede afectar un cambio en las dimensiones de las ventanas sobre la amplitud de la temperatura interior si bajamos la inercia a la mitad?

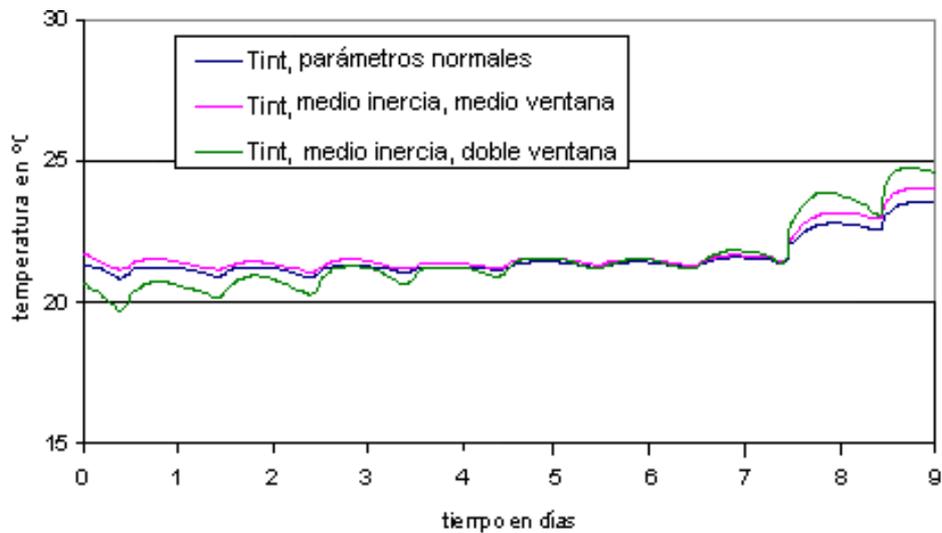
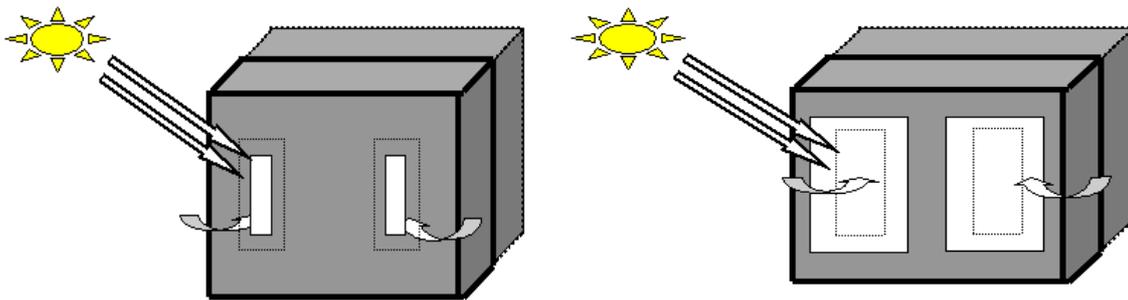


Figura44: Comparación de las temperaturas interiores simuladas: 1) parámetros normales. 2) Mitad inercia, mitad ventana. 3) Mitad inercia, doble ventana.

Comparando las figuras, podemos observar que la amplitud de oscilación ha aumentado cuando se disminuye la inercia y se aumenta el tamaño de las ventanas. Mientras que la amplitud sigue siendo casi la misma que en el caso normal si se disminuye la inercia y el tamaño de las ventanas a la vez.

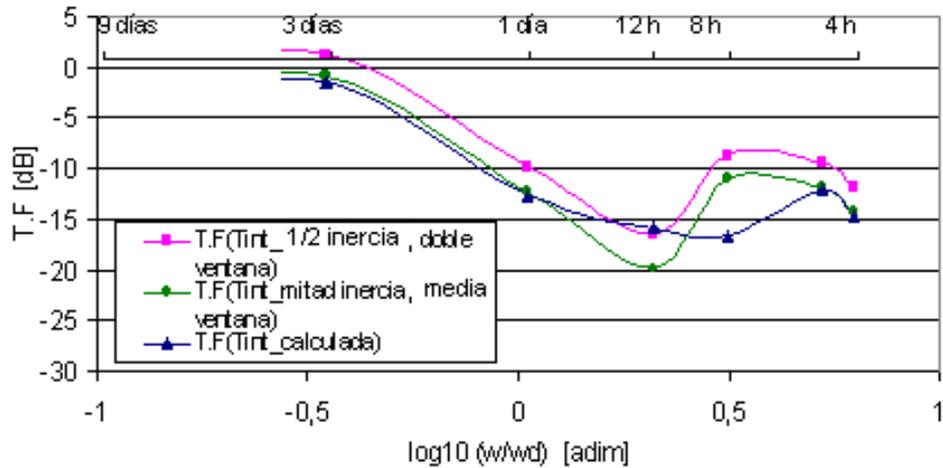


Figura45: Comparación de las Funciones de Transferencia simuladas: 1) parámetros normales. 2) Mitad inercia, doble ventana. 3) Mitad inercia, mitad ventana.

Las figuras correspondiendo al caso de parámetros normales y de mitad inercia-mitad ventana son casi idénticos en las bajas y medias frecuencias. En cambio, se nota un aumento en las oscilaciones para el caso de mitad inercia-doble ventana.

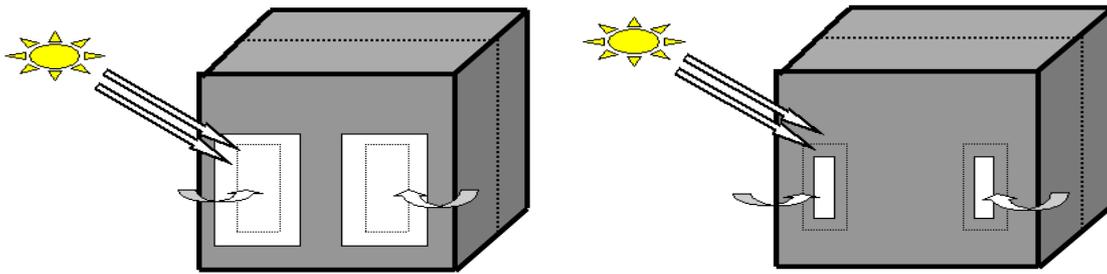
En las altas frecuencias, debido a los cambios en las dimensiones de las ventanas y de la inercia, los cambios rápidos tienen más intensidad, es lo que notamos ya que las oscilaciones han aumentado para los dos casos de mitad inercia-mitad ventana y mitad inercia-doble ventana.

En general, el cambio de la inercia y el tamaño de las ventanas no han causado grandes cambios al nivel de la amplitud de la temperatura interior.

La tipología de la vivienda y la distribución espacial de la inercia térmica influyen mucho en el tipo de la respuesta interior cuando se combinan varios cambios en las características constructivas del edificio.

V.3.4.4 Respuesta interior para doble inercia-doble ventana y doble inercia-mitad ventana

Para apreciar de una forma más completa el efecto que puede tener los cambios de la proporción de la inercia sobre la respuesta interior, hemos duplicando la inercia interior y modificamos el tamaño de las ventanas.



No obstante que cambiemos el tamaño de las ventanas, el ambiente interior no presenta grandes variaciones en la oscilación de la temperatura interior a causa del tamaño diminuto de las aberturas vidriadas del muro de separación galería-interior. Si aumentamos la inercia interior y de la piel, las oscilaciones interiores se amortiguan bastante. La idea de este nuevo análisis es observar si existe alguna diferencia importante al combinar la variación de las superficies vidriadas con la doble proporción de la inercia térmica.

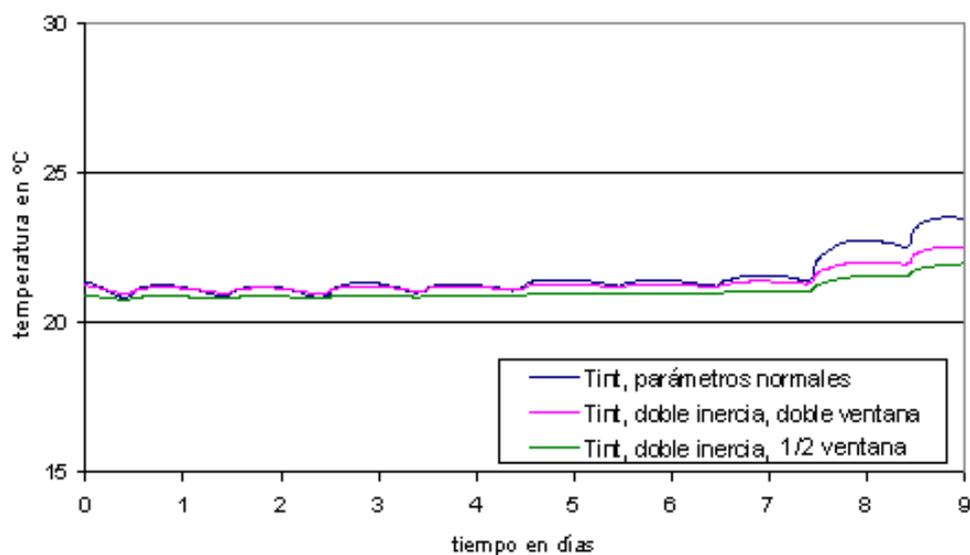


Figura46: Comparación de las temperaturas interiores simuladas: 1) parámetros normales.
2) Doble inercia, mitad ventana. 3) Doble inercia, doble ventana.

La temperatura mitad interior para todos los casos en estudio es aproximadamente la misma.

No se nota gran cambio en la evolución de la temperatura interior entre el caso normal y cuando duplicamos la inercia y el tamaño de las ventanas. Sin embargo, las oscilaciones interiores son muy suaves cuando aumentamos la inercia al doble y disminuimos el tamaño de las ventanas a la mitad.

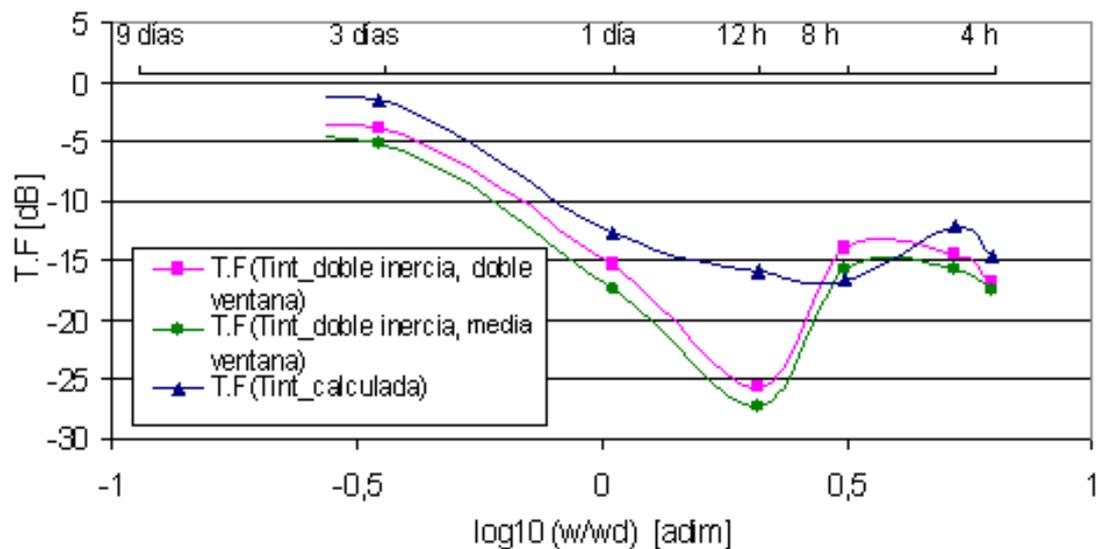


Figura47: Comparación de las Funciones de Transferencia simuladas: 1) parámetros normales. 2) Doble inercia, doble ventana. 3) Doble inercia, mitad ventana.

Al duplicar la inercia térmica, se ha amortiguado de una forma considerable el porcentaje de las oscilaciones de la temperatura interior para todas las frecuencias, y al disminuir el tamaño de las ventanas, se han amortiguado aun más estas oscilaciones. La gran diferencia en las oscilaciones corresponde a la frecuencia de 12 horas.

Debido a la distinta distribución espacial de la inercia en el interior comparando con el caso de la vivienda con gran abertura vidriada al exterior, la modificación de la inercia interior en este nuevo caso influye más sobre la oscilación interior en las frecuencias medias.

V.3.4.5 Respuesta interior si duplicamos la proporción de ventilación y cuando la disminuimos a la mitad

La ventilación es un parámetro importante a la hora de valorar las oscilaciones de la temperatura en el interior. En este análisis, conservamos todos los demás parámetros ambientales y de construcción y modificaremos la proporción de la ventilación.

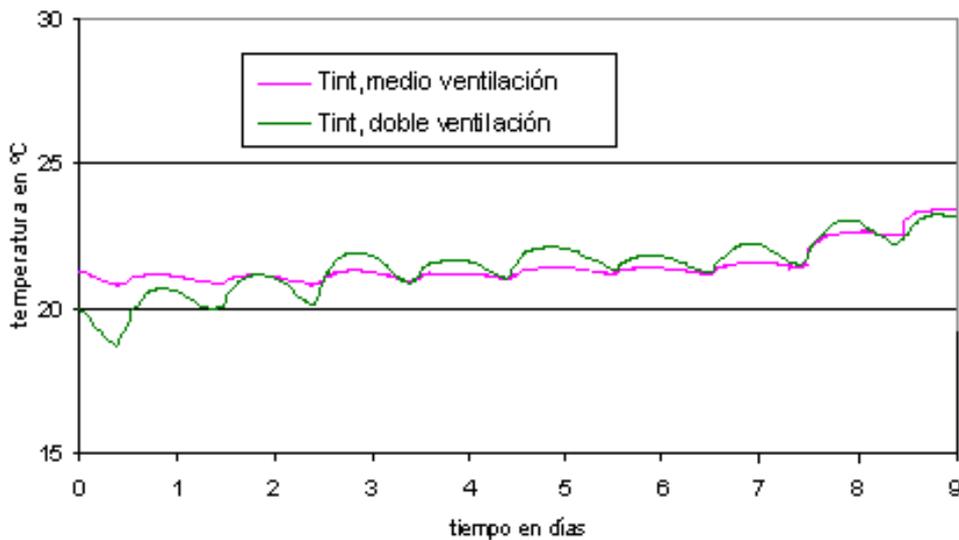
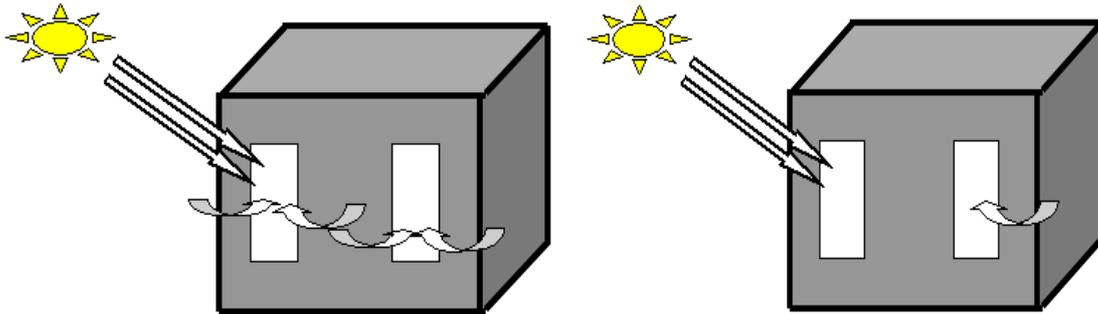


Figura48: Comparación de las temperaturas interiores simuladas: 1) Doble ventilación. 2) Mitad ventilación

Como se puede ver, cuando disminuimos la proporción de la ventilación, la oscilación de la temperatura interior no se ve muy afectada por el cambio. En cambio, cuando aumentamos esa proporción, observamos una amplitud de oscilación importante de la temperatura interior.

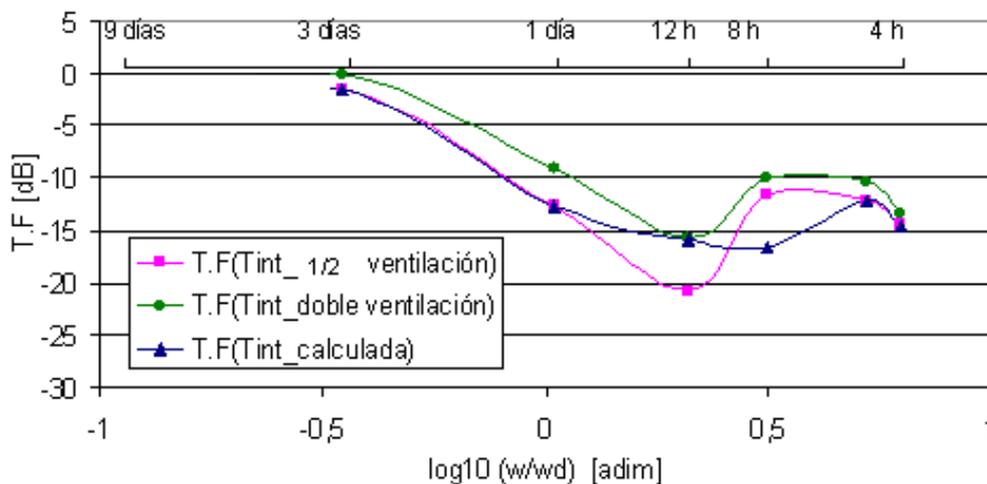


Figura49: Comparación de las Funciones de Transferencia simuladas: 1) parámetros normales. 2) Doble ventilación. 3) Mitad ventilación

Si aumentamos la proporción de la ventilación, las oscilaciones internas aumentan para todas las frecuencias. En cambio, cuando disminuimos estas, las oscilaciones interiores son análogas entre las frecuencias de 9 días y de 1 día, disminuyen para la frecuencia de 12 horas y vuelven a subir para las altas frecuencias.

El criterio que hemos seguido en determinar la ventilación es relativo a las horas de ocupación de los usuarios, es decir que, durante las horas de la noche (entre las 20:00 y 08:00 horas) mantenemos la ventilación constante, y durante las horas del día entre las 8:00 hasta las 13:00 tenemos otra proporción de ventilación, y por la tarde otra. La diferencia en las proporciones de ventilación no es arbitraria, sino que se ha intentado aproximarse lo más posible a la misma proporción de ventilación que hubo durante el tiempo de las mediciones ya que no disponíamos de ningún aparato de medición de la velocidad del aire.

V.3.4.6 Respuesta interior para doble-inercia-doble ventilación y para doble-inercia-mitad-ventana-doble ventilación

Como se ha podido ver en el ejemplo anterior, dependiendo de la proporción de la ventilación la respuesta interior de la temperatura puede mostrar o no grandes cambios.

Para ver con más precisión el efecto de la ventilación, combinaremos dos casos doble-inercia-doble ventilación y doble-inercia-mitad-ventana-doble ventilación

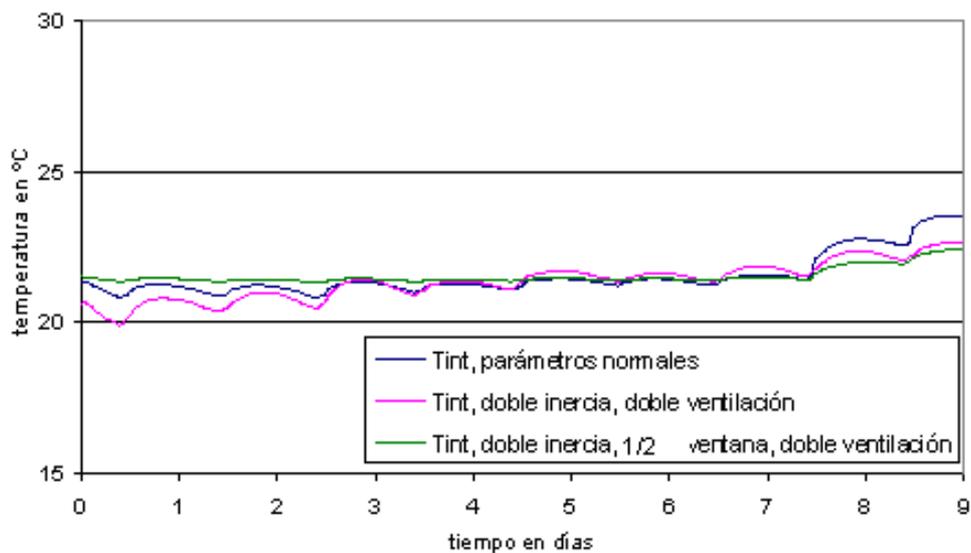
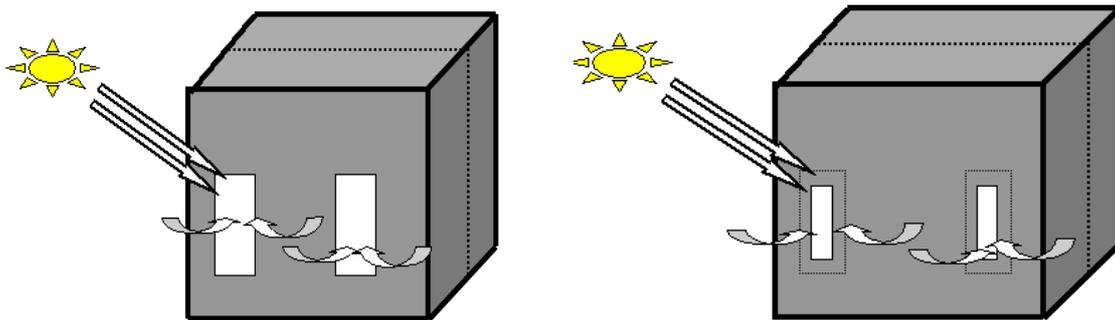


Figura50: Comparación de las temperaturas interiores simuladas: 1) parámetros normales. 2) Doble inercia, doble ventilación. 3) Doble inercia, mitad ventana, doble ventilación

Cuando disminuimos el tamaño de las aberturas vidriadas, los intercambios de flujos de calor con el ambiente de la galería disminuyen también, y por lo tanto, la temperatura interior evoluciona de una forma muy suave y tiende a ser plana. En cambio, si aumentamos la proporción de ventilación, aunque duplicamos la inercia interior, la temperatura interior presenta oscilaciones importantes que se acercan en amplitud a las oscilaciones del caso de los parámetros normales.

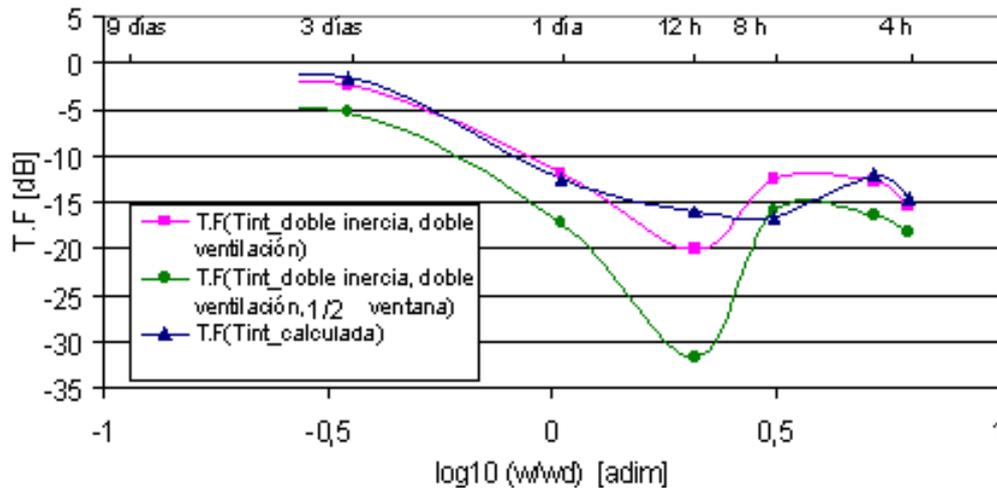


Figura51: Comparación de las Funciones de Transferencia simuladas: 1) parámetros normales. 2) Doble inercia, doble ventilación. 3) Doble inercia, doble ventilación, mitad ventana

Las oscilaciones interiores disminuyen de una forma muy considerable en el caso de *doble inercia-doble ventilación-mitad ventana*. Se observa una caída en el porcentaje de las oscilaciones para todas las frecuencias. Sin embargo, las oscilaciones interiores de temperatura no demuestran grandes cambios para el caso de *doble -inercia-doble-ventilación-ventana normal*.

Se puede decir que la combinación de grandes inercias con pequeñas aberturas vidriadas disminuye las oscilaciones interiores de temperatura. Sin embargo cuando aumentamos la proporción de ventilación sin disminuir el tamaño de las ventanas, las oscilaciones interiores vuelven a ser importantes y muy parecidas al caso de los parámetros normales aunque aumentemos la inercia térmica interior y de la piel de la vivienda.

V.3.4.7 Respuesta interior para mitad-inercia-mitad-ventana-mitad ventilación y para mitad-inercia-doble-ventana-doble ventilación

El último caso a estudiar para la condición de protección “persianas cerradas” es el de comparar las oscilaciones interiores si disminuimos la inercia a la mitad y variamos las proporciones de las ventanas y de la ventilación.

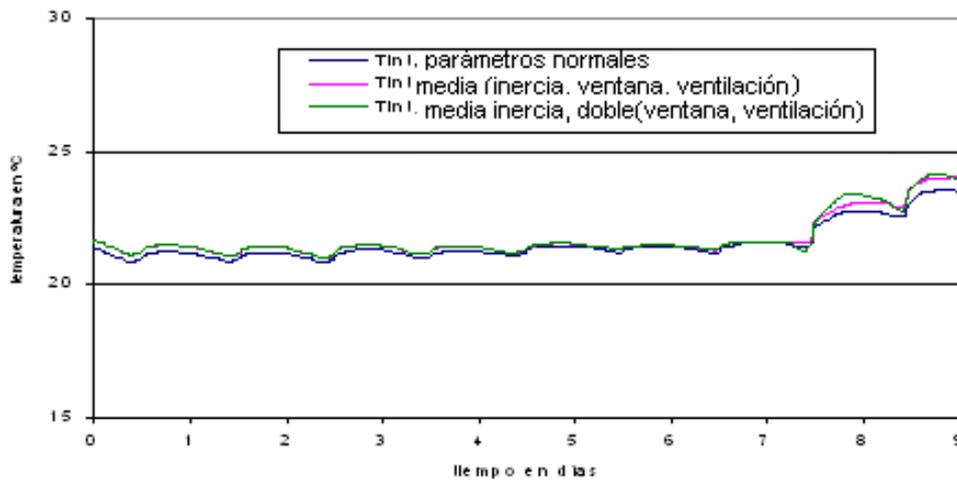
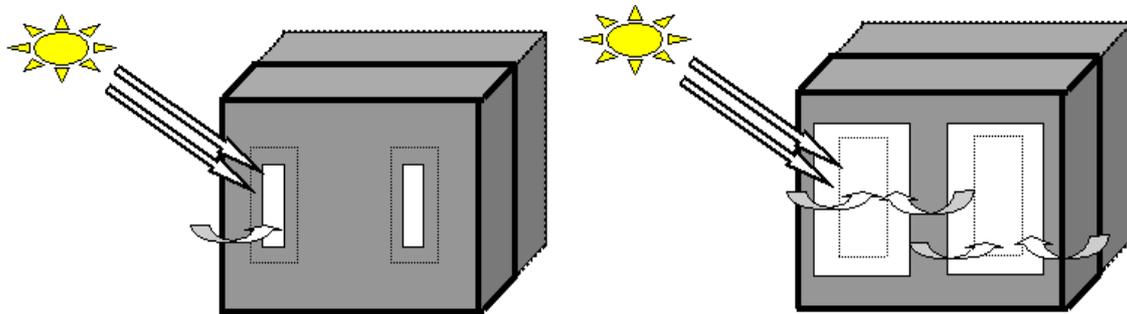


Figura52: Comparación de las temperaturas interiores simuladas: 1) parámetros normales. 2) Mitad inercia, mitad ventana, mitad ventilación. 3) Mitad inercia, doble ventana, doble ventilación

En la figura de la evolución en función de tiempo, no se aprecia una diferencia clara entre los tres casos. Se puede decir que las combinaciones estudiadas en este caso no aportan grandes cambios en las oscilaciones de la temperatura interior.

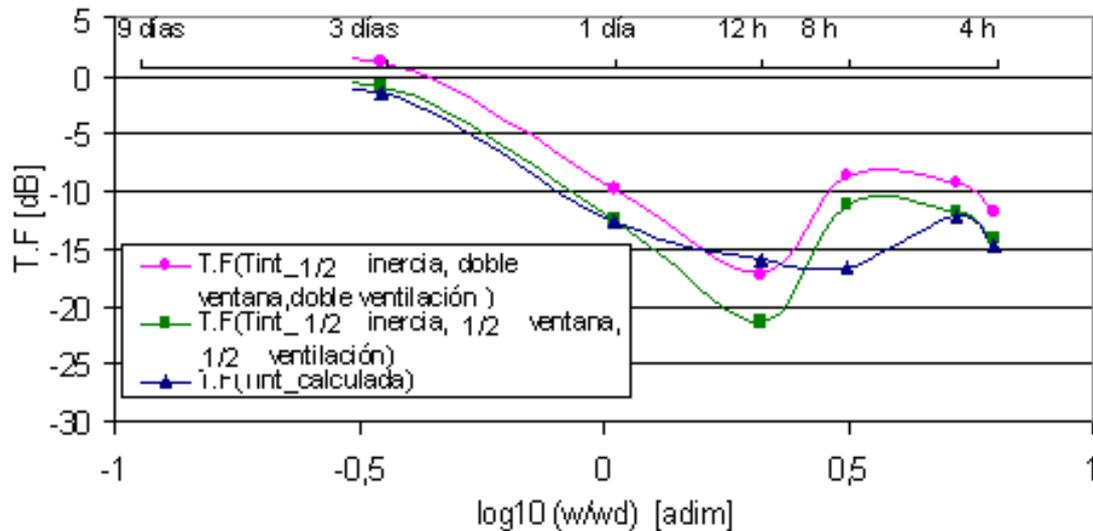


Figura53: Comparación de las Funciones de Transferencia simuladas: 1) parámetros normales. 2) Mitad inercia, mitad ventana, mitad ventilación. 3) Mitad inercia, doble ventana, doble ventilación,

El tipo de control efectuado no afecta el porcentaje de las oscilaciones de la temperatura en las medias y bajas frecuencias.

En general, los cambios en la estructura de la vivienda o en los parámetros ambientales no aportan grandes cambios en las oscilaciones de la temperatura interior. Se puede decir que la tipología de la vivienda y la disponibilidad del espacio intermedio (galería) amortiguan de una forma amplia los posibles cambios en la construcción o ambientales.

A lo largo de este capítulo se han simulado distintos tipos de protección y de ubicación. El resultado ha sido sorprendente, y a veces distinto de lo que se pensaba antes del análisis. Sin embargo, no podemos aún discutir el comportamiento térmico en función de la geometría del edificio. No obstante, la teoría geométrica térmica ha surgido en algunos casos de análisis como determinar el entorno de oscilaciones altas alrededor de las aberturas vidriadas y la constancia en las oscilaciones para las zonas más aisladas. De esto podemos concluir que, cuando nos ubicamos en el interior de un piso, térmicamente no significa que también lo estamos, sino que existen varias zonas variables de oscilación dependiendo de la cercanía a las excitaciones térmicas como la ubicación en lugares de muchas ganancias y pérdidas térmicas.

La importancia de la simulación numérica en arquitectura es primordial teniendo en cuenta que resuelve muchos problemas sin la necesidad de efectuar mediciones. Ahora la pregunta que se puede formalizar es ¿por qué se ha hecho este capítulo? ¿qué se pretende enseñar haciendo este análisis?. La respuesta podría ser más corta de lo que parece. La idea original de este capítulo es de generar la primera etapa de un largo estudio que se puede prolongar a cualquier forma y tipología de edificio.

El programa de simulación, a pesar de su sencillez, ha demostrado que es una herramienta de análisis útil en las fases previas y posteriores de la construcción del edificio. Esta ventaja transmite una confianza en seguir la misma línea y efectuando mejoras en el código para que su aplicación sea más precisa y ampliable a cualquier tipo de construcción. Hasta el momento, las investigaciones y los códigos numéricos obtenidos no han logrado la incorporación de la geometría en todos sus aspectos al fenómeno térmico en la arquitectura. La gran propuesta para el futuro es poder incorporar la geometría a los códigos de cálculo para despejar del todo las ambigüedades que pueden frenar el diseño térmico de edificios.

En el trabajo actual, la ventaja ha sido de aportar dos formas de presentación de los fenómenos térmicos en los edificios: la temporal y la frecuencial. La combinación de ambas presentaciones ha sido de gran importancia ya que de este modo se estudian y se analizan los dos comportamientos: estático y dinámico. Esa ventaja nos conlleva a pensar en interferir, de forma rápida y sencilla, las dos presentaciones con el fin de facilitar las predicciones térmicas en los edificios incluso antes de su construcción.

VI. Conclusiones

El principal objetivo de esta tesis era estudiar el comportamiento térmico dinámico de las viviendas. De esta forma, y como resultado de este trabajo, tenemos indicaciones claras sobre cómo realizar los cambios adecuados para la mejora de las condiciones térmicas interiores de una vivienda. Para ello hemos comparado casos prácticos basándonos en las características constructivas, en especial la piel o envolvente del edificio, y la repartición espacial de la inercia térmica interior y de la piel, con el propósito de obtener indicaciones para el diseño y la remodelación de edificios. Punto y aparte, se entiende por envolvente del edificio el lugar a través del cual se produce el mayor intercambio de flujos entre el interior y el exterior. Las condiciones de protección efectuadas al nivel de la fachada principal del edificio afectan de una forma esencial a las oscilaciones interiores de la temperatura. Cada tipología de edificio tiene su propia respuesta interior y cada cambio aportado a la piel del edificio implica un cambio en la evolución de las oscilaciones interiores de la temperatura. Este análisis parte de medidas experimentales, y por medio de un modelo numérico de comportamiento, con imagen física, validado con las medidas.

En este trabajo, se han analizado medidas de temperaturas y radiación en viviendas ocupadas durante largos intervalos de tiempo y bajo condiciones variables en la protección de la piel y en la excitación exterior. Se han hecho mediciones en dos locales durante períodos prolongados de tiempo y se han seleccionado los intervalos representativos en base a las condiciones de protección de la piel y las características meteorológicas de la excitación exterior, días soleados o nublados. La colocación de las sondas de mediciones en el interior se realizó de tal manera que se pueda estudiar el comportamiento de la respuesta térmica dinámica interior en función de la profundidad (distancia de la fachada principal). En concreto, se han seguido dos viviendas ubicadas en la ciudad de Barcelona. Ambas tienen la misma orientación, Sur 15° Este. La elección de la orientación sur ha sido motivada por el hecho que ésta permite una oscilación dinámica más importante que en otros casos, por la considerable incidencia de la radiación solar directa. Los dos locales en estudio tienen aproximadamente el mismo volumen y se diferencian en la distribución espacial de la inercia térmica y de las características de la envolvente. Así, mientras que el primer local presenta una gran superficie vidriada al sur (con muy baja inercia

de la piel), el segundo posee una galería (espacio intermedio) en la que la temperatura tiene un aspecto totalmente distinto de la que se da en el interior del local.

La herramienta utilizada para el análisis se basa en el uso de la transformada de Fourier aplicada a la Función de Transferencia (T.F.). El análisis frecuencial es una herramienta que agiliza la valoración de los intercambios térmicos dinámicos en los edificios. La transformada de Fourier nos da la capacidad de convertir los datos temporales en función de frecuencias. La Función de Transferencia calcula la ganancia (el porcentaje) de las oscilaciones interiores respecto a las exteriores permitiendo así una interpretación sencilla y completa del comportamiento dinámico de los edificios.

El uso de la función de transferencia como un útil para la cuantificación de la evolución dinámica de los parámetros ambientales interiores nos ha permitido detectar los elementos de la construcción del edificio responsables de las ganancias interiores. El método frecuencial nos ha permitido separar los efectos que tiene cada cambio al nivel de las características del edificio sobre las oscilaciones dinámicas de la temperatura interior así como de la iluminación natural. La representación frecuencial de la función de transferencia (T.F.) permite separar los fenómenos térmicos ocurridos en frecuencias distintas. Por lo tanto, evidenciar los parámetros que afectan más a la evolución de la temperatura interior. Para el análisis frecuencial, distinguimos tres rangos de frecuencias: bajas, medias y altas. Las bajas frecuencias corresponden a intervalos de tiempo superiores a 4 días. Las frecuencias medias corresponden a los períodos de 4 días hasta 12 horas. Las altas frecuencias son inferiores a 12 horas.

Para analizar las medidas, hemos construido un modelo numérico de comportamiento térmico, relativamente simple, y con imagen física. La calidad del modelo se ha validado con las medidas, y hemos realizado un estudio de sensibilidad

de la respuesta con parámetros constructivos. Los resultados del modelo validado nos dan respuesta acerca de los efectos producidos por diversas modificaciones en el diseño. Esta característica se refleja muy bien en el capítulo de la sensibilidad, donde se observan los cambios en la respuesta térmica interior producidos por diferentes modificaciones aportadas en el modelo del edificio, su orientación, el tamaño de las aberturas, las condiciones de protección de la envolvente, la inercia térmica, etc... El modelo validado nos permite así prever los cambios en la respuesta térmica de los pisos sin la necesidad de efectuar mediciones *in situ*. El modelo ha mostrado ser una herramienta relativamente simple, sensible y fiable, que puede por lo tanto ayudar al arquitecto a la hora de tomar decisiones sobre la concepción arquitectónica.

Conclusiones particulares:

Para el análisis térmico en edificios, se distinguen *tres bandas de frecuencias* muy discriminantes con respecto al comportamiento térmico.

En las *bajas frecuencias*, la respuesta es esencialmente independiente de la frecuencia, y tiende a ser plana y lineal, sin cambios en el porcentaje de las oscilaciones, [gráfico 7, capítulo 1].

En las *frecuencias medias*, es donde se manifiestan más los cambios (respuestas distintas para cada tipología y geometría de edificio, condición de protección de la envolvente, orientación, etc.). El aspecto de la curvatura para este rango de frecuencias tiene una forma no lineal en función de las frecuencias, se puede decir que la respuesta es muy dependiente de la frecuencia.

En las *altas frecuencias*, la amplitud de la oscilación depende de las actividades de los ocupantes. La incidencia de la radiación solar directa en el interior de las viviendas y las pérdidas por transmisión a través de la piel del edificio provocan un aumento en la amplitud de oscilaciones.

La relación entre el tamaño de las aberturas en la fachada principal y el porcentaje de las oscilaciones interiores de temperatura se manifiesta más en las frecuencias medias que en altas o bajas frecuencias.

Recordemos ahora un ejemplo particularmente interesante. En el caso de la vivienda con gran abertura vidriada al sur, si modificamos a la vez la inercia y la ventilación, observamos que el cambio de la superficie vidriada sólo perturba la amplitud de oscilación en las frecuencias medias, y el cambio de la proporción de la inercia térmica afecta a todas las frecuencias. La influencia del cambio de las proporciones de la inercia es más notable en las bajas frecuencias que en las frecuencias medias o altas. Sin embargo, si aplicamos los mismos cambios a la vivienda con galería, la variación de las oscilaciones interiores de la temperatura no se ven muy afectadas. La tipología de la vivienda y la distribución espacial de la inercia térmica influyen mucho en el tipo de respuesta interior cuando se combinan varios cambios (distribución distinta de la inercia interior, cambio de la ubicación de las aberturas vidriadas, etc.) en las características constructivas del edificio.

Tales conclusiones parciales sobre el comportamiento térmico dinámico permiten establecer recomendaciones concretas de diseño, a partir de un análisis básico de una situación dada.

En las bajas frecuencias, la inercia, los intercambios de calor por ventilación durante intervalos prolongados y las ganancias estáticas son los principales factores que intervienen en las oscilaciones interiores de la temperatura.

En las frecuencias medias, las oscilaciones se deben a intercambios de calor durante intervalos de tiempo medianos (entre 4 días y 12 horas). El calor por conducción de las paredes de la fachada principal y las ganancias directas e indirectas a través de la radiación solar son los fenómenos que más influyen en las oscilaciones de la temperatura interior.

En las altas frecuencias, las oscilaciones son debidas a fenómenos ocurridos durante cortos plazos de tiempo. Los usuarios son el factor más importante que influye en la respuesta interior. Ésta influencia de los ocupantes viene de las actividades que realizan durante intervalos reducidos de tiempo (por ejemplo: preparar la cena-cenar-ver la televisión, 3 o 4 horas) de una forma repetitiva.

Respecto a la vivienda con gran abertura vidriada al sur, la forma de la dependencia de la función de transferencia casi independiente de la posición espacial interior, aunque, las amplitudes (el valor absoluto de la función de transferencia), ellas, sí dependen de la posición. Existe un límite perimetral donde el tamaño de la amplitud de oscilación es importante y casi constante (hasta la distancia de 4 metros aproximadamente) y luego decrece de una forma fuerte cuando traspasamos esta distancia y llega a ser insignificante para la parte más apartadas de la fachada principal. Se puede observar, con menos claridad, el mismo fenómeno cuando analizamos las mediciones obtenidas de la galería de la segunda vivienda, y esta vez el tamaño de la amplitud de las oscilaciones es mucho más grande debido a que las ganancias y las pérdidas son mayores en la galería (fachada muy ligera y con poca resistencia térmica). En la galería, y gracias al efecto invernadero, la amplitud de la oscilación es casi constante -menos en algunos puntos sombreados donde la amplitud podría variar más, como ocurre en nuestro caso-. En estos casos de fachadas con superficies vidriadas importantes, la radiación solar directa tiene influencia sobre la distribución espacial de las oscilaciones de la temperatura.

En cambio, para la vivienda con galería y masa térmica concentrada en el muro de separación galería-interior, la función de transferencia en el interior es prácticamente la misma independientemente de la ubicación. En este caso, se puede decir que no existe una zona perimetral donde la amplitud de oscilación sea más importante, sino que todo el interior tiene una única amplitud de oscilación ya que la práctica ausencia de la radiación solar directa en el interior impide que se produzca esta diferencia en las ganancias respecto a la profundidad. El equivalente de la zona

perimetral del caso anterior se encuentra en la galería, con un gradiente de condiciones menor en su interior.

La influencia de las características de la envolvente y su condición de protección no sólo altera las oscilaciones de la temperatura media interior, sino que afecta también la fluctuación en profundidad de la temperatura; así, observamos que existe una clara diferencia en las oscilaciones de la temperatura interior entre los dos casos de viviendas estudiados. Para la vivienda con gran obertura al sur, las oscilaciones interiores son muy dependientes de las condiciones de protección de la envolvente, mientras que en el caso de la vivienda con galería, la influencia de la condición de protección de la piel se nota poco en las fluctuaciones interiores, ya que la masa térmica concentrada en el muro de separación galería-interior amortigua y absorbe una gran parte de las fluctuaciones exteriores y las pocas aberturas vidriadas en el mismo muro hacen que las oscilaciones interiores no se vean afectadas por los cambios realizados al nivel de la piel del edificio.

Por lo tanto, es sumamente importante tener en cuenta, a la hora de diseñar un edificio, la geometría, la distribución de la inercia térmica, el tamaño, la repartición de las oberturas y su orientación, el número de ocupantes y los materiales de construcción.

Ahora bien, nuestro modelo numérico, por su misma sencillez, se ha mostrado muy eficiente en este trabajo, al permitirnos prever globalmente las condiciones térmicas de los edificios más variados antes de su construcción. En particular, el capítulo sobre la sensibilidad podría fácilmente dar lugar a un pequeño manual que creemos sería muy útil para los constructores interesados en el tema. Sin embargo, hemos podido también comprobar la extrema importancia para la térmica del factor geométrico, que se encuentra en nuestro modelo, reducido al extremo. Nos queda por delante integrar este factor en su plenitud al código de simulación térmica que ahora vislumbramos. No sería esta una tarea sencilla. Si bien se han dado ya, recientemente, algunos pasos en esta dirección, queda muchísimo por hacer para solamente esbozar aquella *teoría geométrica* de la térmica arquitectónica que aquí

indicamos, sola capaz de adecuar verdaderamente las preocupaciones térmicas al desarrollo real de un proyecto de arquitectura: diseñar con los flujos térmicos como ahora se diseña con la luz o el sonido. Lo único que, llegados aquí, podemos afirmar, es que el código futuro que ahora mencionamos permitirá y necesitará este vínculo fluido entre presentaciones temporales y frecuenciales que, a lo largo del presente trabajo, hemos buscado, defendido e ilustrado.

Anexo 1

“El sistema de adquisición de datos”

1 Introducción y criterios generales para el monitoreo

Una gran parte del trabajo de investigación está basada en la obtención de mediciones en edificios, para el posterior análisis de los datos experimentales, a fin de extraer información sobre su comportamiento térmico para cada tipo de tipología de edificio y para cualquier condición de protección de la envolvente. Es decir, que los resultados obtenidos fueron posibles gracias a la fiabilidad del sistema de adquisición de datos empleado y a los criterios adoptados para su utilización.

Una de las etapas más importantes de un proyecto para monitorear un edificio es probablemente la formulación de una adecuada estrategia de medición. En este caso, se optó por seguir las siguientes proposiciones:

El objetivo ha sido obtener mediciones globales del ambiente interior y exterior simultáneas, variables en el tiempo, a fin de ser comparadas entre sí.

Se seleccionó como variables representativas la temperatura del aire interior, la cantidad de la luz interior, la temperatura del aire exterior y la radiación solar. Si bien hay otras variables climáticas exteriores que inciden sobre la temperatura interior, como por ejemplo el viento, las dos variables medidas son probablemente las más importantes y las que participan en fenómenos de mayor flujo de calor. Por otro lado, son las más sencillas de medir con precisión y fiabilidad. Por estos motivos, se consideró que tener en cuenta estas dos variables sería una primera aproximación a la realidad física. En cuanto al viento y a la ventilación interna, aunque no se han medido, se tiene en cuenta que la infiltración y el número de renovaciones de aire por hora por lo menos sobrepasan el límite higiénico, establecido según la Norma Básica de Edificación NBE-CT-79, para eliminar olores y mantener el ambiente saludable. No se ha tenido en cuenta la variación de la humedad relativa para el análisis, debido a la dificultad de su medición.

Se efectuaron mediciones continuas, de período de medición prolongado (algunos llegan a ser de un año) para la resolución requerida. En el análisis, se optó por intervalos de mediciones que representan una situación dada como mantener las persianas cerradas/abiertas, días nublados o soleados continuos, para ver el efecto de estas características sobre el tipo de la respuesta térmica interior. Tampoco es aconsejable

analizar intervalos de tiempo muy prolongados (mayores a un mes), ya que las excitaciones provenientes de un tiempo largo salen del concepto arquitectónico y no se puede cambiar la respuesta interior modificando elementos en la construcción del edificio. Asimismo, se eligió un intervalo entre mediciones lo más corto posible. Estos son requisitos para disminuir el ruido en los datos, para garantizar cierta fiabilidad en los resultados de los cálculos.

Como el objetivo es efectuar mediciones para evaluar el comportamiento global, se monitorearon varias posiciones interiores (en profundidad) y se fijaron varias condiciones de protección de la envolvente.

1.1 Sistema de adquisición de datos

Teniendo en cuenta las estrategias de medición, es necesario contar con un sistema de adquisición de datos automático, programado para los fines del proyecto de medición, considerando que se requiere un nivel de precisión en la instrumentación relativamente bueno y un elevado nivel de autonomía.

Cabe destacar que se debe tener en cuenta, además de la fiabilidad de la instrumentación en cuanto a las mediciones, la fiabilidad física del equipo, ya que en determinados casos deberá permanecer instalado durante largo tiempo. Por un lado, se requiere que no se produzcan averías o paros en el equipo durante cierto tiempo, a fin de garantizar un período mínimo de mediciones continuas, y por otro, cierta estabilidad de funcionamiento en el tiempo, que depende de la calidad de los instrumentos. Problemas que pueden interrumpir la serie de medidas podrían ser: averías en el soporte magnético, averías en los sensores o conexiones, caídas de la tensión de la red eléctrica, o mal funcionamiento del equipo debido a cambios ambientales importantes y bruscos.

Considerando el tipo de variables a medir, los requerimientos de la metodología de cálculo que se usaría y la disponibilidad de recursos, se eligió un sistema de adquisición de datos que cumpliera lo mejor posible con todos estos requisitos.

El sistema de adquisición de datos utilizado consta principalmente de sensores (de temperatura y radiación solar), conectados por cables a un ordenador personal (PC) con

tarjeta de adquisición de datos y software adecuado. Un esquema de la conexión de estos elementos se puede ver en la figura 1

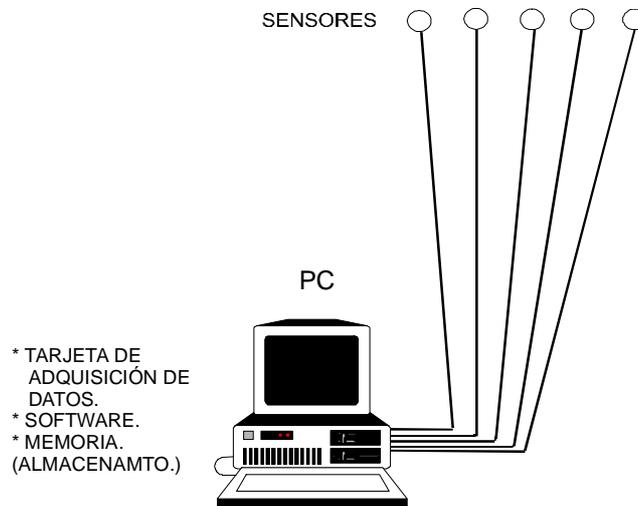


Figura1.: Esquema de los elementos interconectados del sistema de adquisición.

En la siguiente figura se pueden ver los sensores de temperatura y radiación solar, y el ordenador (figura 2)



Figura 2.: Sensores y ordenador que constituyen el sistema de adquisición de datos. En primer plano, célula fotovoltaica (oscura) y, unos 5 cm a su izquierda, sensor de temperatura con radiador.

1.1.1 Sensores de temperatura

Los elementos de un sistema de adquisición de datos que cumplen la función de medir las magnitudes físicas son los sensores, que normalmente dan una salida en forma de variables eléctricas. Los sensores que se utilizan para las magnitudes térmicas de interés y para la caracterización de sistemas térmicos en edificios, efectúan una transducción del valor de la magnitud física a un valor de medida eléctrica (tensión, corriente, resistencia, frecuencia, etc.). Estas señales eléctricas transitorias se almacenan en forma de valores digitales, convertidas mediante una tarjeta de adquisición de datos y el software apropiado, al valor de la magnitud ambiental medida (previa calibración).

Los sensores de temperatura utilizados son circuitos integrados de dos terminales AD590 (el sensor posee un tercer terminal para masa, conectado a su carcasa). Los mismos generan una corriente proporcional a la temperatura absoluta, en relación lineal (Figura 3). Sus características son las siguientes[35]:

Salida de corriente lineal: $1\mu\text{A}/\text{K}$ (sensibilidad)

Rango de medición: -55°C a $+150^{\circ}\text{C}$.

Linealidad: $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ en toda la escala. (Ver figura 3.)

Tensión de alimentación: 4V a 30V dc.

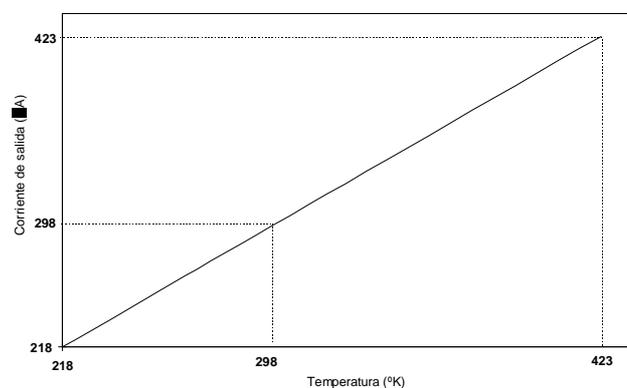


Figura 3: Curva de sensibilidad del sensor: Temperatura (°K)- Corriente I de salida μA . (Fuente: Analog Devices Inc., 1990, USA)

Están ajustados de fábrica a una temperatura de 25°C, con un error de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (para todo el intervalo de medición), aunque pueden obtenerse precisiones mayores, según se verá en el análisis de errores en este mismo anexo.

Su impedancia de salida ($>10\text{M}\Omega$) posibilita una baja variabilidad en las lecturas, ante cambios en la tensión de alimentación.

Cada sensor está conectado a la alimentación de la siguiente manera (ver figura 4.):

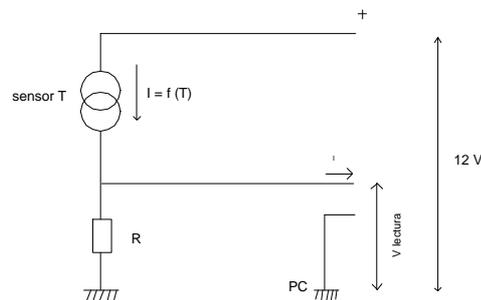


Figura 4.: Circuito de conexión del sensor de temperatura. La corriente I será igual a la temperatura donde está ubicado el sensor en $^{\circ}\text{K}$, en unidades de μA .

La resistencia R se escoge de $22\text{K}\Omega$, para que la tensión entre extremos de los sensores sea cercana a 6 V (valor recomendado por el fabricante), y la salida sea también cercana a 6 V. Se ajusta el amplificador de la placa conversora A/D de forma que estos 6 V correspondan a una lectura cercana o superior a 10000 unidades de digitalización o “dígitos” (de un máximo de 16383 que admite la placa).

Con esto, la unidad de digitalización de la placa conversora A/D, corresponde a cerca de 0.6 mV, o sea, unos 0.03 K.

Los sensores están provistos de radiadores que envuelven su superficie, que disipan el calor generado a causa de la tensión aplicada, para que el mismo modifique lo menos posible la medición.

Este tipo de sensores, es capaz de registrar cambios en la oscilación de temperatura ambiente, tan pequeños como los que se pueden ver el gráfico de temperatura interior de la figura 5., inferiores a la décima de grado (de orden de 0.05 °C) [35].

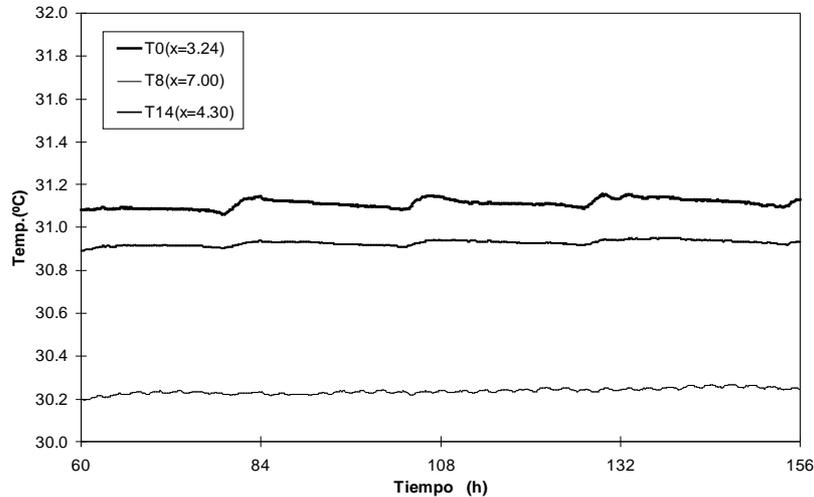


Figura 5: Evolución de la temperatura interior en un piso de edificación tradicional, sin ventilación, con persianas para protección solar.

1.1.2 Sensores de radiación solar.

Se utilizaron sensores constituidos por celdas fotovoltaicas de silicio, que ante la incidencia de luz se comportan como generadores de corriente. A bajas tensiones, la corriente de salida es proporcional a la cantidad de la radiación solar incidente, en un intervalo definido de longitud de onda. El transductor fotovoltaico no da una respuesta proporcional a la integral de la energía incidente por unidad de tiempo, sino que la respuesta depende en cierta medida del espectro de la radiación.

Se puede ver la curva espectral de la celda en la Figura 6:

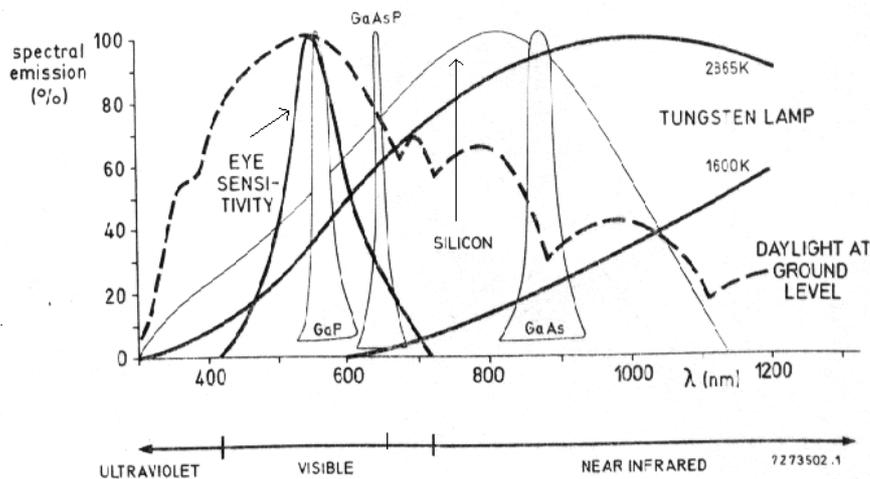


Figura 6: Curva espectral de la celda fotovoltaica de Si, comparada con la curva de sensibilidad del ojo humano, la de la luz natural y la de dos lámparas de tungsteno. (Fuente: General Catalogue Copresa)

Cada sensor se conectó al circuito eléctrico de la siguiente manera: (ver figura 7.):

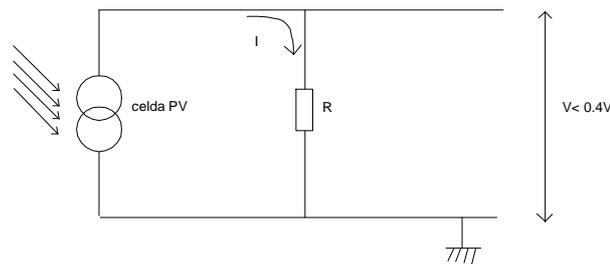


Figura 7: Circuito de conexión de la celda fotovoltaica (sensor de radiación solar).

La resolución obtenible, al utilizar la misma placa convertora A/D que para la temperatura (medida sobre 6 V), es menor.

Se debe prestar particular atención al valor de la resistencia que se coloque en el circuito, de modo que aún en un día con mucha radiación solar, la tensión de salida, pasada la resistencia, no supere los 0.4V. Esto es debido a que a valores mayores de tensión, cambia la relación radiación solar-corriente en la celda, como se puede apreciar en la figura 8.

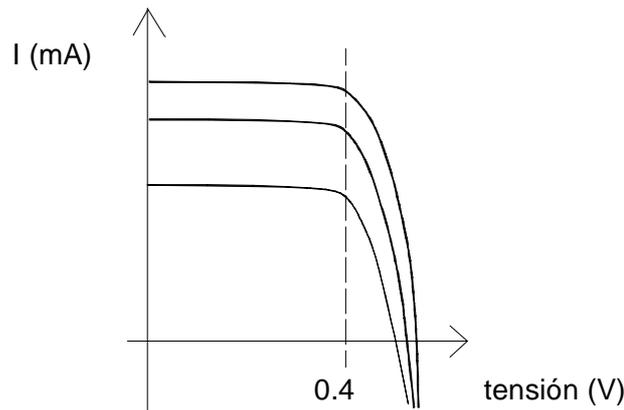


Figura 8: Relación V - I en una celda fotovoltaica de Si (esquema aproximado).

Para poder utilizar los transductores fotovoltaicos como sensores de radiación solar global, se calibran con otro transductor “patrón”, de modo que tuvieran una variación mínima bajo condiciones medias. En este caso, las celdas fotovoltaicas se calibraron con los datos del Servei de Meteorologia de la Generalitat de Catalunya [81] (Gencat) para la Estación de Barcelona. La mayoría de la estaciones de Gencat utiliza celdas fotoeléctricas situadas a 2 m de altura.

Los sensores se colocaron en el exterior, en forma horizontal y en lo posible sin interferencia de obstáculos. En algún caso, sólo se pudo medir media curva diaria de radiación global (durante la mañana) y la otra media curva sólo con radiación difusa, debido a que la parte de cielo disponible era de orientación Este.

En algún caso se han utilizado las celdas fotovoltaicas para medir iluminancia en el interior, calibrándolas con un luxómetro. Probablemente esto sea válido para la mayor parte de la curva diaria de iluminancia, pero carece de fiabilidad para medidas de pocos lux y para ciertos tipos de iluminación artificial (sin otro calibrado de un patrón adaptado).

1.2 Ordenador, tarjeta y software

En este caso, una tarjeta de adquisición de datos analógica-digital de 14 bits (PC ADDA-14 Card), contenida en el PC, recibe la tensión de los diferentes canales, uno por cada sensor. El sistema adquiere y procesa los datos a través de un programa compilado en QuickBasic,

que contiene la calibración de los sensores. El programa se diseñó específicamente para este propósito, y es una adaptación del programa de demostración del manual del usuario de la tarjeta. En el mismo se indica el intervalo entre mediciones, número de mediciones, promedios, etc.

Algunos autores sugieren como intervalo de medición para poder evaluar convenientemente las temperaturas ambientales en edificios, el de menos de 15 minutos. Para la radiación solar sugieren menos de 5 minutos. Por las posibilidades del sistema de adquisición de datos y por los requerimientos de la metodología de cálculo, se programaron las medidas cada 10 minutos, tanto las temperaturas como la radiación solar. El sistema mide durante unos 9 minutos y medio, promedia los datos y graba el promedio del intervalo al finalizar los 10 minutos. Se efectúa el promedio durante tantos minutos, a fin de reducir el ruido producido por la frecuencia propia de la red eléctrica, 50 Hz, y filtrar las posibles fluctuaciones rápidas. Los datos quedan grabados en el PC.

Para fines de cálculo, los datos se extraen posteriormente del PC con un diskette y se promedian, cada media hora en la mayor parte de los cálculos realizados en este trabajo.

Anexo 2

“proceso de construcción de los gráficos”

El sistema de adquisición de datos registra mediciones globales del ambiente interior y exterior simultáneas, variables en el tiempo, con el objetivo de ser comparadas entre sí. Los datos conseguidos con el sistema son series discretas de 10 minutos entre cada dos mediciones consecutivas. Este intervalo es suficiente para poder evaluar convenientemente las temperaturas y la radiación solar en edificios. A fines de facilitar la interpretación de los resultados obtenidos, hemos optado por sacar el promedio de cada tres mediciones consecutivas pasando así de intervalos de 10 minutos a intervalos de media hora. A continuación, analizaremos el aspecto gráfico temporal de la evolución de la temperatura interior para un intervalo de 8 días con las persianas abiertas.

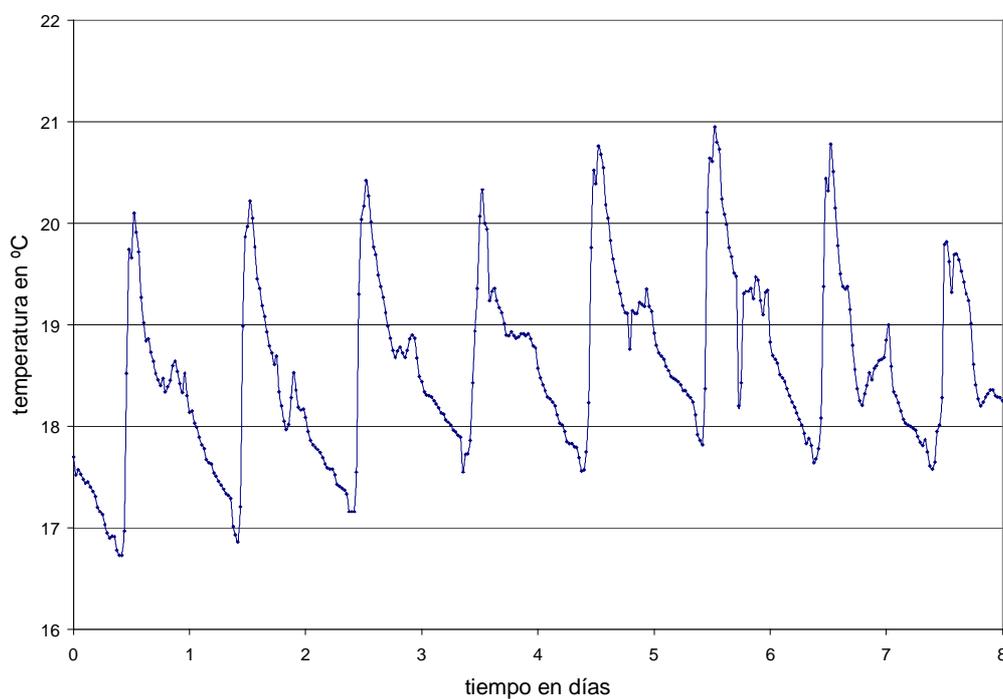


Figura 1: Evolución temporal de la temperatura interior (sonda 2 a un metro de la fachada principal). Datos de 8 días desde el 18 hasta el 25 de Febrero 2002.

Persianas abiertas.

Del gráfico podemos deducir que la temperatura interior sigue un aspecto casi sinusoidal en su evolución, presentando máximos y mínimos que dependen de la evolución de la temperatura exterior. La amplitud de oscilación varía de un día a otro. Observamos un fenómeno que se repite con frecuencia de un día, mientras que, a primera vista, perdimos la visualización de los posibles otros fenómenos que se repiten a frecuencias derivadas o múltiplos de un día.

Con el fin de visualizar todos los fenómenos repetitivos aplicamos la transformada de Fourier (FFT) discreta a estas mediciones.

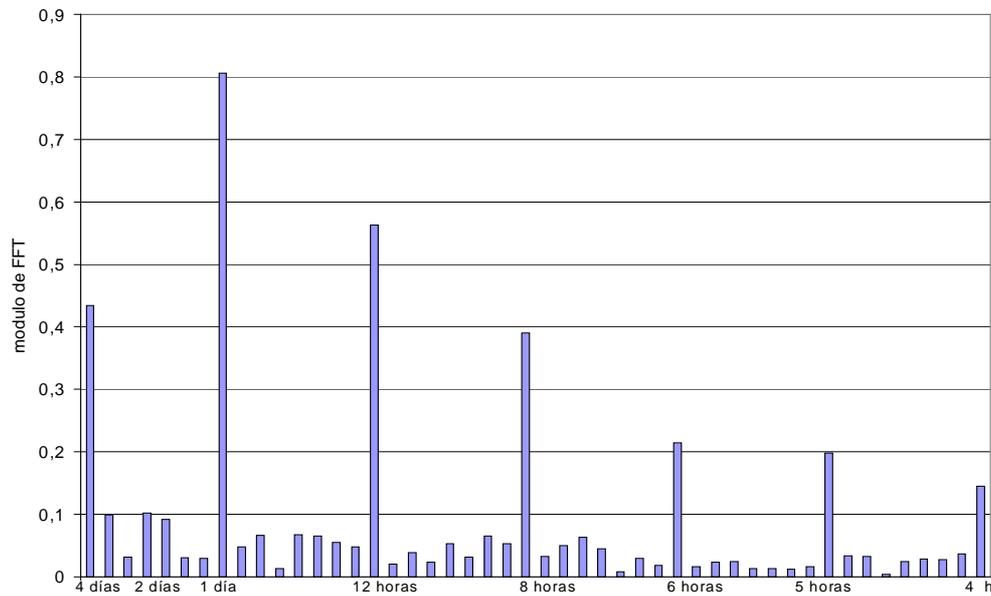


Figura 2: Representación frecuencial del mismo intervalo de mediciones correspondiente a 8 días del mes de Febrero del 2002. Persianas abiertas.

El resultado esta vez es una serie de armónicos, con las amplitudes variables. Se distingue fácilmente una estructura armónica donde la amplitud mas significativa corresponde a la frecuencia de un día. También se observa una amortiguación en amplitud para las frecuencias derivadas de la frecuencia de un día. Entre éstas frecuencias significativas aparecen, de una forma aleatoria, una serie de puntos que son considerados como ruido. Para las frecuencias múltiplos de un día la dependencia frecuencial es menos clara debido al corto intervalo de mediciones analizado. El período de análisis debería ser dos veces superior al período más grande considerado[Shannon] (en nuestro caso el período de cuatro días).

Dicho esto, la transformada de Fourier de las mediciones tiene una clara dependencia armónica donde los puntos más significativos sobresalen del resto.

Descartando todos los puntos no significativos, el aspecto del gráfico interior tiene una forma frecuencial donde la variación más grande corresponde a la frecuencia de 1 día.

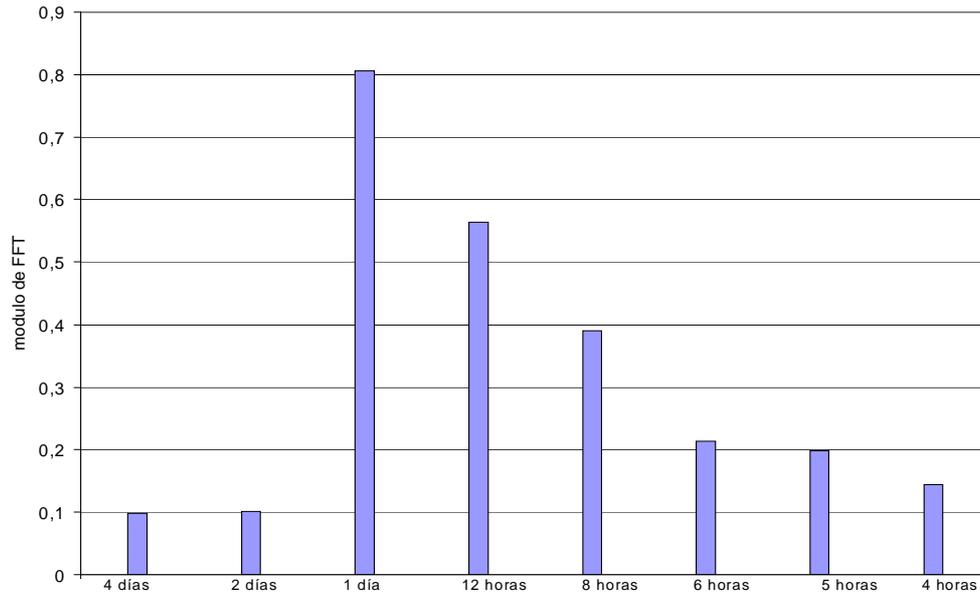


Figura 3: Representación gráfica de las frecuencias significativas.

Para el mismo intervalo de tiempo, la transformada de Fourier para las mediciones de la temperatura exterior presenta este aspecto frecuencial:

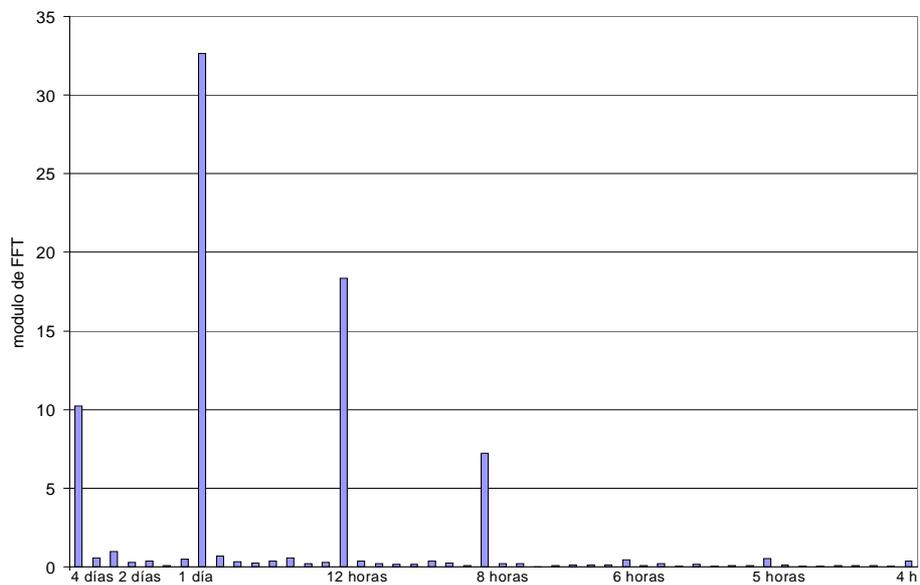


Figura 4: Dependencia frecuencial de la temperatura exterior para el intervalo de mediciones de 8 días del mes de Febrero 2002.

La temperatura exterior sigue la misma estructura armónica. A diferencia de la temperatura interior, la amplitud de variación es mayor debido a los cambios producidos por la radiación solar directa.

De la misma forma, la dependencia frecuencial de la temperatura exterior seleccionando sólo las frecuencias significativas tiene el aspecto siguiente:

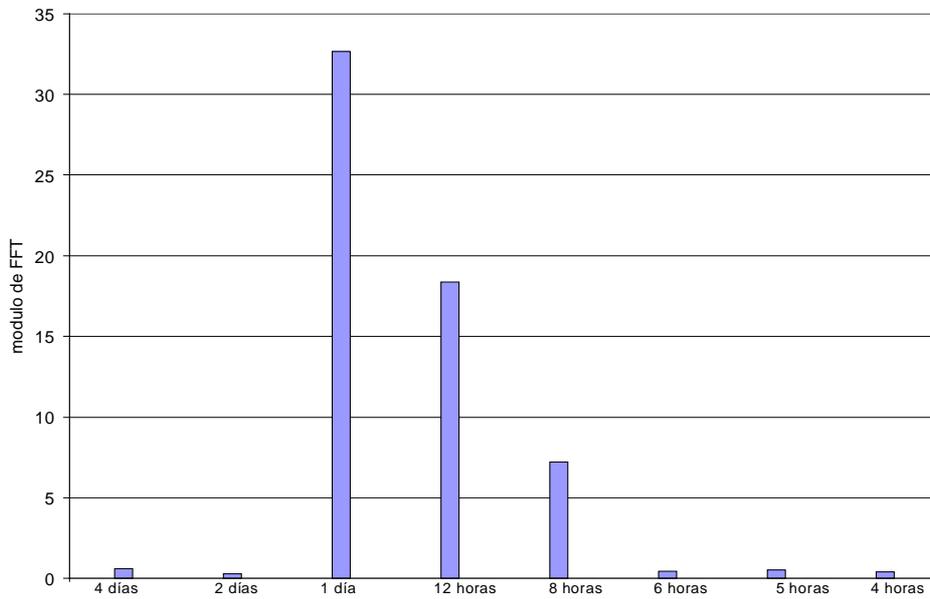


Figura 5: Representación frecuencial de las frecuencias derivadas y múltiplos de un día. Temperatura exterior.

La función de transferencia del sistema teniendo sólo en cuenta las frecuencias significativas es en realidad una curva discreta donde la respuesta total se reparte entre las bandas de frecuencias, bajas, medias y altas. Para construir esta función de transferencia dividimos el módulo de la transformada de Fourier de cada frecuencia de la temperatura interior por el módulo de la transformada de Fourier en cada frecuencia de la temperatura exterior.

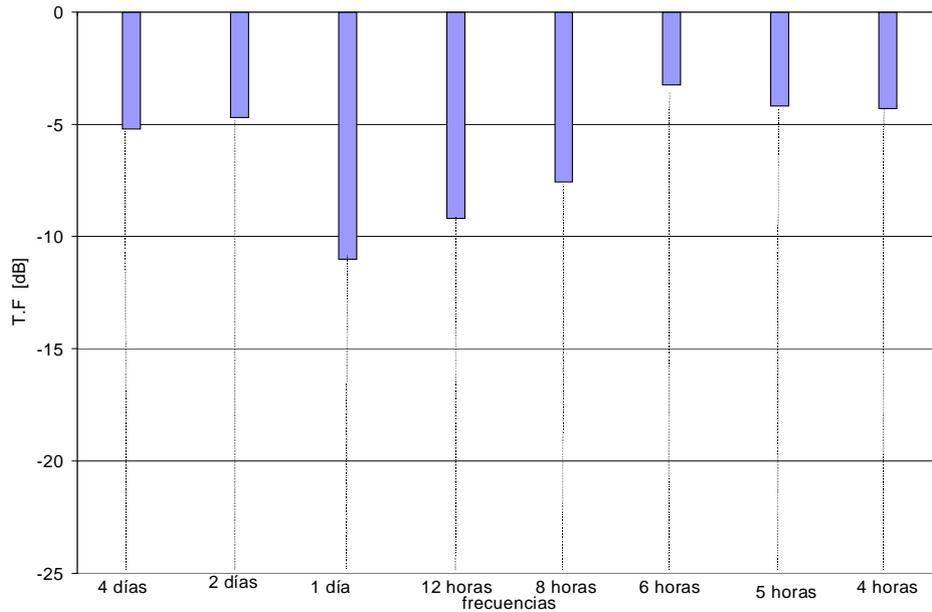


Figura 6: Dependencia de la Función de Transferencia para el caso en estudio. Dificultad de la visualización del fenómeno debido a la discontinuidad gráfica.

La forma de presentación de la figura 5 es la correcta matemáticamente. Debido a que el objetivo del análisis frecuencial en edificios es la visualización de las comparaciones de casos distintos de comportamiento, la forma gráfica discreta no ayuda mucho a descifrar los cambios del comportamiento térmico.

Para visualizar mejor el efecto, hemos optado por unir los puntos con líneas suavizadas que son una guía para el ojo. Notemos que esto no hace perder la esencia discreta (y no continua) del fenómeno. Se espera que este gráfico sea una representación discriminante y estable del comportamiento térmico real.

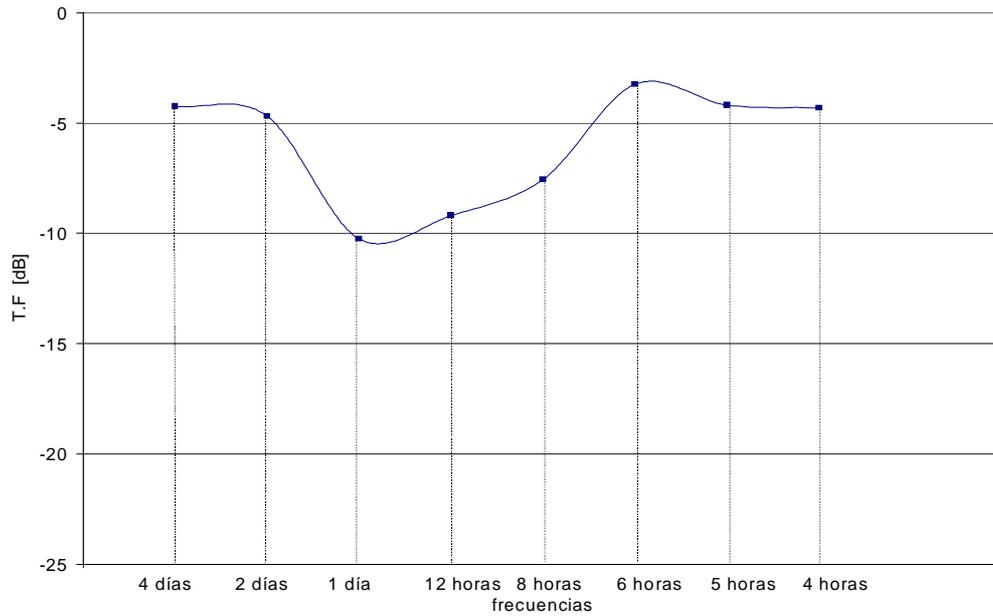


Figura 7: Dependencia continua de la Función de Transferencia después de unir los puntos con una línea suavizada. La visualización del comportamiento es clara.

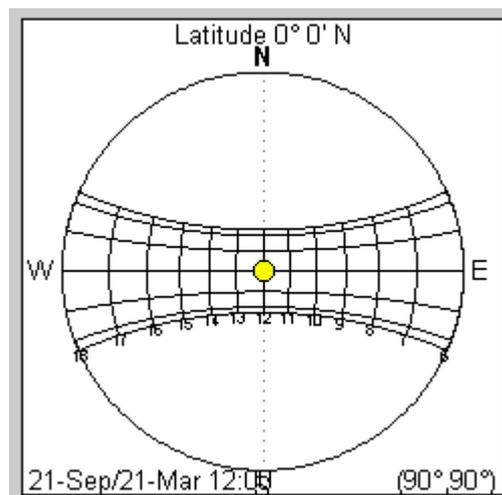
La forma de representación con línea continua permite la visualización despejada del comportamiento, lo cual nos facilita la comparación de varios estudios unidos en el mismo gráfico. Una ventaja que hemos adoptado para entender y ajustar bien los cambios realizados en la construcción del edificio y así determinar las mejores permutaciones de materiales, ubicaciones y geometrías en los edificios.

Anexo 3

“Heliodon”

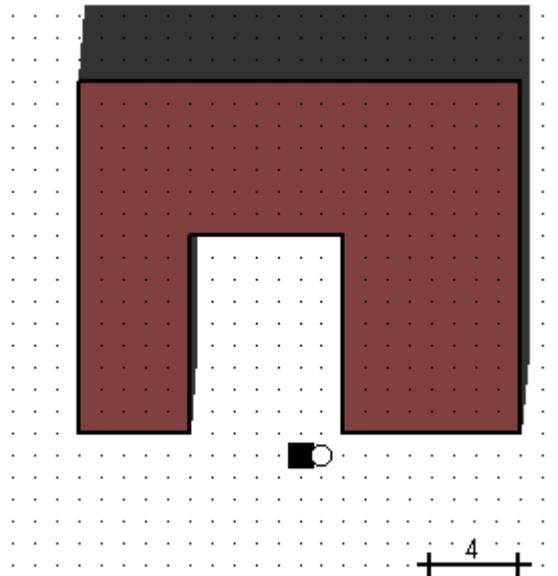
Heliodon es un programa de diseño solar interactivo que permite estudiar los trayectos solares desde cualquier punto del globo y analizar la incidencia de la luz solar directa en cualquier edificio o zona urbana teniendo en cuenta el enmascaramiento producido por otros edificios u obstáculos naturales. La idea principal de Heliodon consiste en ofrecer una visión simultánea de una vista en planta y de un diagrama solar interrelacionados mediante dos puntos- el observador y el sol- y de permitir un constante vaivén entre ambos, haciendo que cualquier modificación en la primera se refleja inmediatamente en el segundo y viceversa. Heliodon es un programa redactado en el lenguaje Matlab © que por su triple presentación: la vista en planta, el diagrama solar y la vista en perspectiva muestra ser una herramienta útil, sencilla y rápida para hallar los efectos de sombra producidos por los obstáculos. Heliodon es un programa de diseño solar interactivo, ideado por Benoit Beckers & Luc Masset.

El diagrama solar presenta los trayectos solares en proyección estereográfica, mientras que la vista en perspectiva permite controlar el dibujo que se está diseñando en la vista en plana y mantener siempre una visión espacial del problema estudiado.



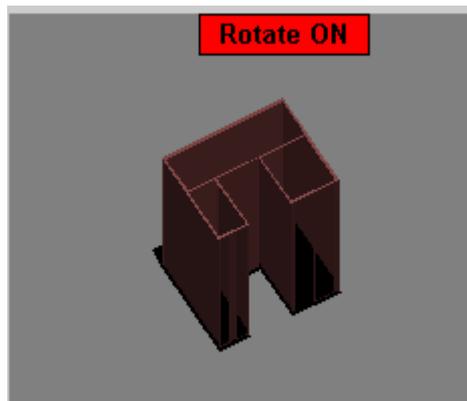
El diagrama solar es una síntesis *temporal puntual* de lo que ocurre en el punto de la vista en planta donde se coloca el observador, mientras que la vista en planta es una representación *espacial instantánea* las sombras producidas por el sol que se ubica en el diagrama solar. En el vaivén entre ambos, se observa rápidamente todo lo que puede ocurrir en el espacio estudiado a lo largo del año: la información que falta en uno, siempre se la encuentra en el otro, o en el juego interactivo entre ambos.

La vista en planta muestra una malla de puntos. Abajo a la derecha, aparece la indicación de *scala*: cuatro metros, correspondiendo a cuatro espacios de la malla; por lo tanto, dos puntos de la malla están separados por un metro.



La vista en perspectiva.

Esta vista permite controlar el dibujo que se está diseñando en la vista en planta, y mantiene siempre una visión espacial del problema estudiado. Sólo dispone de un mando importante: la función “*rotate*”.



El programa “**Heliodon**” tiene como finalidad servir como herramienta en el proceso de proyecto. Ha de permitir plantear problemas de forma rápida e interactiva, que ofrezca respuestas sencillas y fáciles de interpretar. La apuesta de “**Heliodon**” tiene como finalidad conseguir un entorno ágil que permita el análisis de problemas desde el inicio del proceso proyectivo.

Bibliografía

- [1] Leo Hendriks and Kees van der Linden, Building envelopes are part of a whole: reconsidering traditional approaches. *Building and Environment*, February 2003, Pages 309-318
- [2] Clarke. J.A, *Energy Simulation in Building Design*. 2nd Edition 2001. Linacre House, Jordan Hill, Oxford.
- [3] ECOLOGICAL MODELLING 162 (1-2): 69-86 APR 1 2003
- [4] Transient heat flow calculation for multilayer constructions using a frequency-domain regresión meted, *Building and Environment* 38 (2003) 45-61, Elsevier
- [5] B.Givoni, *L'Homme, l'Architecture et le Climat*.
- [6] Aggerholm S. Hybrid ventilation and control strategies in the Annex 35-case studies. Danish Building and Urban Research, Denmark, 2002
- [7] Gratia E. De Herde A. Design of low energy office buildings. *Energy and Buildings* 2003;35:473-91
- [8] Gratia E, I. Bruyère, A. De Herde, How to use natural ventilation to cool narrow office buildings. *Energy and Buildings* 2004; 39:1157-70
- [9] TRANSYS 15, Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory (SEL). University of Wisconsin Madison, USA, 2000.
- [10] T. Weber, G. Jóhannesson. An optimized RC-network for thermally activated building components. *Building and Environment* 40 (2005) 1-14.
- [11] Laouadi A. Development of a radiant heating and cooling model for building energy simulation software. *Building and Environment* 2004; 39:421-31.
- [12] Eunilkim DH. An algorithm for generating a polynomial form of the s-transfer matrix for one-dimensional multilayered slabs. *ASHRAE Transactions* 1989; 95(2): 58-62.
- [13] Hittle DC. A comparison of energy use calculation with actual and synthesized waether data. *ASHRAE Transactions* 1979; 85(2): 167-77.
- [14] Mackey CO, Wright LT. Periodic heat flow – homogeneous walls and roofs, *ASHRAE Transactions* 1944; 50: 293-312.
- [15] Mackey CO, Wright LT. Periodic heat flow – composite walls and roofs. *ASHVE Transactions* 1946;52:283-96.
- [16] Van Gorcum AH. Theoretical considerations in the conduction of fluctuation heat flow. *Applied scientific research*, vol. A2. Martinus Nijhoff: The Hague, 1951. p. 272-80.
- [17] Muncey RW, Spencer JW. Calculations of non-steady heat flow: considerations of radiation within the room. *Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers* 1966; 34:34-42.

- [18] Pipes LA. Matrix analysis of heat transfer problems. Journal of Franklin Institute 1957;263:195-206.
- [19] Gupta CL. A systems model for environmental design of building. National bureau of Standards Building Science Series, No. 39, Washington, DC, 1971.
- [20] Sonderegger RC. Dynamic models of house heating based on equivalent thermal parameters. Doctoral Dissertation, Princeton University, NJ, 1977.
- [21] Hittle DC, Pedersen CO. Calculating building heating loads using the frequency response of multi-layered slabs. ASHRAE Transactions 1981;87(2):545-68.
- [22] LBNL, DOE-2. Engineer manual – Versión 2.1ª. LBNL, University of California Berkeley, November 1982.
- [23] Yumrutas R, Unsal M. A computational model of a heat pump system with a hemispherical surface tank as the ground heat source. Energy 2000;25:371-88.
- [24] Yumrutas R, Unsal M. Analysis of solar aided heat pump systems with seasonal thermal energy storage in surface tanks. Energy 2000;25:1231-43.
- [25] Yumrutas R, Unsal M, Kanoglu M. Periodic solution of transient heat flow through multilayer walls and flat roofs by Complex Finite Fourier Transform technique. Building and Environment 40 (2005) 1117-1125.
- [26] Gouda MM, Danaher S, Underwood CP, Application of an artificial neural network for modelling the thermal dynamics of a building's space and its heating system. MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING OF DYNAMICAL SYSTEMS 8 (3): 333-344 SEP 2002, SWETS ZEILINGER PUBLISHERS, NETHERLANDS.
- [27] Pedro A, Gonzáles, Jesús M. Zamarreño. Prediction of hourly energy consumption in buildings based on a feedback artificial neural network. Building and Environment 37 (2005) 595-601.
- [28] B.M Flax, Intelligent Buildings, IEEE Communications Magazine (1991), April.
- [29] A. Khotanzad, R. Hwang, A. Abaye, D. Maratukulam, An adaptive modular artificial neural network hourly load forecaster and its implementation at electric utilities, IEEE Transactions on Power System 10 (3) (1995) 1716-1722, August.
- [30] A. Khotanzad, R. Afshkhami-Rohani, T.L.Lu, A.Abaye, M. Davis, D. Maratukulam, ANNSTLF a neural network-based electric load forecasting system, IEEE Transactions on Neural Networks 8 (4) (1997) 835-845, July.
- [31] A. Khotanzad, R. Afshkhami-Rohani, D. Maratukulam, ANNSTLF- artificial neural network short-term load forecaster- generation three, IEEE Transactions on Neural Networks 13 (4) (1998) 1413-1422, November.

- [32] M.H. Choueiki, C. Mount-Campbell, S. Ahalt, Building a quasi optimal neural network to solve the short-term load forecasting problem. *IEEE Transactions on Power Systems* 11 (4) (1997) 1432-1439, November.
- [33] G. Schenker, Prediction and Control Using Feedback Neural Networks and Partial Models. Ph. D. dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich. 1996.
- [34] S. Haykin, *Neural Networks, a Comprehensive Foundation*, Maxwell Macmillan, 1994, pp. 160-161.
- [35] Irene Marincic. Respuestas térmicas en edificios: Control térmico a través de la climatización natural. Tesis doctoral, UPC, Barcelona 1999.
- [36] NEEPER DA. Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage. *SOLAR ENERGY* 68 (5): 393-403 2000. ELSEVIER SCIENCE LTD.
- [37] Szekely V, Rencz M, *TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES* 23 (3): 587-594 SEP 2000.
- [38] KALEMA T, HAAPALA T. Effect of interior heat-transfer coefficients on thermal dynamics and energy-consumption. *ENERGY AND BUILDINGS* 22 (2) 101-113 1995, ELSEVIER SCIENCE SA.
- [39] GAL. G, IMBERGER. J, ZOHARY. T, ANTENUCCI. J, ANIS. A, ROSENBERG. T. Simulation the thermal dynamics of Lake Kinneret. *ECOLOGICAL MODELLING* 162 (1-2): 69-86 APR 1 2003. ELSEVIER SCIENCE.
- [40] Y.W.LEE. *STATISTICAL THEORY OF COMMUNICATION*. New York. London. Sydney, John Wiley and Sons, Inc.
- [41] Shengwei Wang, Youming Chen.. Transient heat flow calculation for multilayer constructions using a frequency-domain regression method. *Building and Environment* 38 (2003) 45-61, Elsevier.
- [42] Edward Allen, *Construcción, Cómo funciona un edificio. Principios elementales*. Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona 1982.
- [43] Kusuda T. Early history and future prospects of buildings system simulation. *Proceedings of Building Simulation '99*, vol. I, Kyoto, Japan, September 1999. p. 3-15.
- [44] Lebrun J, Wang SW. Evaluation and emulation of building energy management systems – Synthesis Report, IEA (BCS) Annex 17 Final Report, University of Liege, Belgium, 1993.
- [45] Wang SW. Dynamic simulation of a building VAV air-conditioning system and evaluation of EMCS online control strategies. *Building and Environment* 1999; 34: 681-705.

- [46] R. SERRA, J. ROSET, H. COCH, ARCHISUN. A program that evaluates building comfort. 19th International PLEA'02. Conference. Design with the environment.
- [47] Silvana Flores Larson, Graciela Lesino. SIMEDIF 2000. Nueva Versión del Programa de Diseño y Cálculo de Edificios. Universidad Nacional de Salta. Argentina.
- [48] Crawley DB, Lawrie LK, Winkelmann FC, Buhl WF, Huang YJ, Pedersen CO, Strand RK, Liesen RJ, Fisher DE, Witte MJ, Glazer J. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings* 2001; 33 (4): 443-57.
- [49] Klein SA, Beckman WA, Mitchell JW, et al. TRANSYS - a transient system simulation program. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin- Madison, Madison, USA, July 1994.
- [50] Klein SA, Duffie JA, Beckman WA. TRANSYS –a transient simulation program. *ASHRAE Transactions* 1976; 82 (1): 623-33.
- [51] Winkelmann FC, Brisdall BE, Buhl WF, Ellington KL, Erdem AE, Hirsch JJ, Gates S. DOE-2 supplement, version 2.1E. Technical report LBL-34947, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, 1993.
- [52] Sahlin P, Bring A, IDA solver – a tool for building and energy systems simulation. In : Clarke JA, Mitchell JW, de Perre RCV, editors. *Proceedings of the IBPSA Conference, Nice, France, 1991.*
- [53] Björnsell N, Bring A, Eriksson L, Grozman P, Lindgren M, Sahlin P, Shapovalov A, Vuolle M, IDA indoor climate and energy. In: Nakahara N, Yoshida H, Udagawa M, Hensen J, editors. *Proceedings of the sixth IBPSA Conference, Kyoto, Japan, 1999.* p. 1035-42.
- [54] R.B. Randall, B.Tech., B.A. *Application of Brüel and Kjaer to FREQUENCY ANALYSIS.* 2nd edition. September 1977.
- [55] Koschenz M. Calculation of surface temperature in DOE-2. *The Building Energy Simulation User News*, 1999;20(2).
- [56] Strand R, Winkelmann F, Buhl F, Huang J, Liesen R, Pedersen C, Fisher D, Taylor R, Crawley D, Lawrie L. Enhancing and extending the capabilities of building heat balance simulation technique for use in energyplus. *Proceedings of Building Simulation '99, vol. II, Kyoto, Japan, September 1999.* p. 653-7.
- [57] Hittle DC. *Building loads analysis and system thermodynamic (BLAST) programs. Version 2.0: Users Manual.* Technical Report E-153, US Army Construction Engineering Research Laboratory (USACERL), Champaign, IL, 1979.

- [58] ASHRAE. Procedure for determining heating and cooling loads for computerizing energy calculations – algorithms for building heat transfer subroutines. Atlanta, USA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1976.
- [59] BLAST: Building loads analysis and system thermodynamic. <http://www.bsp.uiuc.edu/blastmain.htm>.
- [60] Park C, Clark DR, Kelly GE. *HVACSIM*⁺ building systems and equipment simulation program: building loads calculation. NBSIR 86-3331, National Bureau of Standards, February 1986.
- [61] Clarke JA. Building and Energy simulation: the state of the art. Solar and Wind Technology 1989;25(4):375-8.
- [62] C. Lombard, E.H.Mathews, A two- port envelope model for building heat transfer. Building and Environment 34 (1999) 19-30.
- [63] Mathews EH, Richards PG. A first-order thermal model for building design. Energy and Buildings 1994; 21:133-45.
- [64] Achterbosch GGJ, de Jong PPG. Krist-Spit CE, van der Meulen SF. Verberne J. The development of a convenient thermal dynamic building model. Energy and Buildings 1985;8:183-96.
- [65] De Witt MH, Driessen HH. ELAN. A computer model for building energy design. Building and Environment 1988; 23 (4):285- 9.
- [66] Crabb JA, Murdoch N, Pnman JM. A simplified thermal response model. Building Serv Eng Res Technol 1987;8:13-9.
- [67] Laret L. Use of general models with a small number of parameters. CLIMA 20,000: 7th Int Cong of Heating and Air Conditioning, Budapest, 1980.
- [68] Tindale A. Third-order lumped parameter simulation method. Building Science. DOE-2 Basics (LBL-29140). Lawrence Berkeley Laboratory. University of California, Berkeley. CA 94720, August 1991.
- [69] Mathews EH, Richards PG. A tool for predicting hourly air temperatures and sensible energy loads in buildings at sketch design stage. Energy and Buildings 1989;14:61-80.
- [70] Lord EA, Wilson CB. The prediction of the behaviour of building environment systems. Building and Environment 1983;18(1/2):65-84.
- [71] Winkelman F. Advances in building energy simulation in North America. Energy and Buildings 1988;10-161-173.
- [72] Tuddenham D. Computers in air-conditioning load estimation. In: Sherrat AFC (Ed). Air-Conditioning System Design for Buildings: McGraw-Hill, 1982.96-111.

- [73] Ayresss JM. Stamper E. Historical development of building energy calculations. ASHRAE Journal 1995;47-55.
- [74] Zmeureanu, R. Fazio P. Haghghat F. Analytical and Inter-program validation of a building thermal model. Energy and Buildings 1987; 10:121-33.
- [75] Anh TTC. Martell A. Cmarero R. A computer code for solving general network simulation in buildings. In The Fourth International Symposium on the Use of Computers for Environmental Engineering Related to Buildings. pp. 225-30.
- [76] Newton D. James R, Bartholomew D. Building energy simulation- a user's perspective. Energy and Buildings 1988; 10:241-7.
- [77] Davies MG. An idealised model for room radiant exchange. Building and Environment 1990;25 (4):209-15.
- [78] Davies MG. The basis for a room global temperature . Phil Trans R Soc Lond 1992;339 A: 153-91.
- [79] Davies MG. Flaws in the environment temperature model. Building Serv Eng Res Technol 1992; 13(4):375-8.
- [80] Davies MG. Definitions of room temperature. Building and Environment 1993; 28(4):383-98.
- [81] Web de la Generalitat de Catalunya. Catalunya y el medi ambient. Datos meteorológicos. www.gencat.es.
- [82] Rafael Serra Florensa, Helena Coch Roura. Arquitectura y energía natural
- [83] Romanazzo, M. *Instrumentation and Measurement Methods Example of Monitored Buildings*. Interaction Between Physics and Architecture in Environment Conscious Design. Trieste, 25-29 September 1989.
- [84] Fanchiotti, A.; Romanazzo, M. *Guida alla strumentazione per l'edilizia dimostrativa*. E.N.E.A., Roma.
- [85] Analog Devices, Inc., 1990, U.S.A. (catálogo).
- [86] General Catalogue 1978 Copresa, february 1978, Eindhoven, Netherlands.
- [87] Arqº José Reyes. Revista digital. arquisol, arquitectura bioambiental y solar
- [88] Revista digital universitaria de la universidad autónoma de México. Y Lemvigh-Muller, Ricardo. (1999). Instalaciones de energía solar térmica manual y de energía solar térmica para producción de agua caliente sanitaria, calefacción de viviendas y climatización de piscinas exteriores.. Madrid: SAPT, Publicaciones Técnicas.
- [89] Rangel, Ruíz Rocío. *Iluminación Natural y Aborro Energético en las Edificaciones*. UNAM.
- [90] Claude. Alain Roulet. Energétique du bâtiment II.

- [91] Serra, R. *Clima, Lugar y Arquitectura. Manual de Diseño Bioclimático*. Madrid: Ciemat, 1989.
- [92] Guedes de Almeida, M.; García, Valdemar ; Maldonado, E. *The Dependence of Effective Thermal Heat Capacity of Non-homogeneous Materiales on Location and Climat Parameters*. Proceedings PLEA 98, Lisbon, June 1998, pp. 345-348.
- [93] Guedes de Almeida, M. ; Bragança, L. ; Maldonado, E. *An Easy and Fast Computer Program for Thermal Simulation of Buildings Based on Variable Heat Capacity*. Proceedings PLEA 98, Lisbon, June 1998, pp. 547-550.
- [94] P.E. Ergatis, P.G. Massouros, G.C. Athanasouli, G.P. Massouros. *Time-dependent heat transfer coefficient of a wall*. International Journal of Energy Research 2003, vol 27, p. 795-811.
- [95] Benoit Beckers. Luc Masset. *Heliodon*. <http://www.upc.edu/aie/catala/soft/index.html>