

TESIS DOCTORAL

La sensibilidad energética de los edificios

Massimo Palme

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE BARCELONA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS I

La sensibilidad energética de los edificios

Tesis Doctoral presentada por

Massimo Palme

para la obtención del título de
Doctor Ingeniero de Materiales

Director: Antonio Isalgué Buxeda

Codirector: Rafael Serra Florensa

Barcelona, 2010

Nota al lector

Esta Tesis se escribió en dos idiomas oficiales de la Unión Europea, español e inglés, para obtener la mención de “Doctor Europeo” en el título Doctor.

En español se escribió la totalidad del texto, en inglés se escribieron el resumen, la introducción y las conclusiones.

En inglés se encuentran además la mayoría de los anexos, que son comunicaciones a congresos de partes de la investigación que es argumento de la Tesis.

Note to the reader

This PhD Thesis was written in two official languages of the European Union, English and Spanish, to obtain the “European Doctor” mention in the PhD degree.

In Spanish was written the entire text, in English were written the abstract, the introduction and the conclusions.

In English are also the majority of the annexes, which are communications to congresses of parts of the investigation that is the argument of the Thesis.

Agradecimientos

A Antonio Isalgué y Rafael Serra, respectivamente Director y Codirector de la Tesis, por las enseñanzas y la paciencia demostrada durante la larga realización de este trabajo.

A la Universidad Politécnica de Cataluña y a la empresa Trama Tecnoambiental, por la Beca UPC Recerca concedida que permitió la investigación.

A la Dirección del Centro de Les Planes de Son y a los autores de los proyectos que se analizaron, por las facilidades en la recogida de datos, dibujos y fotografías de los edificios.

A Helena Coch y a todos los profesores y estudiantes del Grupo de Investigación en Arquitectura y Energía, por todas las enriquecedoras discusiones que vivimos.

A Aldo Fanchiotti, por la ayuda recibida y la profunda relación humana que instauramos durante mi estancia en la Universidad de Roma 3.

A mis amigos antiguos y nuevos, por su presencia constante a mi lado.

A mi familia, referencia continua de mis pasos en la vida.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
INTRODUCTION	15
CAP. 1 ESTADO DEL ARTE	29
1.1 La evaluación energética	33
1.2 La simulación energética	36
1.2.1 Programa Trnsys	36
1.2.2 Programa Ecotect	37
1.2.3 Programa Archisun	39
1.3 La certificación energética en España	41
1.3.1 Programa Lider	41
1.3.2 Programa Calener VYP	42
1.3.3 Programa Calener GT	43
1.4 Los análisis de sensibilidad	44
CAP. 2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	49
2.1 Objetivos	53
2.2 Metodología	54
2.2.1 Definición de variables	55
2.2.2 Relevancia de las variables	60
2.2.3 Edición de datos en los simuladores	65
2.2.3.1 Características de Lider	65

2.2.3.2	Características de Calener VYP	66
2.2.3.3	Características de Calener GT	67
2.2.3.4	Características de Archisun	68
2.2.3.5	Características de Ecoctect	70
2.2.3.6	Características de Trnsys	71
2.2.4	Selección de los estudios de sensibilidad	72
CAP.3	EDIFICIOS EVALUADOS	77
3.1	Bloque de viviendas Les Franqueses del Valles	81
3.1.1	Clima	81
3.1.2	Zonas del edificio	85
3.1.3	Materiales	85
3.1.4	Sistemas	86
3.2	Centro de naturaleza Les Planes de Son	87
3.2.1	Clima	88
3.2.2	Zonas del edificio	90
3.2.3	Materiales	92
3.2.3	Sistemas	95
3.3	Rehabilitación de la antigua Masía de Vallforners	96
3.3.1	Clima	96
3.3.2	Zonas del edificio	98
3.3.3	Materiales	98
3.3.4	Sistemas	98
3.4	Prototipo de escuelas Protoceip	99
3.4.1	Clima	99

3.4.2	Zonas del edificio	99
3.4.3	Materiales	100
3.4.4	Criterios de sostenibilidad	100
CAP. 4	RESULTADOS	103
4.1	Evaluación básica	107
4.1.1	Les Franqueses del Valles	107
4.1.2	Massia de Vallforneres	108
4.1.3	Les Planes de Son	109
4.1.4	Protoceip	109
4.2	Simulaciones	113
4.2.1	Les Franqueses del Valles	114
4.2.2	Massia de Vallforneres	120
4.2.3	Les Planes de Son	125
4.2.4	Protoceip	130
4.3	Monitorización. Les Planes de Son.	135
4.4	Conclusiones parciales	151
4.4.1	Comparativa entre simuladores	151
4.4.2	Comparativa entre tipologías arquitectónicas	153
CAP.5	DISCUSIÓN	157
5.1	Inclusión de análisis de sensibilidad en la evaluación básica	161
5.1.1	El vector sensibilidad	161
5.1.2	La efusividad térmica global	163
5.2	Inclusión de análisis de sensibilidad en la simulación	169

5.2.1	Ecotect	169
5.2.2	Trnsys	169
5.2.3	Archisun	169
5.3	Inclusión de análisis de sensibilidad en la certificación	170
5.4	El confort en condiciones dinámicas.	174
CONCLUSIONES		187
CONCLUSIONS		193
Bibliografía		199

Anexos. Ponencias presentadas por el autor en conferencias y congresos y detalles sobre los instrumentos de medición.

- A Energy consumption in small flats; World Renewable Energy Congress IX, Firenze, Italia, 2006.
- B The importance of the user's actions on the sensation of comfort in buildings; 23th Passive and Low Energy Architecture Conference, Geneve, Suisse, 2006.
- C Robust design: a way to control energy consumption from human behaviour in buildings; 23th Passive and Low Energy Architecture Conference, Geneve, Suisse, 2006.
- D On the influence of user's actions on the thermal performance of buildings; 4th European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon, France, 2006.
- E Comfort evaluation: the relevance of the transition time; AsiaSustainability Conference, Hanoi, Vietnam, 2007.
- F Dynamic sensation of comfort in buildings: the temperature changes effects; Passive and Low Energy Cooling Conference, Crete, Greek, 2007.
- G La simulación energética de los edificios; Habita Conference, Hermosillo, México, 2007.
- H Building sensitivity to climatic fluctuations and user's actions: a challenge for high-tech buildings; 25th Passive and Low Energy Conference, Dublin, Ireland, 2008.
- I Energy consumption and CO₂ emissions in construction and use of buildings according to floor area; World Renewable Energy Congress X, Glasgow, UK, 2008.
- L Proveniencia de los datos analizados para el edificio de Les Planes de Son y características de los instrumentos de medición.

RESUMEN

El propósito de esta Tesis Doctoral es evaluar la sensibilidad de los consumos energéticos de los edificios y de las condiciones de confort establecidas en su interior, frente a variaciones en los parámetros que intervienen en las dinámicas energéticas de intercambio que tienen lugar entre edificio y ambiente. El origen de la investigación es una interrogación sobre la importancia (sospechada) de las acciones de los usuarios sobre los consumos y sobre el mismo confort. La Tesis es constituida por cinco capítulos más una introducción, unas conclusiones, la bibliografía y los anexos. Los capítulos tratan en el orden: análisis del estado del arte, presentación de objetivos y metodología, descripción de los edificios evaluados, presentación de los resultados, discusión crítica de los resultados. La metodología elegida para el estudio es coherente con el análisis del estado del arte previo; a saber, actualmente se investigan las dinámicas energéticas de los edificios de tres maneras: evaluaciones teóricas, simulaciones por ordenador y monitorizaciones de edificios existentes. En esta Tesis se seleccionan cuatro edificios, representativos del entorno construido de la Comunidad de Cataluña, y se les aplica en el orden: una evaluación básica teórica, cuatro procesos de simulación a través de cuatro diferentes simuladores, un análisis de sensibilidad de los resultados de las evaluaciones teóricas, y finalmente un análisis de sensibilidad comparativo de los procesos de simulación. De uno de los cuatro edificios también se presentan datos reales recogidos durante los años 2006 y 2007. Los proyectos y edificios estudiados son: el bloque de 14 viviendas para jóvenes de Les Franqueses del Valles (proyecto ejecutivo); el Centro de Naturaleza de Les Planes de Son (construido); la rehabilitación de la antigua Masía de Vallforners (proyecto de rehabilitación de edificio existente); el prototipo de escuela secundaria Protoceip (proyecto). La metodología de evaluación básica es la propuesta por R. Serra y A. Isalgué y utiliza ecuaciones de balance y variaciones discretas de las mismas. Los programas utilizados para las simulaciones dinámicas son Lider-Calener, Ecotect, Trnsys y Archisun. Todos los pasos descritos se centran en la evaluación del comportamiento térmico de los edificios, que resulta ser preponderante en magnitud de consumo sobre las demás formas de energía que intercambian edificio y ambiente. Los estudios de sensibilidad de las evaluaciones teóricas se conducen sobre los parámetros de las ecuaciones de balance utilizadas: el coeficiente de pérdidas por ventilación, el coeficiente de ganancias por radiación solar directa y el coeficiente de aportaciones en el interior del edificio. Los estudios de sensibilidad de las simulaciones se conducen sobre una selección racional de los numerosos parámetros que permite editar cada simulador, expuesta e justificada en la metodología. Los resultados muestran que un simulador (Archisun) y una tipología arquitectónica (Masía de Vallforners) resultan menos sensibles a las variaciones evaluadas. Por lo tanto, en la discusión y en las conclusiones se discuten la utilidad real de los simuladores y la filosofía que parece mejor utilizar en su desarrollo; también se discuten las diferencias evidentes entre tipologías arquitectónicas frente a la sensibilidad energética y se proponen los conceptos de robustez energética y de efusividad térmica global, como nuevas herramientas de calificación y certificación del correcto funcionamiento energético de los edificios. Finalmente, se discute sobre el concepto de confort en condiciones dinámicas, proponiendo futuras líneas de desarrollo e investigación.

ABSTRACT

The general proposal of this PhD Thesis is the evaluation of the sensitivity of buildings in the energy consumption and comfort sensation, depending on variations in the parameters that appear in the energy interchange dynamics between building and environment. The origin is a question over the relevance (supposed) of the user's actions on the energy consumption and comfort sensation. The Thesis has five chapters, an introduction, some conclusions, the bibliography and the annexes. The chapters treat, on order, the following arguments: state of art, objectives and methodology definition, case studies description, results presentation, critical discussion of the results. Selected methodology for the study is coherent with the previous state of art analysis; nowadays, in fact, there are three ways to investigate the energy dynamics of buildings: heuristic evaluation, dynamic simulation by software and constructed building monitoring. In this work we select four buildings, representative of the built environment of Catalan Community in the Spain Kingdom, and apply to its in order: a basic evaluation, four simulation processes with four different simulators, a sensitivity analysis of the evaluation results, and finally a comparative sensitivity analysis of the simulation results. In one case, results present real assessment during years 2006 and 2007 too. Projects and buildings studied are: the block of 14 flat for young people located in Les Franqueses del Valles (executive project); the Nature Centre of the Planes de Son (constructed); the retrofit of the old Masía of Vallforners (retrofit of existing building); the prototype of the secondary school Protoceip (project). The heuristic evaluation methodology is proposed by R. Serra and A. Isalgué and use steady-state equations and its discrete variations. The software used for the simulations are Lider-Calener, Ecotect, Trnsys and Archisun. All the described evaluations, simulations and sensitivity analysis focalise the thermal behaviour of buildings that appears to be more relevant respect to the others forms of energy interchanges between building and environment. The sensitivity studies of the evaluations are conducted over the parameters that appear in the equations: the loss ventilation coefficient, the direct solar radiation gain coefficient and the internal gain coefficient. The sensitivity studies of the simulations are conducted over a selection of parameters that the software permit to edit, presented and justified in the methodology. Results show that one software (Archisun) and one architectural typology (old Masía of Vallforners) have a lower sensitivity to the considered variations. For this, in the discussion and conclusions we discuss the real usability of the software and the philosophy that seems to be better to use in its development; at the other hand, we discuss the difference between architectural typologies under the energy sensitivity point of view and propose the concepts of robust design and global thermal effusive, as new strategies of qualification and certification of the correct building performance. Finally, we discuss the concept of comfort in dynamical conditions, opening future lines of investigation and development.

INTRODUCCIÓN

Una pregunta banal.

¿Cuánto influye el comportamiento del usuario sobre el consumo energético de un edificio?

Con esta sencilla interrogación empezó un largo viaje en el mundo de la física aplicada a la arquitectura, y en especial en la simulación dinámica del comportamiento energético de los edificios que se realiza por ordenador. Detrás de algo aparentemente banal se escondía un campo muy extenso de trabajo, en buena parte aún por desarrollar, ya que implica la intersección de disciplinas a veces muy distantes entre sí, como la ingeniería, la arquitectura, la psicología y la sociología.

El propósito de esta tesis doctoral es la evaluación de los efectos que mutuamente tienen entre ellos la arquitectura y sus usuarios, bajo la mirada de la energía. Lo de energía es un concepto muy general y difícil de entender de manera exacta. Para decirlo con palabras del premio Nobel por la física R. Feynman, “en la física de hoy no sabemos que es la energía” [Feynman 1964]. Entonces, el primer paso es definir bien que es lo que se entiende con energía en esta tesis, y cuales son los efectos mutuos de la arquitectura y de los usuarios pensando en el concepto definido. Consideramos que en la arquitectura, como en el lenguaje común y corriente, no deberían confundirse los términos energía, potencia, calor, etc... No obstante, y más allá de una discusión en sentido físico estricto, para la que se puede mirar por ejemplo el citado libro de Feynman, se pretende aquí mostrar la percepción del concepto de energía en el trabajo cotidiano del arquitecto. En el desarrollo de este trabajo se utilizará frecuentemente el término energía en lugar del término flujo de energía o potencia, por adecuarse a un lenguaje corriente, sin prejuzgar el sentido físico de las argumentaciones, ya que energía y potencia consumidas están relacionadas por un factor temporal. En las evaluaciones numéricas, siempre aparecen las unidades, impidiendo confusiones donde podrían ser posibles y peligrosas.

Energía es, por un lado, la fuente de calor (o frío) que nuestras viviendas y nuestros espacios arquitectónicos necesitan para hacernos vivir de una manera confortable. Por otro lado, energía es la electricidad que los aparatos que utilizamos consumen en su funcionamiento. Por otro lado aún, energía en general puede ser todo lo que un sistema intercambia con el ambiente que lo rodea.

Existen muchas otras formas de describir lo que es energía, desde su estricta definición física de *posibilidad de realizar trabajo* hasta ideas metafísicas sobre lo que el ser humano posee e intercambia.

La elección de las tres maneras anteriores (calor, electricidad, intercambios) de describir la energía tiene su justificación en el hecho de que así es como la encontramos cotidianamente en nuestras casas, en el lugar de trabajo, en los espacios de la ciudad.

Calor y electricidad son, por cierto, maneras comunes de encontrar la energía en la arquitectura. El tercer elemento, los intercambios, permite generalizar el problema sin hacerlo demasiado abstracto: bien se puede entender, de hecho, que calor y electricidad sean los principales intercambios entre el interior y el exterior de un edificio, pero no los únicos, ya que a ellos tienen que sumarse seguramente flujos de personas, de materiales,

de información que pueden ser considerados energías y convertidos, de forma más o menos compleja, en cantidades mesurables de ese concepto, ahora algo más concreto.

La primera parte del trabajo (capítulos 1 y 2) define lo que es la evaluación del comportamiento energético de los edificios. La segunda parte (capítulos 3 y 4) se centra en la simulación de ese comportamiento que se puede llevar a cabo con diferentes sistemas informáticos en circulación. La tercera parte (capítulo 5) mira al usuario y a su difícil bienestar, con el propósito de entender porqué la arquitectura puede solicitar la gente que vive en ella hasta que esta responda con acciones muchas veces desproporcionadas y descontroladas.

Es una convención, muy difundida en estos días, de que el hombre sea, al fin y al cabo, la medida de todas las cosas; seguramente tiene que ser el la unidad de medida de los espacios que habita, en tiempos de grande conocimientos técnicos que permiten alterar de manera considerable el entorno construido. La creación de un sistema internacional (SI) para la unificación de las unidades de medida fue seguramente un paso importante hacia la posibilidad de medir la mayoría de los fenómenos naturales de una manera congruente con el entorno macroscópico en el que vivimos. En la física aplicada, especialmente cuando se aplica a la arquitectura, se definen hoy en día algunas nuevas unidades, correspondientes a las personas y a sus costumbres. Valgan como ejemplos la definición de la unidad met para medir el metabolismo del cuerpo humano y la de clo para medir la resistencia térmica de la ropa que lleva puesta un usuario medio. La medición de la energía, por otro lado, resulta muy afectada por hechos cotidianos (la factura de la luz, para entendernos...); por lo que en este trabajo se hace largo uso de la unidad kWh en lugar de la del sistema internacional (J), como en la gran mayoría de los textos arquitectónicos en nuestro ámbito cultural.

La arquitectura, vista en su recorrido histórico, ha evolucionado desde las primeras formas de habitaciones, donde la relación mutua con el entorno era fundamental, hacia edificios siempre más grandes y complejos y consecuentemente siempre más separados artificialmente del ambiente exterior. La relación dinámica entre espacio interior y ambiente exterior se ha visto así interrumpida por barreras, físicas y tecnológicas, siempre mayores, como nota muy profundamente R. Serra [Serra 2004]. Todo esto implica una necesidad siempre mayor de control sobre el funcionamiento del sistema.

Si este control total sea o no posible es argumento que va mucho más allá de los propósitos de este trabajo. Aunque sea posible de obtener, el control total implicaría un número tan grande de variables, que alguna de ellas debe de ser la más sensible o de alguna forma la más activa sobre el sistema global.

Individuar cuales son las variables críticas para las diferentes tipologías constructivas modernas es tal vez el objetivo final de esta tesis. La idea de una arquitectura que empiece por la energía y desde este concepto mueva hacia la resolución estética y funcional del problema del habitar, es algo relativamente nuevo en este mundo, pero ya se dieron grandes pasos, y seguramente los próximos años verán la centralidad de este tema en el debate cultural y científico mundial. La literatura en la materia es ya considerable, así como los datos recogidos en el pasado medio siglo por universidades de todo el mundo.

Un breve análisis del estado del arte será el principio de todas las hipótesis presentadas. La bibliografía remite a los textos utilizados, consultados o leídos durante la preparación de este trabajo, referencias constantes de cada discusión y duda que haya salido.

La evolución del control como historia de la arquitectura

Hubo un tiempo en el que los hombres vivían en la selva, en el desierto, en los bosques, o más generalmente donde se encontraban por su destino de nacimiento. Muy pronto empezaron a aprovechar de lo que la naturaleza circunstante podía ofrecerle para defenderse de los agentes atmosféricos cuando estos se hacían agresivos: la cueva fue entonces su primera casa.

Con el desarrollo de habilidades manuales, sin embargo, su capacidad de construir y mejorar los lugares en los que se encontraban ganó sobre el simple aprovechamiento de un lugar menos agresivo, como era el caso de la cueva. El hombre empezó a elegir los materiales y las técnicas constructivas según la situación climática de sus tierras, aunque durante mucho tiempo siguió también desplazándose con el cambio de la temporada e incluso a lo largo de todo el año, como es el caso de algunas tribus nómadas de África, Australia o América. Sin embargo, los sabios que guiaban la tribu sabían muy bien, aunque sea empíricamente, cual era el lugar adecuado para quedarse en todas las temporadas. Véanse, por ejemplo, los estudios sobre algunos pueblos indios de Norte América reportados en el espléndido libro *Energy and form* de R. Knowles [Knowles 1974].

Con el principio de la construcción se sitúa también el principio del control. Durante mucho tiempo encerrar el espacio donde vivir no fue tan sencillo, ya que los primeros materiales de los que se disponía no permitían un nivel tan alto de aislamiento del exterior. Tal vez el igloo resulta ser una de las primeras viviendas bien aisladas que hizo su aparición, y no es seguramente casual el hecho de que apareció en lugares caracterizados por un clima exterior muy extremo. La mayoría de los materiales a disposición, de hecho, eran materiales difícilmente utilizables en su estado primo, como ramas, tierra, hojas, piedras, pieles. Todas las viviendas primitivas eran caracterizadas, consecuentemente, por un elevado nivel de interacción entre los dos espacios que se habían creado: el interior donde el hombre iba a desarrollar parte de su vida, y el exterior desde el cual hacía falta a menudo protegerse.

Con respecto a la simple elección de la cueva, ya se había dado un paso importante: las primeras viviendas hechas por el hombre permitían evidentemente flexibilidad y diferencia en la relación establecida con los agentes atmosféricos, cosa que en las cuevas (lugares muy estables energéticamente) no existía. Así aparecieron también las primeras diferencias entre tipologías de viviendas, evidentemente relacionadas con los diferentes lugares donde se estaba desarrollando la cultura humana.

Con los descubrimientos de los procesos de trabajo de la piedra y de la tierra, con el dominio sobre el fuego y sucesivamente con la posibilidad de fundir los metales, los hombres adquirieron las capacidades necesarias a perfeccionar sus estrategias constructivas. Entonces fue cuando, probablemente por primera vez, surgió la elección

entre la posibilidad de cambiar una estructura muy a menudo y la idea de aislarse lo más posible del agresivo medio exterior, de una vez por todas.

No hubo la misma respuesta a esta elección en todos los lugares del planeta al mismo tiempo, evidentemente. Allí donde los agentes externos eran más molestos durante todo el año, se privilegió la idea de eliminar sus efectos para siempre; mientras donde las variaciones eran muy frecuentes se optó por el otro camino.

Sin duda, las diferentes posturas generaron una riqueza increíble que es ahora patrimonio de la humanidad [Sennet 1997]. Pero hay que anotar que, no obstante las diferencias, el progreso tecnológico llevó en todos los lugares el hombre a intentar protegerse siempre más, y a regular los flujos aprovechables de agentes externos a través de maquinarias siempre más complejas y eficientes. El progreso iluminaba el camino hacia una arquitectura eficiente y racional. Eso por lo menos se creía.

El control total: ¿una ilusión optimista?

En las primeras décadas del siglo XX, una de las tareas de mayor importancia para los matemáticos era la demostración de la completad del espacio lógico. La racionalidad de la Ilustración aún seguía guiando a los grandes profesores D. Hilbert y B. Russel, como si la revolución romántica y el existencialismo recién nacido no existieran.

No obstante, la situación parecía mucho menos simple de lo que ellos pensaban. En el bloqueo de los intentos de demostrar tal completitud, fue H. Gödel quien puso fin a las discusiones con su famoso teorema de incompletitud. Sus hipótesis fueron muy sencillas y el resultado tan deslumbrante como obvio para una mente no matemática: existen cosas verdaderas que no se pueden demostrar. En otras palabras, siempre habrá una o más variables que se escapan al circuito lógico que se pretende cerrar alrededor de ellas, ampliando el espectro de posibilidades en el que están metidas.

La física en general parte de unos conceptos primogenios no definibles formalmente, como el de tiempo. Una larga discusión epistemológica sobre el asunto fue desarrollada por E. Mach [Mach 1833], aún en la época de la Ilustración. La física moderna confirma sin duda la aproximación de Gödel y la filosofía de la época no tardó en elogiar el gran matemático por su descubrimiento. Sin embargo, a pesar de las advertencias de la mecánica cuántica sobre la posibilidad de definir al mismo tiempo una posición y una velocidad, o un tiempo y una energía, aún hoy sigue viva la fe absoluta en la ciencia y en su poder de explicar y controlar el todo, cosa que bien se puede notar en el carácter siempre más tecnológico de nuestra sociedad.

En la arquitectura, la voluntad de control total fue probablemente la causa que nos llevó a la fragmentación del saber y a la división profunda entre las actividades; es muy normal que el arquitecto se considere o sea considerado por los demás casi exclusivamente como un artista o un dibujante, mientras que el ingeniero es un calculista, alguien que nada sabe, ni debería saber, de estética o proporciones.

En síntesis, consideramos que una actitud muy difundida hoy en día sea la siguiente:

- primero, existe el control sobre las variables físicas relacionadas con la arquitectura, simplemente porque debe de existir;
- segundo, el físico y el ingeniero son los elegidos para regular los sistemas de control de una construcción, sin derecho alguno a influir sobre su diseño, propiedad exclusiva del hacer arquitectura.

La evolución de los estilos arquitectónicos más diferentes entre sí ha exasperado este proceso, por lo cual la fractura entre quien hace un proyecto mirando en lo simbólico y quien después sobre esto construye el control que se necesita, se ha ido engrandeciendo de manera desmesurada.

La aparición en los últimos años del problema energético y de las discusiones sobre la sostenibilidad de nuestra sociedad replanteó los problemas del control y del aprovechamiento de los medios naturales, favoreciendo el dialogo, que parecía haber muerto hace tiempo, entre las diferentes disciplinas relacionadas. De hecho, nos damos cuentas ahora de la necesidad de interrelación, de la absoluta importancia de conceptos interdisciplinarios como el de energía.

Bajo estas nuevas miradas, se abren muchas nuevas posibilidades, y en esta riqueza de oportunidades hay que empezar a moverse desde el principio. La arquitectura, tal vez como todo el arte de hoy (y como toda la ciencia, a pensarlo bien), ya no vive de dogmas; es un hacer cada vez diferente, cada vez como si fuera la primera vez, en un dialogo único entre las preexistencias de un lugar y las voliciones de quien quiere vivir en el.

Las variables que influyen sobre el funcionamiento energético de una arquitectura son muchas y tienen orígenes muy diferentes: conteniendo los usuarios, es decir personas, seres más bien complejos, son a la vez psicológicas, fisiológicas, culturales, ambientales.

La física puede explicar mucho sobre los materiales y sobre los agentes atmosféricos, pero se ve necesariamente en dificultad ante el fenómeno humano, algo misterioso al fin y al cabo para ella.

Generalizando, podemos decir que existen dos filosofías a la hora de proyectar: considerar el usuario y su poder de decidir y actuar sobre muchos elementos físicos de la arquitectura, o bien considerarlo simplemente como un sujeto pasivo del entorno en el que vive, pero aún así necesitamos de unos criterios medios para conseguir unos estándares de bienestar, o sea decidir que es este bienestar.

Ambos criterios de proyecto llevan dentro de sí la elección del control como espada de Damocles del funcionamiento del sistema; ambos pasan además a través de la definición de confort, por la necesidad de establecer los estándar que los sistemas tecnológicos necesitan mantener y para entender como actúan las personas y poder entonces predecir y, si es necesario, regular su comportamiento.

Los usuarios y la arquitectura: una doble relación

Las variaciones dinámicas de las variables ambientales ya por si mismas constituyen una gran dificultad en la correcta evaluación de los consumos energéticos de un edificio. A esto se debe adjuntar el hecho de que nunca un espacio arquitectónico existe sin quien lo habite, donde con habitar se entiende relacionarse con el espacio de una manera no lineal en sentido físico, y tal vez absolutamente irracional bajo el estricto control de las leyes de la lógica matemática.

Véase, por ejemplo, la famosa e importantísima contribución de M. Heidegger *Construir, habitar, pensar* [Heidegger 1951] y los debates que desde su presentación se originaron. Para una extensa descripción taxonómica del espacio, se puede consultar la bellísima obra de F. Bollnow, *Hombre y espacio* [Bollnow 1969].

Los usuarios de un espacio continuamente cumplen acciones que modifican su funcionamiento, entender las posibles orígenes de estas acciones es el punto de partida para una aproximación a sus efectos sobre el consumo de energía.

Como los usuarios interfieren con el sistema que constituye el entorno, así el entorno actúa sobre los usuarios, modificando sus percepciones y sucesivamente sus sensaciones.

Todo este efecto se puede resumir bajo el nombre de búsqueda del *comfort* y es uno de los argumentos interdisciplinarios más estudiados en arquitectura. La necesidad de colaboración de físicos, biólogos, psicólogos y ingenieros, además de arquitectos, hace que el reto de acercarse a la definición de confort sea tan fascinante como difícil.

Su importancia es de todas maneras evidente: la sensación de confort que se experimenta en un lugar puede mover a las personas a actuar sobre los sistemas de control de los que disponen, modificando las condiciones y, desde luego, sus sensaciones sucesivas.

Los cambios que ellos hacen son muchas veces cambios totales, como abrir-cerrar; encender-apagar; otras veces se parecen más a lo que pasa en el ambiente exterior: regular el termostato, por ejemplo, u orientar cortinas y persianas.

En todos los casos las funciones, que describen las variables que definiremos internas del sistema, varían y presentan numerosas discontinuidades, hecho que hace muy difícil la formulación físico-matemática del problema.

La distinción entre percepción y sensación será otro de los argumentos largamente discutidos en un próximo futuro, ya que no siempre entre las dos existe una relación lineal [Serra et al. 1995], [Vernon 1962], debiéndose considerar efectos de muchos factores al momento de considerar como una o más percepciones generan una o más sensaciones.

Los intercambios térmicos serán los primeros considerados en este trabajo, puesto que la mayoría de los consumos de los espacios arquitectónicos están relacionados con ellos.

Sin embargo, hace falta recordar que no son los únicos: usuarios y espacio intercambian en cada momento flujos de energía acústica, lumínica, eléctrica y cinética, además de térmica. A estos intercambios se deben adjuntar los no menos importantes intercambios de materia e información, que influyen directamente u indirectamente sobre los demás parámetros de la relación.

Por ejemplo, la sensación de confort en un espacio donde el termostato haga visible la temperatura puede ser diferente de la sensación en un espacio, bajo las mismas condiciones, donde falte esta información. Experimentos en esta dirección ya están conduciéndose, no obstante la evidente dificultad de separar lo que es el efecto psicológico de lo que es el efecto fisiológico bajo un estímulo.

Caracterización de sistemas dinámicos: fundamentos

La caracterización de sistemas dinámicos y de los mecanismos de control sobre estos es una materia muy estudiada en matemática, física, electrónica, informática.

Su aplicación a la arquitectura es importante, pero hace falta entender que cualquiera aproximación a la arquitectura siempre lleva a un error de evaluación. Por esto se procederá aquí en una primera definición de lo que es un sistema dinámico, que será utilizada en el trabajo, pero sin dejarse atrapar en las rigurosas definiciones que la matemática requiere: mejor dicho, en las análisis sucesivas los modelos cambiarán según las necesidades, eso cierto hará las análisis menos generales, pero más comprensibles y relacionadas a la realidad.

En tiempos postmodernos [Lyotard 1979] hace falta un acercamiento más suave a la teoría, que siempre queda relacionada por muchos lados a la praxis. Cada vez es la primera vez, entonces, y cada caso necesita sus condiciones peculiares. Eso no debe impedir hacer algunas consideraciones generales, de lo contrario, tiene que complementarlas en el camino hacia una siempre mejor comprensión de los fenómenos.

Un sistema dinámico se caracteriza por tener unas variables de entradas y unas variables de salidas. Sobre estas variables actúan los elementos presentes en el sistema, y los ruidos internos y externos que dificultan su registro y análisis. Un sistema se define lineal si la relación entre las variables de entrada y salida comporta que una combinación lineal de las primeras dé como resultado una combinación lineal de las segundas.

Un sistema dinámico se define invariante si a una excitación $e(t)$ corresponde una salida $s(t)$ y a una excitación $e(t-t_0)$ corresponde una salida $s(t-t_0)$. Un sistema se define causal si $e(t)=0$ para $t < t_0$ implica $s(t)=0$ para $t < t_0$. Los sistemas físicos normalmente se consideran lineales, invariantes y causales.

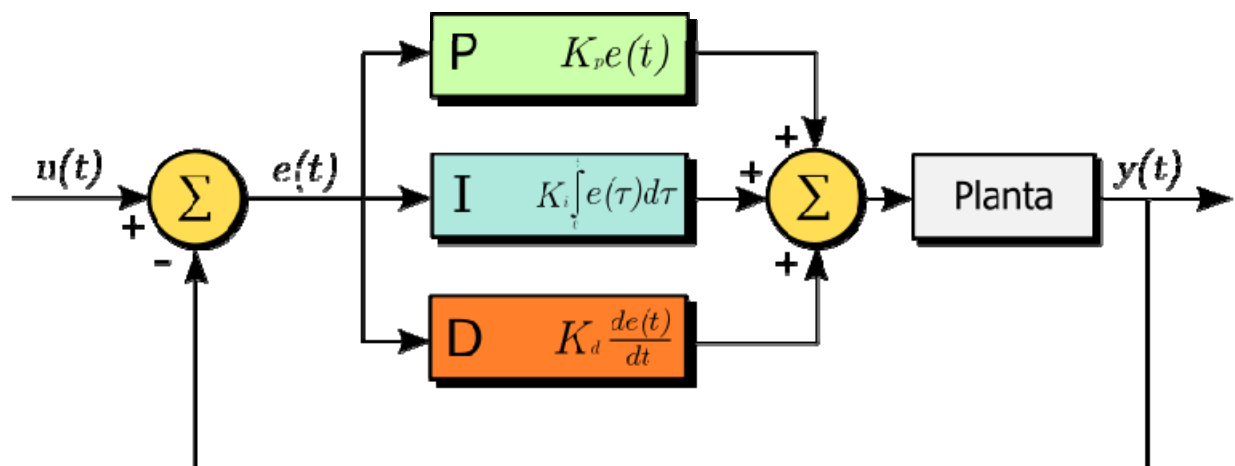
Sobre estos sistemas se puede actuar la transformada de Fourier, que permite hacer mucho más sencillos los cálculos diferenciales. No obstante, casos básicos se pueden analizar sin el recurso a la herramienta de Fourier, a través de metodologías numéricas como la de Euler o la de Runge-Kutta. Este trabajo aprovechará largamente de estas estrategias.

Como subrayado precedentemente, el campo de análisis de las acciones de los usuarios comporta variaciones no continuas en las funciones de referencia para las variables de entrada del sistema. Esto hace imposible una correcta evaluación del fenómeno a través del análisis de Fourier, de todas formas los resultados obtenidos por medio de diferentes simulaciones mostrarán como la tendencia general se aproxima a las teorías, quedando claro de que la análisis de cada caso tiene que ser modificada cada vez en sus hipótesis para acercarse a la realidad.

La simulación dinámica de la arquitectura frente a variaciones de los parámetros ambientales es un campo ya muy desarrollado; por esto no se entrará demasiado en el tema en este trabajo, fijándose mejor en la relevancia de las acciones cumplidas por los usuarios y intentando una evaluación puntual de sus efectos.

El controlador proporcional integral derivativo (PID)

En muchos campos de la física y de la electrónica es muy frecuente utilizar un controlador de tipo proporcional integral derivativo. Esto porqué las mediciones son normalmente afectadas por errores sistemáticos y por errores causados por variaciones rápidas de las entradas. Así, un buen mecanismo de control tiene en cuenta los dos efectos y es capaz de autorregular el funcionamiento del sistema que controla. En el capítulo conclusivo se hará la hipótesis de que el mismo cuerpo humano pueda aproximarse a un PID o, mejor dicho, que el PID sea al final la reproducción de algo que la naturaleza hace continuamente relacionando los sistemas de regulación de los organismos con sus sistemas nerviosos y sensoriales. Esta hipótesis se intentará confirmar a través de experimentos sobre la estimación del confort en situación dinámica. Si así fuera, nos encontraríamos frente a una importante consecuencia para el proyecto de las instalaciones de regulación y control de las variables ambientales en el entorno construido. Para una discusión cibernética véase por ejemplo el trabajo de A. David [David 1973].



Esquema lógico de un controlador proporcional integral derivativo

Planteamiento de la cuestión. ¿Qué es la sensibilidad energética?

Durante ya medio siglo, científicos de varias disciplinas han centrado su atención a las problemáticas relacionadas con la energía. La sociedad moderna fundó su subsistencia sobre el aprovechamiento de recursos naturales que se revelaron muy pronto agotables. El problema de la dependencia de los recursos naturales siempre fue enorme, llevando al desarrollo de nuevas tecnologías, con los objetivos de optimizar el aprovechamiento de los recursos tradicionales y de ampliar el campo de los recursos mismos aprovechables. Buena parte de los recursos más escasos se destina a la producción de energía, especialmente eléctrica, que se utiliza después como fuente de iluminación y de calor, o bien para el funcionamiento de los dispositivos de comunicación y almacenamiento de la información.

En el campo de la arquitectura, el problema de la energía no tardó en hacerse prioritario, porque buena parte de la energía producida se consume en los edificios, en su construcción y utilización.

El desarrollo de estrategias de diseño se vio acompañado por la necesidad de evaluación de los proyectos. A tal fin se crearon numerosas metodologías de análisis y planteamiento, y dentro de ellas destacan los ahora numerosos simuladores electrónicos. Entre ellos citamos Energyplus, DOE II, Trnsys, Blast, Ecotect. En España son muy utilizados Lider y Calener, programas oficiales de evaluación y asignación de la etiqueta energética según las directivas nacionales de ahorro de energía.

Los factores claves para el desarrollo de estrategias constructivas más eficientes han sido

- el agotamiento de los combustibles fósiles
- el calentamiento global, a veces asociado al cambio climático

La recepción de las problemáticas relacionadas con la energía ha tenido algunas pautas clave. Entre estas las más importantes parecen ser:

- a nivel mundial, la firma del protocolo de Kyoto el 11 de diciembre de 1997, con el que los países industrializados se comprometieron a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero entre el 2012
- a nivel europeo, la recepción del mismo protocolo en la directiva EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) del 4 de enero de 2003
- a nivel español, el Real Decreto 47/2007, que incluye la certificación energética entre las obligaciones para construcciones nuevas y rehabilitaciones.

La directiva europea obliga los estados miembros a:

- desarrollar una metodología de cálculo del comportamiento energético de los edificios

- establecer y aplicar unos requerimientos mínimos de eficiencia energética a los edificios nuevos y existentes
- certificar la calidad de los nuevos edificios construidos, vendidos o rentados

La recepción del primer punto en la mayoría de los estados miembros llevó al desarrollo de simuladores. En España los simuladores utilizados son las herramientas Lider y Calener, que además se utilizan para los puntos 2 y 3 de la misma directiva (verificar los requerimientos y calificar).

El desarrollo y la utilización de estos simuladores puso el problema de su fiabilidad. De aquí el problema de la sensibilidad.

El concepto de análisis de sensibilidad no es nuevo en matemáticas. Con ese concepto se entiende un análisis de la variación determinada en una variable dependiente cuando varían una o más de las independientes. En la arquitectura el problema es complicado, porque el sistema físico que se representa tiene relaciones no lineales, y eso dificulta la comparación de los resultados de un análisis de sensibilidad.

¿Simuladores sensibles o edificios sensibles?

En el campo de la simulación, la sensibilidad está relacionada a la reproducibilidad y a la transparencia de los resultados de la misma simulación. Varios investigadores se dedicaron durante las últimas décadas a analizar la sensibilidad de distintos simuladores.

Los análisis de sensibilidad fueron utilizados también para afinar el cálculo cuando, con los edificios construidos, se podían relacionar los resultados con datos reales, medidos en situ.

Sin embargo, ¿Quién nos asegura que la sensibilidad sea solo un aspecto de mera incertidumbre de la simulación?

Es decir, el objeto real de la investigación, un edificio, tiene él mismo una cierta sensibilidad a las variaciones en los parámetros que determinan su consumo.

¿Es posible afinar las simulaciones hasta pretender que la realidad se vea casi totalmente respetada en los resultados? ¿O bien siempre habrá variaciones incontrolables que hacen sensible el mismo edificio construido? Más aún, ¿es cierto que todos los edificios son igual de sensibles a los cambios en esos parámetros?

Si no es así, ¿tiene sentido una clasificación de las tipologías arquitectónicas según su sensibilidad frente a las variaciones? Estas son una parte de las cuestiones desde las que emerge la necesidad de este trabajo.

Que es un análisis de sensibilidad?

Generalmente se entiende con análisis de sensibilidad una evaluación de los cambios en los resultados de un cálculo cuando varía una de las variables de ingreso. En el campo de la edificación se habla por tanto de sensibilidad de las simulaciones o bien del mismo simulador. Durante los últimos 20 años se han realizados muchos estudios en este sentido, todos con los objetivos de:

- definir la sensibilidad (transparencia y reproducibilidad) de los simuladores
- afinar la evaluación a través de análisis de sensibilidad y definición más precisa de las variables más sensibles

Por ejemplo recordamos los trabajos de K. Bruke [Bruke et al. 2005] en el primer caso y de F. Westphal [Westphal et al. 2005] en el segundo.

Sensibilidad, ¿simulación o realidad?

Dentro de todas las variables del cálculo energético, muchas dependen fuertemente del usuario. Resulta interesante evaluar la sensibilidad de las simulaciones a estas variables, porque son muy difícilmente controlables, es decir, si la sensibilidad frente a ellas es muy alta, no existe la posibilidad de afinar el cálculo.

En este trabajo se clasificarán las variables como: climáticas, dependientes del usuario, propias del edificio, dependientes de los sistemas.

Se averiguará que es posible afinar la estimación de las variables del edificio, que es posible sacar unos valores climáticos medios relativamente validos, que es posible definir el error de los controles de los sistemas, pero que es muy difícil definir la variabilidad donde el usuario tiene el poder de decidir como actuar.

En este sentido, la sensibilidad de los edificios se podrá definir como una realidad, más que como un simple problema de reproducibilidad y transparencia de los resultados de una simulación. Es decir, los datos reales de consumo serán muy dependientes del uso que se hará del lugar.

Primero habrá que demostrar que son las dependientes del usuario las variables más sensibles. Para esto el punto de partida es definir todas las variables que entran en las simulaciones según diferentes filosofías de evaluación. Se analizarán los simuladores Lider, Calener, Ecotect, Trnsys, Archisun.

INTRODUCTION

A banal question.

How much affect the behavior of the users the energy consumption of a building?

With this simple question started a large rise in the world of the architecture applied physic, and specially in the dynamic simulation of the energy performance of buildings that is realized by a software. Behind something apparently banal hides a field of study very extensive, in great part still to developed, because involve the intersection of disciplines sometimes very different, as engineering, architecture, psychology and sociology.

The final objective of this PhD Thesis is the evaluation of the effects that users and buildings generate each others, under the point of view of the energy. Energy is a general concept that is difficult to understand exactly. As said the Nobel prize R. Feynman, “nowadays in physics we don’t know what energy is” [Feynman 1964]. So, the first step is to define what means “energy” in this work and which are the mutual effects of users and architecture thinking on this concept.

We consider that in architecture, such as in the general language, the words energy, power, heat, etc... might not be confused. Over a strictly discussion in the physical sense (see for example the same book of Feynman), it is pretended here to show the perception of the energy concept in the daily work of the architect. Developing this work, it was frequently used the word energy instead of the words energy flow or power, in order to accord with a general language, without prejudice the physical sense of the argumentations, because energy and power are related by a time factor. In the numerical evaluations, always appear the unities, impeding confusion where it can be possible and dangerous.

Energy is the heating and cooling demand that our flats need, to make possible a comfortable life inside of them. At the other hand, energy is the electricity that our systems consume in the function. Moreover, energy is all that a physic system exchanges with the external ambient.

There are a lot of ways to describe what energy is, from the physical definition as “possibility to do work” to metaphysical ideas over what the human being has and interchanges.

The selection of the previous tree forms to describe the energy (heat, electricity and information) is justified for the fact that these are the common ways to find energy in the every day life, at home, in the spaces of the city, at work.

Heat and electricity are clearly common ways of find energy in architecture. The third element, the interchange, make possible to generalize the problem without making it too abstract: is easy to understand, in fact, that heat and electricity are the most important interchanges between the inside and the outside of a building, but not the only ones: there have to be added fluxes of persons, materials, information, that can be regarded as energy and converted, more or less easily in physical quantities of this concept, now something clearer.

The first step of the work (chapters 1 and 2) defines what the evaluation of the energy behavior of buildings is. The second part (chapters 3 and 4) centers in the simulation of building performance with different simulators. The last one (chapter 5) takes into account the user and its difficult comfort, with the objective to understand why architecture can actuate over the users until they respond with actions often excessive and uncontrolled.

Is one idea very diffused nowadays, that the user is the measure of all things, and certainly has to be the measure of the spaces that use, in times when knowledge permits to change considerably the built environment. The creation of an international system (SI) for the unification of the measure unities was certainly an important step to the possibility of measuring the natural phenomena congruently with the macroscopic environment in which we live. In the applied physic, especially when it is applied to architecture, are defined nowadays some new units, directly related to the persons and to their culture. For example, the definition of the met unit, to ass the human metabolism, or the definition of the clo unit, to ass the thermal resistance of the clothing for a standard user. The energy measure, at the other and, result to be very affected by quotidian facts (the bill of the electricity, to understand...); for this fact it was use often, in this work such as in the majority of the architectural books of this cultural environment, the unit kWh instead of the SI unit (J).

In fact, architecture during its historical development, evolved from the first habitations (where the mutual relationship with the environment was fundamental) to buildings bigger and bigger and always more complex (and consequently more artificially separated from the external environment). The dynamic relation between internal space and external ambient was interrupted with barriers, physical and technological, ever bigger, well described by R. Serra [Serra 2004]. All these facts implicate a necessity bigger and bigger of control over the performance of the physical system “building”.

If total control would be possible or not is an argument, that moves far away of the aim of this work. If possible, this control implicates a number so large of variables that one of these has to be the most important or active over the global system.

Find out which are these sensitive critical variables for different modern architectural typology is maybe the final proposition of this PhD thesis. The idea of an architecture that starts from energy and moves to the esthetical and functional resolution of the problem is something new in this world, but the way is signed and in the future years this topic will be central in the science and culture discussion around the world.

Literature of the topic is considerable, such as the dates measured during the past half century in various Universities of the world.

A short art state analysis is the start point of the thesis expressed. The bibliography leads to texts used, consulted or red during the preparation of the work, constant references of discussion and doubts.

The evolution of the control like history of the architecture

It had a time in which the men were living in the jungle, in the desert, in the forests, or more generally where they were for his destiny of birth. Very soon they started making useful what the surrounding nature could offer them to defend themselves from the atmospheric agents when these were becoming aggressive: the cave was at the time their first house.

With the development of manual skills, nevertheless, their aptitude to construct and improve the places in those they were won on the simple utilization of a place less aggressive, since it was the case of the cave. The man started choosing the materials and the constructive technologies according to the climatic situation of the landscape though for a long time they continued also moving with the change of the season and even along all the year, since it is the case of some nomadic tribes of Africa, Australia or America. Nevertheless, the wise persons who were guiding the tribe knew very well, which was the place adapted to remain in all the seasons. See, for example, the splendid book *Energy and form* of R. Knowles [Knowles 1974].

At the beginning of the construction places also the beginning of the control. For a long time to enclose the space where to live was not simple, because the first materials of which they was arranging were not allowing a high level of isolation of the exterior. Maybe the igloo was one of the first well isolated houses, and there it is not fortuitousness the fact that it appeared in places characterized by a very extreme climate. The majority of the materials, in fact, were materials difficult to use in its natural state, as branches, land, leaves, stones, skins.

All the primitive housings were characterized, for this, from a high level of interaction between both spaces that had been created: the interior where the man was going to develop part of his life, and the exterior of which it was necessary to protect often.

Respect to the simple choice of the cave, an important step was done yet: the first housings made for the man allows an evident flexibility and difference in the relation established with the atmospheric agents, thing that in the caves did not exist. In this way appeared also the first differences between typologies of housings, evidently related to the different places where the human culture was been developing.

With the discovery of the processes for working the rock and the dirt, with the domain over the fire and successively with the possibility of fusing metals, men acquired the necessary capacities to perfecting his constructive strategies. Then it was when appeared, probably for the first time, the choice between the possibility of changing often the skin structure of the constructions and the idea of making it isolated the most possible of the aggressive exterior environment, once for all.

There was no the same response to this choice in all the places of the planet at the same time, evidently. Where the external agents were more troublesome all the year, there was favored the idea of eliminating their effects once for all; while where the variations were more frequent it was chose another way.

Undoubtedly, the different attitudes generated an incredible architectural variety that is now a patrimony of humanity [Sennet 1997]. But it is necessary to annotate that,

nevertheless the differences, the technological progress led in all the places to trying to protect always more, and to regulating the usable flows of external agents across machineries always more complex and efficient.

The total control: an optimistic illusion?

In the first decades of the 20th century, one of the tasks of major importance for the mathematicians was the demonstration of the completeness of the logical space. The rationality of the Illustration still continued guiding the important professors D. Hilbert and B. Russel, as if the romantic revolution and the existentialism did not exist.

Nevertheless, the situation was turning out to be less simple than they were thinking. In the blockade of the attempts of demonstrating completeness, was H. Gödel who put end to the discussions with his famous theorem of uncompleteness. His hypotheses were very simple and the result so dazzling as obvious for a not mathematical mind: there exist real things that cannot be demonstrated. In other words, always there will be one or more variables that escape to the logical circuit that one tries to close about them, extending the spectrum of possibilities in the one that they are put.

Physic in general starts from a primitive concepts, that are not formally definably, such as the concept of time. An extended epistemological discussion over this question was developed by E. Mach [Mach 1833] still in the Illustration époque. The modern physics confirms undoubtedly the approach of Gödel and the philosophy of the epoch was not late in the great mathematician praised for his discovery. Nevertheless, still today it follows alive the absolute faith in the science and in its power to explain and control everything, thing that well can be obvious in the character always more technological of our society.

In architecture, the will of total control was the one that took us to the fragmentation of the knowledge and to the deep division between the activities; it is very normal that an architect consider himself or were considered by the others almost exclusively as an artist or a draftsman, whereas the engineer is someone that nothing knows, or should not know, of aesthetics or proportions.

Resuming, we consider that:

- first, exists the control on the physical variables related to the architecture, simply because must exist;
- second, the physicist and the engineer are the chosen ones to regulate the systems of control of a construction, without any right to influence the design, exclusive property of architecture and architects.

The evolution of the most different architectural styles exasperated this process, for which the fracture between whom does a project looking in the symbolic order and the one who later constructs the control that it needs, has been enlarging in an enormous way.

The appearance in the last years of the energetic problem and of the discussions on the sustainability of our society restated the problems of the control and of the utilization of the natural means, favoring the dialog, which seemed to have died some time ago, between the different related disciplines. In fact, we give ourselves account now of the need of interrelationship, of the absolute importance of interdisciplinary concepts, such as energy.

Under these new points of view, many possibilities are opened, and in this wealth of opportunity it is necessary to start moving from the beginning. The architecture, maybe as the whole art of today (and as the whole science, thinking it at well), does not live of dogmas yet; it is one to do every time differently, every time as if it was the first time, in a unique dialog between the preexistences of a place and the ideas of the one who wants to live in.

The variables that influence the energetic performance of architecture are a lot and include the users, this means that complexity is rising enormously. The user-dependent variables are simultaneously psychological, physiological, cultural and environmental.

Physics can explain much on the materials and on the atmospheric agents, but is not enough explaining the complexity of the human phenomenon.

Generalizing, we can say that two philosophies exist at the moment in the architectural project: to consider the user and his power to decide and act on many physical elements of the architecture, or to consider he to be simply a passive subject of the environment in which he lives, but nonetheless we need a few average criteria to obtain some standard of well-being, or to decide that it is this well-being.

Both criteria of project lead to the choice of the control as Damocles' sword of the performance of the system; both lead in addition to the definition of comfort, one because of the need to establish the standard that the technological systems have to support, and another one because of the need to understand what people desire to predict and eventually regulate it.

The users and the architecture: a double relation

The dynamic variations of the environmental variables constitute a great difficulty in the correct evaluation of the energetic consumptions of a building. To do it is necessary to attach the fact that an architectural space never exists without whom lives inside, where in spite of living has to be understood to relate to the space in a not linear way in physical sense, and maybe absolutely irrationally under the strict control of the laws of the mathematical logic. See, for example, the M.'s Heidegger famous and very important contribution *Bauen, whonen, denken* [Heidegger 1951] and the debates that from his presentation originated. For an extensive taxonomic description of the space, it is possible to consult the beautiful work of O. F. Bollnow, *Mensch und raum* [Bollnow 1969].

The users of a space constant fulfill actions that modify its performance, to understand the possible reasons that originate these actions is the start point for an approximation to their effects on the consumption of energy.

As the users interfere with the system that constitutes the environment, so the environment acts on the users, modifying their perceptions and sensations.

All this effect can be summarized under the name of comfort and it is one of the interdisciplinary arguments most studied in architecture. The need of collaboration of physicists, biologists, psychologists, engineers and architects, it does that the objective of approaching the definition of comfort were as attractive as difficult.

Its importance is anyhow evident: the sensation of comfort that one feels in a place can move the persons and act on the systems of control which they have, modifying the conditions and, certainly, his successive sensations.

The changes that they do are often steps, like to open/close or to ignite/extinguish; other times look alike more to what it goes on in the exterior environment: to regulate the thermostat, for example, or to orientate curtains and blinds.

In all the cases the functions, which describe the variables that we will define as internal to the system, have numerous discontinuities, and this fact makes the physical - mathematical formulation of the problem very difficult.

The distinction between perception and sensation will be another of the arguments discussed, [Serra et al. 1995], [Vernon 1962], because not always a linear relation exists between the concepts, considering the many factors that have to be taken in account studying how one or more perceptions generate one or more sensations.

The thermal exchanges will be the most considered, since the majority of the consumptions of the architectural spaces are related to them.

Nevertheless, it is necessary to remember that these are not the only ones: users and space exchange in every moment flows of acoustic, light, electrical and kinetic energy, besides thermal. To these exchanges there must be attached not fewer important exchanges of information, which influence directly or indirectly on other parameters of the relation.

For example, the sensation of comfort in a space where the thermostat does visibly the temperature can be different from the sensation in a space, under the same conditions, where this information is absent. Experiments in this direction already have been conducted, nevertheless the evident difficulty of separating what is the psychological effect of what is the physiological effect under a stimulus.

Characterization of dynamic systems: fundamentals

The characterization of dynamic systems and of the mechanisms of control on these is a matter very studied in mathematics, physics, electronics and computer science.

Its application to the architecture is important, but it is necessary to understand that any approximation to the architecture always leads to a mistake of evaluation. For this

reason first will be done the definition of what a dynamic system is, as will be used in the work, but without the rigorous definitions that the mathematics needs: rather, in the successive analysis, the models will change according to the needs, to make the analysis more understandable related to the reality.

In postmodern times [Lyotard 1979] it is necessary to have a weak approach to the theory, which always remains related by many sides to the practice. Every time it is the first time, then, and every case needs its peculiar conditions. It must not prevent from doing any general considerations, otherwise, has to complement them in the way towards a better and better comprehension of the phenomena.

A dynamic system is characterized for having a few variables of income and a few variables of exits. On these variables they operate the present elements in the system, and the internal and external noises that impede its record and analysis. A system is defined linear when the relation between the variables of entry and exit leaves that a linear combination of the first ones gives as a result a linear combination of the second ones.

A dynamic system defines invariant if to an excitation $e(t)$ corresponds an exit $s(t)$ and to an excitation $e(t-t_0)$ correspond an exit $s(t-t_0)$. A system defines causal if $e(t) = 0$ for $t < t_0$ implies $s(t) = 0$ for $t < t_0$. The physical systems normally are considered linear, invariant and causal.

On these systems it is possible to operate with the Fourier's transforms, which allows making the differential calculations much simpler.

Nevertheless, basic cases can be analyzed without the resource to Fourier's tool, across numerical methodologies as that of Euler or that of Runge-Kutta. This work will use a lot these strategies.

As underlined, the field of analysis of the actions of the users endures variations not continue in the functions of reference to the variables of entry of the system. This makes a correct evaluation of the phenomenon impossible across Fourier's analysis. Anyway, the results obtained by different simulations will show as the general trend come closer the theories, remaining clear that the analysis of every case has to be conducted every time under different hypotheses to approach the reality.

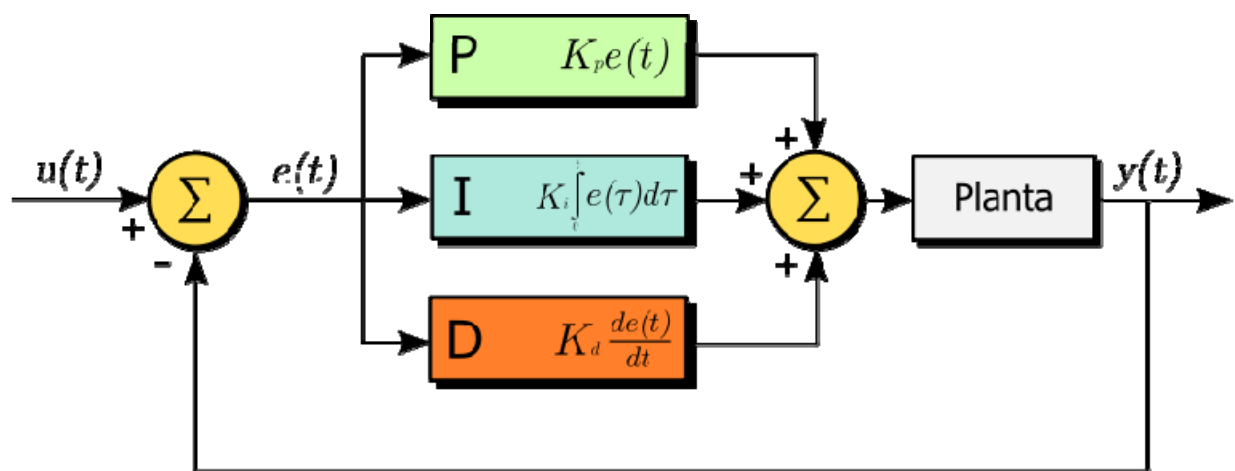
The dynamic simulation of the architecture opposite to variations of the environmental parameters is a field already very developed, for this reason it will not be entered too much in the topic in this work that centers in the relevancy of the actions fulfilled by the users and trying a punctual evaluation of its effects.

The proportional-integrative-derivative (PID) controller

In many fields of the physics and of the electronics it is very frequent to use a control of type integrative and derivative. The measurements are normally affected by systematic mistakes and by mistakes caused by rapid variations of the income. In this way, a good

mechanism of control bears both effects in mind and there is capable of auto regulation in the functioning of the system that controls.

In the conclusive chapter there will be done the hypothesis of which the same human body could come closer a PID or, rather, that the PID is ultimately the reproduction of something that the nature does constant relating the systems of regulation of the organisms to its nervous and sensory systems. This hypothesis will try to confirm across experiments on the estimation of the comfort in dynamic situation. It could have important consequences in the project of regulation and control facilities over the environmental variables in the constructed environment. For a cybernetic discussion you can see the work of A. David [David 1973].



Logical scheme of a proportional integrative derivative controller

Exposition of the question: What is the energetic sensitivity?

During already half century, scientists of several disciplines have centered their attention to problematic related to the energy. The modern society founded its subsistence on the utilization of natural resources that were revealed very soon exhaustible. The problem of the dependence of the natural resources was done with the years always more urgent, leading to the development of new technologies, with the aim to optimize the utilization of the traditional resources and to extend the field of the usable resources themselves.

A good part of the scantiest resources is destined to the production of energy, specially electrical, which is in use later as source of lighting and of heat, or for the functioning of the devices of communication and storage of information.

In the field of the architecture, the problem of the energy was not late in becoming priority, because good part of the produced energy is consumed in the buildings, in its construction and utilization.

The development of strategies of design met accompanied by the need of evaluation of the projects. There were created numerous methodologies of analysis and exposition. Between them Energyplus, DOE II, Trnsys, Blast, Ecotect. In Spain Lider and Calener are very used, official programs of evaluation and assignment of the energetic etiquette according to the national boards of saving energy.

The key factors for the development of the most efficient constructive strategies have been

- the depletion of the fossil fuels
- the global warming sometimes associated with the climatic change

The receipt of problematic related to the energy has had some key guidelines. Between these the most important seem to be:

- worldwide, the signature of Kyoto's protocol on December 11, 1997, with which the industrialized countries promised to reduce the emission of CO₂ before 2012
- to European level, the receipt of the same protocol in the directive EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) of January 4, 2003
- to Spanish level, the Royal decree 47/2007, that includes the energetic certification between the obligations for new constructions and rehabilitations.

The European directive forces the member states to:

- To develop a methodology of calculation of the energetic behavior of the buildings
- to establish and to apply a few minimal requirements of energetic efficiency to the new and existing buildings
- to certify the quality of the new constructed, sold or rented buildings

The receipt of the first point in the majority of the member states led to the simulators development. In Spain the used simulators are the tools Lider and Calener, which in addition are in use for the points 2 and 3 of the same directive (to check the requirements and to qualify).

The development and the utilization of these programs put the problem of its reliability. Of here comes the problem of its sensitivity.

The concept of sensitivity analysis is not new in mathematics. With this concept there is understood an analysis of the variation determined in a dependent variable when they change one or more of the independent ones. In the architecture the problem is complicated, because the physical system that is represented has not linear relations, and it impedes the comparison of the results of a sensitivity analysis.

Sensitive simulation tools or sensitive buildings?

In the field of the simulation, the sensitivity is related to the repeatability and to the transparency of the results of the same simulation. Several researchers devoted themselves during the last decades to analyze the sensitivity of these simulators.

Sensitivity analysis were used also to perfect the calculation when, with the constructed buildings, it was possible to relate the results to real information, measured on site.

Nevertheless, the one who does assure us that the sensitivity should be alone a fact of mere uncertainty of the simulation? That is to say, the real object of the research, a building, has it or not itself certain sensitivity to the variations in the parameters that determine its consumption?

Is it possible to perfect the simulations up to claiming that the reality meets almost totally respected in the results? Or always there will be uncontrollable variations that make the same constructed building sensitive? Even more, is it true that all the buildings are equal of sensitive to the changes in these parameters?

If it is not like that, has it felt a classification of the architectural typologies according to its sensitivity opposite to the variations? These are parts of the questions from which it emerges the need of this work.

What is an analysis of sensitivity?

Generally an evaluation of the changes is understood by sensitivity analysis in the results of a calculation when it changes one of the variables of revenue. In the field of the building one speaks therefore about sensitivity of the simulations or about the same simulator. During the last 20 years many studies have been realized in this respect, all with the aims of:

- To define the sensitivity (transparency and repeatability) of the simulators
- to perfect the evaluation across sensitivity analysis and more precise definition of the most sensitive variables

For example we remember the works of K. Bruke [Bruke et al. 2005] in the first case and of F. Westphal [Westphal et al. 2005] in the second one.

Sensitivity: simulation or reality?

Inside all the variables of the energetic calculation, many of them depend strongly on the user. It turns out interesting to evaluate the sensitivity of the simulations to these variables, because they are very difficultly controllable, that is to say, if the sensitivity opposite to them is very high, there does not exist the possibility of perfecting the calculation.

The variables will qualify as: climatic, dependent on the user, own of the building, dependent of the systems.

One will verify that it is possible to perfect the estimation of the variables of the building, which is possible to extract a few climatic average relatively good values, which it is possible to define the mistake of the controls of the systems, but that is very difficult to define the variability where the user has the power to decide and act.

In this respect, the sensitivity of the buildings will be able to be defined as a reality, more than as a simple problem of repeatability and transparency of the results of a simulation. That is to say, the real information of consumption will be very dependent on the use that will be done of the place.

First there will be necessary to demonstrate that they are dependent of the user the most sensitive variables. For this the point of item is to define all the variables that enter the simulations according to different philosophies of evaluation. There will analyze the softwares Leader, Calener, Ecotect, Trnsys, Archisun.

CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se examinará el estado del arte, es decir los resultados conseguidos hasta ahora en los diferentes temas que se tratarán en la investigación.

Estos temas pueden ser esquemáticamente resumidos en los siguientes:

- la arquitectura sostenible, pensada como una arquitectura que pretende reaccionar a las problemáticas del agotamiento de los recursos energéticos y del calentamiento global asociado a la producción de energía a través de los combustibles fósiles
- la evaluación energética de los edificios como disciplina que utiliza conceptos de la física, de la arquitectura y de la ingeniería para calcular el consumo teórico de los edificios
- la simulación energética de los edificios a través de herramientas informáticas, en las diferentes versiones y filosofías de evaluación que se encuentran en el mercado
- la certificación energética de los edificios, como política de ahorro de energía y de reducción de las emisiones de gases contaminantes, a nivel mundial, europeo y español
- los estudios de sensibilidad en general como disciplina matemático-estadística aplicada a diferentes campos de la ciencia
- los estudios de sensibilidad aplicados a la simulación energética de los edificios, como nueva propuesta para evaluar y mejorar la fiabilidad de los simuladores
- los estudios de sensibilidad aplicados a la evaluación general del funcionamiento energético de los edificios, como índice de la capacidad del edificio para reaccionar a perturbaciones en los parámetros que regulan su comportamiento energético
- los estudios sobre el confort, como disciplina que aprovecha de conceptos físicos, psicológicos, sociológicos para definir que es el bienestar y explicar la origen de las acciones de los usuarios sobre la arquitectura

Por la amplitud de cada tema, algunos fueron tratados más profundamente que otros, intentando centrar el análisis en los que más interesan este trabajo, es decir: la evaluación energética, las herramientas de simulación y de certificación y los análisis de sensibilidad.

La importante parte del confort, por su especial interés y por su presencia preponderante en las perspectivas de investigación en el futuro, se trató a parte en el capítulo conclusivo.

1.1 La evaluación energética

Con el planteamiento de las problemáticas ambientales, consecuencia directa del agotamiento de los recursos y, en tiempos más recientes, de la emergencia debida al fenómeno conocido como calentamiento global, empezaron a desarrollarse estrategias de actuación para limitar la demanda energética de todos los sectores de la actividad humana. Al mismo tiempo, creció notablemente la investigación de nuevas formas de energías, renovables y limpias.

En la arquitectura, el planteamiento medio ambiental se encuentra en todos los niveles del proyecto. Especialmente se nota la presencia del enfoque ambiental:

- en la formación del arquitecto: escuelas y empresas forman sus estudiantes, empleados y colaboradores para que sepan gestionar los proyectos con atención a la temática energética
- en la evaluación del proyecto: consultoras, auditorias y los mismos Estados ponen en marcha programas de control y certificación de las prestaciones de los edificios
- en la puesta en obra: las instalaciones y los materiales deben asimismo tener certificación de bajo consumo y calidad
- en el mantenimiento y en la gestión: el edificio ya no es algo que terminado deje de importar, sino más bien una entidad con cierta vida útil y ciertas necesidades que se programan desde el principio.

La evaluación del proyecto se hace con criterios medio ambientales, más o menos reconocidos y compartidos por los profesionales y los académicos del sector.

Las contribuciones (libros, revistas, investigaciones) al establecimiento de estos criterios medio ambientales son innumerables, y además no siempre son congruentes entre ellos.

Una estrategia interesante es la propuesta por R. Serra [Serra et al., 1995]. Según el Profesor Serra, el proyecto arquitectónico interviene a modificar las *preexistencias ambientales* intentando dirigirse hacia unas *voliciones ambientales*. Estas últimas serían, según el autor, muy difíciles de traducir en un parámetro directamente medible, ya que dependen de los factores psicológicos y culturales de percepción del confort. A través del juego entre preexistencias y voliciones emergen, dentro del proyecto, unas características generales y unas características específicas. La determinación de estas características puede, en cada caso, guiar el arquitecto hacia el buen funcionamiento medioambiental de su obra.

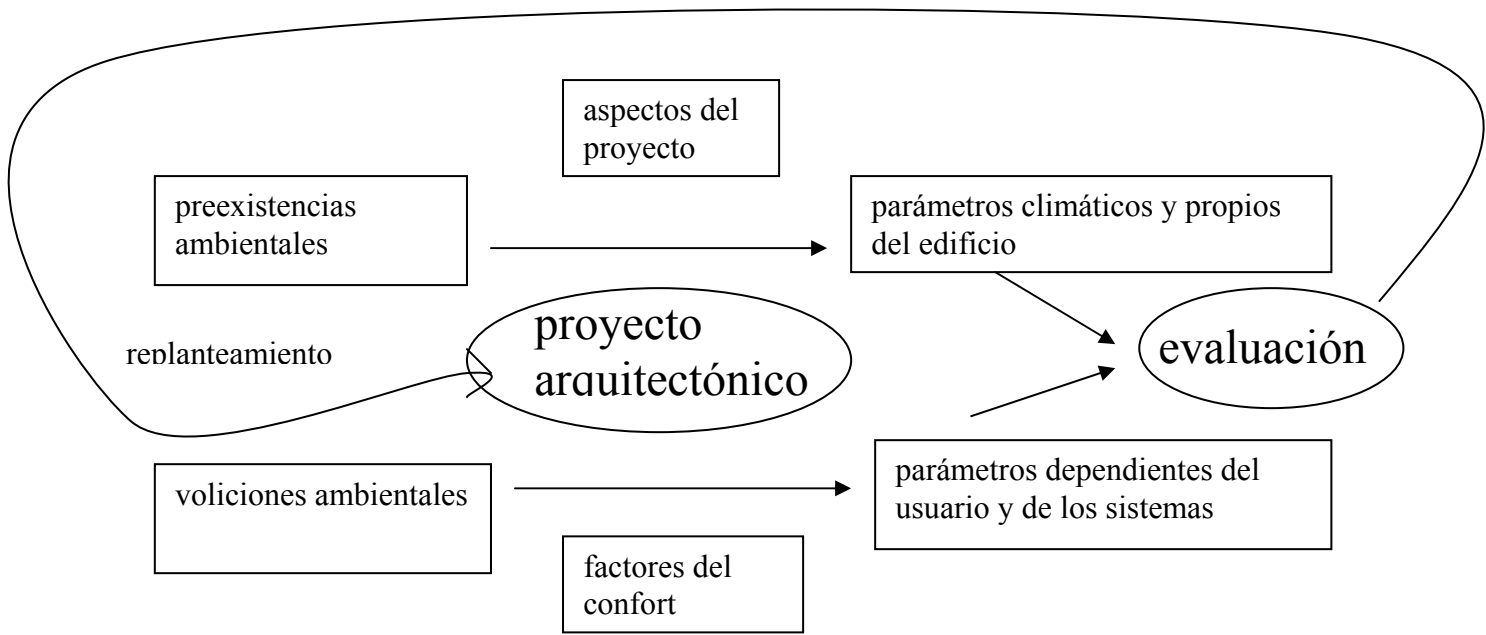


Figura 1: el proyecto arquitectónico a partir de voliciones y preexistencias

Otros planteamientos son muy diferentes. Apuestan por valores estándar de unos parámetros físicos que se pueden fácilmente medir y comparar. Este es el caso de las mayorías de los códigos técnicos de los Estados que se preocupan por estas cuestiones. La necesidad de una ley fácil de entender y rápida de aplicar lleva a simplificaciones que, a pesar de parecer necesarias, confunden y mistifican los resultados más que aclararlos y hacerlos transparentes.

El primer acercamiento a la energía en la arquitectura es el cálculo de la demanda térmica necesaria al bienestar. Esto implica la definición de bienestar, que es en realidad mucho más problemática de lo que parece. En el capítulo conclusivo se discutirá largamente el concepto de confort y su valoración, aún hoy temas de una fuerte investigación. De momento, sin considerar el fenómeno de la adaptación, el problema del confort térmico se puede resolver imponiendo la existencia de una banda de temperaturas de confort y fijándola en el intervalo 19-24 °C en invierno y 22-28 °C en verano. Los cálculos de demanda se pueden efectuar manualmente, pero es muy frecuente, hoy en día, la simulación a través de los numerosos programas informáticos desarrollados con esta intención.

Cuando hablamos de calor, probablemente la primera distinción que tenemos que hacer es entre calor sensible y calor latente. Se define sensible el calor que un fluido recibe o pierde cuando cambia su temperatura. Se define calor latente el calor que un fluido recibe o pierde cuando cambia su estado interno, sin variar su temperatura. Son calores latentes los calores asociados a las transiciones de fase, y el calor responsable de los cambios de humedad en el aire. El calor latente es muchas veces dejado en segundo plano respecto al sensible, así como las ganancias por radiación solar y las pérdidas por ventilación son dejadas en un lugar secundario frente a las pérdidas y ganancias por transmisión.

La evaluación del calor necesario en invierno en un edificio se puede hacer a través de la ecuación (1):

$$Q = (T_i - T_e) \times G - I - D \quad (1)$$

Donde

- Q (W/m^3) es el calor necesario a mantener la temperatura interior T_i
- T_i ($^{\circ}C$) es la temperatura interior deseada
- T_e ($^{\circ}C$) es la temperatura exterior
- G (W/m^3) es el coeficiente de pérdidas por unidad de volumen del edificio
- I (W/m^3) son las ganancias por radiación solar directa y difusa
- D (W/m^3) son los aportes internos de calor

No obstante, muchos cursos de física técnica de las facultades de ingeniería industrial proponen la (2)

$$Q = (T_i - T_e) \times U \quad (2)$$

trabajando con valores por metro cuadrado y olvidándose los importantes términos de radiación y aportes internos.

G es un parámetro constituido por dos partes: una G_t de transmisión y una G_v de ventilación. Muchas veces la ventilación es la directa responsable de la mayor parte de las pérdidas de un espacio. Por otro lado, tiene parcialmente un origen sanitario que en muchos casos no se puede eliminar ni reducir.

Como en la realidad casi nada es nunca estático, será muy interesante estudiar la variación de G como la de I y D y analizar sus consecuencias sobre el consumo. Esto puede hacerse con la (3):

$$\delta T_i = \delta T_e + \frac{\delta (I + D)}{G} - \frac{I + D}{G^2} \delta G \quad (3)$$

Esta ecuación nos enseña la variación de la temperatura interna en un espacio causada por variaciones en las condiciones climáticas (T_e , I , D) o por variaciones de la estructura funcional del espacio (G). En el capítulo conclusivo se discutirá el concepto de robustez, que está directamente relacionado con la sensibilidad frente a estos cambios que las diferentes tipologías edilicias pueden tener.

El resumen de los diferentes casos estudiados evidenciará la substancial diferencia de comportamiento de edificios clasificados como robustos (cuya característica será tener una G normativa, pero no demasiado pequeña, y protecciones adecuadas frente a variaciones en I y D) y edificios clasificados como sensibles (cuya característica será tener una G muy pequeña y posibilidad de control por el usuario casi inexistente).

Los experimentos efectuados sobre un gran número de personas en diferentes lugares del mundo evidenciarán por otra parte como la robustez así definida coincide con el deseo de los usuarios, sobre todo cuando las condiciones variables hagan necesarios estudios dinámicos que modifiquen parcialmente los resultados de los análisis de confort en condiciones estacionarias.

1.2 La simulación energética

La exigencia de uniformidad en la evaluación ambiental (y quizás varios intereses comerciales de empresas bien acostumbradas a moverse en el mundo de la última fase del capitalismo neo liberalista) llevó al desarrollo de una cierta cantidad de herramientas de evaluación.

Como soporte de cálculo se desarrollaron a partir de los años 70, paralelamente a la creciente importancia de los ordenadores en toda la actividad humana, herramientas de simulación energética de los edificios.

Estos programas gestionan bases de datos, tienen ficheros climáticos y de materiales, permiten a los usuarios cierta libertad en la elección de los parámetros de trabajo, y realizan los cálculos de intercambio energético a lo largo del año.

El resultado, normalmente, es una tabla de consumos por mes, y a veces un resumen de la evolución de la temperatura interior de los espacios. Algún simulador incluye análisis lumínicos y acústicos.

El número de los simuladores actualmente en el mercado supera la treintena, aunque no todos tengan las mismas características y funciones. Una evaluación comparativa muy extensa se encuentra en el trabajo de D. B. Crawley [Crawley et al. 2005].

En el desarrollo de este trabajo se estudiaron tres herramientas de simulación, seleccionadas por sus diferencias de enfoque.

Con el pasar de los años, estos simuladores se han utilizado siempre más frecuentemente y en algunos estados han sido elegidos como herramienta normativa de certificación. En el desarrollo de este trabajo se estudiaron los simuladores utilizados en España con tal finalidad.

1.2.1 Programa Trnsys

La herramienta TRNSYS (TRAnSient SYstem Simulation) se desarrolló en el Solar Energy Laboratory de la Universidad de Wisconsin (EEUU).

Se utiliza para simular el funcionamiento de sistemas, incluyendo edificios mono o multizona. Se caracteriza por no tener herramienta de diseño o de visualización del edificio propia. Por otro lado, resulta muy versátil porque permite insertar ecuaciones y modificar las metodologías de cálculo. Los resultados por defecto son la evolución de la temperatura interior de las zonas a lo largo del año, y la demanda energética

correspondiente, sensible y latente. Sin embargo, es posible obtener muchos más parámetros de salida.

El programa fue elegido para entrar entre los analizados por su gran difusión, versatilidad y por ser uno de los mejores ejemplos de software calculador, a elementos finitos, de los intercambios térmicos de los espacios.

En la figura 2 se puede apreciar la pantalla de inserción de datos del edificio. La edición del edificio se hace en una herramienta distinta de la que gestiona la simulación.

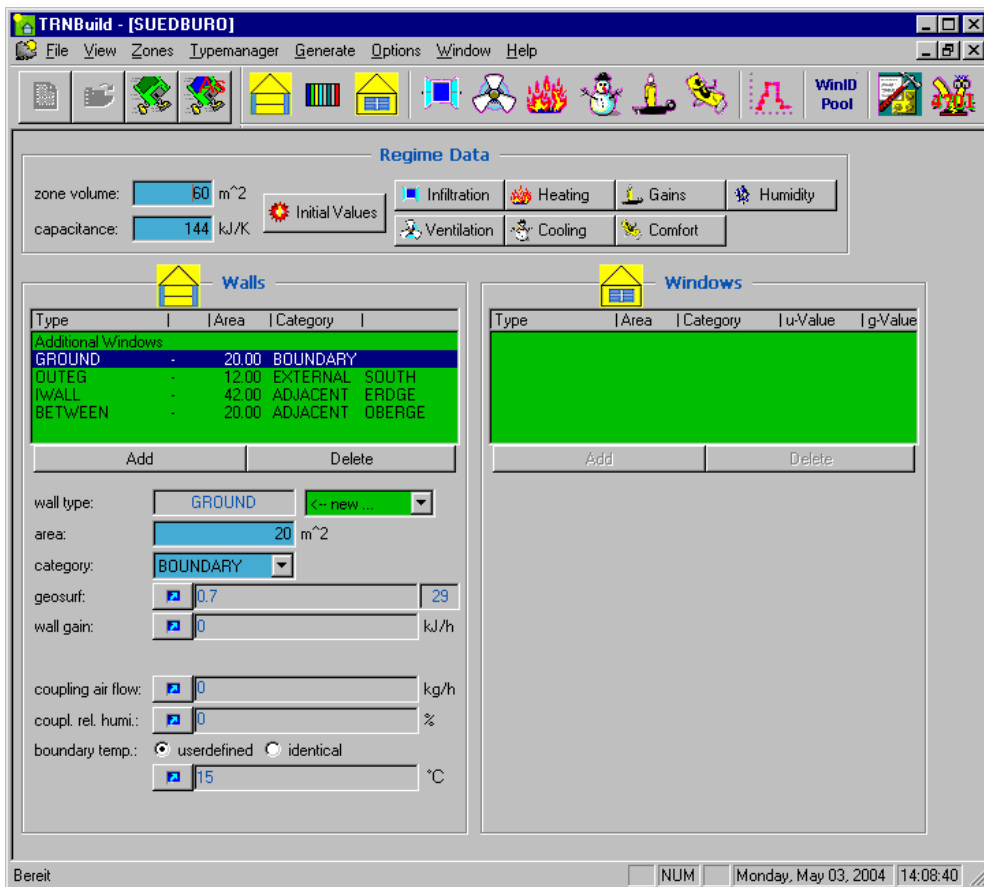


Figura 2: pantalla de edición del edificio en TRNSYS

1.2.2 Programa Ecotect

Muy diferente de Trnsys, este software se desarrolló por el doctor A. Marsh y el grupo de investigación Square One de la Universidad de Cardiff (Reino Unido). Es una herramienta muy visual, permite la creación rápida de maquetas del edificio y también los resultados se visualizan muy bien a través de gráficos y imágenes. El programa pretende dar resultados térmicos, lumínicos y acústicos. Sin embargo, su fiabilidad es muy criticada, según el esquema por el que el alcance del cálculo aumenta al disminuir la certidumbre de los resultados. En otras palabras, hacer muchas evaluaciones lleva a hacerlas de manera sumaria y poco fiable.

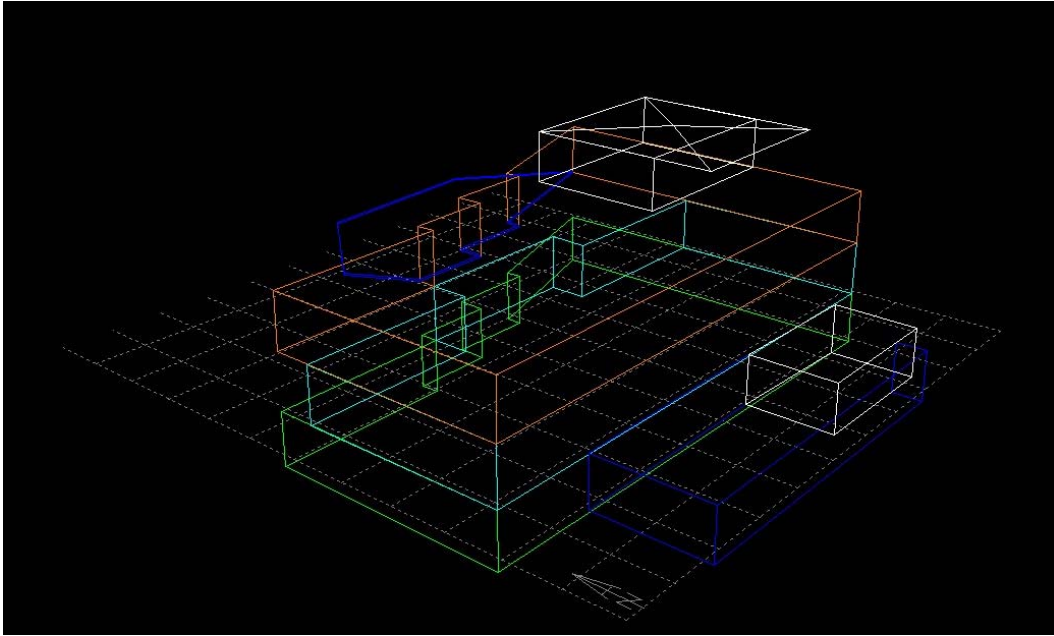


Figura 3: modelo Ecotect para un edificio

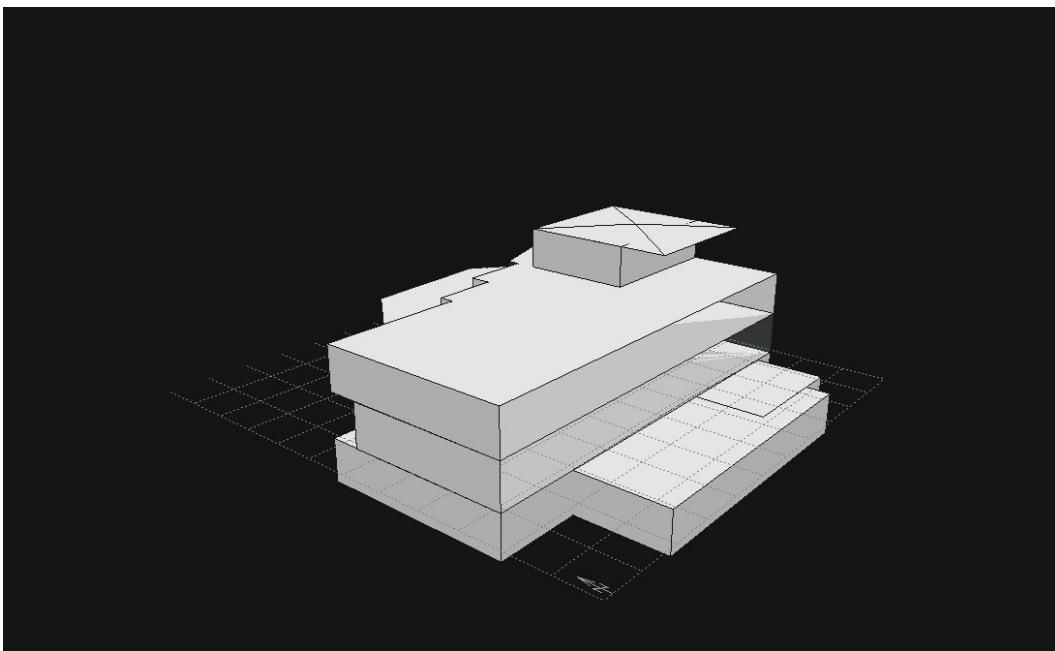


Figura 4: representación de los volúmenes en Ecotect

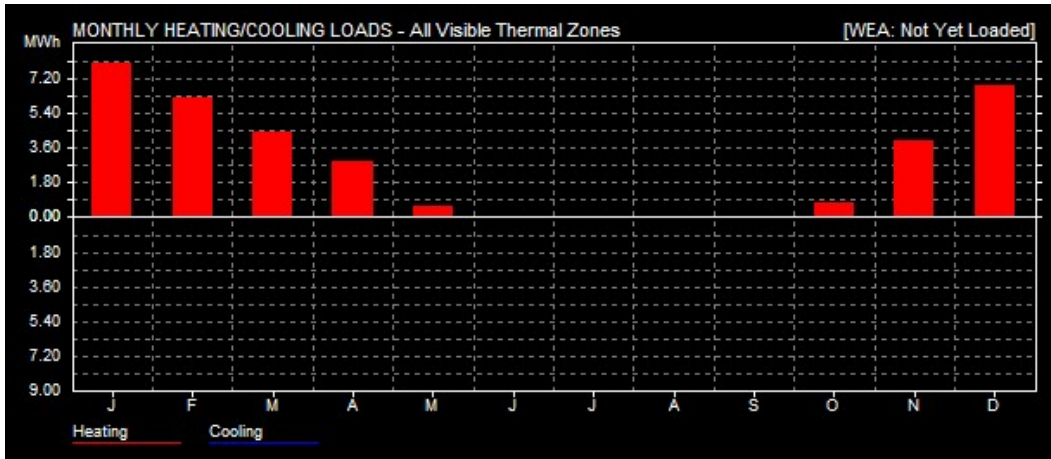


Figura 5: resultados de consumo en Ecotect

1.2.3 Programa Archisun

Esta herramienta, desarrollada por el grupo de investigación en Arquitectura y Energía de la Universidad Politécnica de Cataluña, presenta características muy diferentes respecto a las dos anteriores. No pretende calcular valores exactos, pero sí pretende utilizar criterios generales coherentes en la evaluación. Los elementos finitos desaparecen, y tampoco la definición geométrica exacta del edificio aparece necesaria. Los coeficientes que importan son los aspectos generales del proyecto, elaborados por uno de sus autores, Rafael Serra. El cálculo considera el edificio como una caja gris, caracterizada por parámetros internos y parámetros de la piel. Los resultados son las evoluciones de las temperaturas interiores en cada temporada. También se obtienen unas estimaciones sobre el consumo.



Figura 6: pantalla de selección climática Archisun

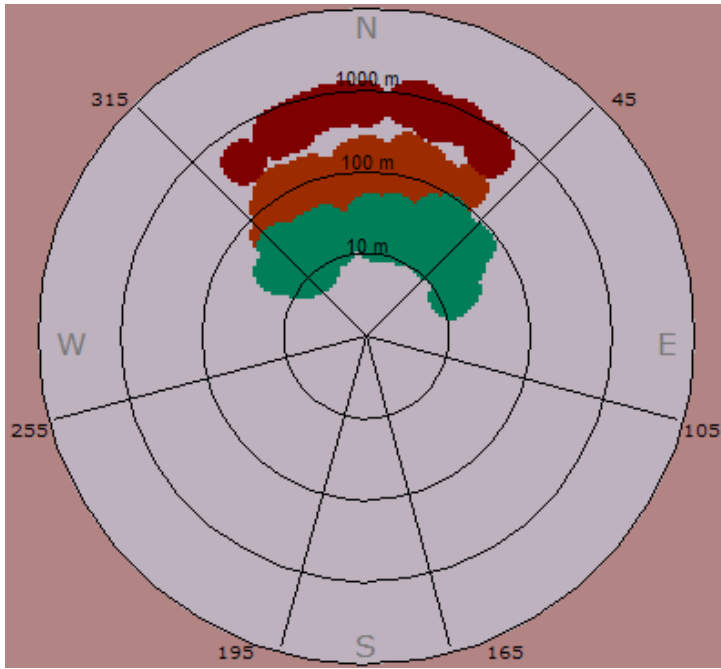


Figura 7: pantalla de construcción del entorno Archisun

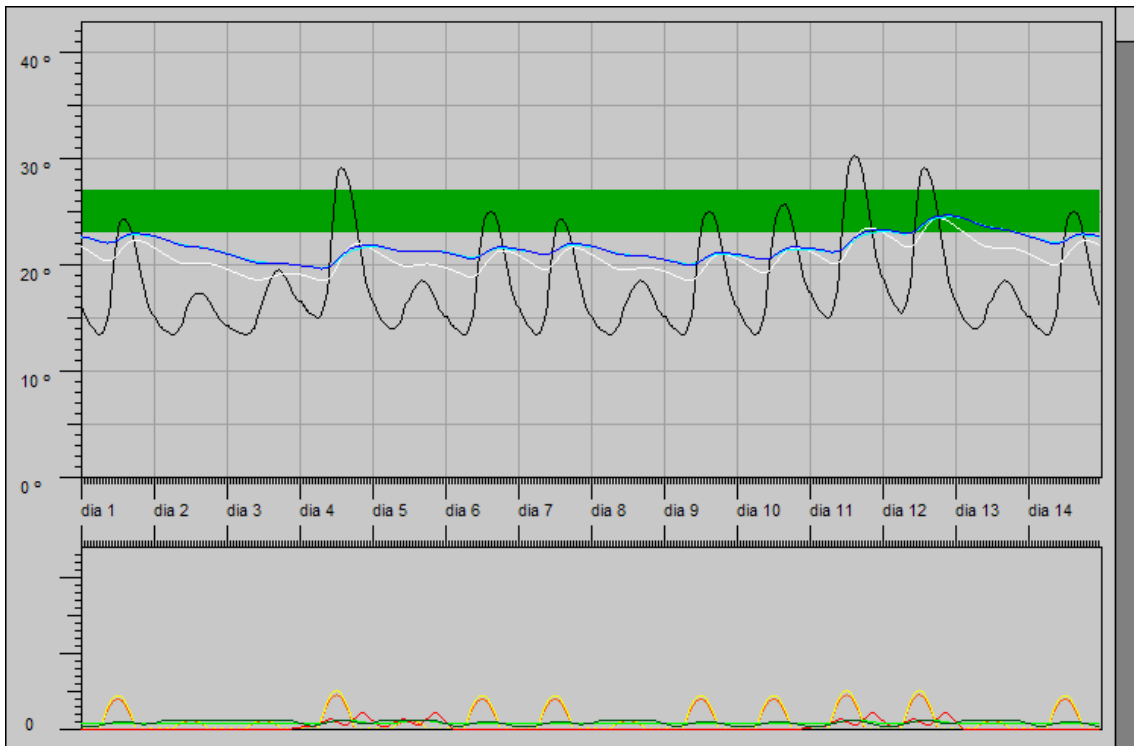


Figura 8: visualización de resultados Archisun. La banda verde corresponde a la zona de confort estacional, y la línea azul es la evolución “natural” de la temperatura interior (sin considerar la intervención de sistemas de tratamiento de aire u otros).

1.3 La certificación energética

Como se ha adelantado en la introducción, el cumplimiento del protocolo de Kyoto obliga los estados miembros de la Unión Europea a reducir sus emisiones. Especialmente, la normativa establece que los gobiernos nacionales deben:

- desarrollar una metodología de cálculo del comportamiento energético de los edificios
- establecer y aplicar unos requerimientos mínimos de eficiencia energética a los edificios nuevos y existentes
- certificar la calidad de los nuevos edificios construidos, vendidos o alquilados

En España, para cumplir el punto 3 de la normativa se decidió desarrollar herramientas informáticas de certificación.

1.3.1 Programa Lider

Lider es una herramienta desarrollada por el grupo de investigación en termotecnia de la Universidad de Sevilla. La función principal del programa es justificar el cumplimiento de la normativa española de la edificación, el Código Técnico de la Edificación (CTE), por lo que atiene al Documento Básico de ahorro energético (HE), sección reducción de la demanda térmica (CTE-HE1). El programa trabaja de manera muy gráfica y permite la construcción de una maqueta del edificio y la asignación de los materiales. No se pueden insertar instalaciones ni editar datos externos al programa. Los ficheros climáticos son fijos. El resultado del análisis es una simple indicación sobre el cumplimiento del Código.

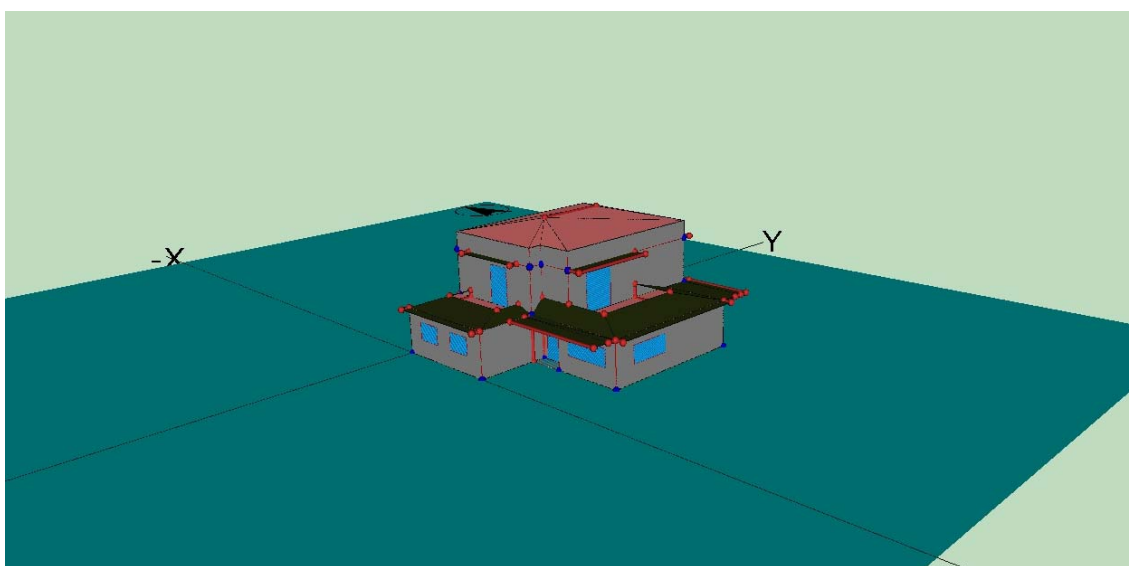


Figura 9: maqueta de edificio en lider

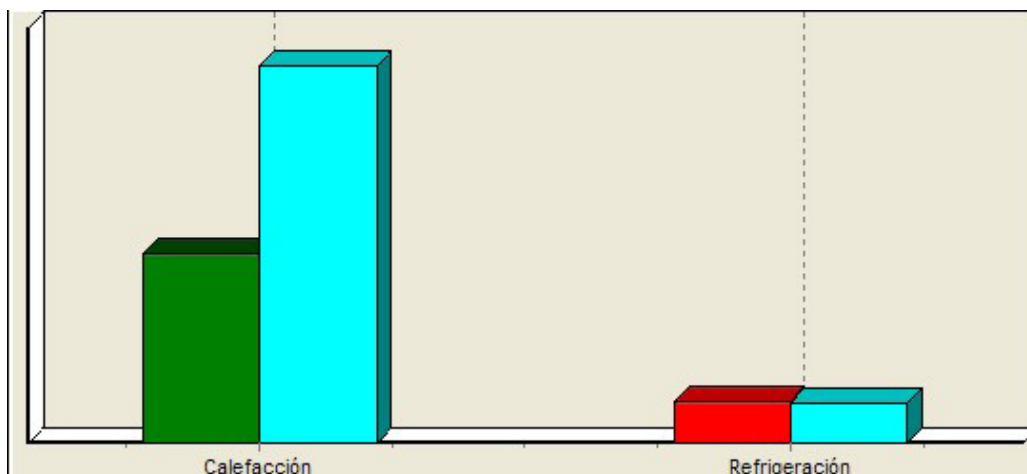


Figura 10: pantalla de resultados lider

1.3.2 Programa Calener VYP

La herramienta Lider proporciona solamente la certificación de que el Código a sido respetado. La exigencia de asignación de una clase o *etiqueta energética* a cada proyecto y a cada edificio terminado obligó a ampliar el alcance de la simulación. Para esto en el mismo grupo de investigación se llevó a cabo el programa Calener. Calener evalúa las demandas de energía y la eficiencia de las instalaciones. Existen actualmente dos versiones del programa, una especialmente estudiada para *vivienda y pequeño terciario* (VYP) y otra para *gran terciario* (GT).

La herramienta Calener VYP es relativamente sencilla y sólo permite la introducción de un número limitado de datos referentes a la utilización de los espacios y a los sistemas de climatización e iluminación instalados.

El resultado es una etiqueta energética que compara el edificio objeto con un edificio de referencia que es el que cumple estrictamente el Código Técnico de la Edificación con soluciones técnicas estándar.

Resulta evidente que la necesidad de obtener fácilmente una etiqueta por parte de muchos técnicos operantes en el sector de la edificación haya llevado a la creación de programas como estos, sencillos y rápidos en su utilización. Sin embargo, la pérdida de fiabilidad de estas herramientas es grande, como denuncian varios expertos del sector. (Véanse por ejemplo las contribuciones de García Casals [García 2004 y 2009]).

En este trabajo se intentará poner las bases para estrategias de certificación más efectivas, que tengan en cuenta más factores, entre ellos los conceptos de robustez y sensibilidad, que se introducirán en estas páginas.

1.4 Los análisis de sensibilidad

Los análisis de sensibilidad, muy comunes en las matemáticas aplicadas, son algo relativamente novedoso en la simulación energética de los edificios. El interés se está intensificando, sobre todo después de la fundación de la International Building Performance Simulation Association, que desde 1985 organiza un congreso cada dos años y desde 2008 tiene revista propia, the Journal of Building Performance Simulation.

La investigación sobre sensibilidad de los simuladores se está desarrollando en tres direcciones:

- afinar las simulaciones, una vez que el edificio esté construido, a través de mediciones más precisas sobre los parámetros detectados como los más sensibles a errores
- establecer la transparencia y la reproducibilidad de las simulaciones, sobre todo cuando nuevas herramientas se presentan en el mercado
- introducir en los simuladores la opción de análisis de sensibilidad para obtener al mismo tiempo un resultado de consumo total y uno de sensibilidad

La primera de estas direcciones no parece muy útil, puesto que lo que se necesita es una simulación fiable antes de la construcción, y no después, de un edificio. Sin embargo, mucha es la literatura que se sigue produciendo en ese estilo (véase, por ejemplo, el trabajo de F. Westphal [Westphal et al. 2005]).

Más interesante parece la segunda vía, que informa sobre la capacidad real de los simuladores, sobre todo en el momento en que se hacen servir para calificar oficialmente y no simplemente para evaluar. Se puede citar la importante investigación de K. Bruke [Bruke et al. 2005] sobre transparencia.

Sobre la estrategia más oportuna para insertar análisis de sensibilidad en los simuladores, hay que recordar el problema de la no linealidad de los fenómenos que interesan el sistema dinámico en objeto.

En la figura se anticipan los resultados de uno de los edificios analizados. Se puede ver como un análisis de sensibilidad porcentual no evidencia la inmensa preponderancia del factor renovación de aire, debido a que

- su valor inicial es 0.4, es decir mucho más pequeño que el valor inicial de otros parámetros como la conductividad del vidrio (2.8)
- la variación probable para este parámetro puede ser del 300% o incluso más, debido al descontrol que se tiene sobre las acciones humanas, mientras que la variación posible para las tipologías de vidrio, o para el espesor de los aislamientos, o para el factor solar no superan el 100% del valor.

Las figuras 13 y 14 enseñan la dependencia si las variaciones se consideran en porcentaje y la real dependencia de sensibilidad de los factores seleccionados.

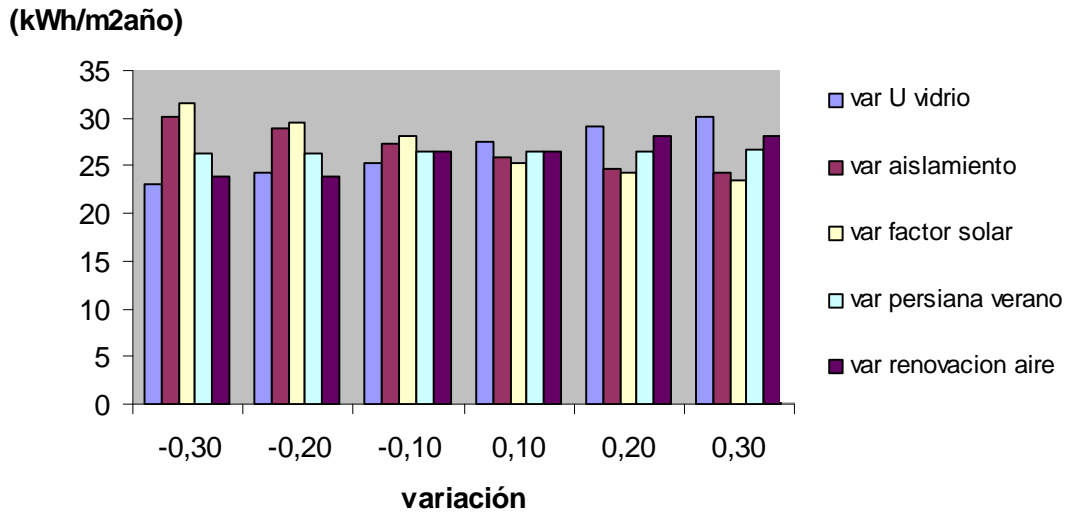


Figura 13: variación del consumo de energía final frente a variaciones en tanto por uno de los parámetros

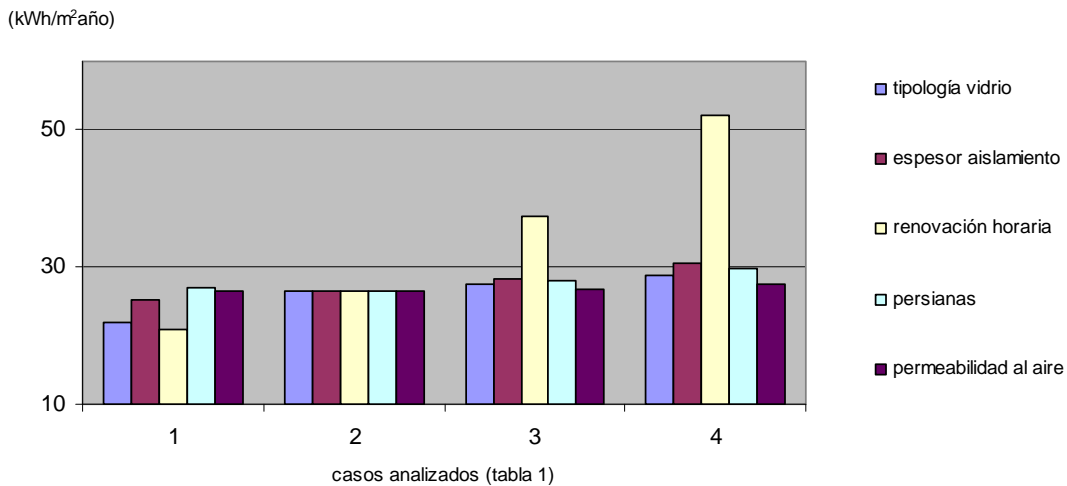


Figura 14: variación del consumo de energía final frente a variaciones reales en los parámetros (los casos valorados son 1...4; las líneas son guías visuales)

Tabla 1: valores de los parámetros considerados en los 4 casos representativos

Parámetros	Vidrio (W/m ² K)	Aislamiento (mm)	Renovación (1/h)	Factor solar persiana (%)	Permeabilidad (m ² /m ³)
Caso 1	1,6	70	0,2	0,1	0
Caso 2	2,8	60	0,4	0,2	9
Caso 3	3,0	50	0,8	0,6	27
Caso 4	3,3	40	1,2	1	54

Bien lo nota T. Mara [Mara et al. 2008], que propone un método para eliminar las no linealidades, basado en los precedentes trabajos de I. Sobol [Sobol 1993], E. Borgonovo [Borgonovo 2007] y A. Saltelli [Saltelli 2004].

Comentando las diferencias entre las contribuciones más bien arquitectónicas, como la de K. Bruke, y las de matemática aplicada, como la de T. Mara, se puede notar que:

- las dos hacen larga utilización de una selección previa de los parámetros intuitivamente más relevantes, sea directamente o sea aprovechando otros estudios (como por ejemplo los de S. De Wit [De Wit 1997 y 2002]), introduciendo así cierta subjetividad en la elección de los parámetros a analizar;
- el nivel experimental de las segundas es muy alto, pero necesariamente se acaba alejando de la realidad de los edificios, aproximándolos como celdas cerradas.

En este trabajo, conscientes de que los fenómenos no lineales son los más importantes en la evaluación y en la simulación del comportamiento de los edificios, se ha preferido el enfoque más arquitectónico de las primeras, que ahorran muchas simulaciones que realmente no aportan demasiado al resultado final.

Todos estos trabajos no consiguen alcanzar de manera exhaustiva todo el campo de la sensibilidad. Como se adelantó en la introducción, probablemente son los mismos edificios a ser sensibles, además de los simuladores. Por este motivo algunos estudios se ocuparon de definir los límites espaciales y temporales de las evaluaciones energéticas. Recordamos, entre otros, los estudios de I. Marincic [Marincic 1999] y de H. Arham [Arham 2006], sobre la sensibilidad de la respuesta a variaciones de media y alta frecuencia temporal.

El tema de la variabilidad espacio-temporal también se encuentra como central en algunos de los actuales estudios sobre confort, como la discusión sobre los espacios intermedios de Helena Coch [Coch 2003]. Para profundizar en el tema, se pueden consultar los anexos E y F [Palme et al. 2007 A y B].

Por último, es necesario citar el trabajo de C. Ghiaus [Ghiaus 2003], [Ghiaus et al. 2003], que propone el concepto de adaptabilidad de los edificios, así como su medición a través de la temperatura interior natural del edificio. La adaptabilidad se define como la diferencia entre la temperatura natural del edificio sin acondicionar (free running) y la temperatura exterior. Este concepto está relacionado con el de sensibilidad, y se utilizará en la definición del vector sensibilidad en los capítulos 2 y 5. La temperatura natural es en general un instrumento poderoso, porque el confort estacional influye en su definición. Sobre la importancia del confort se insistirá en el capítulo conclusivo. Para más información, consúltense también los trabajos de De Dear [De Dear et al. 1997], Brager [Brager et al. 1998], Nicol [Nicol et al. 2002].

Resumen:

En este capítulo se presentó el estado del arte de la evaluación, simulación y certificación energética de los edificios en España.

En el tema de la evaluación, se profundizó en la estrategia concebida por R. Serra y A. Isalgué en el Grupo de Arquitectura y Energía de la Universidad Politécnica de Cataluña.

En la parte dedicada a la simulación y a la certificación, se presentaron las características principales de los simuladores Lider, Calener VYP, Calenr GT, Ecotect, Trnsys y Archisun.

Finalmente, en la parte dedicada a los estudios de sensibilidad, se presentaron las principales investigaciones recientes que afectan el tema, sea bajo la mirada de la arquitectura, sea bajo la más estricta mirada de la matemática aplicada.

Por último, se presentó una primera justificación de la selección de los análisis a realizar, fundada en la diferente variabilidad de los fenómenos de transporte de energía que intervienen en la evaluación de los edificios: ventilación, transmisión, radiación, generación interna de calor.

CAPÍTULO 2: OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

En este capítulo se expondrán los objetivos generales del trabajo y la metodología utilizada para conducir la investigación.

El objetivo final, como adelantado en la introducción, es la identificación de las variables más sensibles a variaciones, es decir las que al variar generan más efectos sobre el resultado del cálculo, sea eso un cálculo directo de consumo energético o sea un cálculo de confort (normalmente representado a través de una variación de temperatura interior).

Para conseguirlo se realizaron estudios de sensibilidad sobre cuatro edificios elegidos por sus diferentes características, representativos del entorno construido español.

Los estudios de sensibilidad se realizaron directamente en la evaluación básica de los edificios y en las simulaciones a través de cuatro simuladores: Lider-Calener, Eotect, Trnsys y Archisun.

Por su enorme cantidad, no todas las variables que cada simulador permite insertar en la simulación fueron tomadas en cuenta. La selección se hizo fundándose en las investigaciones anteriores citadas en este capítulo o en el estado del arte.

Para obtener una comparación más profunda, un edificio fue monitorizado durante dos años y los datos recogidos fueron utilizados para confirmar (o desmentir) los resultados de los análisis de sensibilidad.

Los resultados esperados y un ejemplo concreto de cómo el análisis fue conducido se encuentran en las páginas finales del capítulo.

2.1 Objetivos

Como expuesto en el análisis del estado del arte, resulta urgente estimar la sensibilidad de los simuladores más utilizados, tanto para poder afinar las simulaciones como para conocer realmente su alcance, es decir sus límites de transparencia y reproducibilidad. Como la estructura misma de los simuladores permite editar datos de manera que la simulación pueda acercarse al caso concreto estudiado, las estimaciones obtenidas dependerán muy fuertemente del software y del edificio en concreto. Por otro lado, aparece interesante desarrollar vías de implementación de análisis de sensibilidad, o estimaciones de esta, en el mismo cálculo de eficiencia de las herramientas.

Coherentemente con todo esto, los objetivos del trabajo que aquí se presenta se pueden resumir en:

- evaluar la sensibilidad de los simuladores a las variables que considera cada uno de ellos en los casos de vivienda, edificio residencial del sector terciario (hotel), edificio destinado a la enseñanza
- evaluar la correspondencia de los análisis de sensibilidad con las mediciones de casos reales
- proponer una estructura de evaluación del proyecto que incluya análisis de sensibilidad.

Es importante que la sensibilidad se estudie en diferentes tipologías de uso y de edificación, porque así será posible encontrar (si existen) las pautas de sensibilidad de cada herramienta de simulación. Asimismo es importante evaluar el mismo edificio con diferentes simuladores, para subrayar la diferencia entre ellos, pero también para caracterizar (si así lo detectan los resultados) la sensibilidad energética del edificio en si mismo (en lugar de la del simulador).

En la práctica, el trabajo consiste en calcular la sensibilidad a cambios en las variables elegidas como más representativas del sistema simulador-edificio en cada caso concreto, para después intentar generalizar los resultados de dos maneras:

- desde la sensibilidad de unos sistemas simulador-edificio hacia la definición de sensibilidad de un simulador (se utilizan diferentes edificios)
- desde la sensibilidad de unos sistemas simulador-edificio hacia la definición de sensibilidad de un edificio (se utilizan diferentes simuladores)

El objetivo final es la obtención de nuevas líneas de desarrollo que permitan incluir la sensibilidad (tanto de los simuladores como de los edificios) en las futuras tareas de evaluación, simulación y certificación energética. Sobre todo este última aparece muy urgente, en la época de crisis económica, social y ambiental que vivimos. En el momento en que la especulación teórica se encuentra muy distante de los intereses empresariales y la atención privada al medio ambiente resulta más que nada una

oportunidad de generación de riqueza (o de expolio de esta, si lo miramos por el otro lado), parece fundamental que los gobiernos sepan imponer su autoridad moral y integrar nuevas herramientas en el proceso obligatorio de certificación, para que construir no pueda ser nunca más dar vueltas alrededor de las leyes y engañar la pública decencia.

En el capítulo 4 se pondrán los fundamentos para una nueva y diferente estrategia de certificación, donde el buen edificio será, además que de bajo consumo teórico, robusto frente a las variaciones que inexorablemente le afectarán, es decir, capaz de adsorber en su miasma estructura (materiales, forma, dimensión) los repentinos cambios ambientales provocados por efectos externos o por los usuarios y los sistemas.

2.2 Metodología

Para poder llevar a término los análisis de sensibilidad, resulta que (por lo exhaustivamente expuesto anteriormente problema de la no linealidad) el primer paso es seleccionar las variables más relevantes. Para hacerlo se pueden intentar diferentes vías, entre las que merecen ser destacadas:

- un análisis bibliográfico que proporcione datos sobre el entorno construido
- un cálculo directo de la relevancia de variaciones puntuales a través de la ecuación de balance
- un procedimiento tentativo dentro del mismo proceso de simulación

La tercera vía servirá de confirmación de lo elegido por las dos primeras. Según el análisis bibliográfico, las variaciones más frecuentes en los parámetros que gobiernan una simulación se genera en los que dependen, directamente o indirectamente, del usuario. A veces, cuando es necesario comparar construcciones con el mismo destino de utilización, pero con características constructivas muy diferentes, pueden tomar supremacía las variables edificatorias o las dependientes de las instalaciones [De Wit 1997], [Clevenger et al. 2006], [Lutzenhiser 1993].

El cálculo de las variables más relevantes es sencillo, pero por la importancia que tiene en la fase conclusiva del trabajo, merece ser analizado muy exhaustivamente.

La metodología de trabajo seguida es entonces la siguiente:

- se clasifican las variables que entran en la evaluación energética según un criterio racional
- se establece una escala general de relevancia para estas

- se clasifican las variables que los simuladores permiten editar según el mismo criterio
- se establecen las tipologías arquitectónicas que se analizan
- se establecen las variables que se analizan en cada caso concreto
- se lleva a cabo la simulación y el estudio de sensibilidad
- se comparan los resultados obtenidos con diferentes simuladores sobre el mismo edificio
- se monitoriza el edificio
- se comparan los resultados de la simulación con los resultados de la monitorización y eventualmente con evaluaciones previas y más generales sobre el proyecto
- se comparan los resultados de diferentes edificios obtenidos con el mismo simulador
- se comparan las sensibilidades de los simuladores entre sí
- si es que hay edificios con el mismo destino de utilización y un emplazamiento similar, se comparan diferentes estrategias constructivas
- se generalizan los resultados obtenidos en términos de transparencia y fiabilidad o sensibilidad de los simuladores
- se generalizan los resultados obtenidos en términos de robustez o sensibilidad de los edificios
- se propone como introducir análisis de sensibilidad en las futuras evaluaciones, simulaciones y certificaciones

2.2.1 Definición de variables

Las variables que entran en una evaluación del funcionamiento energético de un edificio se pueden generalmente clasificar en cuatro categorías:

- variables dependientes del clima
- variables dependientes del mismo edificio
- variables dependientes del usuario
- variables dependientes de los sistemas

Paralelamente, aparecen los aspectos del proyecto y los factores del confort, que están relacionados con las variables definidas, según el esquema indicado en la figura 1.

Variables climáticas

Las variables climáticas a su vez se pueden clasificar en macroclimáticas y microclimáticas, con referencia a la localización geográfica y al emplazamiento específico respectivamente.

Son las siguientes:

- temperatura del aire
- radiación incidente o temperatura media radiante
- dirección y velocidad del viento
- humedad

Entre los aspectos del proyecto, que son muchos, podemos recordar

- latitud
- pendiente
- densidad urbana
- altura relativa
- presencia de vegetación
- presencia de agua
- otros elementos de sombra

Variables del edificio

Dependen mucho de la estrategia elegida en la definición del edificio. En general, y en la mayoría de las tipologías de evaluación energética existentes, son:

- conductividad térmica de los cerramientos
- inercia térmica de los cerramientos
- masa térmica interior
- factor de absorción de los cerramientos (muros y vidrios) de la radiación infrarroja y visible
- coeficiente de ventilación de proyecto

Entre los aspectos del proyecto, destacan

- forma
- compacidad
- esbeltez
- porosidad
- aportaciones pasivas
- elementos de protección fijos

Variables dependientes del usuario

A su vez estas dependen del esquema de representación elegido. En línea totalmente general, pueden ser:

- variación en la renovación de aire
- variabilidad en las pérdidas por transmisión
- variabilidad en las ganancias por radiación
- aportes internos

Los factores del confort, que determinan el comportamiento de los usuarios y los valores de los parámetros definidos, son muchos y tienen origen diferente. Los podemos clasificar así:

- factores fisiológicos
- factores psicológicos
- factores culturales

Variables dependientes de los sistemas

Las instalaciones activas normalmente utilizadas son: climatizadores, intercambiadores de aire e instalaciones térmicas radiantes. Los aspectos del proyecto se clasifican entonces como:

- calidad del aire de renovación
- tipología de los equipos
- tipología de combustible

Los parámetros correspondientes son los valores de consigna de los equipos con respecto a los diferentes aspectos y funciones, por ejemplo:

- temperatura de consigna del aire
- humedad de consigna del aire
- velocidad de impulsión del aire
- rendimiento nominal de los equipos
- poder calorífico del combustible utilizado

Entrando en el detalle, es necesario elegir un sistema de representación del edificio (sistema dinámico) específico.

Uno posible es por ejemplo el utilizado por R. Serra [Serra et al. 1995] y A. Isalgué [Isalgué 1995 y 1997], que fue el primer paso hacia el desarrollo de la herramienta informática Archisun. Definimos los siguientes parámetros:

T	temperatura media exterior (°C)
ΔT	oscilación diaria de la temperatura media exterior (°C)
v	velocidad media del viento (m/s)
Δv	dirección predominante del viento (adimensional)

H	humedad absoluta media (gr/kg)
R	radiación media sobre el plano horizontal (W/m ²)
E	iluminación media sobre el plano horizontal (lux)
G _t	coeficiente de intercambio térmico por transmisión (W/m ³ K)
G _v	coeficiente de intercambio térmico por ventilación (W/m ³ K)
m _e	masa térmica media de la envolvente (J/m ³ °C)
f _s	factor de captación de la energía solar (m ² /m ³)
f _s	factor de captación de energía lumínica (m ² /m ³)
f _e	factor de enfriamiento evaporativo (W/m ³)
f _t	factor de influencia del contacto con el terreno (W/m ³)
C _v	coeficiente de acción interior sobre la ventilación (adimensional)
m _i	masa térmica útil del interior (J/m ³ K)
C _u	coeficiente de utilización de la luz interior (adimensional)

En la tabla 2 se resumen las relaciones entre aspectos del proyectos y parámetros. La variabilidad de los parámetros de los edificios se encuentra en aspectos siguientes: transparencia, perforación, aislamiento, conexión.

Los parámetros climáticos son todos variables por definición.

En este esquema, el proyecto resulta definido por unos aspectos, que generan unos coeficientes o parámetros representativos. A su vez, los parámetros se insertan en una ecuación que reducida resulta depender de las siguientes variables:

- una masa térmica global del edificio, medida en J/m³K
- un coeficiente global de pérdidas por transmisión a través de la piel, medido en W/m³K
- un coeficiente global de pérdidas por ventilación, medido en W/m³K
- un coeficiente de aportación solar, medido en W/m³
- un coeficiente de generación interna de calor, medido en W/m³
- una temperatura interior de referencia, que tenga en cuenta el efecto radiante de las paredes, medida en °C

$$T_i = T_e + \frac{I + D}{G} \quad (4)$$

donde

T_i es la temperatura media interior (°C)

T_e es la temperatura media exterior (°C)

I son las aportaciones por radiación solar incidente (W/m³)

D son los aportes internos (personas y sistemas) (W/m³)

G es el coeficiente de pérdidas (transmisión y ventilación) (W/m³K)

Todos los valores se dan por metro cúbico con la finalidad de evaluar el comportamiento de espacios con alturas muy diferentes y poder hacer comparaciones.

Tabla 2: parámetros en relación con los aspectos del proyecto

ASPECTOS DEL PROYECTO		PARÁMETROS										
GENERALES	ESPECÍFICOS	T	ΔT	v	Δv	H	R	E				
	topografía: pendiente	X	X	X		X	X	X				
	topografía: altura relativa	X	X	X	X	X	X	X				
	forma urbana: tipo	X	X	X		X	X	X				
UBICACIÓN	forma urbana: densidad	X	X	X		X						
	forma urbana: altura relativa	X	X	X	X	X	X	X				
	relación con el agua		X	X	X	X						
CLIMA	relación con la vegetación	X	X	X	X	X	X	X				
	pantallas			X	X		X	X				
ENTORNO	relación con el agua	X	X			X	X					
	relación con la vegetación	X	X	X	X	X	X	X				
		G_t	G_v	C_v	f_e	f_s	f_l	C_u	m_e	m_i	f_t	
	compacidad	X	X			X	X		X		X	
FORMA	porosidad	X	X		X	X	X		X			
	esbeltez	X	X			X	X		X	X	X	
	asentamiento	X	X			X	X		X			
	adosamiento	X	X			X	X		X	X	X	
	transparencia	X				X	X	X	X			
	variabilidad de la transparencia					X	X					
EDIFICIO	PIEL		X								X	
	variabilidad de la perforación		X									
	aislamiento	X									X	
	variabilidad del aislamiento	X										
	tersura	X	X				X		X			
	pesadez	X	X			X	X		X			
	compartimentación vertical			X				X		X		
	compartimentación horizontal	X		X				X		X		
	conexión vertical			X				X				
	variabilidad de la conexión vertical			X								
INTERIOR	conexión horizontal			X				X				
	variabilidad de la conexión horizontal			X				X				
	peso									X		
	color							X	X			

2.2.2 Relevancia de las variables

En el momento de determinar la relevancia de las variaciones de las variables así clasificadas sobre los resultados de una evaluación energética, es importante distinguir entre:

- variaciones en la distribución espacial de los valores asumidos por las variables
- variaciones temporales de los valores de cada variable

La distribución espacial no uniforme de los diferentes parámetros lleva a cierta dificultad en la evaluación analítica del comportamiento energético y fue una de las causas del desarrollo de los sistemas de simulación. Sin embargo, se está estudiando el límite de finitud de los elementos espaciales en que se puede reducir un edificio, frente al cálculo temporal que necesariamente tiene que aparecer.

En adelante se consideraran variaciones temporales dejando fijadas las espaciales al orden de magnitud adecuado para representar un edificio, es decir, donde es legítimo considerarlo como un punto o una caja gris, caracterizada por valores volumétricos de parámetros medios.

Las variaciones temporales se pueden evaluar en primera aproximación pensando en perturbaciones tipo escalón. En este caso se está pasando desde una situación estacionaria a otra situación estacionaria y la ecuación de evaluación de la variabilidad es sencillamente la (3):

$$\delta T_i = \delta T_e + \frac{\delta(I+D)}{G} - \frac{I+D}{G^2} \delta G$$

Donde

δT_i , δT_e , δI , δD y δG son las variaciones temporales de las respectivas variables.

Esta es una evaluación muy general, de todas formas evidencia que la magnitud del término G es muy relevante en determinar la importancia de las variaciones de temperatura que las diferentes acciones pueden causar.

Para una evaluación más correcta, es necesario considerar un término de acumulación térmica en la masa, así que la ecuación dinámica correspondiente es la (5):

$$M \frac{\partial T_i}{\partial t} = I + D + (T_e - T_i)G \quad (5)$$

donde M es la masa térmica unitaria expresada en $J/m^3 \text{ } ^\circ\text{C}$

Integrando con cierto paso temporal se obtiene:

$$M \frac{T_i^{t=\tau} - T_i^{t=0}}{\tau} = I + D + (T_e - T_i^{t=0})G \quad (6)$$

Y finalmente, resolviendo,

$$T_i^{t=\tau} = T_i^{t=0} + \left[I + D + (T_e - T_i^{t=0})G \right] \frac{\tau}{M} \quad (7)$$

Utilizando los dos criterios anteriores, se puede definir en primera aproximación cuales serán las variables más importantes a la hora de evaluar energéticamente un edificio en situación dinámica.

Parece que, en términos de porcentaje, los parámetros más relevantes sean el coeficiente de pérdida por transmisión y el de ganancia por radiación solar incidente. Sin embargo, ¿es correcto un análisis en porcentaje? Como se anotó en la introducción y en el estado del arte, la definición de los casos a evaluar y de la variabilidad correspondiente a cada variable debe hacerse de manera empírica, ya que las dependencias son no lineales. La variabilidad del coeficiente de transmisión, por ejemplo, es mucho menor a la del coeficiente de ventilación, a causa la misma manera en la que se los calcula. Por otra parte, ¿a que variación en estos parámetros corresponde un suceso real, como una acción de un usuario, una avería de una instalación o un degrado del edificio? Evaluar la relevancia de las acciones y variaciones será un paso fundamental. De momento registramos que:

- 1) al disminuir del valor total de G la sensibilidad a las variaciones (todas) aumenta de una manera importante
- 2) las variaciones obtenidas utilizando valores razonables como datos de partida están entre uno y siete grados centígrados. Este valor sirve para decidir que se entiende con relevante.

¿Como valorar ahora numéricamente y como comparar la relevancia de las acciones? Es necesaria la introducción de algún coeficiente representativo de esta propiedad “sensibilidad”. Este coeficiente debe permitir evaluar acciones singulares y edificios enteros. Podemos proponer la definición de un coeficiente de sensibilidad:

$$S = \frac{\delta T_i}{\Delta T} \quad (8)$$

Donde δT es la variación de temperatura provocada por un cambio en uno de los parámetros de la ecuación de balance y ΔT es una diferencia de temperatura de referencia. La elección de esta diferencia de temperatura de referencia en la definición del coeficiente de sensibilidad no es unívoca ni exente de discusión. En principio, se presentaron diferentes posibilidades para relacionar un fenómeno puntual (variación de

temperatura interior asociada a una acción o variación específica) con el comportamiento general de un edificio. Las principales fueron:

1. relacionar la variación con una temperatura de referencia. En fórmulas:

$$S = \frac{\delta T_i}{T_i} \quad (8-I)$$

Esto presenta el gran obstáculo de variar el resultado si se utiliza la temperatura absoluta como referencia en lugar de la común temperatura medida en °C. Además, depende de los estándares de confort elegidos para la definición de la temperatura interior de referencia.

2. relacionar la variación con una diferencia de temperaturas. Esta diferencia puede ser la diferencia de las temperaturas medias, de las mínimas o de las máximas entre el interior y el exterior. En fórmula, para la elección de las temperaturas medias:

$$S = \frac{\delta T_i}{|T_i - T_e|} \quad (8-II)$$

Esto presenta el obstáculo de depender del clima exterior y de los estándares de confort elegidos para la elección de la temperatura interior, aunque libere del problema de la temperatura absoluta.

3. relacionar la variación con otra variación. Esta puede ser la variación máxima de la temperatura exterior en la estación considerada, o la excursión máxima anual de la misma. También puede ser dependiente sólo de los fenómenos naturales, es decir la variación media de temperatura interior generada por la variación media de temperatura exterior, según el esquema:

$$S = \frac{\delta T_i(\text{acción})}{\delta T_i(\delta T_e)} \quad (8-III)$$

Esto permite definir cual es la variación estándar (o natural) de la temperatura interior para nuestro edificio en su emplazamiento, y relacionar con ella cualquier otra variación se provoque. Tiene el problema de depender del diseño del edificio, cosa que dificulta evaluaciones comparativas. Este parámetro puede definirse como *controlabilidad* del edificio.

Una última posibilidad puede ser la definición de la máxima excursión de temperatura aceptada para mantener el ambiente confortable. En formulas:

$$S = \frac{\delta T_i(\text{acción})}{\delta T_i(\text{confort})} \quad (8-IV)$$

Si el análisis de sensibilidad se conduce para uno o más edificios con los mismos estándares de confort y en un emplazamiento climático comparable, se puede utilizar la segunda ecuación propuesta (8-II), que reduce los cálculos necesarios. De no ser así, resulta recomendable utilizar la ecuación (8-III), que además resulta muy adecuada para comparar fenómenos de muy alta frecuencia, ya que elimina el efecto debido a la amortiguación térmica natural del edificio.

Sin embargo, en evaluaciones comparativas, es muy recomendable utilizar una variación que dependa solamente de los estándares de confort (ni del clima, ni del edificio). Esta (8-IV) es la solución que se adopta en esta tesis. Se remanda al capítulo 4 para la descripción detallada de su definición.

El coeficiente S nos proporcionará entonces una medida de la sensibilidad del edificio a cambios inducidos en su relación con el ambiente que le rodea. Veremos como habrá edificios con una buena respuesta a un análisis de balance, pero no a una de sensibilidad y viceversa. Veremos también como las simulaciones dinámicas, que pretenden evaluar integrando paso a paso las ecuaciones de transmisión térmica del sistema edificio, no siempre serán concordes con los resultados obtenidos aplicando un análisis de sensibilidad, por el simple hecho de no poder considerar variaciones puntuales como todas las relacionadas con el usuario (acciones como abrir ventanas o operar con las protecciones solares).

En el momento de clasificar las acciones y variaciones, establecemos que:

Una acción se define como muy relevante si la variación de temperatura media interior que causa es superior a los 4°C

Una acción se define como relevante si la variación de temperatura media interior que causa es incluida entre 2 y 4 °C

Una acción se define como escasamente relevante si la variación de temperatura que causa es incluida entre 1 y 2 °C

Una acción se define como muy poco relevante si la variación de temperatura que causa es menor a 1°C

Evalúamos acciones como

1. abrir una ventana
2. abrir una puerta
3. levantar persianas o abrir cortinas
4. operar con maquinaria eléctrica de hasta 500 W

Los resultados se resumen en la tabla 3. Estos resultados se pueden consultar más ampliamente en el anexo D [Palme et al. 2006 D].

Tabla 3: relevancia de unas acciones medias en vivienda

Acción	abrir una ventana	abrir una puerta interior	encender la luz	utilizar aparatos	operar con persianas	encender calefacción	encender aire acondicionado
Repercusión energética	alta	muy baja	medio baja	media	media	muy alta	muy alta
Repercusión en confort	alta	baja	medio alta	baja	alta	medio alta	alta

Por otra parte, estudios llevados a cabo en otras instituciones evidencian como los fenómenos dependientes de los usuarios, y especialmente los de ocupación y ventilación, resultan ser los preponderantes en cuanto a variaciones y análisis de sensibilidad. Véase por ejemplo los trabajos de S. de Wit [De Wit 1997] y de C. Clevenger [Clevenger et al. 2006].

En el momento de pasar a las simulaciones, es importante relacionar los parámetros del simulador representativos de las acciones y variaciones evaluadas. Por ejemplo, en el caso de Archisun, las relaciones son las que aparecen abajo:

Tabla 4: aspectos interesados y parámetros afectados por las acciones evaluadas

acción	aspectos interesados	parámetros afectados
operar con sistema de iluminación	disipación adicional	D
operar con sistemas eléctricos	disipación adicional	D
	transparencia	fs fi
abrir/cerrar una ventana exterior	aislamiento	Gt
	perforación	Gv
abrir/cerrar una puerta interior	conexión horizontal	Cv Cu
	transparencia	fs fi
operar con cortinas o persianas		
	aislamiento	Gt

2.2.3 Edición de datos en los simuladores

Las variables de una evaluación teórica de los edificios no siempre se corresponden a los datos que es posible insertar en las herramientas de simulación. Por otro lado, se evidenció que la importancia real la tienen las acciones y variaciones en el sistema físico edificio, así que resulta prioritario entender como se representa un fenómeno o suceso en las herramientas y en las metodologías de evaluación.

Los simuladores elegidos en este trabajo deben entonces analizarse y clasificarse según los datos que permiten editar a los usuarios. Recordamos que los simuladores considerados son: Lider-Calener, Trnsys, Ecotect, Archisun.

2.2.3.1 Características de Lider

Variables climáticas

La selección climática se hace a través de ficheros existentes. No se pueden editar las variables climáticas. La elección puede ser una capital de provincia española o bien una de las zonas climáticas previstas en el documento básico. Es posible insertar la altura sobre el nivel del mar (metros) del lugar para que el programa modifique la densidad del aire en sus cálculos.

Variables propias del edificio

Es posible editar la orientación, los puentes térmicos presentes, las propiedades de los cerramientos y de las protecciones fijas. Existe una variable de redistribución de la radiación en el interior.

La orientación se define simplemente a través de un ángulo (grados).

Los puentes térmicos se pueden elegir dentro de unas opciones por defecto o bien definir a través de los parámetros ψ (conductancia térmica lineal – W/mK) y f (factor de temperatura superficial interior – adimensional).

Los cerramientos se definen por capas a partir de una base de datos de los materiales, introduciendo los espesores de cada capa.

Los materiales se eligen en la base de datos o se editan de dos maneras: a través de los parámetros R (resistencia térmica – m^2K/W) y μ (factor de resistencia a la difusión del vapor de agua - adimensional) o bien a través de las características λ (conductividad lineal – W/mK), ρ (densidad – kg/m^3) y c_p (calor específico a presión constante – J/kgK) y de nuevo μ (adimensional).

Los huecos se definen a través de las propiedades de vidrios y marcos y de la permeabilidad al aire (P – m^3 aire / m^2 ventana a 100 Pa).

Los vidrios se eligen en una base de datos o bien se definen a través de la transmitancia térmica superficial ($U - W/m^2K$) y del factor solar ($g -$ adimensional).

Los marcos se definen a través de la conductividad térmica superficial ($U - W/m^2K$) y del coeficiente de absorción de la radiación ($\alpha -$ adimensional).

Las protecciones fijas se definen por su geometría si son aleros o bien por su geometría y propiedades ópticas de transmisividad (adimensional) y reflectividad (adimensional) si se trata de lamas exteriores.

La redistribución de la radiación (adimensional) se define por opciones: prefijada, aproximada o calculada. No se puede editar el método de cálculo.

Variables dependientes de los sistemas

Lider no considera la presencia de sistemas en el edificio. Sólo evalúa la demanda de calefacción y refrigeración de la construcción.

Variables dependientes del usuario

El programa permite elegir el número de renovaciones horarias, la tasa de producción de la humedad interior y el tipo de uso.

Las renovaciones de aire se definen con un coeficiente horario medio (1/h). No existe ley de correspondencia. No se puede editar la calidad del aire de renovación.

La producción de humedad se puede definir por opciones: clase de higrometría correspondiente a tablas del Código Técnico de la Edificación, tasa de renovación (kg/h) o humedad relativa constante (%).

El uso se puede definir por opciones: residencial, intensidad baja o alta con ocupación de 8, 12, 16 o 24 horas.

Las protecciones solares móviles son definidas a través de un coeficiente medio en verano y en invierno (adimensional).

2.2.3.2 Características de Calener VYP

Calener VYP se utiliza asociado a Lider. Se pueden editar los datos de los sistemas.

Los sistemas se definen a través de unidades terminales, equipos y temperaturas de impulsión.

Las unidades terminales se definen a través de una potencia (W).

Los equipos de generación se definen a través de una potencia (W), un rendimiento (adimensional) y un tipo de combustible.

2.2.3.3 Características de Calener GT

El programa puede utilizar datos definidos en Lider o bien editar geometría y materiales además que sistemas.

Variables climáticas

Se eligen de ficheros climáticos así como en Lider. La elección puede ser una capital de provincia española o bien una de las zonas climáticas previstas en el documento básico.

Variables propias del edificio.

Permite definir la orientación de los cerramientos y sus materiales.

Definición de los cerramientos: por capas o por propiedades del cerramiento (conductividad total – W/m^2K y factor de absorción de la radiación – adimensional).

Definición de los materiales: por resistividad térmica (mK/W) o por conductividad lineal (W/mK), calor específico (J/kgK) y densidad (kg/m^3).

Definición de acristalamientos: a través de conductividad térmica total (vidrio y marco – W/m^2K), factor solar (adimensional) y factor de transmisión (adimensional) de la radiación visible.

Variables dependientes de los usuarios

Permite definir el tipo de uso, la ocupación, la infiltración, la iluminación y los aportes internos.

Tipo de uso: se define por opciones: oficinas, docencia, sanitaria, comercial.

Ocupación: se define por el espacio disponible por ocupante ($m^2/persona$).

Infiltración: se define por las renovaciones horarias (1/h).

Iluminación: se pueden definir la potencia instalada (W/m^2), la eficiencia (W/m^2 para 100 lux), el tipo de luminaria (incandescente, fluorescente ventilado, fluorescente no ventilado) y el control natural de la iluminación artificial si es que está presente.

Aportes internos: se definen los aportes de las personas ($W/persona$) latentes y sensibles y los de los equipos (W/m^2 – con especificada su fracción latente y sensible).

Variables dependientes de los sistemas

Los sistemas se clasifican en subsistemas primarios y subsistemas secundarios. Los subsistemas primarios utilizan agua como fluido, mientras los subsistemas secundarios sólo tratan aire.

Los subsistemas primarios se componen de equipos (bombas, enfriadoras, calderas son los principales) y circuitos de agua. Los subsistemas secundarios se componen de circuitos de aire, equipos (ventiladores y recuperadores principalmente) y unidades terminales.

Todos los equipos tienen asociadas unas curvas de rendimiento, que pueden ser editadas por los usuarios, si es que se dispone de los datos de los fabricantes. También llevan unas fijadas por defecto.

Las bombas se definen a través de una potencia adsorbida (W), un caudal (l/h), una altura manométrica (m) y los rendimientos mecánico y del motor. Se puede seleccionar la tipología (velocidad variable, dos velocidades, velocidad constante).

Las calderas se definen a través de la potencia nominal (W), la temperatura de consigna (°C), el salto térmico de proyecto (°C), el rendimiento nominal. Se puede elegir el combustible.

Las plantas enfriadoras se definen por tipo (eléctrico, bomba de calor, etc...), potencia (W) y rendimiento.

Los ventiladores se definen por caudal (m³/h) y potencia (W).

Los recuperadores se definen por tipo (estático, dinámico sensible, dinámico entálpico), el consumo (W) y el rendimiento.

Los circuitos necesitan por su definición de un sistema de control. Deben estar asociados a una bomba y normalmente tienen cierta recirculación del fluido.

Las unidades terminales son muy importantes porque en ellas se definen las temperaturas de consigna de los termostatos (°C) y los caudales de renovación del aire (m³/h y persona).

2.2.3.4 Características de Archisun

Variables climáticas

Son editables por el usuario datos referentes a temperatura, radiación, viento, humedad del aire, ruido, ubicación y entorno. Los datos de radiación, temperatura, viento, humedad y ruido se caracterizan por ser valores medios extraídos desde tres tipologías

de día (cielo nublado, medio nublado y despejado). El usuario edita los valores de cada tipología de día y la secuencia de los días.

Datos de temperatura: se edita la temperatura media diaria (°C) y la variación de ella en el ciclo día noche (°C).

Radiación: se tratan dos aspectos, el térmico y el lumínico, a través de coeficientes de iluminación (lux) y radiación diaria media en plano horizontal (W/m^2).

Viento: se especifica la dirección predominante (grados), la velocidad media (m/s) y su variación (m/s)

Humedad: se especifica el valor medio de la humedad relativa (%).

Ruido: se especifica el nivel medio de ruido previsible según el entorno (dB)

Ubicación: se especifican latitud, longitud, distancia al mar (km), altura (m) y densidad urbana (m^3/m^2).

Entorno: se especifica la presencia de montañas, agua, árboles de hoja caduca y perenne. Esta inserción de datos es gráfica y no por parámetros.

Variables propias del edificio

Son parámetros exteriores e interiores. Para los exteriores se puede elegir una de dos posibilidades:

- definir el edificio a través de unos coeficientes representativos de su forma y de los coeficientes medios de la piel
- definir el edificio a través de los detalles de orientación y composición de los cerramientos.

En el primer caso son editables los coeficientes de compacidad, porosidad, esbeltez, alargamiento (adimensionales) y orientación (grados), las conductividades medias de día y de noche del edificio (W/m^2k), la reflectancia media de la piel (adimensional), el porcentaje de superficie transparente, adosada o asentada (%). Se pueden insertar sistemas pasivos como conductos de sol.

Para los cerramientos interiores se pueden editar las separaciones y las conexiones horizontales y verticales (tanto por uno), la reflectancia (adimensional) y el peso medio de los cerramientos (kg/m^3), la presencia de agua en el interior (kg).

Variables relativas a los sistemas

Se editan los rendimientos medios (adimensionales) de los sistemas de calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria. Se pueden insertar sistemas activos: solar térmico y fotovoltaico.

Variables relativas a los usuarios

Se define la ocupación media y el horario típico de tres tipologías de uso: residencial, ocasional o administrativo. Se puede editar una nueva tipología de uso a través de la elección entre tres perfiles de usuario (variaciones en el aislamiento y en los aportes internos), el consumo de luz artificial, agua caliente, cocina y otros aparatos (W).

2.2.3.5 Características de Ecotect

Variables climáticas

Se pueden definir de varias maneras, lo más sencillo y frecuente es utilizar ficheros climáticos.

Variables relativas al edificio

Cerramientos: se definen por capas o a través de las características generales si se dispone de una estrategia de cálculo. En el primer caso se insertan densidad (kg/m^3) calor específico (J/kgK), conductividad lineal (W/mK). En el segundo se deben calcular la conductividad global ($\text{W/m}^2\text{K}$), el coeficiente de absorción (adimensional), el de transparencia (adimensional), el coeficiente de amortiguación de la ola térmica (adimensional) y el retraso temporal de penetración (h).

Vidrios: se definen a través de las propiedades globales de transmisión ($\text{W/m}^2\text{K}$), absorción (adimensional), transparencia (adimensional), sombras (adimensional).

Infiltración: se define a través de un valor fijo (1/h) o una ley de dependencia horaria. Se puede insertar un coeficiente de sensibilidad al viento (1/h).

Variables dependientes de los usuarios

Ocupación: se define la densidad de ocupación como valor fijo (numero de personas) o ley horaria. Se establece la actividad entre unos valores prefijados (met). Las ganancias se mezclan con las de los equipos pero se dividen en sensibles y latentes (W/m^2).

Ventilación: no es editable directamente. No existe un perfil de usuario. Es necesario pasar a través de la infiltración (1/h).

Variables dependientes de los sistemas

Se define un rendimiento medio (adimensional) del sistema único que puede ser solo calor, solo frío, calor y frío, solo ventilación. Se definen las horas de funcionamiento y el rango de confort ($^{\circ}\text{C}$). Las ganancias se suman a las de los usuarios. Este programa permite evaluaciones de iluminación y de acústica. También permite valoraciones económicas. En todo esto no se entrará en este trabajo.

2.2.3.6 Características de Trnsys

Los datos que los usuarios pueden modificar son muchos. Hace falta distinguir primero entre la definición del edificio, que se hace en la interfaz de introducción de datos, y la definición del ambiente, que se hace en la herramienta de cálculo.

Variables propias del edificio

Cerramientos: se definen por capas. Las capas pueden ser masivas o bien privadas de masa. Existen capas especiales definidas capa activa y techo con refrigeración.

Una capa masiva se define a través de conductividad térmica lineal (kJ/hmK), calor específico (kJ/kgK) y densidad (kg/m^3).

Una capa sin masa (cámaras de aire) se define a través de la resistencia térmica ($\text{hm}^2\text{K/kJ}$) correspondiente.

Una capa activa corresponde a un suelo o a una pared radiante. Capa activa y techo con refrigeración se pueden definir de dos maneras: o bien insertando la geometría del cerramiento activo, o calculando el coeficiente equivalente de transmisión ($\text{kJ/hm}^2\text{K}$).

El muro, además de las capas con sus espesores, necesita por su definición de los coeficientes de absorción solar (adimensional) y de intercambio por convección en las dos caras ($\text{kJ/hm}^2\text{K}$).

Las zonas se definen a través de su volumen (m^3), su capacidad calorífica interna (kJ/K) y la orientación de los cerramientos (grados).

Los elementos de sombra se definen en la herramienta de simulación.

Variables dependientes del usuario

Las protecciones de las ventanas, internas o externas (adimensionales), pueden tener un valor fijo o bien una dependencia temporal, sin diferenciar si el control es automático o dependiente de las personas. Las infiltraciones son tratadas a la misma manera ($1/\text{h}$).

Variables dependientes de los sistemas

El sistema de ventilación se define a través del coeficiente de intercambio de aire ($1/\text{h}$), temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$) y su humedad relativa (%), todos definibles con valores fijos o dependencia temporal.

El sistema de calefacción se define a través de la temperatura del termostato ($^{\circ}\text{C}$), el poder de calefacción (kJ/h), la proporción radiante de las unidades terminales (%), la humidificación del local (%).

El sistema de refrigeración se define de la misma forma, dejando la opción de la proporción radiante.

Variables climáticas

Se definen en la herramienta de simulación a través de ficheros climáticos con datos de radiación (kJ/hm^2), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%), dirección (grados) e intensidad del viento (m/s). Para el cálculo de la radiación se dispone de dos ficheros, uno de radiación en la atmósfera y otro de nebulosidad.

En la herramienta de simulación se definen los elementos de sombra directamente a través del ángulo sólido que le quitan a las superficies correspondientes.

2.2.4 Selección de los estudios de sensibilidad

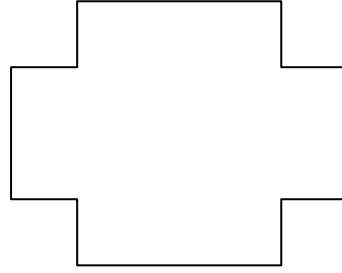
Los datos que los usuarios pueden modificar, como visto, son muy diferentes en los varios simuladores. Por esto, será necesario evaluar la sensibilidad a parámetros diferentes para cada simulador. La comparación será posible pensando en la representación que se hace de acciones y cambios concretos en cada simulador.

La tabla 5 resume los parámetros editables de los simuladores analizados.

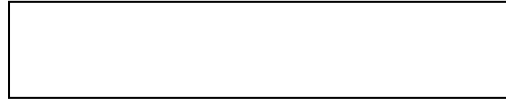
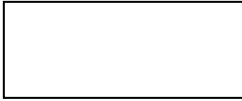
Dentro de esos, concordando con lo expuesto anteriormente, y especialmente con las investigaciones de K. Bruke [Bruke et al. 2005]; S. De Wit [De Wit 1997] y C. Clevenger [Clevenger et al. 2006], fueron elegidos para el análisis:

- la permeabilidad al aire de los cerramientos
- la tasa de renovación de aire sanitario
- la infiltración accidental de aire
- la tipología del vidrio
- el espesor del aislamiento
- el factor de protección solar debido al uso de las persianas en verano
- la compacidad del edificio
- la esbeltez del edificio
- la variación del aislamiento de los vidrios debida a uso de protecciones nocturnas
- la eficiencia de los recuperadores de calor en los sistemas de climatización
- la potencia de los ventiladores de los sistemas de climatización
- el alargamiento del edificio
- el peso de los cerramientos

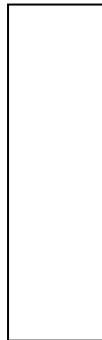
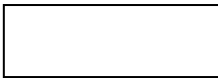
No todos los parámetros se consideraron en todas las evaluaciones, sino que se decidió por uno u otro según el simulador y la tipología arquitectónica analizada. En los resultados se explican estas elecciones con el máximo detalle posible.



Compacidad: relación entre la longitud del perímetro de un círculo de superficie igual a la planta del nuestro edificio y el perímetro de la planta del edificio



Alargamiento: relación entre el lado largo y el lado corto de la planta



Esbeltez: relación entre la altura del edificio y el radio del círculo con superficie equivalente a la superficie de la planta media

Tabla 5: clasificación de los parámetros de los simuladores

	Lider-Calener	Trnsys	Ecotect	Archisun
Parámetros climáticos	Altitud	Sombras	No editables	Temperatura aire Humedad relativa Radiación incidente Velocidad del viento Dirección del viento
Parámetros del edificio	Orientación Conductividad lineal materiales Densidad Calor específico Resistencia al vapor de agua Factor solar de los vidrios Permeabilidad al aire de los cerramientos Conductividad lineal puentes térmicos Factor de temperatura superficial del puente térmico Reflexión y transmisión de la radiación de las protecciones	Orientación Conductividad lineal materiales Densidad Calor específico Capacidad calorífica interior Volumen	Orientación Conductividad lineal materiales Densidad Calor específico Amortiguación Retraso Absorción Transparencia Sombras Infiltración Sensibilidad al viento	Compacidad Alargamiento Esbeltez Orientación Porosidad Conductividad Reflectancia Adosamiento Asentamiento Separaciones interiores horizontales Separaciones interiores verticales Conexiones interiores horizontales Conexiones interiores verticales Peso interior Volumen
Parámetros dependientes del usuario	Densidad de ocupación Renovaciones de aire Protección solar invierno Protección solar verano Conductividad invierno Conductividad verano	Renovación de aire Protección solar	Densidad de ocupación Ganancia sensible Ganancia latente	Densidad de ocupación Perfil de usuario
Parámetros dependientes de los sistemas	Rendimiento generadores Potencia generadores Potencia unidades terminales Consumo ventiladores Consumo bombas Recuperación de energía Sistemas activos	Renovación de aire Temperatura aire Humedad aire Potencia equipo calefacción Potencia equipo refrigeración Proporción calefacción radiante Humidificación Dehumidificación	Rendimiento Horario	Rendimiento medio Sistemas activos

Resumen:

En este capítulo se expusieron las motivaciones, los objetivos parciales y finales de la investigación y la metodología utilizada.

Esta se resume en la selección de unos estudios de sensibilidad, es decir en una primera clasificación de las variables que entran en la evaluación energética y de su respectiva relevancia sobre los resultados.

Las variables se clasificaron previamente según su procedencia en climáticas, propias del edificio, dependientes de los usuarios y dependientes de los sistemas.

Una sencilla evaluación de acciones frecuentes en un edificio permitió hacer hipótesis sobre la relevancia de las principales variables de la evaluación energética.

Los simuladores fueron tratados congruentemente al esquema conceptual ideado para la evaluación básica, y sus parámetros se clasificaron según el mismo esquema: parámetros climáticos, propios del edificio, dependientes de los usuarios y dependientes de los sistemas.

La totalidad de los parámetros fue presentada en la tabla resumen conclusiva.

CAPÍTULO 3: EDIFICIOS EVALUADOS

Se presentarán aquí los edificios analizados. Para obtener resultados generalizables, se seleccionaron diferentes tipologías edificativas y diferentes destinaciones de uso.

Todos los proyectos se encuentran en el ambiente cultural, climático y legislativo de la Comunidad Autónoma de Cataluña dentro del Reino de España.

Los proyectos considerados fueron:

- bloque de viviendas “Les Franqueses del Valles”
- centro de naturaleza “Les Planes de Son”
- rehabilitación de la antigua Massia de Vallforners
- prototipo de construcción de escuelas “CEIP”

Según la destinación de uso, se pueden clasificar las categorías:

- vivienda
- hotel
- escuela

Según la tipología edificativa, por lo menos están presentes las dos siguientes:

- construcción antigua-tradicional
- construcción moderna con criterios de sostenibilidad

Por el emplazamiento climático, finalmente, se consideran dos casos básicos:

- montaña (Pireneo catalán)
- mediterraneo (Barcelona)

Las combinaciones de esas situaciones permitieron determinadas comparaciones: por ejemplo, entre dos construcciones con la misma destinación de uso (hotel) y el mismo emplazamiento climático pero de diferente tipología arquitectónica (rehabilitación de edificio antiguo y nueva construcción sostenible).

Las simulaciones y los análisis de sensibilidad se llevaron a cabo con los cuatro softwares descritos en los capítulos anteriores sobre los proyectos de las respectivas construcciones o rehabilitaciones.

Además, el edificio “Les Planes de Son” fue monitorizado durante dos años y se llevaron a cabo mediciones in situ.

3.1 Les Franqueses del Valles

Edificio de 14 pisos para jóvenes, concurso de incasol 2007, 1^{er} premio. Arquitectos Berga, Gonzalez y Bañares. Emplazamiento: Les Franqueses del Valles, Catalunya.

3.1.1 Clima:

Según clasificación de Köppen, la zona se clasifica como clima mediterráneo. La altitud es de 218 m.

El entorno es urbano de densidad medio-baja. Hay ligera presencia de vegetación al sur y al este, y entorno construido al oeste y al norte.



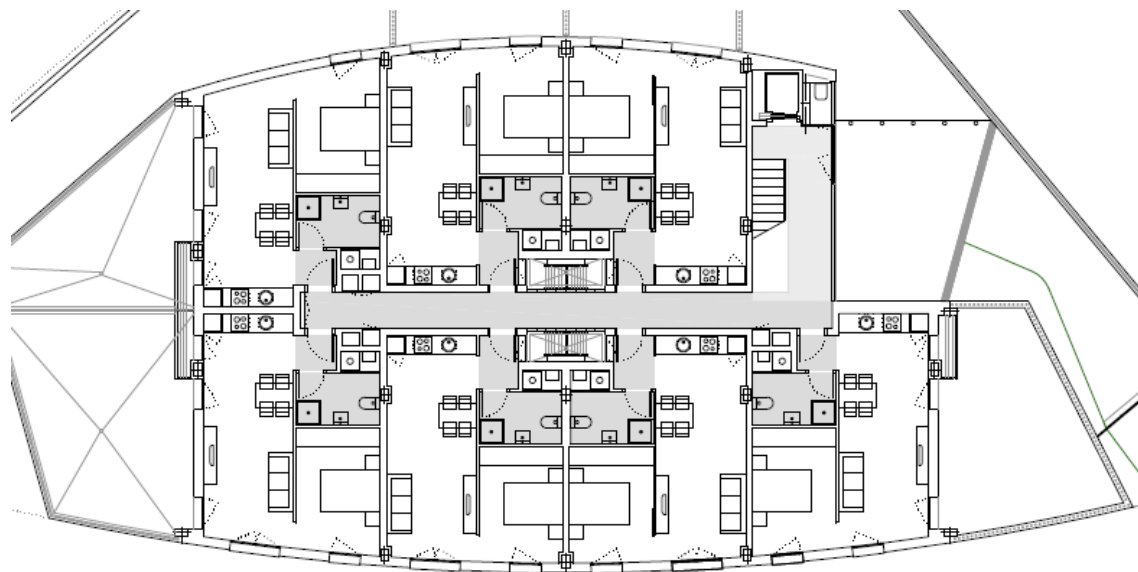
Figura 15: Les Franqueses del Valles, emplazamiento climático



Figura 16: Les Franqueses del Valles, fachada principal, fotomontaje

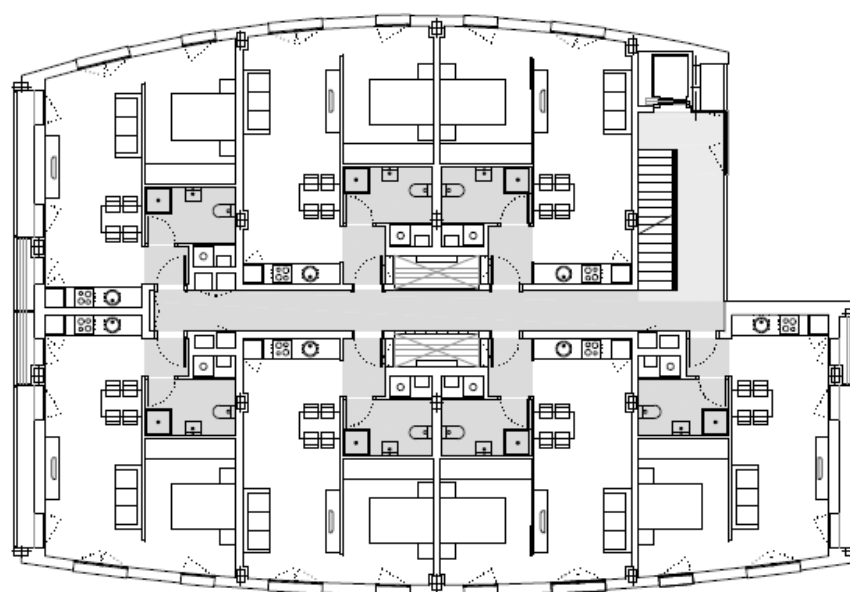


Figura 17: Les Franqueses del Valles, fachada posterior, fotomontaje



PLANTA BAIXA

Figura 18: Les Franqueses del Valles, planta baja



PLANTA PRIMERA

Figura 19: Les Franqueses del valles, planta primera



Figura 20: Les Franqueses del Valles, fachadas principales

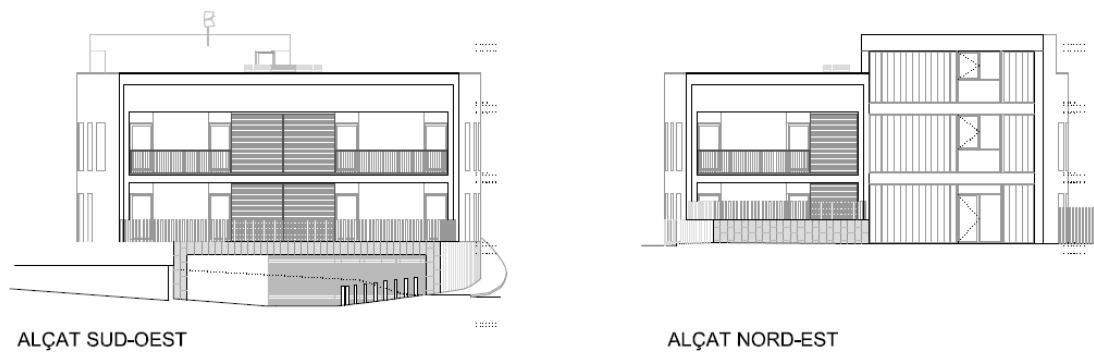


Figura 21: Les Franqueses del Valles, fachadas menores

3.1.2 Zonas del edificio:

Es un edificio de vivienda, las zonas se pueden clasificar por su uso en aparcamiento, entrada, escalera y vivienda. Las únicas zonas térmicas son las habitables. Las 14 viviendas presentan pequeñas diferencias de distribución, pero pueden ser generalizadas a una única tipología de 40 m² útiles. Las figuras anteriores enseñan las distribuciones de las plantas y las fachadas según proyecto.

3.1.3 Materiales:

Muro exterior: es un muro de ladrillo con aislamiento. Las capas son: 2 cm de mortero de cemento, 11,5 cm de ladrillo, cámara de aire sin ventilar de 7 cm, aislamiento de lana de roca de 6 cm, acabado interior de yeso de 3 cm. El coeficiente de transmisión resultante es 0,42 W/m²°C.

Cubiertas: presentan alguna pequeña diferencia según las zonas del edificio, pero en general tienen el mismo comportamiento térmico. Las capas son: grava 10 cm, poliestireno expandido con hidrofluorcarbonos de 6 cm, feltro de 2 cm, hormigón de 7 cm, forjado de hormigón 30 cm, enlucido de yeso de 1,5 cm. El coeficiente de transmisión es 0,4 W/m²°C.

Suelo en contacto con el terreno: es un forjado de hormigón aislado. Capas: yeso laminado de 2 cm, forjado de hormigón de 30 cm, lana mineral de 5 cm, hormigón 4 cm, mortero de cemento de 3 cm, mármol 3 cm. Coeficiente de transmisión total: 0,56 W/m²°C.

Medianera: cartón yeso con doble aislamiento. Capas: yeso laminado 3 cm, lana mineral 7 cm, plancha de acero 7 mm, lana mineral 7 cm, yeso laminado 3 cm. Coeficiente de transmisión resultante: 0,26 W/m²°C.

Muro enterrado y forjados: hormigón sin aislar con acabado superficial. Coeficiente de pérdidas 0,96 W/m²°C.

Vidrios: son vidrios dobles con un coeficiente de pérdidas de 2,8 W/m²°C, un factor solar de 0,75, marcos de aluminio con ruptura del puente térmico, persianas enrollables a disposición del usuario, permeabilidad al aire 9 m³/m²h a 100 Pa.

Tabla 6: Les Franqueses del Valles, puentes térmicos de proyecto definidos por la conductividad y el factor superficial de temperatura (temperatura de la capa externa respecto a la capa interior).

	Conductividad W/(mK)	factor superficial de temperatura (adimensional)
Encuentro forjado-fachada	0,17	0,81
Encuentro suelo exterior-fachada	0,39	0,71
Encuentro cubierta-fachada	0,39	0,71
Esquina saliente	0,08	0,82
Hueco ventana	0,19	0,76
Esquina entrante	-0,15	0,90
Pilar	0,06	0,84
Unión solera pared exterior	0,14	0,74

Puentes térmicos considerados: en la evaluación se consideraron los puentes térmicos de la tabla 6.

3.1.4 Sistemas:

La calefacción se proporcionará con calderas individuales de condensación. Combustible gas natural, rendimiento del 95%. El agua caliente se obtendrá con un circuito solar térmico centralizado con apoyo de las calderas al 50%. No se prevé la instalación de ningún sistema de aire acondicionado. La ventilación será natural para los espacios habitables a través de las ventanas.

3.2 Les Planes de Son

Mención honorífica en los Premios de Medio Ambiente de la Generalitat de Catalunya 2006, el Centro de Natura de Les Planes de Son (arquitecto Francesc Rius) se encuentra en el pueblo de Son, en la región del Pireneo catalán. El edificio resulta muy interesante para un análisis de sensibilidad, por sus características constructivas y su emplazamiento. [Rius 2008] En la figura se puede notar la zona climática. La altura relativa es de 1500 metros sobre el nivel del mar. La destinación de uso del edificio es la de un albergue, con habitaciones, salas comunes, recepción, bar. Las actividades que se desarrollan son sobre todo educativas, aunque la mayoría de estas tenga lugar en el exterior.

Para proceder a un análisis energético, en el edificio se instalaron unas sondas para recoger datos sobre la evolución de la temperatura interior a lo largo del año. En el momento de establecer el emplazamiento de las sondas, el edificio fue dividido conceptualmente en zonas, que tienen unas características tales que el comportamiento térmico en cada zona debería ser uniforme. El edificio consta de tres plantas. En la planta enterrada se encuentran la galería de las instalaciones y la habitación del guarda (semienterrada). En la planta baja se encuentran las zonas comunes: la recepción, el comedor, el bar, las salas de actividades lúdicas, el laboratorio, la biblioteca, la cocina y unos baños. En la planta primera se encuentran las habitaciones y algunas zonas de paso.



Figura 22: Les Planes de Son, emplazamiento climático

3.2.1 Clima

El emplazamiento macroclimático, según la clasificación de Koppen, es difícil de obtener con exactitud. El Pueblo de Son se localiza justo en la línea de división de dos zonas climáticas muy importantes: la mediterránea y la oceánica. La colocación más adecuada parece ser la mediterránea, y es muy importante decir que el microclima será evidentemente muy importante en la evaluación climática general. La altura del pueblo, aunque no excesiva, permite además de clasificar la zona como zona montañosa, y es probablemente esta la zona climática de Koppen que más se pueda reconducir al lugar.



Figura 23: Les Planes de Son, fachada principal

El microclima del lugar resulta el de un lugar de montaña, con valores de radiación solar muy elevados, relativamente pocas precipitaciones durante todo el año, una temperatura baja en los meses invernales y no excesivamente alta en los meses de verano.

El edificio se encuentra expuesto al sur, y protegido al norte por la montaña. Además se encuentra semienterrado.

Los datos climáticos provienen de mediciones en situ y de las estaciones más cercanas del servicio meteorológico catalán, Molló y Pardines. También se utilizaron datos de la estación francesa de Odeillo y datos proporcionados por el Atlas Solar del ICAEN (Institut Catalan de l'Energía).

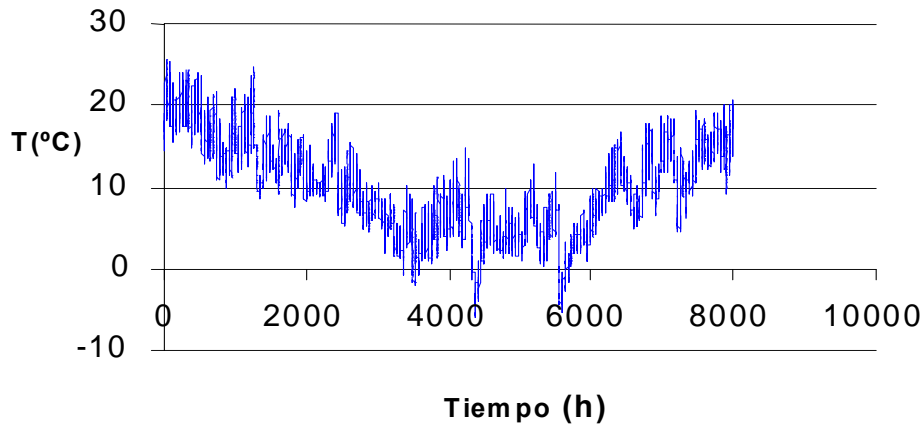


Figura 24: Les Planes de Son, evolución horaria de la temperatura exterior durante un año

Tabla 7: Les Planes de Son, resumen mensual de temperaturas 2006-2007

meses	T media	T max media	T min media	T max absol	Tmin absol
julio	19,5	23	16,4	25,8	13,6
agosto	16	19,4	13	23,7	9,7
septiembre	10,3	16,6	11,7	24,8	8,4
octubre	12,2	14,5	10	19,2	7,5
noviembre	8	10,8	5,9	15,6	0
diciembre	3,4	6,9	1,6	10,2	-2
enero	4,8	8,3	2,5	14,8	-6
febrero	3,4	6,8	2,4	9,7	1
marzo	3,6	6,1	1,5	12,9	-5,2
abril	8,7	11,2	6,5	16,7	1
mayo	11,5	14	9,2	18,8	4,4
junio	14,1	17	12,1	20,8	6,3

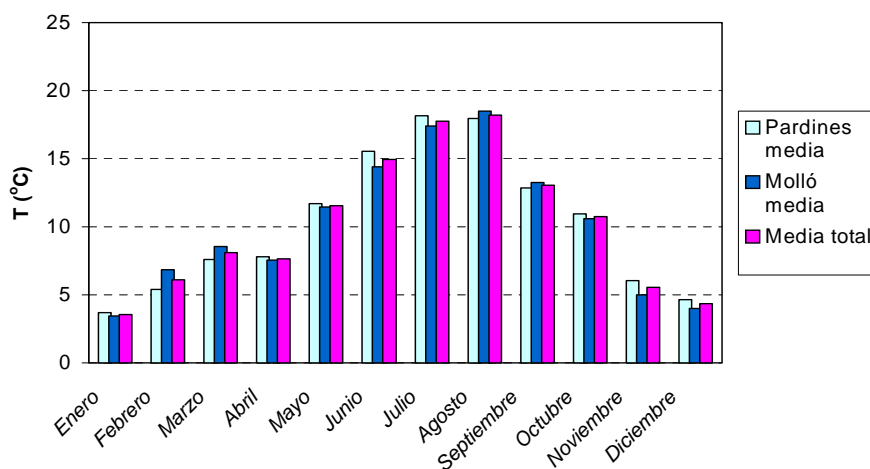


Figura 25: temperatura exterior media de las estaciones de Molló i Pardines 1996-1998

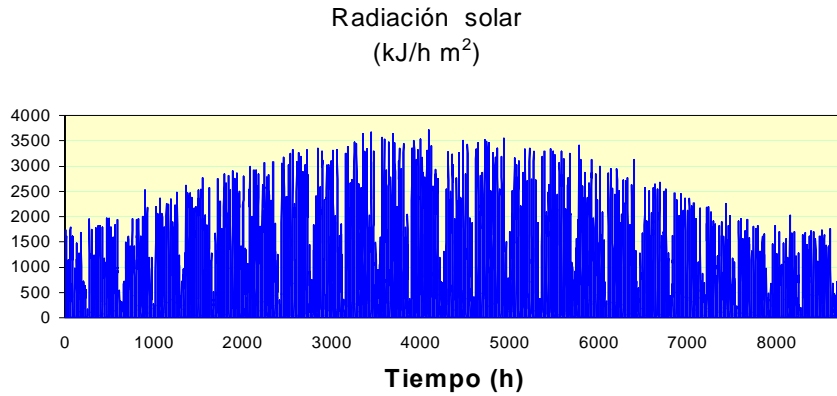


Figura 26: Les Planes de Son, radiación media en plano horizontal a lo largo de un año

Tabla 8: Les Planes de Son, radiación solar mensual media (kJ/m² día)

	Pardines 1997	Pardines 1998	Pardines mitjana	Molló 1997	Molló 1998	Molló mitjana	Atlas ICAEN	Odeillo mitjana
gener	7.300	8.000	7.233	2.800	6.400	4.600	7.200	8.000
febrer	14.500	12.600	12.167	6.700	10.400	8.550	10.000	10.500
març	17.600	17.400	17.400	16.500	12.500	14.500	13.900	14.300
abril	19.900	17.600	18.367	16.500	12.700	14.600	18.300	18.800
maig	20.700	19.100	21.533	15.900	14.600	15.250	21.500	22.400
juny	20.800	23.800	22.300	13.300	15.800	14.550	23.000	24.400
juliol	22.400	24.800	23.100	15.500	17.000	16.250	22.200	24.000
agost	19.500	19.400	20.233	15.600	14.100	14.850	19.400	21.500
setembre	17.500	13.400	15.567	10.800	11.900	11.350	15.400	17.400
octubre	14.200	14.300	13.600	10.100	9.400	9.750	11.100	13.000
novembre	7.900	10.700	8.600	6.000	7.100	6.550	7.300	9.400
desembre	7.000	7.800	7.200	5.400	5.900	5.650	6.400	7.500

3.2.2 Zonas del edificio

El perfil de uso del edificio es diferente según la época del año y, sobre todo, varía mucho de zona a zona.

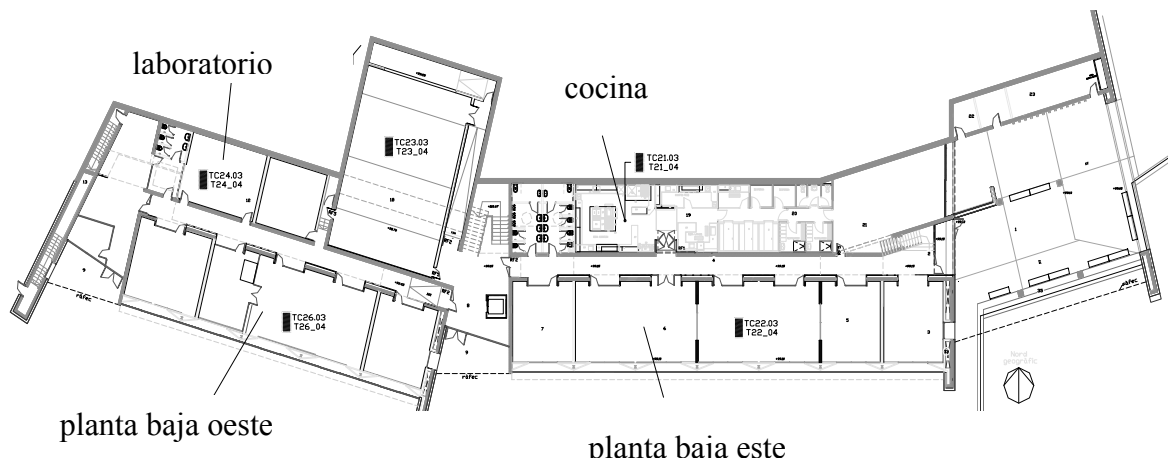


Figura 27: Les Planes de Son, zonas del edificio

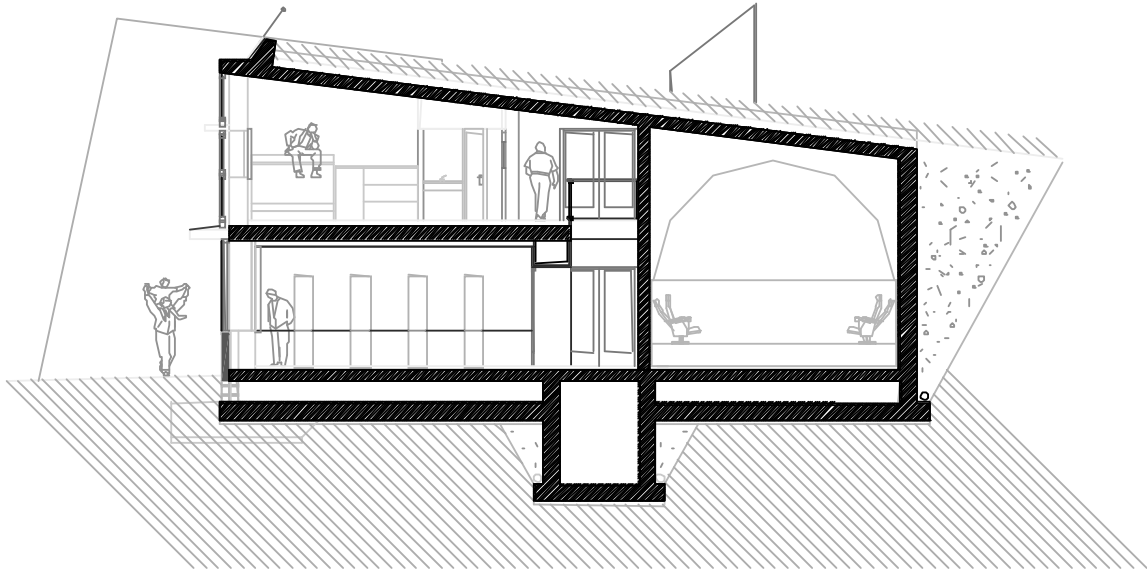


Figura 28: Les Planes de Son, sección

La planta enterrada

La planta enterrada es ocupada por las instalaciones y, en la parte este, por la casa del guarda, orientada al sur. En la casa del guarda se colocó una de las sondas.

La planta baja

Esta planta es constituida por varias zonas muy diferentes entre sí por comportamiento térmico, así que es necesario analizarlas una a la vez.

La cocina

Se encuentra en la parte norte del edificio. Una de las paredes es enterrada, las otras comunican con espacios interiores.

La sala de actos

También se encuentra en la parte norte del edificio. Tres de las paredes son enterradas y la cuarta comunica con el pasillo.

El laboratorio

Es probablemente la zona más fría del edificio, localizada a norte, con paredes enterradas o comunicantes con el interior.

La planta baja oeste

Está muy expuesta a la radiación solar. Aquí tienen lugar las actividades lúdicas. La ocupación de esta zona es entonces muy variable. La constituyen la biblioteca, la sala ordenadores, la sala de juegos, la zona de televisión.

La planta baja este

Esta zona tiene una ocupación variable pero nunca está vacía. Comprende el comedor, el bar, la recepción. Es muy expuesta a la radiación.

La primera planta

Aquí se encuentran las habitaciones, que casi no se utilizan durante el día.

3.2.3 Materiales:

El edificio se caracteriza por tener una parte de la superficie exterior enterrada. La gran fachada norte, de más de 100 m de longitud, se encuentra en esta situación. La cubierta también se encuentra bajo una capa de tierra de medio metro.

Las características de los muros se calcularon con la ecuación (9)

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum \frac{s_i}{\lambda_i}} \quad (9)$$

Donde h_i y h_e son los coeficientes de intercambio por convección entre aire y superficie interior y exterior respectivamente, s_i son los espesores de las capas de los muros y λ_i son las conductividades lineales de los materiales que las constituyen.

En la tabla se resumen los valores de las conductividades de los materiales presentes en el edificio.

Tabla 9: conductividad lineal para algunos materiales [Aschroft et al. 1976]

material	Conductivitat λ (W/m°C)
cartró guix	0,18
formigó	1,63
pedra granítica	3,5
llana de roca	0,04
fusta	0,2
terra	2
poliestirè expand.	0,034

Con los valores típicos de h obtenemos

$$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} = 0,17 \quad (10)$$

Muros exteriores

Los cerramientos exteriores son muy diferentes según las zonas. La fachada sur es casi totalmente de vidrio, detrás del vidrio se encuentra en buena parte de la fachada un panel captador de radiación, oblicuo respecto al vidrio mismo. La fachada norte es enterrada y constituida por un muro muy grueso de hormigón. Las fachadas este y oeste, muy pequeñas respecto a las otras dos, son de hormigón y recubrimiento de granito.

Muro externo de fachada sur

Este muro se encuentra en la fachada sur y en parte en la fachada este. Las características son: dos placas de cartón yeso de 13 mm, aislamiento de lana de roca de 70 mm, hormigón de 200 mm y piedra granítica de 200 mm. La conductividad térmica resultante es 0,48 W/m²°C.

Muro externo de fachada este

En la parte alta de la fachada este se encuentra un muro muy poco aislado que separa el exterior y un espacio interior no habitable. Las características son: hormigón de 200 mm y revestimiento interior de madera de 10 mm. La conductividad resultante es 2,9 W/m²°C

Muro externo de fachada oeste

En la fachada oeste se encuentra un muro de hormigón de 200 mm. Este muro separa un espacio habitable y uno no habitable. La conductividad es de $4 \text{ W/m}^2\text{C}$.

Muro de unión entre partes del edificio

En los puntos de unión entre las partes del edificio se encuentra un muro de hormigón de 200 mm, dos placas de cartón yeso de 13 mm y aislado con lana de roca de 70 mm. La conductividad es $0,45 \text{ W/m}^2\text{C}$.

Muro detrás de los vidrios

Detrás del vidrio de la fachada sur, donde no hay captadores solares de agua caliente, se encuentra un muro captador compuesto por cartón yeso de 13 mm, lana de roca 50 mm y otro cartón yeso de 13 mm. Este muro está inclinado respecto al vidrio y comunica directamente con el interior. Su función es captar la energía radiante y transferirla al aire interior.

El mismo muro se encuentra detrás de los captadores solares de agua caliente, sin capa adsorbente y sin inclinar. La conductividad es $0,34 \text{ W/m}^2\text{C}$.

Muro enterrado

El muro norte es un muro de hormigón de 400 mm. El cálculo de la conductividad de un muro enterrado se hace, de acuerdo con el código técnico, con las ecuaciones:

$$K = \frac{K_m L}{S} \quad (11)$$

donde L es el perímetro y S la superficie del muro, mientras que

$$K_m = K_s - K_p \quad (12)$$

Donde K_s y K_p son valores que se encuentran en tablas del mismo código técnico y dependen de la profundidad del muro. En este caso $K_s=3,5 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ y $K_p=2 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$. La conductividad resultante es $0,38 \text{ W/m}^2\text{C}$.

Cubierta

La cubierta es una cubierta verde formada por un forjado de hormigón de 260 mm, una capa de mortero de 10 mm, aislamiento de lana de roca de 80 mm, una capa impermeabilizante, poli estireno expandido de 30 mm, tierra vegetal de 460 mm. La conductividad es $0,28 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Ventanas

Las ventanas ocupan la mitad de la fachada sur a la planta baja y un tercio en la planta primera. El doble vidrio con cámara de aire y marcos con ruptura del puente térmico garantizan una conductividad de $1,7 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Con este valor se considera que por la noche se utilice una protección aislada.

$$K = \frac{K_d + K_n}{2} \quad (13)$$

Suelo

El suelo de la planta baja es constituido por 280 mm de hormigón, cámara de aire de 180 mm, lana de roca 50 mm, mortero y suelo de madera o cerámico dependiendo del espacio. La conductividad se considera cero por la presencia del espacio soterrado.

3.2.4 Sistemas

El edificio integra sistemas de aprovechamiento de la energía renovable (fotovoltaico y solar térmico).

El sistema de calefacción es por suelo radiante, el fluido se calienta en parte en los captadores solares y en parte en una caldera de gas. Existe una caldera de biomasa actualmente no en función.

El aire de renovación se distribuye a las diferentes zonas a través de un sistema centralizado.

La cocina es de gas, con contadores separados de los de calefacción.

3.3 Masía de Vallforners

3.3.1 Clima:

La Masía se encuentra en el Montseny, Catalunya, en una zona climática que se puede definir mediterránea según la clasificación de Köppen. La altura y el entorno definen un microclima de baja montaña.



Figura 29: Masía de Vallforners, emplazamiento climático



Figura 30: Masia de Vallforners, vista principal



Figura 31: Masia de Vallforners, vista posterior

3.3.2 Zonas del edificio:

El núcleo edificado visible en el lugar es un conjunto de construcciones y reconstrucciones, entre las cuales se pueden identificar la masía, los corrales, la capilla y los restos de una torre. El proyecto de rehabilitación está dirigido a la masía y a parte de los corrales. En la masía se encontrarán habitaciones turísticas y la casa del guarda. En los corrales se emplazarán las instalaciones. La zona de tres plantas es la que necesita las mayores intervenciones.

3.3.3 Materiales:

Las características constructivas actuales de los cerramientos son las siguientes:

- muros exteriores: piedra sin aislar con un grueso de 60 cm.
- suelo: piedra sin aislar con placas cerámicas al interior, grueso de 30 cm.
- cubierta: actualmente es una cubierta de tejas puestas sobre una estructura de vigas de madera. Está previsto modificar la estructura, poniendo impermeabilización y aislamiento (4 cm.)
- paredes interiores: son unas paredes de madera ligera.

Como se puede entender, las características son las de un espacio poco aislado, pero al mismo tiempo poco sensible, por la presencia de una masa térmica considerable.

3.3.4 Sistemas:

El calor se generará a través de una caldera de biomasa. Eso evidentemente afectará los resultados de la certificación energética, donando a este edificio una buena calificación aunque los resultados en términos de demanda no serán buenos.

Se prevén las instalaciones de captadores solares para agua caliente sanitaria y de placas fotovoltaicas de generación eléctrica.

3.4 Protoceip

Se trata de un proyecto tipo para escuelas secundarias. Los criterios medioambientales y de ahorro de energía se tuvieron en cuenta a la hora de desarrollar los prototipos.

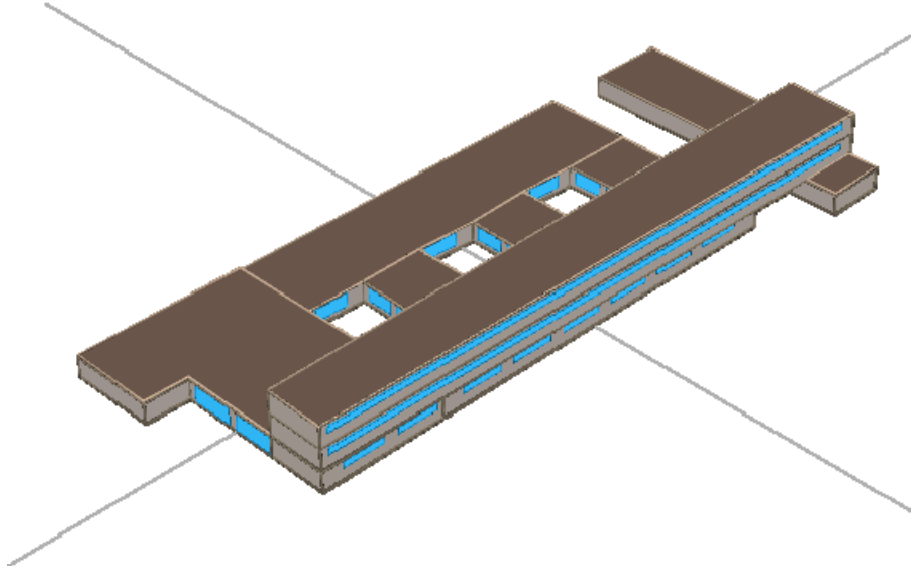


Figura 32: maqueta Calener GT del prototipo de escuelas Ceip

3.4.1 Clima

El proyecto no tiene una ubicación bien definida, es un prototipo para la construcción de Centros de enseñanza secundaria en Cataluña. Para las simulaciones se consideró ubicado en Barcelona, en un entorno urbano muy denso, a pocos metros sobre el nivel del mar.

3.4.2 Zonas del edificio

El edificio consta de una planta baja con grandes patios y dos plantas superiores más pequeñas. Las aulas se encuentran en las extremidades norte y sur de la planta baja y en las plantas superiores. En la zona este de la planta baja se ubican los espacios de uso colectivo (comedor, biblioteca, laboratorios). En la zona oeste se encuentran el gimnasio y la zona de instalaciones. En la parte central se alternan los patios y las oficinas.

Una escuela secundaria normalmente abre durante la semana de lunes a viernes de 8.00 a 18.00 con variabilidad de ocupación.

La zona oeste tiene un horario de utilización muy limitado. La zona este tampoco se utiliza continuamente.

3.4.3 Materiales:

- muros exteriores: ladrillo u hormigón con aislamiento de poliestireno expandido. U resultante $0,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- suelo: mortero de cemento, forjado reticular de hormigón con aislamiento de poliestireno expandido, acabado cerámico. U resultante $0,4 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- cubierta: mortero de cemento, capa de separación textil, aislamiento de poliestireno expandido, lamina de polietileno, mortero, acabado de grava. U resultante $0,3 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- vidrios: dobles con marco de aluminio y ruptura del puente térmico. U resultante $2,8 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

3.4.4 Criterios medioambientales:

Un largo estudio previo permitió formular los criterios básicos de construcción ambiental de estas escuelas. Los factores que se tomaron en consideración fueron acústicos, lumínicos y térmicos, con el objetivo de conseguir el máximo confort y un ahorro energético considerable, siempre respetando lo establecido por el código técnico de la edificación.

Los principales criterios se pueden clasificar en:

- emplazamiento, accesibilidad y transporte
- aprovechamiento y recuperación de aguas
- vegetación
- materiales constructivos
- orientación y forma
- calidad del aire interior
- acústica
- instalaciones eficientes
- gestión de los residuos

Los criterios que más afectan la evaluación energética y los análisis de sensibilidad son los relativos a los materiales y a la forma del edificio.

Especialmente, la forma debe combinar las exigencias de iluminación, ventilación y ahorro de energía. El resultado es una forma suficientemente compacta, pero porosa, con una buena orientación y la posibilidad de ventilar utilizando los patios de luz.

Resumen:

En este capítulo se presentaron los cuatro proyectos analizados: el bloque de viviendas Les Franqueses del Valles, la rehabilitación de la antigua masía de Vallforners, el centro de naturaleza Les Planes de Son y el prototipo para la construcción sostenible de centros de educación secundaria Protoceip.

Todos los edificios se describieron según el mismo esquema, relacionado con el esquema de clasificación de las variables utilizado en el capítulo 2:

variables climáticas – descripción del emplazamiento macro y micro climático del edificio

variables propias del edificio – descripción de los materiales utilizados, de las características generales y de la zonificación del edificio

variables dependientes de los usuarios – descripción del uso de las diferentes zonas del edificio

variables dependientes de los sistemas – descripción de las instalaciones presentes o previstas en el edificio

CAPÍTULO 4:

RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos, tanto en las evaluaciones como en las simulaciones y en sus correspondientes estudios de sensibilidad. También se muestran los datos recogidos en Les Planes de Son y se discute la monitorización de este edificio.

Los resultados de las simulaciones son ordenados por edificio y por simulador.

A cada gráfica de sensibilidad corresponde una tabla que indica cuales fueron los parámetros evaluados en cada caso y cuales valores se eligieron para las variaciones de los mismos parámetros.

En la última parte del capítulo se sacan unas primeras conclusiones y se comparan los diferentes simuladores utilizados y las diferentes tipologías arquitectónicas evaluadas, coherentemente con cuanto expuesto en el capítulo anterior.

4.1 Evaluaciones

Como explicado en la metodología, las evaluaciones de sensibilidad se conducen a través de la variación de uno de los parámetros de la ecuación de balance volumétrica (1), (3):

$$T_i = T_e + \frac{I + D}{G}$$

$$\delta T_i = \delta T_e + \frac{\delta(I + D)}{G} - \frac{I + D}{G^2} \delta G$$

Se variaron entonces los valores de I, D y G respecto a una situación de equilibrio determinada por la ocupación estándar y por un razonable uso de la ventilación y de las protecciones solares.

Los resultados se expresan bajo la forma de una variación de temperatura y también de una variación en porcentaje, teniendo en cuenta la localización de los edificios y los sistemas de medida en vigor en tal lugar. Especialmente, como adelantado en la metodología (capítulo 2), el coeficiente de sensibilidad se define una vez aceptada una máxima variación de la temperatura de referencia para el bienestar interior.

Las teorías que definen una zona de confort son numerosas. Se pueden citar las gráficas de Olgyay y de Givoni a título de ejemplo. Esas zonas pretenden definir el confort durante todo el año o durante una estación. Aquí lo más interesante resulta definir un coeficiente de media o alta frecuencia, es decir la excursión máxima que no podemos asumir como confortable en un tiempo de horas o, como mucho, días. Un coeficiente de alta frecuencia se podría definir a través de nuevos estudios sobre el carácter dinámico del confort (véase el capítulo 5). Sugerencias sobre excursiones del orden del día se encuentran en los manual de aire acondicionado, como el de Carrier, y corresponden a intervalos de 2 a 5 grados según los usos del edificio. En estas evaluaciones consideramos como variación máxima admisible una variación de 4 grados centígrados.

Las variaciones de I y D consideradas son variaciones del 30%. La variación de G considerada es mucho mayor, coherentemente con la discusión introductiva del capítulo 1, donde se explicó que acciones como “abrir ventanas” causan variaciones muy grandes en ese parámetro. El coeficiente de pérdidas por ventilación puede variar del 300% o incluso más; aquí se consideraron variaciones del 100% con la finalidad de tener en cuenta la localización de las variaciones citadas, que normalmente tienen lugar en una zona bien especificada de un edificio. No se considera variación de temperatura exterior, debido a la alta frecuencia de las acciones consideradas.

1.1.1 Les Franqueses del Valles

El edificio de viviendas de Les Franqueses presenta un volumen de 1900 m³ y una superficie habitable de unos 600 m².

Los valores adoptados para los coeficientes de la ecuación son los siguientes:

Tabla 10: Les Franqueses del valles, valores de los parámetros según proyecto

U (W/m ² °C)	G _t (W/m ³ °C)	G _v (W/m ³ °C)	I (W/m ³)	D (W/m ³)
0,45	0,15	0,12	1,5	2

El vector de sensibilidad definido tiene la forma:

$$S = (dT_i(dG); dT_i(dI); dT_i(dD))$$

$$S = (-5,7; 1,6; 2,2)$$

Las sensibilidades porcentajes en valor absoluto se pueden expresar como:

$$S = (144%; 42%; 55%)$$

Este resultado indica la sensibilidad del edificio a los fenómenos de ventilación como la preponderante.

El coeficiente medio de sensibilidad se puede expresar como la media aritmética de las sensibilidades pesada sobre la frecuencia de las variaciones. Considerando la misma probabilidad de variación, se obtiene un coeficiente de sensibilidad S = 80%.

1.1.2 Masía de Vallforners

El edificio tiene un volumen de 1500 m³ por una superficie habitable de 400 m².

Los valores utilizados son:

Tabla 11: Masía de Vallforners, valores de los parámetros según proyecto

U (W/m ² °C)	G _t (W/m ³ °C)	G _v (W/m ³ °C)	I (W/m ³)	D (W/m ³)
2	0,54	0,24	1,5	2

El vector de sensibilidad tiene la forma:

$$S = (dT_i(dG); dT_i(dI); dT_i(dD))$$

$$S = (-1,4; 0,6; 0,8)$$

Las sensibilidades porcentajes en valor absoluto se pueden expresar como:

$$S = (34\%; 14\%; 19\%)$$

Este resultado indica la sensibilidad del edificio a los fenómenos de ventilación como la preponderante.

El coeficiente medio de sensibilidad se puede expresar como la media aritmética de las sensibilidades pesada sobre la frecuencia de las variaciones. Considerando la misma probabilidad de variación, se obtiene un coeficiente de sensibilidad $S = 22\%$.

1.1.3 Les Planes de Son

El edificio tiene un volumen de 7000 m^3 por una superficie habitable de 2400 m^2 .

Los valores utilizados son:

Tabla 12: Les Planes de Son, valores de los parámetros según proyecto

$U \text{ (W/m}^2\text{°C)}$	$G_t \text{ (W/m}^3\text{°C)}$	$G_v \text{ (W/m}^3\text{°C)}$	$I \text{ (W/m}^3)$	$D \text{ (W/m}^3)$
0,4	0,14	0,12	1,5	2

El vector de sensibilidad tiene la forma:

$$S = (dT_i(dG); dT_i(dI); dT_i(dD))$$

$$S = (-6,2; 1,7; 2,3)$$

Las sensibilidades porcentajes en valor absoluto se pueden expresar como:

$$S = (155\%; 43\%; 58\%)$$

Este resultado indica la sensibilidad del edificio a los fenómenos de ventilación como la preponderante.

El coeficiente medio de sensibilidad se puede expresar como la media aritmética de las sensibilidades pesada sobre la frecuencia de las variaciones. Considerando la misma probabilidad de variación, se obtiene un coeficiente de sensibilidad $S = 85\%$.

1.1.4 Protoceip

El edificio tiene un volumen de 12000 m³ por una superficie habitable de 4200 m².

Los valores utilizados son:

Tabla 13: Protoceip, valores de los parámetros según proyecto

U (W/m ² °C)	G _t (W/m ³ °C)	G _v (W/m ³ °C)	I (W/m ³)	D (W/m ³)
0,5	0,17	0,24	1,5	2

El vector de sensibilidad tiene la forma:

$$S = (dT_i(dG); dT_i(dI); dT_i(dD))$$

$$S = (-5; 1,1; 1,5)$$

Las sensibilidades porcentajes en valor absoluto se pueden expresar como:

$$S = (125\%; 27\%; 37\%)$$

Este resultado indica la sensibilidad del edificio a los fenómenos de ventilación como la preponderante.

El coeficiente medio de sensibilidad se puede expresar como la media aritmética de las sensibilidades pesada sobre la frecuencia de las variaciones. Considerando la misma probabilidad de variación, se obtiene un coeficiente de sensibilidad $S = 63\%$.

Los resultados indican una sensibilidad más elevada en el edificio de Les Planes de Son respecto a los otros, especialmente respecto a la comparable (por uso, ubicación y forma) Masía de Vallforner.

El edificio de vivienda y el prototipo de escuelas Ceip dan resultados parecidos pero con orígenes diferentes: el término de ventilación relativamente bajo del primero y el gran volumen del segundo.

Esta evaluación no tiene en cuenta el efecto de la inercia térmica, por lo que resulta necesario proceder a una simulación dinámica de las variaciones.

En todo caso, notamos que, tratándose de situaciones dinámicas a alta frecuencia, los resultados esperados no deberían ser muy distantes de los obtenidos de esta forma sencilla.

La tabla resume las sensibilidades de los edificios analizados frente a cambios en los parámetros de ventilación, radiación incidente y aportación interna definidos.

Tabla 14: comparación de sensibilidades de los proyectos

	$dT_i(dG_v)/\Delta T$ (%)	$dT_i/(dI)/\Delta T$ (%)	$dT_i(dD)/\Delta T$ (%)	$dT_i/\Delta T$ promed. (%)
Les Franqueses	144	41	55	80
Massia Vallforners	34	14	19	23
Les Planes de Son	155	43	57	85
Protoceip	125	27	36	63

Para conducir un análisis dinámico se puede proceder como descrito en la metodología (2.2.2), integrando una ecuación de transferencia de calor con uno de los métodos matemáticos apropiados (Runge Kutta, Euler, etc.).

No se obtiene explícitamente un valor numérico de la sensibilidad pero se puede visualizar gráficamente la respuesta del edificio frente a variaciones.

En las figuras se enseñan los resultados para dos casos límite: un edificio con mucha inercia y poco aislamiento (bajas M y G) y uno con poca inercia y mucho aislamiento (altas M y G). Se evaluaron variaciones de dos días en el sistema de calefacción y de una semana en el factor solar y en el coeficiente de ventilación. Caso de invierno en clima mediterráneo, variación sinusoidal de la temperatura exterior con amplitud 5 °C. Temperatura exterior media 10 °C. Las variaciones consideradas son estimaciones de situaciones reales.

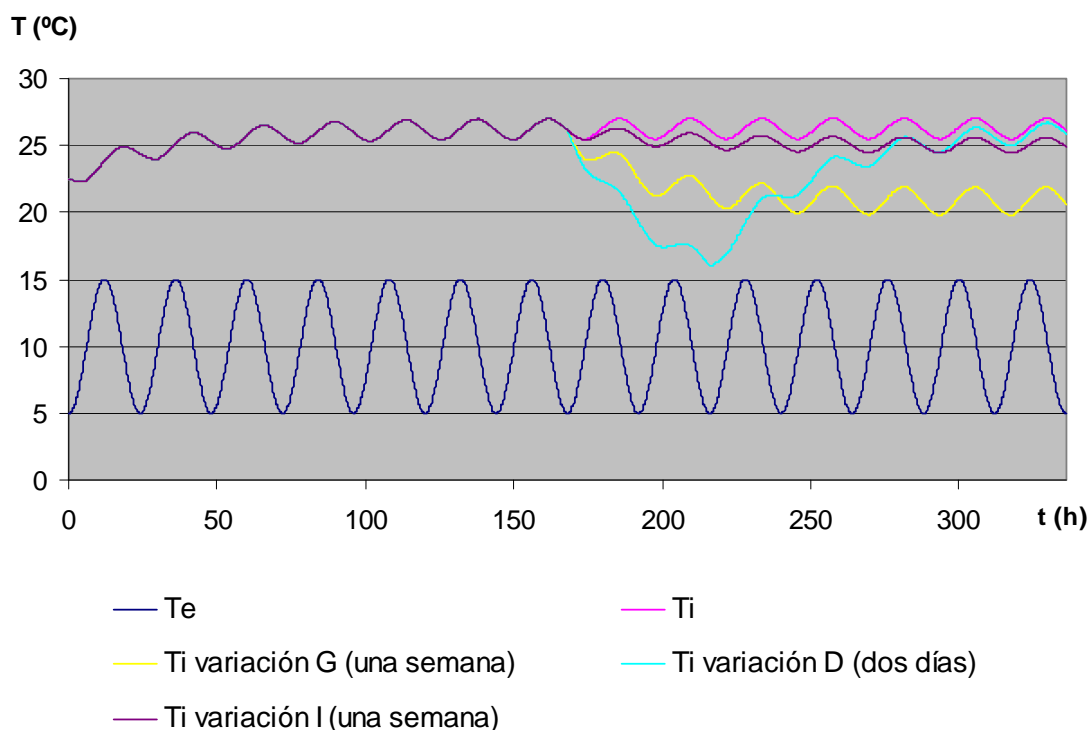


Figura 33: evolución horaria de T_i en función de G, I, D. Caso de alta inercia y poco aislamiento.

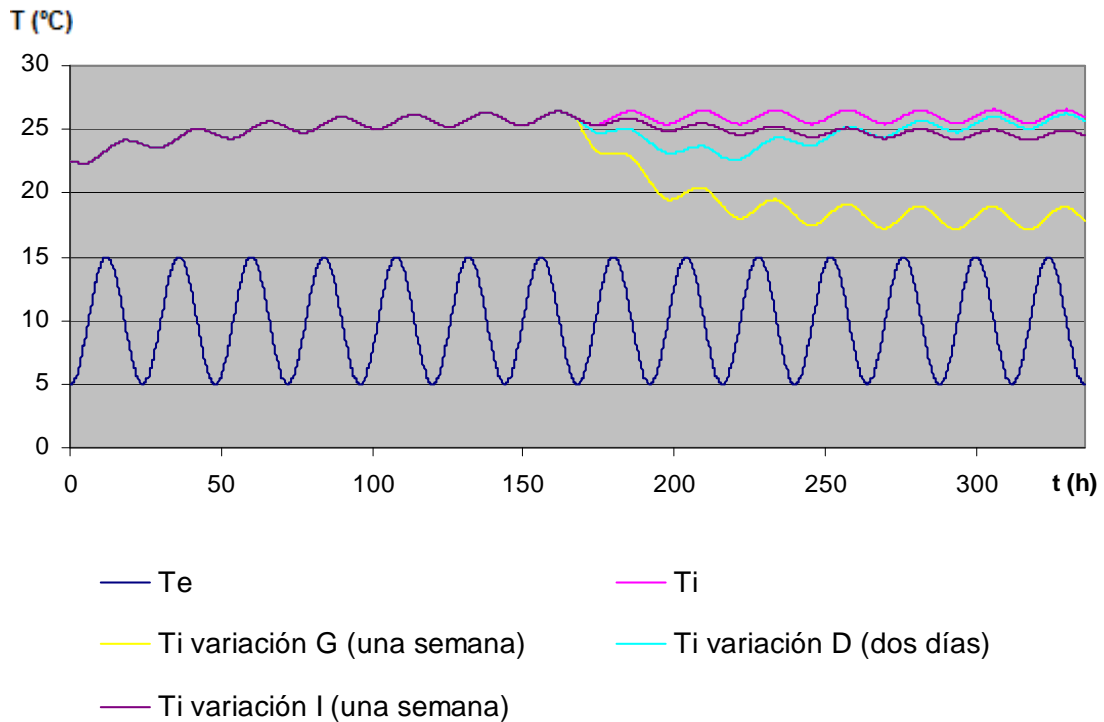


Figura 34: evolución horaria de T_i en función de G , I , D . Caso de baja inercia y elevado aislamiento.

Tabla: valores de los parámetros considerados en los casos analizados

	M (J/kg°C)	G (W/m ³ °C)	D (W/m ³)	I (W/m ³)	dG (W/m ³ °C)	dI (W/m ³)	dD (W/m ³)
Caso 1	20	0,6	7	1,5	0,3	1,5	7
Caso 2	10	0,2	2	1,5	0,2	1,5	2

El primer caso indica una dependencia muy grande del término interno D (que incluye los sistemas de calefacción), es decir un consumo relativamente elevado, pero una sensibilidad a cambios en ventilación o radiación poco significativos.

El segundo caso indica una dependencia no muy fuerte de D (es decir un consumo bajo) y una fuerte sensibilidad a los cambios en los parámetros de ventilación y radiación.

Se podrían identificar los dos casos teóricos analizados con respectivamente la Massia de Vallforners y el centro de naturaleza de Les Planes de Son. En el mismo edificio de Les Planes, se diferenciarán zonas con un comportamiento muy reconocible.

En las comparaciones veremos como estas gráficas se reproducen casi especulares en el análisis de los datos del caso monitorizado, donde se pueden identificar zonas de comportamiento extremo como esos casos límite.

1.2 Simulaciones

La principal dificultad en la realización y en el análisis de los resultados de las simulaciones es hacer comparables los simuladores. A veces el mismo cálculo de las demandas se realiza de manera diferente, como cuando se utiliza Calener VYP, que pone una temperatura interior constante de 22,5 °C durante todo el año y sin posibilidad de introducción de horarios. Al mismo tiempo, uno de los objetivos era determinar la sensibilidad del edificio, es decir que las variaciones de los parámetros establecidas debían ser representativas de algo que físicamente ocurre o bien que puede ocurrir en el funcionamiento concreto del sistema dinámico esquematizado. Hacer los resultados comparables podía además cambiar la filosofía de utilización de los softwares, por lo que a veces se optó por la comparación y otras veces se decidió dejar los resultados con sus diferencias para subrayar la enorme dependencia que tienen frente a la elección del simulador.

En específico, se trató de:

- utilizar el caso más sencillo, el edificio de viviendas “Les Franqueses” para pesar los simuladores y determinar una simetría entre las variaciones que se decidió evaluar
- efectuar las simulaciones coherentemente con la simetría establecida
- intentar evaluar el edificio más allá de su uso de proyecto, es decir utilizando horarios generales no muy detallados
- no modificar la filosofía de los simuladores en las evaluaciones más complejas aunque cuando la comparación de esa manera se dificulta notablemente

El caso del Archisun merece un discurso a parte. Por su estructura, el programa tiene dos maneras de inserción de datos: según una definición precisa de su forma (particularidad de la filosofía de análisis volumétrica del grupo que diseñó el software) o bien según sus detalles de piel. La definición según forma resulta muy importante en los casos de edificios peculiares, como son el centro de naturaleza de “Les Planes de Son” (semienterrado, largo y estrecho) y el prototipo de escuela “Protoceip” (con muchos patios interiores). En el análisis de estos proyectos se privilegió la evaluación según forma.

En el caso del bloque de viviendas “Les Franqueses” y en la massia de Vallforners, se optó por la definición precisa de la piel, ya que la forma parece no tener mucha importancia (el programa si se define la piel toma para ella una “forma media” representativa). Asimismo, en los casos de “Les Planes de Son” y “Protoceip” se evaluó la sensibilidad a la definición de la forma en lugar de la sensibilidad a los coeficientes de transmisión del calor. Eso hace los resultados menos comparables pero permite evaluar la sensibilidad de Archisun de manera más profunda. Además los edificios son grandes y complejos, por lo que los resultados de los otros simuladores tampoco resultan bien comparables.

Para todos los análisis de sensibilidad se consideró un caso de referencia, tomando para los parámetros valores correspondientes a una construcción representativa del entorno

construido español. Las variaciones fueron entonces hacia un caso mejor, hacia uno peor y hacia uno muy peor. Cuando no fue claro cual era la situación mejor (como en el caso de los parámetros compacidad, esbeltez, y otros de Archisun), se tomaron en cuenta variaciones de aumento y disminución del coeficiente medio considerado.

1.2.1 Les Franqueses del Valles

Este fue el caso en el que se intentó comparar los simuladores. Tratándose de un edificio de vivienda, los esquemas de ocupación y de utilización son generalmente más acertados que en otros casos.

Los parámetros que se variaron fueron la tipología del vidrio, el espesor del aislamiento, la tasa de renovación de aire, el factor solar por dispositivos de sombra, la permeabilidad al aire del vidrio. La definición de los parámetros se hizo sobre el simulador Lider-Calener, quizás el menos flexible en la definición del objeto a evaluar. En los demás simuladores se intentó reproducir los parámetros de Lider. Por ejemplo, en Ecotect no se puede definir la permeabilidad al aire y se utilizó el dato editable “sensibilidad al viento”.

En las tablas se resumen los parámetros y los valores utilizados. La decisión de los valores a utilizar se tomó por vía analítica, es decir se hizo coincidir el orden de magnitud de las variaciones finales de energía de los simuladores.

Cuando no fue posible, por ejemplo por no tener la posibilidad de establecer cualquier valor en un determinado simulador, se optó por analizar la variación al dato editable más próximo. Sin embargo, en el caso de la tipología de vidrio, resulta evidente que los datos de Trnsys no pueden ser comparados con los demás simuladores por su total distancia de las variaciones supuestas.

Tabla 15: Les Franqueses del Valles, parámetros analizados

Parámetros	1	2	3	4	5
Lider	Tipología vidrio – U (W/m ² °C)	Espesor aislamiento (mm)	Renovación horaria (1/h)	Factor solar en verano (0-1, 1 no sombra)	Permeabilidad al aire (m ³ /m ² a 100 Pa)
Ecotect	Tipología vidrio – U (W/m ² °C)	Espesor aislamiento (mm)	Renovación horaria (1/h)	Factor solar todo el año (0-1, 1 no sombra)	Sensibilidad al viento (1/h)
Trnsys	Tipología vidrio – U (W/m ² °C)	Espesor aislamiento (mm)	Renovación horaria (1/h)	Factor solar en verano (0-1, 0 no sombra)	Infiltración nocturna en los conductos de ventilación (1/h)
Archisun	K ventanas (W/m ² °C)	K paredes (W/m ² °C)	No editable	Factor solar verano (0-1, 0 no sombra)	Hermeticidad (S rendijas / S ventanas en tanto por mil)

En la figura 35 se pueden apreciar los resultados de los análisis de sensibilidad para la simulación Lider-Calener; la variable utilizada es el consumo de energía final

(kWh/m²año)

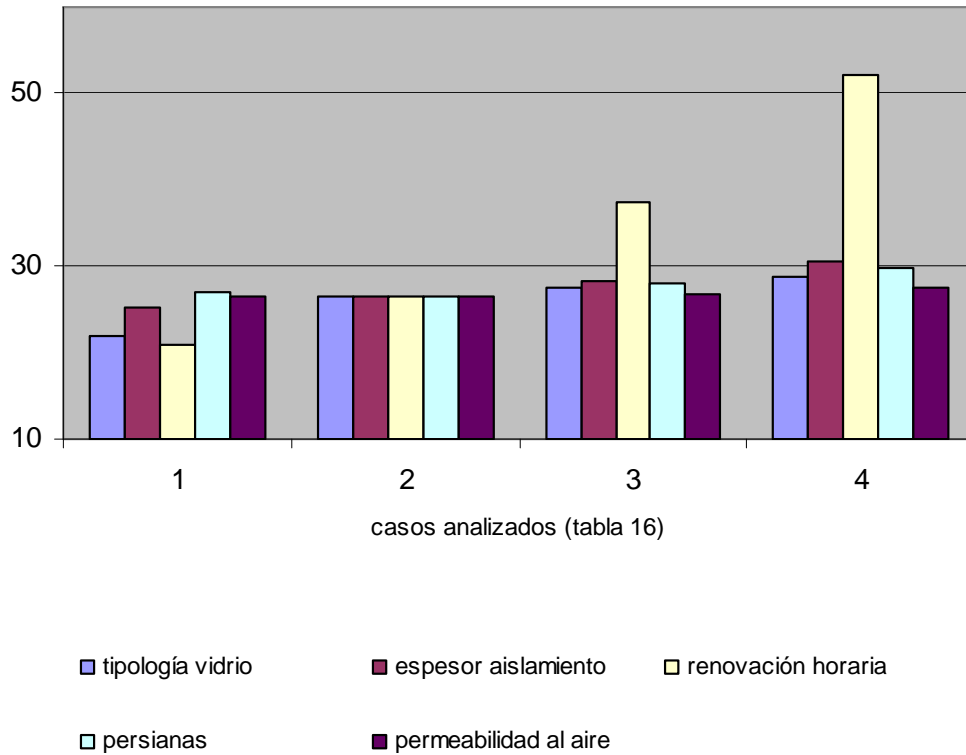


Figura 35: Les Franqueses del Valles, sensibilidad de la simulación Lider-Calener

Tabla 16: Les Franqueses del Valles, valores de los parámetros considerados para la simulación Líder

Casos analizados	1	2	3	4
Tipología vidrio (W/m ² °C)	1,6	2,8	3	3,3
Espesor aislamiento (mm)	70	60	50	40
Factor solar persianas (adimensional)	0,1	0,2	0,6	1
Renovación horaria (1/h)	0,2	0,4	0,8	1,2
Permeabilidad al aire (m ³ /m ² a 100 Pa)	0	9	27	54

En la figura 36 se pueden apreciar los resultados de los análisis de sensibilidad para la simulación Ecotect; la variable utilizada es el consumo de energía final

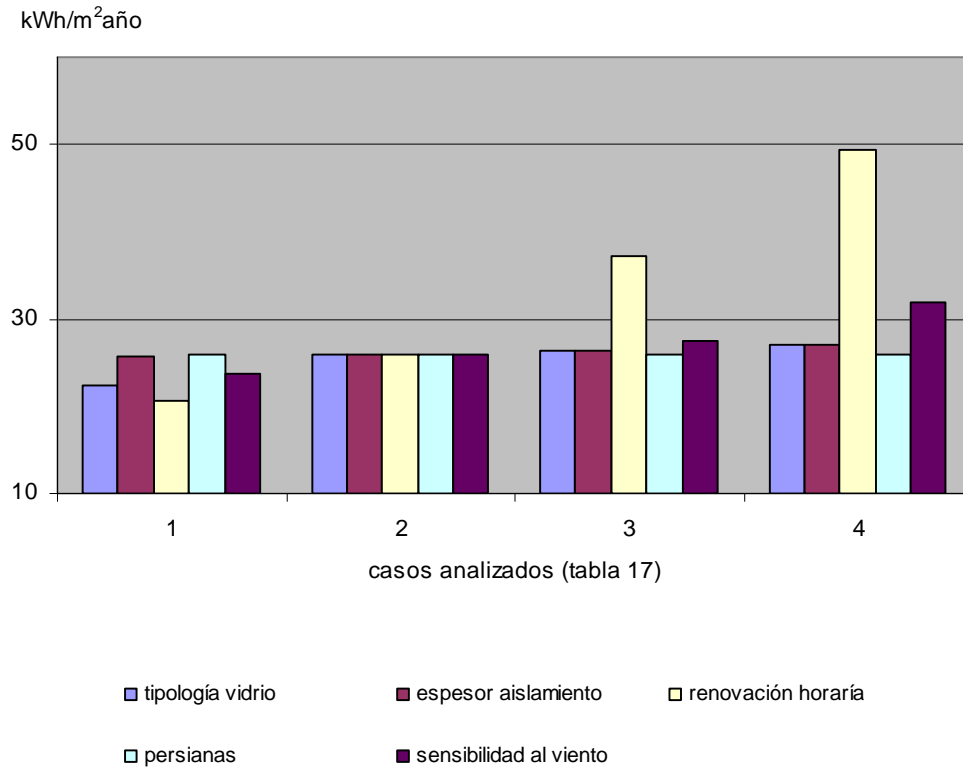


Figura 36: Les Franqueses del Valles, sensibilidad de la simulación Ecotect

Tabla 17: Les Franqueses del Valles, valores de los parámetros considerados para la simulación Ecotect

Casos analizados	1	2	3	4
Tipología vidrio ($W/m^2\text{°C}$)	1,6	2,8	3	3,3
Espesor aislamiento (mm)	70	60	50	40
Renovación horaria (1/h)	0,2	0,4	0,8	1,2
Factor solar persianas adimensional)	0,1	0,2	0,6	1
Sensibilidad al viento (1/h)	0	0,1	0,2	0,4

En la figura 37 se pueden apreciar los resultados de los análisis de sensibilidad para la simulación Trnsys; la variable utilizada es el consumo de energía final

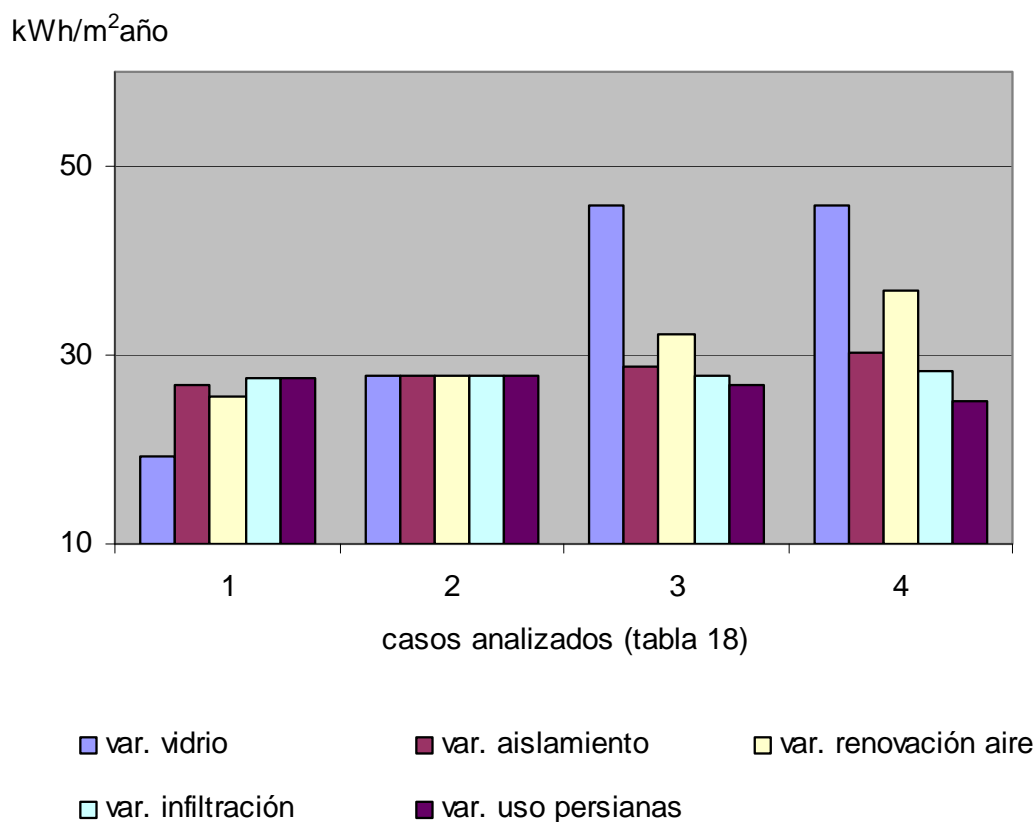


Figura 37: Les Franqueses del Valles, sensibilidad de la simulación Trnsys

Tabla 18: Les Franqueses del Valles, valores de los parámetros considerados para la simulación Trnsys

Casos analizados	1	2	3	4
Tipología vidrio (W/m ² °C)	1,4	2,8	5,8	5,8
Espesor aislamiento (mm)	70	60	50	40
Renovación horaria (1/h)	0,2	0,4	0,8	1,2
Factor solar persianas (adimensional)	0,9	0,8	0,4	0
Infiltración (1/h)	0	0,004	0,01	0,02

En la figura 38 se pueden apreciar los resultados de los análisis de sensibilidad para la simulación Archisun; la variable utilizada es el consumo de energía final

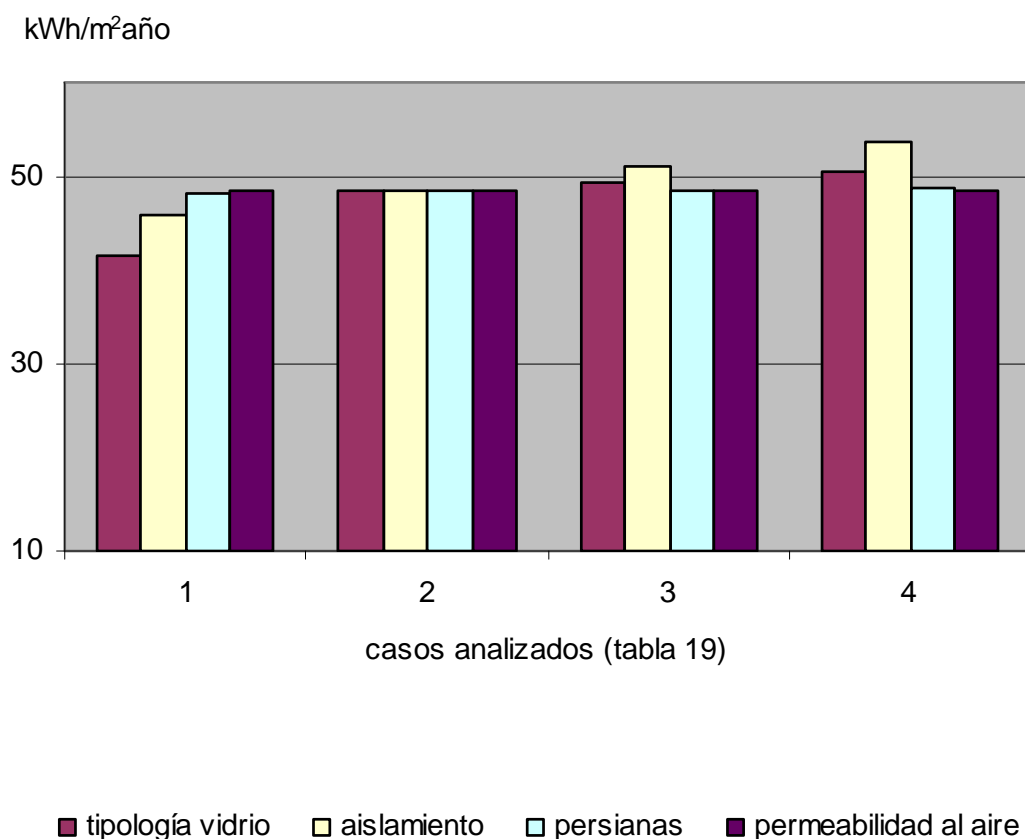


Figura 38: Les Franqueses del Valles, sensibilidad de la simulación Archisun

Tabla 19: Les Franqueses del Valles, valores de los parámetros considerados para la simulación Archisun

Casos analizados	1	2	3	4
Tipología vidrio (W/m ² °C)	1,6	2,8	3	3,3
Conductividad paredes (W/m ² °C)	0,35	0,45	0,55	0,65
Factor solar persianas (adimensional)	0,9	0,8	0,4	0
Permeabilidad (S rendijas / S ventanas en tanto por mil)	2	8	27	40

No debe sorprender el resultado del análisis Trnsys con respecto a la tipología de vidrio. Este simulador permite elegir la tipología de vidrio entre las de una librería interna y no permite cambiar el valor de la transmitancia. Por esto, siendo los valores muy distantes entre sí, la sensibilidad resulta muy alta. Se están comparando vidrios sencillos, dobles o bien dobles bajo emisivos con gases en el interior.

Todos los simuladores se demuestran especialmente sensibles al coeficiente de renovación horaria, ya que puede variar en un espectro de valores bastante amplio. Esto además corresponde a la realidad, porqué los fenómenos de ventilación son muchas veces gobernados por los usuarios y entonces se escapan a una estimación precisa.

La evaluación Archisun resulta diferente de las otras por calcular diferentemente la carga de refrigeración, mucho más elevada.

La sensibilidad del programa resulta ser menor de los otros a la mayoría de los parámetros. La ventilación no es editable, cosa que complica mucho el estudio. Los perfiles de usuario que se pueden modificar se refieren al uso de las protecciones de las ventanas por la noche y al uso de los electrodomésticos y de la cocina.

Tabla 20: Les Franqueses del Valles, resumen de consumos de energía final

	Calefacción	Refrigeración	Cocina	Iluminación	ACS	Otros
Lider	17,8	1,9	/	/	6,8	/
Ecotect	17,6	9,3	/	/	/	/
Trnsys	25	2,7	/	/	/	/
Archisun	19,2	29,1	28,5	18,4	31,3	5,7

1.2.2 Masía de Vallformers

Los parámetros utilizados para la evaluación son los mismos que los de la anterior, aunque la destinación de uso sea algo diferente. Se supone que esta casa rural será utilizada como alojamiento de visitantes el parque del Montseny, lo que la clasifica en principio como hotel. Sin embargo, el tamaño reducido obliga a una utilización no masiva (10-12 personas), por lo que los parámetros más importantes parecen ser los mismos que el caso del bloque de viviendas. Solamente el parámetro relativo al aislamiento ha sido modificado, ya que interesó solo la cubierta en el proyecto de rehabilitación.

Tabla 21: Masía de Vallformers, parámetros analizados

Parámetros	1	2	3	4	5
Lider	Tipología vidrio – U (W/m ² °C)	Espesor aislamiento cubierta (mm)	Renovación horaria (1/h)	Factor solar en verano (0-1, 1 no sombra)	Permeabilidad al aire (m ³ /m ² a 100 Pa)
Ecotect	Tipología vidrio – U (W/m ² °C)	Espesor aislamiento cubierta (mm)	Renovación horaria (1/h)	Factor solar todo el año (0-1, 1 no sombra)	Sensibilidad al viento (1/h)
Trnsys	Tipología vidrio – U (W/m ² °C)	Espesor aislamiento cubierta (mm)	Renovación horaria (1/h)	Factor solar en verano (0-1, 0 no sombra)	Infiltración nocturna en los conductos de ventilación (1/h)
Archisun	K ventanas (W/m ² °C)	K paredes (W/m ² °C)	No editable	Factor solar verano (0-1, 0 no sombra)	Hermeticidad (S rendijas / S ventanas en tanto por mil)

El consumo de este edificio, comparado con el del edificio anterior, es muy superior. Esto es debido al emplazamiento climático (montaña) y a la tipología constructiva (es un edificio antiguo de piedra). Sin embargo la inercia térmica es muy elevada, por lo que en todas las simulaciones aparece una sensibilidad muy baja.

Tabla 22: Masía de Vallformers, resumen de consumo de energía final

	Calefacción	Refrigeración	Cocina	Iluminación	ACS	Otros
Lider	86,5	0	/	/	10	/
Ecotect	74,2	5,4	/	/	/	/
Trnsys	97,5	0	/	/	/	/
Archisun	107,3	0,3	0,9	6,1	5,5	1,3

En la figura 39 se pueden apreciar los resultados de los análisis de sensibilidad para la simulación Lider-Calener; la variable utilizada es el consumo de energía final

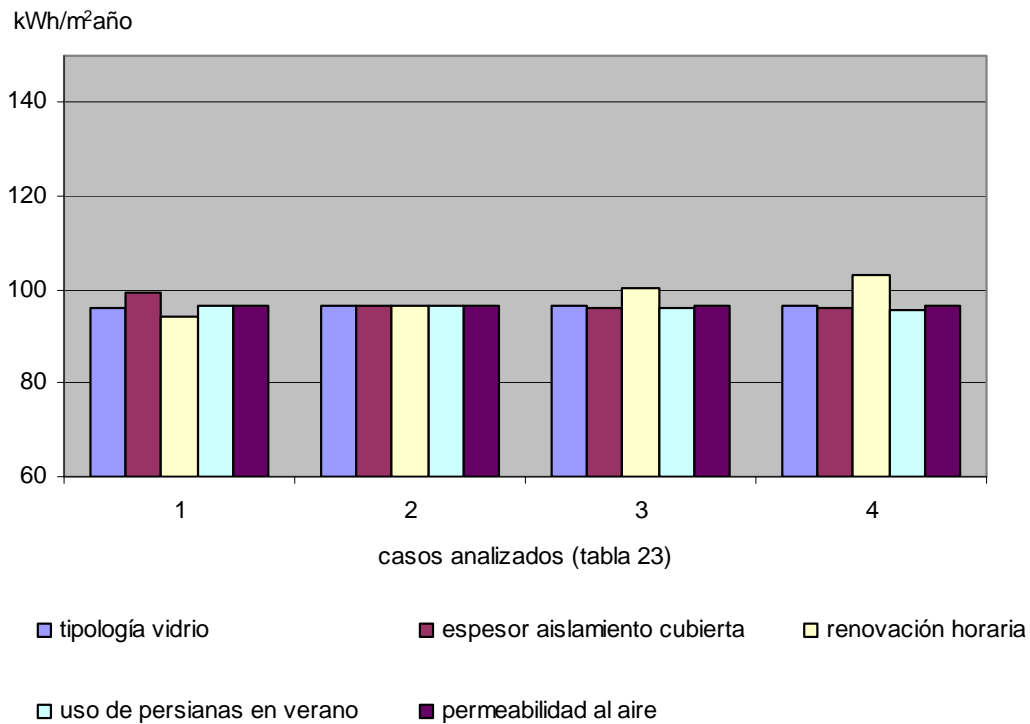


Figura 39: Masía de Vallforners, sensibilidad de la simulación Lider-Calener

Tabla 23: Masía de Vallforners, valores de los parámetros considerados para la simulación Lider-Calener

Casos analizados	1	2	3	4
Tipología vidrio (W/m ² °C)	1,6	2,8	3	3,3
Espesor aislamiento cubierta (mm)	0	40	80	100
Renovación horaria (1/h)	0,2	0,4	0,8	1,2
Factor solar persianas (adimensional)	0,1	0,2	0,6	1
Permeabilidad (m ³ /m ² a 100 Pa)	0	9	27	54

En la figura 40 se pueden apreciar los resultados de los análisis de sensibilidad para la simulación Ecotect; la variable utilizada es el consumo de energía final

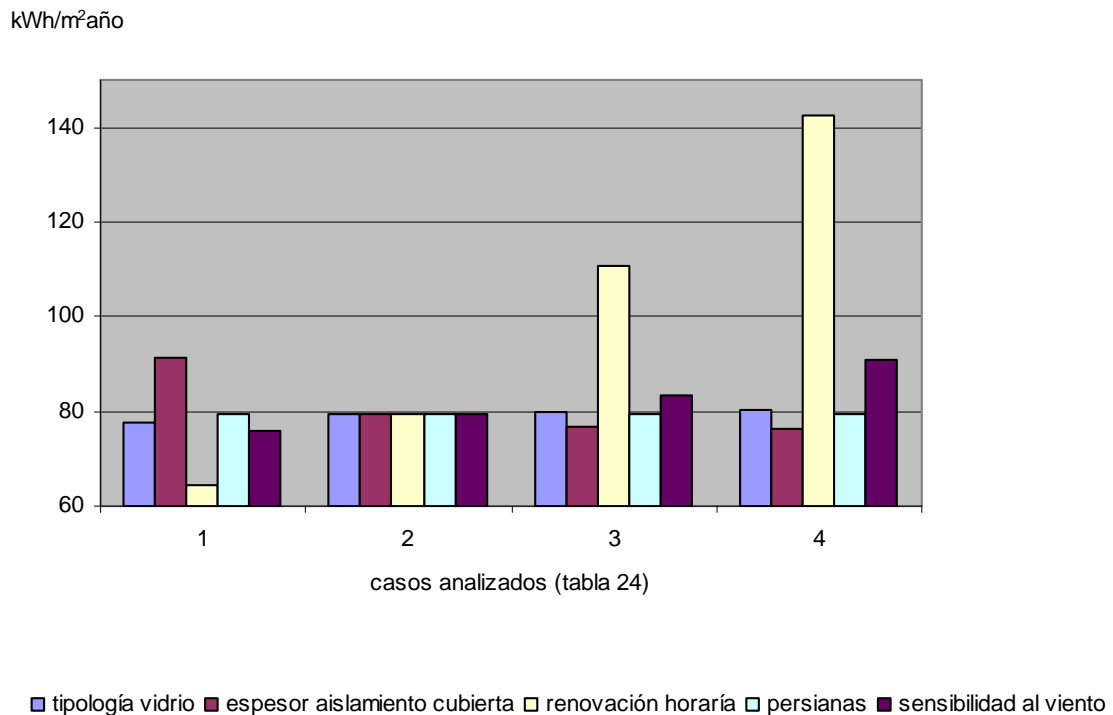


Figura 40: Masía de Vallforners, sensibilidad de la simulación Ecotect

Tabla 24: Masía de Vallforners, valores de los parámetros considerados para la simulación Ecotect

Casos analizados	1	2	3	4
Tipología vidrio ($W/m^2\text{°C}$)	1,6	2,8	3	3,3
Espesor aislamiento cubierta (mm)	0	40	80	100
Renovación horaria (1/h)	0,2	0,4	0,8	1,2
Factor solar persianas (adimensional)	0,1	0,2	0,6	1
Sensibilidad al viento (1/h)	0	0,1	0,2	0,4

En la figura 41 se pueden apreciar los resultados de los análisis de sensibilidad para la simulación Trnsys; la variable utilizada es el consumo de energía final

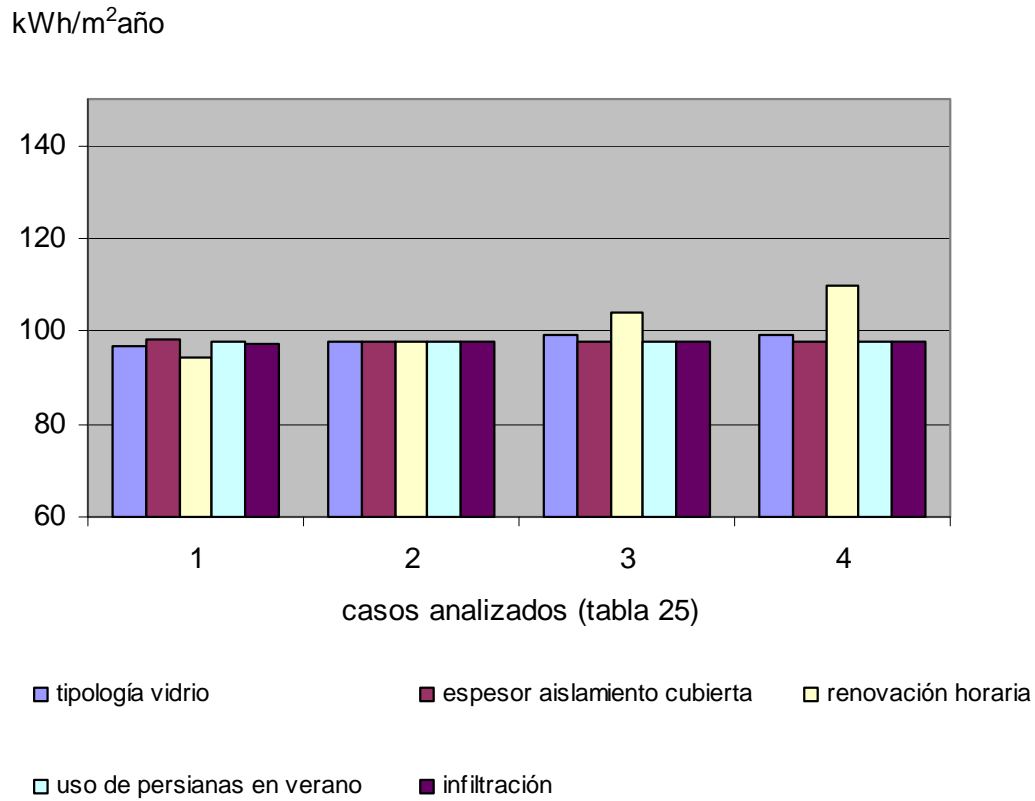


Figura 41: Masía de Vallforners, sensibilidad de la simulación Trnsys

Tabla 25: Masía de Vallforners, valores de los parámetros considerados para la simulación Trnsys

Casos analizados	1	2	3	4
Tipología vidrio (W/m ² °C)	1,4	2,8	5,8	5,8
Espesor aislamiento cubierta (mm)	0	40	80	100
Renovación horaria (1/h)	0,2	0,4	0,8	1,2
Factor solar persianas (adimensional)	0,9	0,8	0,4	0
Infiltración (1/h)	0	0,004	0,01	0,02

En la figura 42 se pueden apreciar los resultados de los análisis de sensibilidad para la simulación Archisun; la variable utilizada es el consumo de energía final

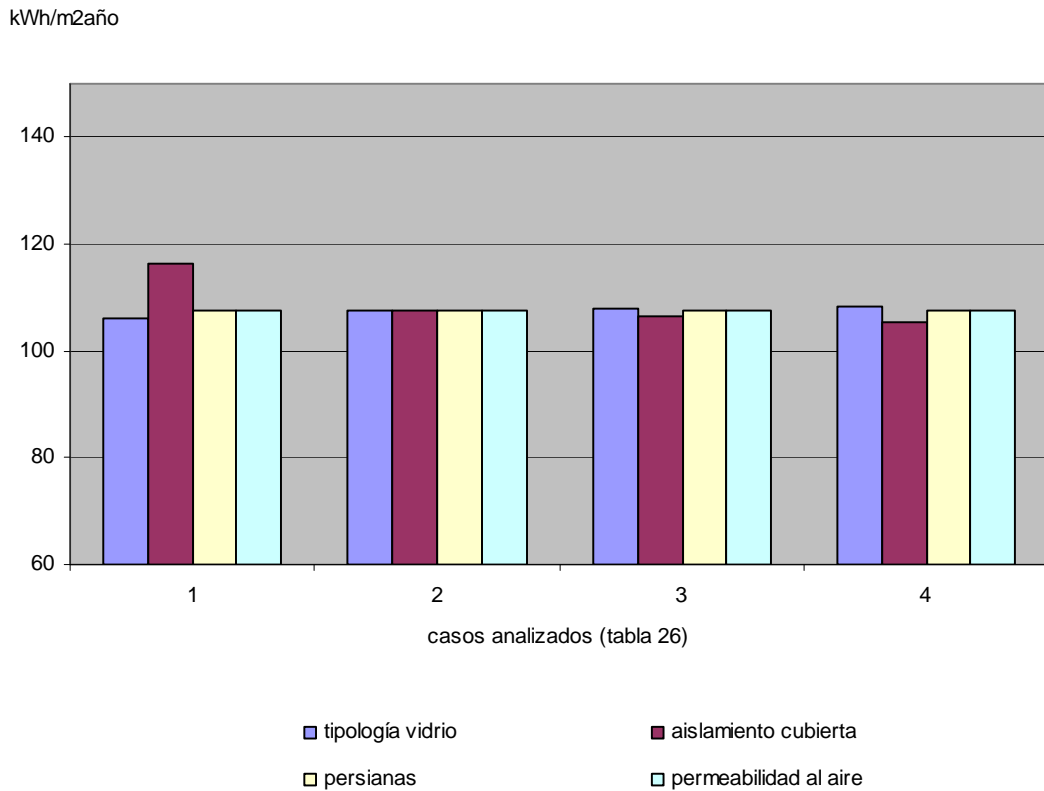


Figura 42: Masía de Vallforners, sensibilidad de la simulación Archisun

Tabla 26: Masía de Vallforners, valores de los parámetros considerados para la simulación Archisun

Casos analizados	1	2	3	4
Tipología vidrio ($W/m^2\text{°C}$)	1,6	2,8	3	3,3
Conductividad paredes ($W/m^2\text{°C}$)	1,5	0,65	0,37	0,3
Factor solar persianas (adimensional)	0,9	0,8	0,4	0
Permeabilidad (S rendijas / S ventanas en tanto por mil)	2	8	27	40

1.2.3 Les Planes de Son

Los resultados de esta simulación resultan ser muy diferentes entre un simulador y otro. Como ya explicado, no se modificaron los parámetros de la simulación, para evaluar las sensibilidades y evidenciar las diferencias entre los simuladores. Destaca el gasto de refrigeración, ausente en la evaluación Lider y muy relevante en las otras evaluaciones. En la evaluación Lider se incluye el consumo de iluminación. En la evaluación Archisun se decidió variar los parámetros que más reflejan la filosofía del software, por lo que su análisis de sensibilidad resulta poco comparable con la de los demás simuladores.

Tabla 27: Les Planes de Son, parámetros analizados

Parámetros	1	2	3	4	5
Lider	Tipología vidrio – U (W/m ² C)	Espesor aislamiento cubierta (mm)	Renovación horaria (1/h)	Factor solar en verano (0-1, 1 no sombra)	Permeabilidad al aire (m ³ /m ² a 100 Pa)
Ecotect	Tipología vidrio – U (W/m ² C)	Espesor aislamiento cubierta (mm)	Renovación horaria (1/h)	Factor solar todo el año (0-1, 1 no sombra)	Sensibilidad al viento (1/h)
Trnsys	Tipología vidrio – U (W/m ² C)	Espesor aislamiento cubierta (mm)	Renovación horaria (1/h)	Factor solar en verano (0-1, 0 no sombra)	Infiltración nocturna en los conductos de ventilación (1/h)
Archisun	Compacidad (adimensional)	Alargamiento (adimensional)	Esbeltez (adimensional)	Peso (kg/m ²)	Conductividad nocturna (W/m ² C)

Tabla 28: Les Planes de Son, resumen de consumo de energía final

	Calefacción	Refrigeración	Cocina	Iluminación	ACS	Otros
Lider	47,3	0	/	43,3	8	/
Ecotect	36,4	15,4	/	/	/	/
Trnsys	62,5	18,4	/	/	/	/
Archisun	65,8	1,2	19	5,4	0	2,1

En la figura 43 se pueden apreciar los resultados de los análisis de sensibilidad para la simulación Lider-Calener; la variable utilizada es el consumo de energía final

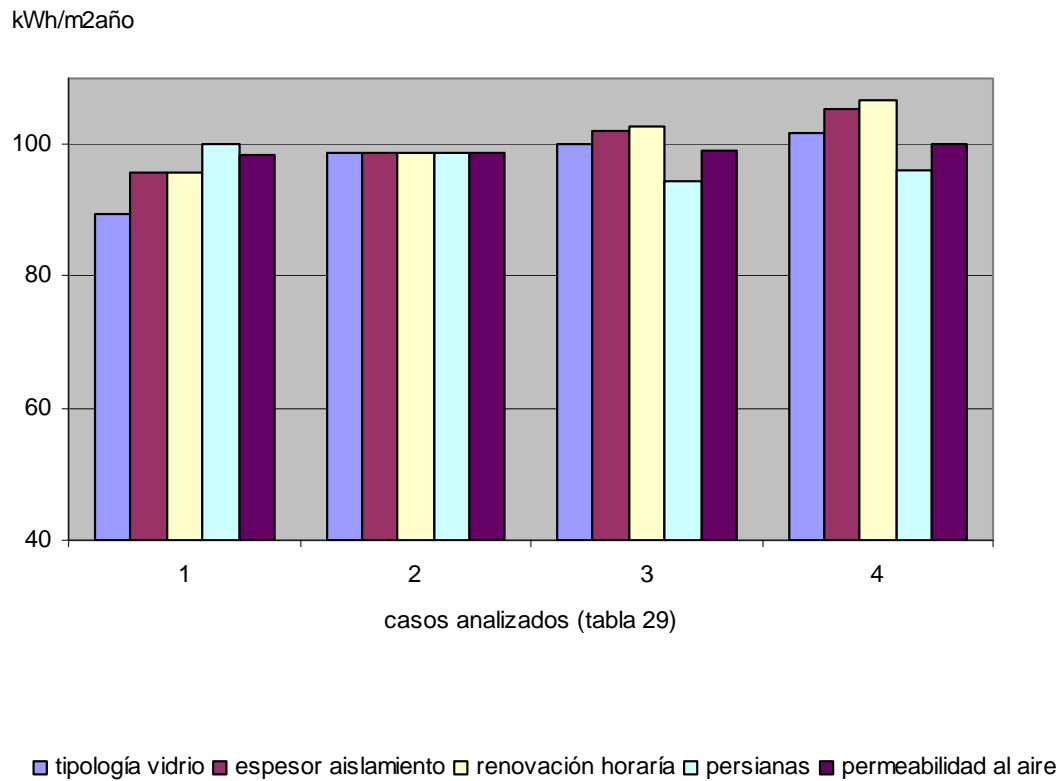


Figura 43: Les Planes de Son, sensibilidad de la simulación Lider-Calener

Tabla 29: Les Planes de Son, valores de los parámetros considerados para la simulación Lider-Calener

Casos analizados	1	2	3	4
Tipología vidrio ($W/m^2\text{°C}$)	1,6	2,8	3	3,3
Espesor aislamiento (mm)	70	60	50	40
Renovación horaria (1/h)	0,2	0,4	0,8	1,2
Factor solar persianas (adimensional)	0,1	0,2	0,6	1
Permeabilidad (m^3/m^2 a 100 Pa)	0	9	27	54

En la figura 44 se pueden apreciar los resultados de los análisis de sensibilidad para la simulación Ecotect; la variable utilizada es el consumo de energía final

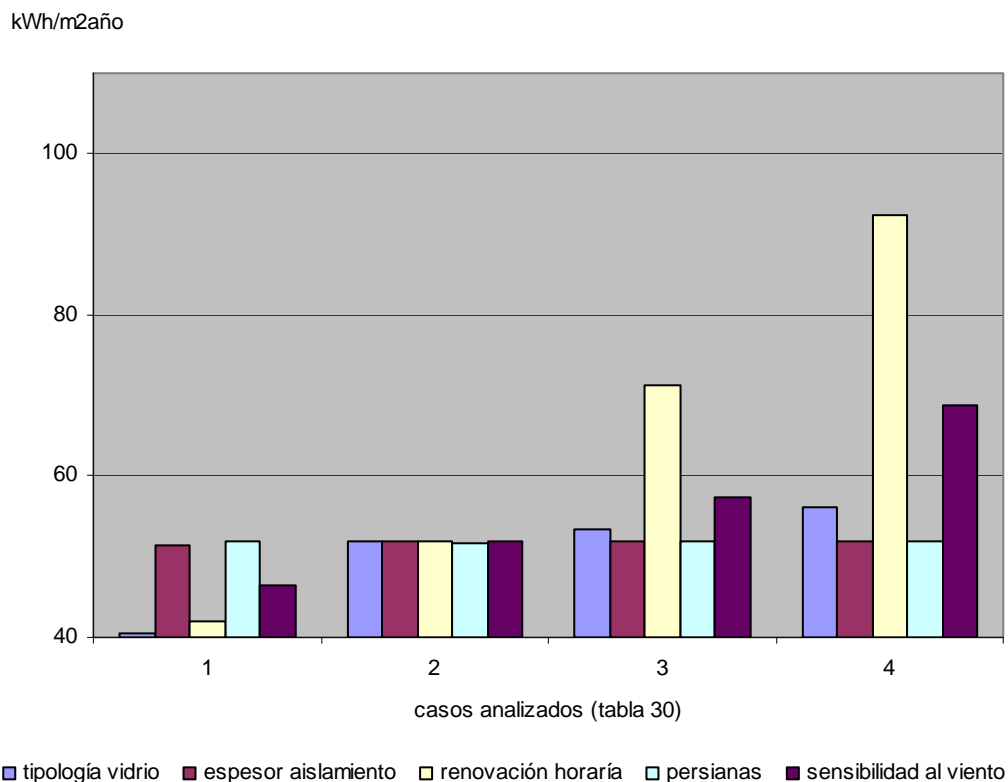


Figura 44: Les Planes de Son, sensibilidad de la simulación Ecotect

Tabla 30: Les Planes de Son, valores de los parámetros considerados para la simulación Ecotect

Casos analizados	1	2	3	4
Tipología vidrio ($W/m^2\text{°C}$)	1,6	2,8	3	3,3
Espesor aislamiento (mm)	70	60	50	40
Renovación horaria (1/h)	0,2	0,4	0,8	1,2
Factor solar persianas (adimensional)	0,1	0,2	0,6	1
Sensibilidad al viento	0	0,1	0,2	0,4

En la figura 45 se pueden apreciar los resultados de los análisis de sensibilidad para la simulación Trnsys; la variable utilizada es el consumo de energía final

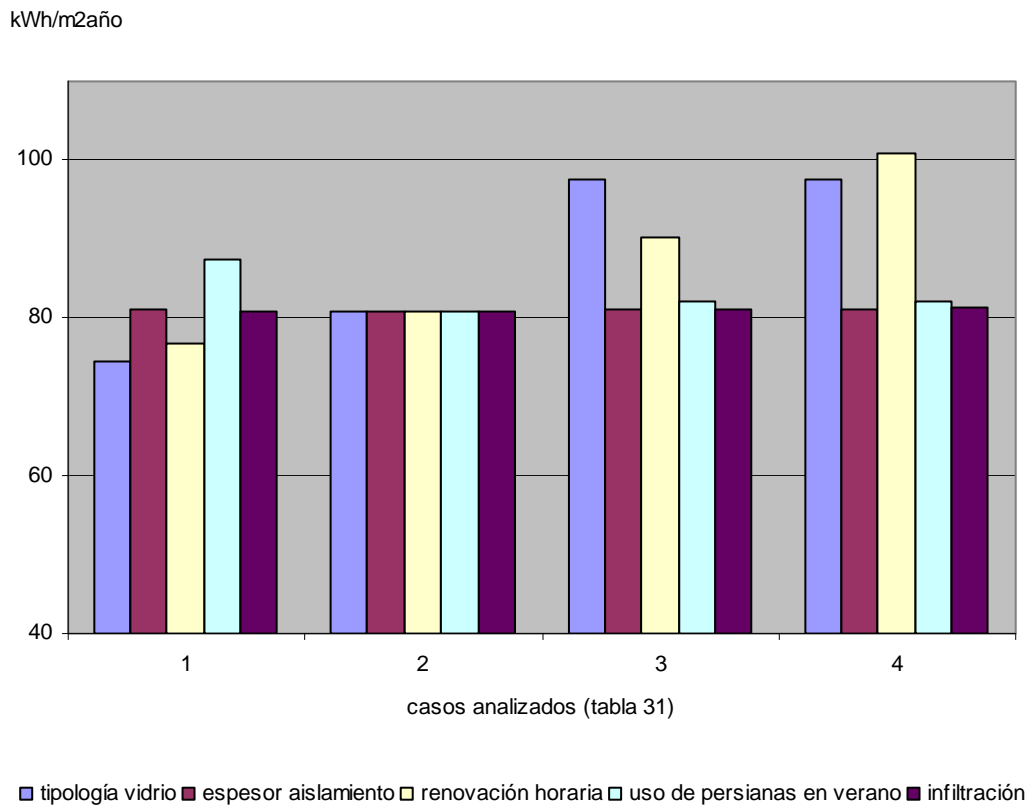


Figura 45: Les Planes de Son, sensibilidad de la simulación Trnsys

Tabla 31: Les Planes de Son, valores de los parámetros considerados para la simulación Trnsys

Casos analizados	1	2	3	4
Tipología vidrio ($W/m^2\text{°C}$)	1,4	2,8	5,8	5,8
Espesor aislamiento (mm)	70	60	50	40
Renovación horaria (1/h)	0,2	0,4	0,8	1,2
Factor solar persianas (adimensional)	0,9	0,8	0,4	0
Infiltración (1/h)	0	0,004	0,01	0,02

En la figura 46 se pueden apreciar los resultados de los análisis de sensibilidad para la simulación Archisun; la variable utilizada es el consumo de energía final

kWh/m2año

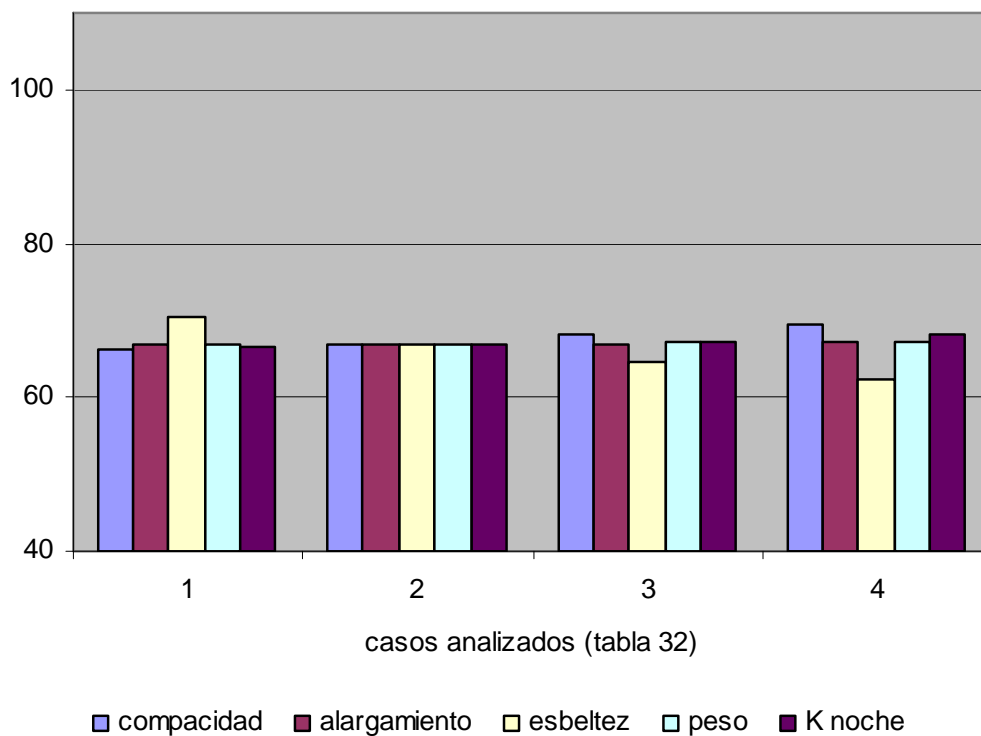


Figura 46: Les Planes de Son, sensibilidad de la simulación Archisun

Tabla 32: Les Planes de Son, valores de los parámetros considerados para la simulación Archisun

Casos analizados	1	2	3	4
Compacidad (adimensional)	0,73	0,69	0,62	0,55
Alargamiento (adimensional)	0,18	0,22	0,3	0,36
Esbeltez (adimensional)	0,2	0,25	0,3	0,35
Peso piel (kg/m ²)	1700	2000	2300	2600
Cond. nocturna (W/m ² °C)	0,15	0,2	0,3	0,4

1.2.4 Protoceip

El análisis del prototipo de escuela CEIP ha sido aún más difícil, puesto que se optó por el análisis Calener GT, que permite evaluar las instalaciones. Esto debería hacer comparable el resultado final con Archisun, mientras con Ecotect y Trnsys se obtuvo solamente un análisis de la demanda. La sensibilidad fue entonces evaluada con parámetros muy diferentes respecto a las anteriores Lider-Calener. En el caso de Archisun, se evaluó el proyecto según su forma, debido a la presencia de muchos patios interiores y pensando siempre en la filosofía del simulador.

Tabla 33: Protoceip, parámetros analizados

Parámetros	1	2	3	4	5
Calener GT	Tipología vidrio – U (W/m ² °C)	Potencia ventiladores (kW)	Renovación de aire (m ³ /h)	Recuperación de energía (%)	Infiltración (1/h)
Ecotect	Tipología vidrio – U (W/m ² °C)	Espesor aislamiento cubierta (mm)	Renovación horaria (1/h)	Factor solar todo el año (0-1, 1 no sombra)	Sensibilidad al viento (1/h)
Trnsys	Tipología vidrio – U (W/m ² °C)	Espesor aislamiento cubierta (mm)	Renovación horaria (1/h)	Factor solar en verano (0-1, 0 no sombra)	Infiltración nocturna en los conductos (1/h)
Archisun	Compacidad (adimensional)	Alargamiento (adimensional)	Esbeltez (adimensional)	Peso (kg/m ²)	Conductividad nocturna (W/m ² °C)

Tabla 34: Protoceip, resumen de consumo de energía final

	Calefacción	Refrigeración	Cocina	Iluminación	ACS	Otros
Lider	53,2	0	/	/	6,7	29,3
Ecotect	24,2	13	/	/	/	/
Trnsys	33,3	5,3	/	/	/	/
Archisun	0	25,2	0	30	0	36,6

En la figura 47 se pueden apreciar los resultados de los análisis de sensibilidad para la simulación Lider-Calener GT; la variable utilizada es el consumo de energía final

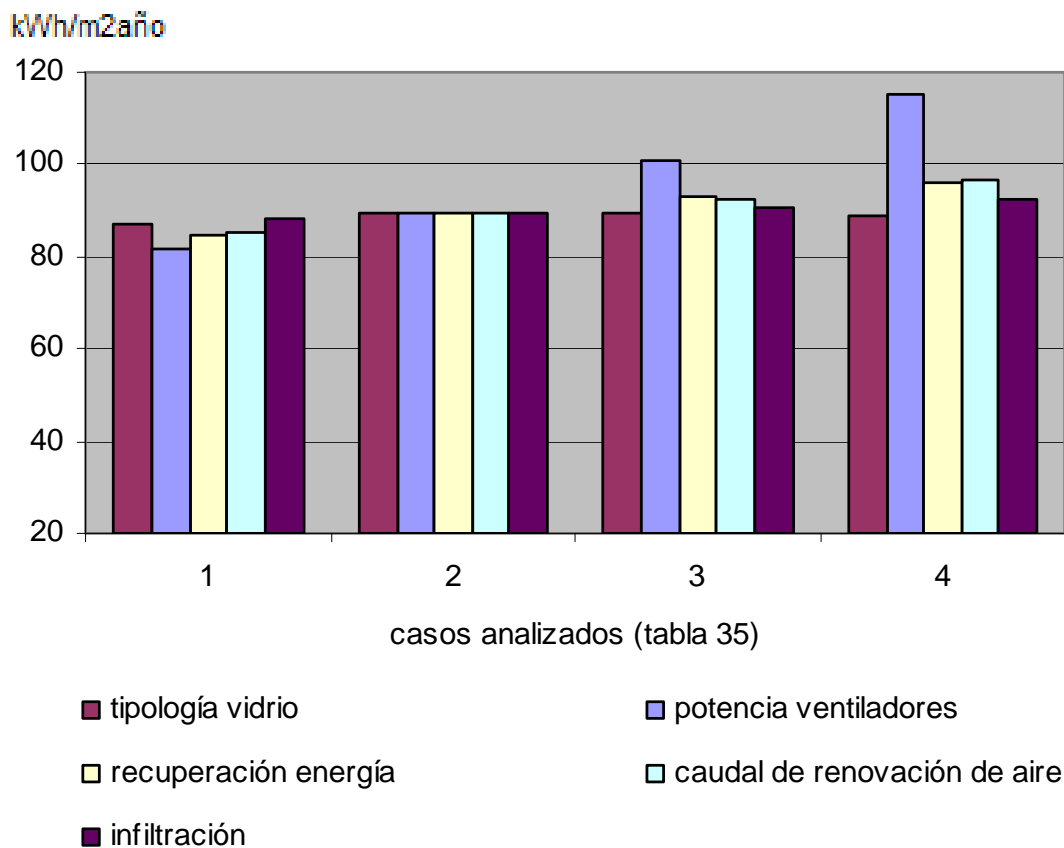


Figura 47: Protoceip, sensibilidad de la simulación Lider-Calener GT

Tabla 35: Protoceip, valores de los parámetros considerados para la simulación Lider-Calener GT

Casos analizados	1	2	3	4
Tipología de vidrio ($W/m^2\text{°C}$)	1,6	2,8	3,0	3,3
Potencia ventiladores (kW)	3,5	5,5	8,5	12,5
Recuperación de energía (%)	50	70	85	95
Renovación de aire (m^3/h)	20000	27000	35000	42000
Infiltración (1/h)	0,2	0,5	0,8	1,2

En la figura 48 se pueden apreciar los resultados de los análisis de sensibilidad para la simulación Ecotect; la variable utilizada es el consumo de energía final

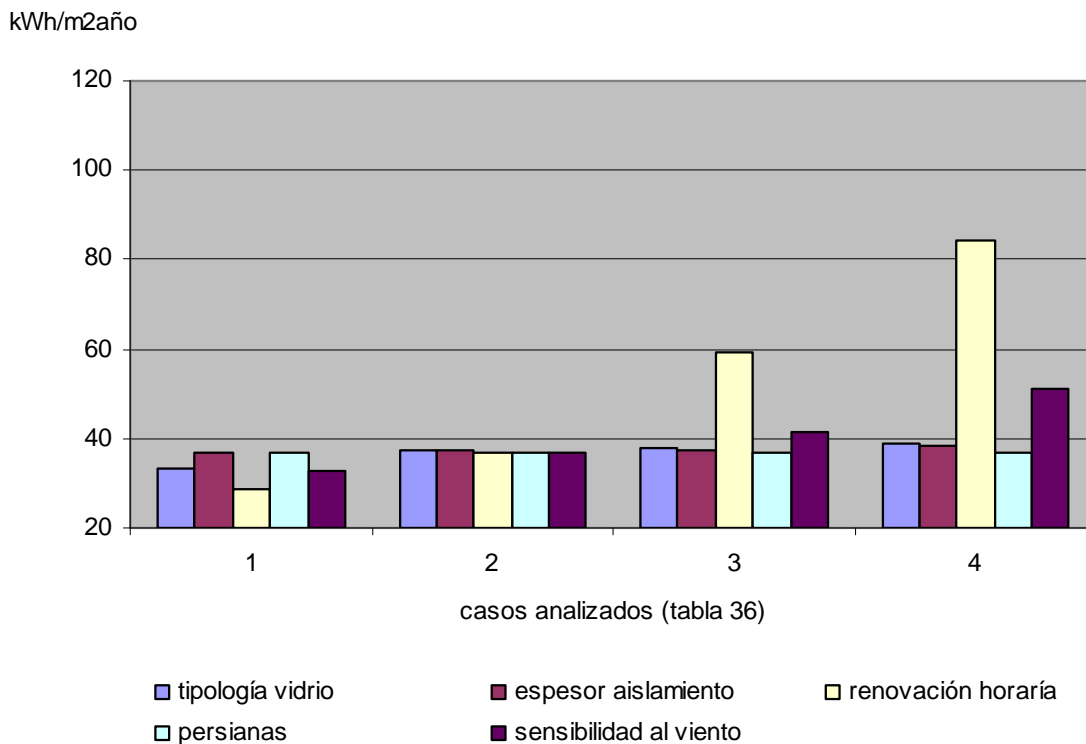


Figura 48: Protoceip, sensibilidad de la simulación Ecotect

Tabla 36: Protoceip, valores de los parámetros considerados para la simulación Ecotect

Casos analizados	1	2	3	4
Tipología vidrio (W/m ² °C)	1,6	2,8	3	3,3
Espesor aislamiento (mm)	70	60	50	40
Renovación horaria (1/h)	0,2	0,4	0,8	1,2
Factor solar persianas (adimensional)	0,1	0,2	0,6	1
Sensibilidad al viento	0	0,1	0,2	0,4

En la figura 49 se pueden apreciar los resultados de los análisis de sensibilidad para la simulación Trnsys; la variable utilizada es el consumo de energía final

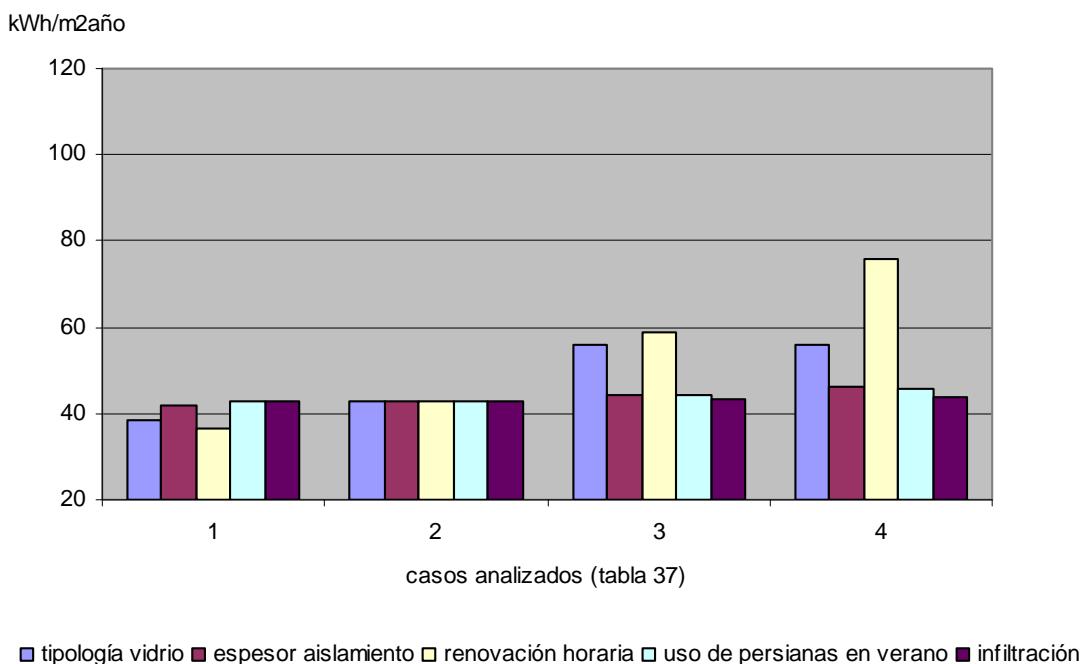


Figura 49: Protoceip, sensibilidad de la simulación Trnsys

Tabla 37: Protoceip, valores de los parámetros considerados para la simulación Trnsys

Casos analizados	1	2	3	4
Tipología vidrio (W/m ² °C)	1,4	2,8	5,8	5,8
Espesor aislamiento (mm)	70	60	50	40
Renovación horaria (1/h)	0,2	0,4	0,8	1,2
Factor solar persianas (adimensional)	0,9	0,8	0,4	0
Infiltración (1/h)	0	0,004	0,01	0,02

En la figura 50 se pueden apreciar los resultados de los análisis de sensibilidad para la simulación Archisun; la variable utilizada es el consumo de energía final

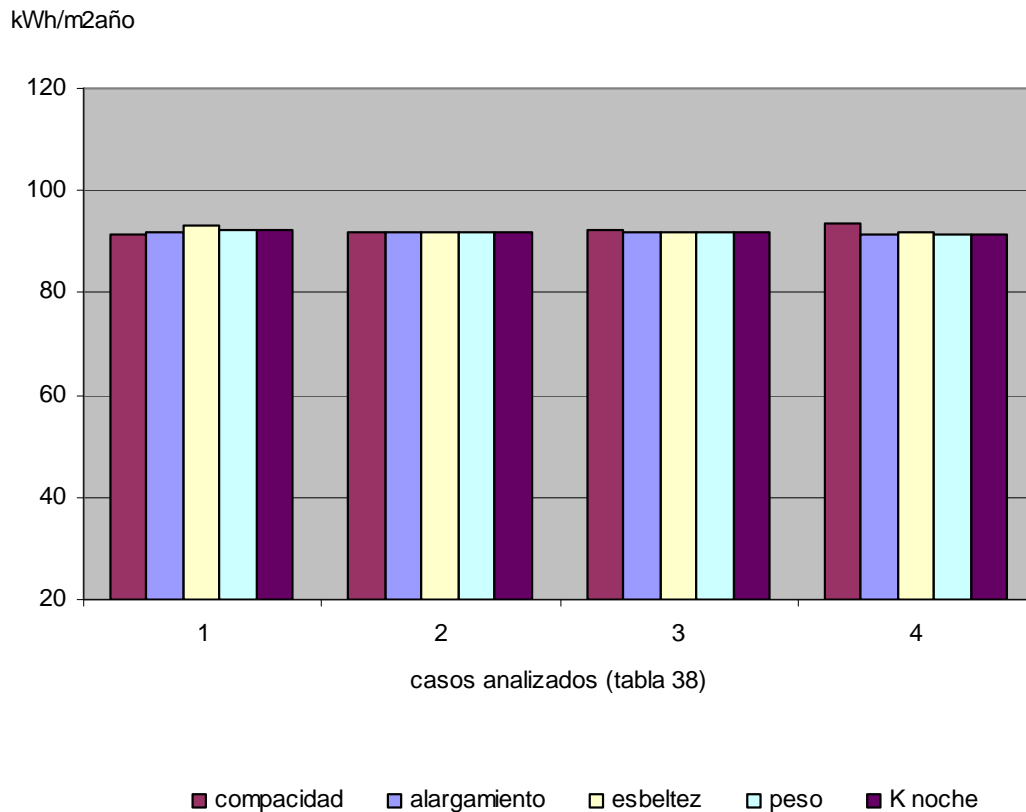


Figura 50: Protoceip, sensibilidad de la simulación Archisun

Tabla 38: Protoceip, valores de los parámetros considerados para la simulación Archisun

Casos analizados	1	2	3	4
Compacidad (adimensional)	0,6	0,7	0,8	0,9
Alargamiento (adimensional)	0,25	0,3	0,4	0,5
Esbeltez (adimensional)	0,3	0,35	0,4	0,45
Peso piel (kg/m2)	300	400	600	1000
K noche (W/m ² °C)	0,4	0,5	0,6	0,8

1.3 Caso monitorizado

El edificio de Les Planes de Son fue monitorizado durante 2006 y 2007 para comprobar su funcionamiento. Se pusieron sondas de temperatura en diferentes zonas del edificio, en las salidas y en los retornos de las instalaciones de calefacción, de las instalaciones de captación solar y de la caldera de biomasa.

El análisis que ese condujo se centró en:

Graficar las temperaturas horarias durante un año entero, interpretar las enormes diferencias que se generan entre diferentes zonas, averiguar a través de mediciones in situ las interpretaciones.

Las mediciones fueron mediciones de temperaturas superficiales de la cara sur del edificio, que resulta tener un comportamiento oscilatorio debido a su bajísima inercia térmica. El nivel de radiación solar genera una captación directa exagerada, que no tiene la debida redistribución de la energía correspondiente.

En las tablas siguientes (fuente: informe entregado a la propiedad y realizado por Massimo Palme y Jaume Serrasolses en 2007) se recogen los datos de temperatura en las diferentes zonas del edificio. La disposición de los muros y la orientación determinan el comportamiento de cada zona, el consumo asociado y la sensación de confort o desconfort que se genera.

Las temperaturas de las tablas siguientes muestran que las zonas norte son mucho más estables de las zonas sur, debido a la aportación solar durante algunas horas del día y a la falta de masa térmica localizada en proximidad de la captación.

Tabla 39: Planes de Son, resumen de temperaturas medias

mesos	planta baixa est	planta 1 est	planta baixa oest	planta 1 oest	laboratori	sala d'actes	cuina	casa guarda
juliol	27,2	26	23,4	24,8	22,5	23,2	25,4	25,1
agost	24,7	24,7	23,2	24,1	23,3	23,4	24,5	24,6
setembre	26,7	24,6	23,4	23,3	23	22,9	23,9	24,1
octubre	25,1	23,1	23,6	22,5	21,7	21,8	23	23,4
novembre	25,4	23,1	23,5	23	21,3	22,3	22	21,3
desembre	25	22,9	24	22,8	21,9	22,8	21,5	23,7
gener	23,7	20,9	22,7	21,1	19,8	21,2	18,1	23,2
febrer	24,8	22,5	23,7	22,8	21,8	22,8	20,5	23,9
març	25,7	22,7	23,7	22,8	22,3	22,9	22,5	24
abril	25,1	22,7	22,7	22,5	21,6	22	22,4	23,6
maig	24,9	22,6	22,4	22	20,9	21,1	23	23,3
juny	26,2	24,1	23,9	23,1	22,4	22,5	24	23,6

Tabla 40: Planes de Son, resumen de temperaturas máximas

mesos	planta baixa est	planta 1 est	planta baixa oest	planta 1 oest	laboratori	sala d'actes	cuina	casa guarda
juliol	29,2	27	25,9	25,8	23,1	23,6	26,5	26,3
agost	27,1	25,8	26,3	25,3	23,6	23,9	25,7	25,8
setembre	28,6	25,7	26,5	24,4	23,4	23,3	25,1	25,4
octubre	27,3	24,3	26,6	23,7	22,1	22,1	24,6	24,9
novembre	28	24,3	27,7	24,2	21,9	22,9	23,6	23,2
desembre	27,6	24	27,5	23,8	22,4	23,3	22,6	25,4
gener	27,1	21,9	26,3	22	20	21,6	18,9	25,3
febrer	27,2	23,7	26,7	23,9	22,2	23,4	19,9	25,6
març	27,5	23,9	26,7	23,8	22,6	23,5	23,8	25,6
abril	26,8	23,5	25	23,4	21,9	22,6	24	25,1
maig	26,6	23,6	24,2	22,9	21,3	21,5	24,6	24,4
juny	27,4	25,1	26,3	24,2	22,8	23	25,4	25,5

Tabla 41: Planes de Son, resumen de temperaturas mínimas

mesos	planta baixa est	planta 1 est	planta baixa oest	planta 1 oest	laboratori	sala d'actes	cuina	casa guarda
juliol	24,9	25,1	21,4	24	22	22,9	23,8	23,5
agost	21,5	23,2	20,7	22,7	22,9	23,1	23,1	22,3
setembre	24	23,3	21,1	22	22,5	22,6	22,5	21,8
octubre	22,2	21,9	21	21,4	21,1	21,4	21,3	20,7
novembre	21,7	21,4	20,4	21,1	20,2	21,2	19,9	18,6
desembre	22,4	21,9	21,6	21,8	21,5	22,2	20,5	22,1
gener	21,1	20	20,4	20,3	19,4	20,6	19,3	21,1
febrer	22,1	20,9	21,8	21,5	21,6	21,9	16,8	22
març	23,1	21,4	21,5	21,4	22	22,2	21,6	22,1
abril	22,4	21,6	20,4	21,6	21,3	21,5	21,1	21,1
maig	22,5	21,4	20,6	20,8	20,5	20,7	21,5	21,1
juny	24,1	23,1	22	22,2	21,9	22,1	22,4	22

Tabla 42: Planes de Son, resumen de temperaturas máximas absolutas

mesos	planta baixa est	planta 1 est	planta baixa oest	planta 1 oest	laboratori	sala d'actes	cuina	casa guarda
juliol	30,3	28,2	28	27	24,7	24,6	27,7	27,7
agost	29,8	27,2	28,5	27,4	24,3	24,4	27,8	27,7
setembre	31,8	27,8	30,8	27	24,8	24,3	27,1	27,9
octubre	30,4	26	30,6	25,4	23	23,1	26,1	26,5
novembre	31,1	25,6	30,7	25,1	23,7	24	26,6	27,1
desembre	30,5	25,2	30,7	24,7	24,2	23,9	25,4	27,1
gener	31,2	25	31,4	24,9	23,1	24,2	23,3	27
febrer	30,6	24,9	30,6	25	23,3	24,3	24,3	27,4
març	30	25,5	29,4	24,8	23,6	24,3	24,6	27,6
abril	27,8	24,4	27,5	24,8	23,3	23,8	25,2	26,9
maig	27,8	25,4	26,2	23,9	21,8	22,5	26,3	25,9
juny	29,4	26,4	27,3	25,7	23,8	24,2	26,5	26,8

Tabla 43: Planes de Son, resumen de temperaturas mínimas absolutas

mesos	planta baixa est	planta 1 est	planta baixa oest	planta 1 oest	laboratori	sala d'actes	cuina	casa guarda
juliol	20,6	23,9	19,5	23,1	20,7	22,1	21,8	21,9
agost	19,7	20,1	19	19,5	22,2	22,1	20,7	19,7
setembre	19,5	19,7	17,9	18,5	21,2	21,5	20,2	19,8
octubre	19,9	19,3	19,5	19,3	19,9	20,8	18,9	18,7
novembre	19,2	20,2	17,3	18,2	17,5	20,4	17,3	17,1
desembre	20,2	21,1	20,7	19,6	20,9	22	19,3	20,6
gener	16,4	16,8	14,8	17	17,4	18,2	12,4	18,2
febrer	18,3	16	20,7	17,8	19,9	22	14,6	20,5
març	19,2	18	17,4	19	21,6	21,8	20,8	19,9
abril	17,6	19	15,2	19,7	20,1	20,6	19,3	19,4
maig	18,3	17,7	18,7	18,7	19,9	20,2	20	19,3
juny	21,2	18,8	20,1	19,3	19,8	20,5	21,6	20,2

Tabla 44: Planes de Son, resumen de temperaturas anuales

Temperatures anuals	planta baixa est	planta 1 est	planta baixa oest	planta 1 oest	laboratori	sala d'actes	cuina	casa guarda
Mitjanes	25,38	23,33	23,35	22,90	21,88	22,41	22,57	23,65
mitjanes de les màximes	27,53	24,40	26,31	23,95	22,28	22,89	23,73	25,21
mitjanes de les mínimes	22,67	22,10	21,08	21,73	21,41	21,87	21,15	21,53
mitj. màximes absol.	30,06	25,97	29,31	25,48	23,63	23,97	25,91	27,13
mitj. mínimes absol.	19,18	19,22	18,40	19,14	20,09	21,02	18,91	19,61
absoluta de les màximes	31,80	28,20	31,40	27,40	24,80	24,60	27,80	27,90
absoluta de les mínimes	16,40	16,00	15,20	17,00	17,40	18,20	12,40	17,10

Cocina

La cocina es uno de los espacios más estable, como se ve en la grafica.

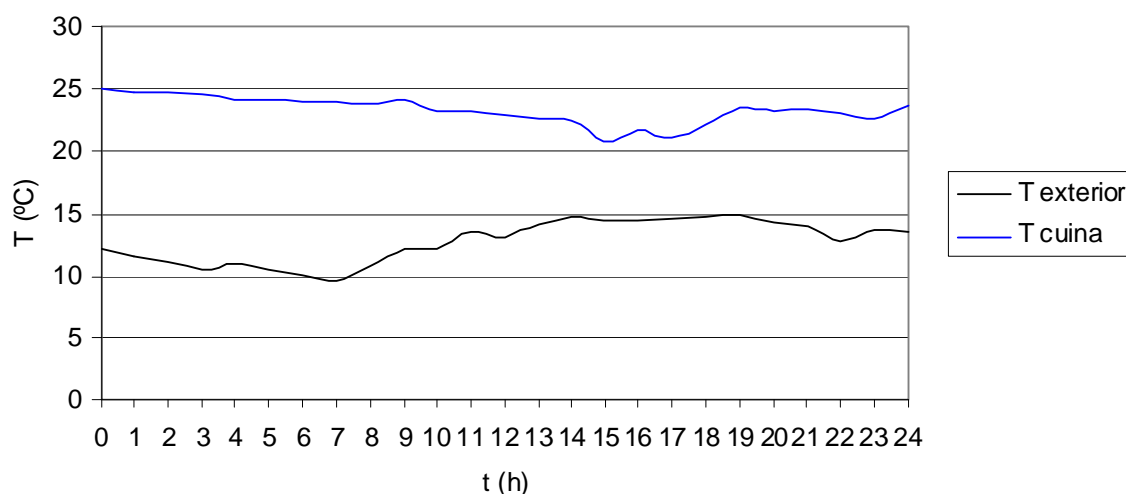


Figura 51: Planes de Son, evolución de la temperatura interior en la cocina el día 18 agosto de 2006.

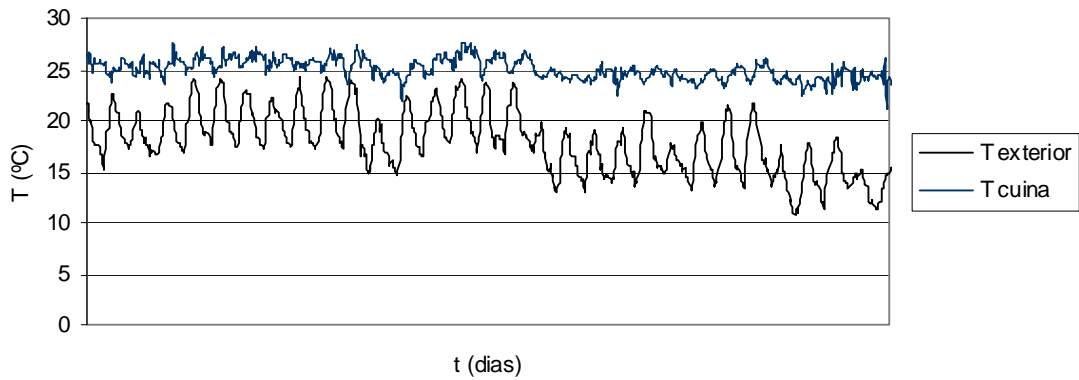


Figura 52: Planes de Son, evolución de la temperatura interior en la cocina en el periodo 17/7-17/8/2006.

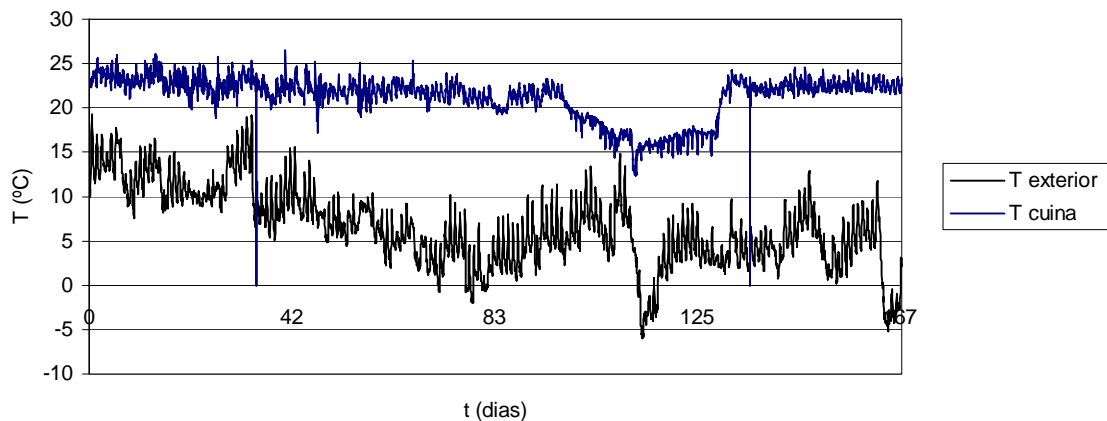


Figura 53: Planes de Son, evolución de la temperatura en la cocina en el periodo 27/9/2006 – 23/3/2007

La temperatura durante los meses invernales es muy estable por el uso del espacio y por la presencia del muro enterrado norte de gran inercia térmica.

Laboratorio

La zona se encuentra en la parte norte oeste del edificio, y es la zona más fría por la poca actividad que tiene lugar allí. Durante el verano la temperatura se mantiene agradable, y en general durante todo el año la zona es muy estable térmicamente.

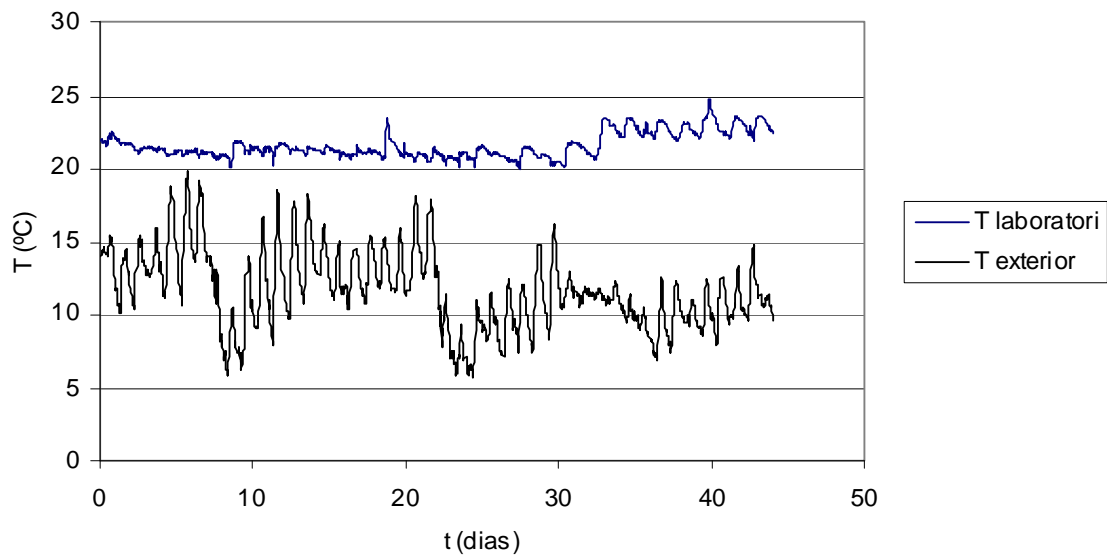


Figura 54: Planes de Son, evolución de la temperatura al laboratorio en el periodo 10/9-23/10/2005.

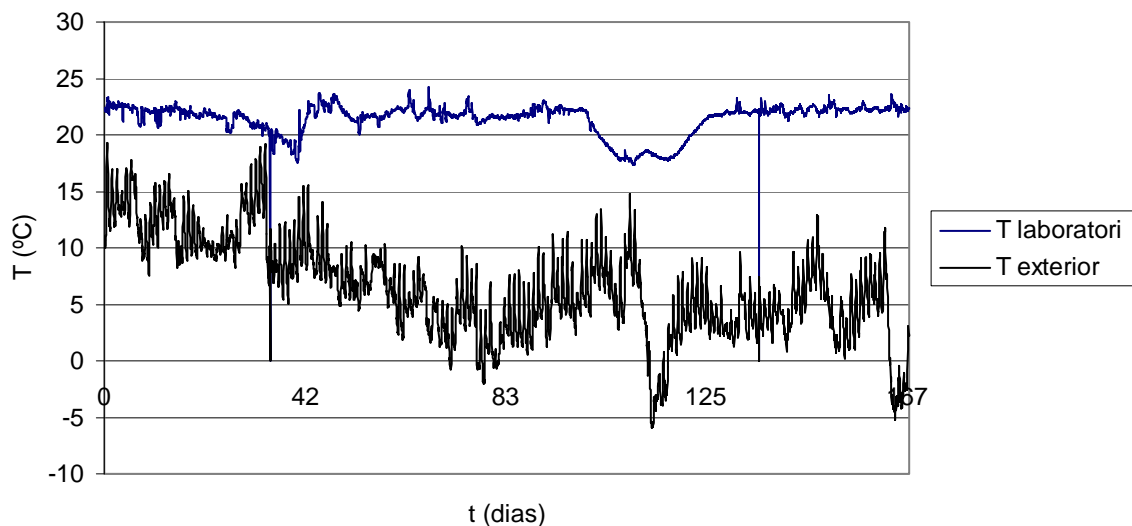


Figura 55: Planes de Son, evolución de la temperatura al laboratorio (periodo 27/9/2006-23/3/2007)

Sala de actos

También esta zona se sitúa en la parte norte oeste y tiene un perfil muy similar al del laboratorio.

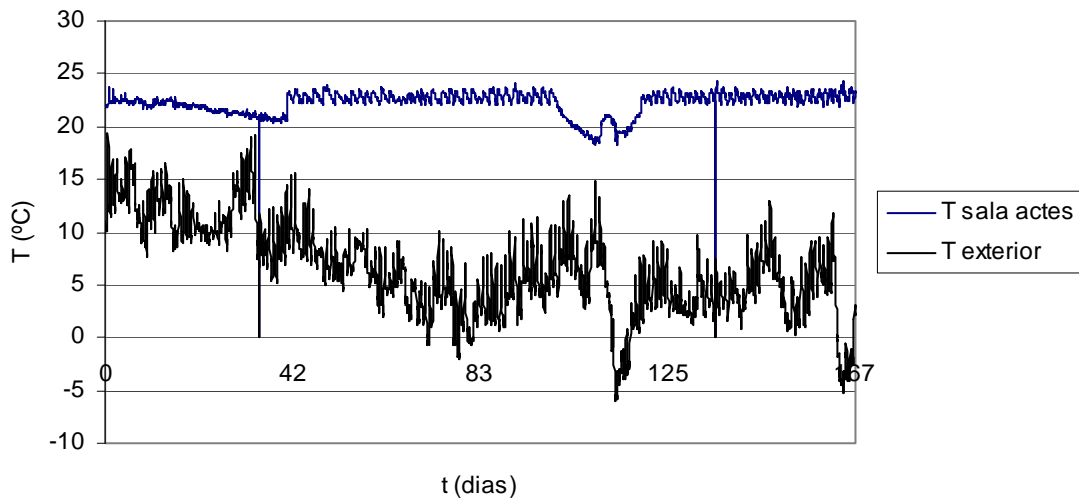


Figura 56: Planes de Son, evolución de la temperatura en la sala de actos, periodo 10/9-23/10/2005.

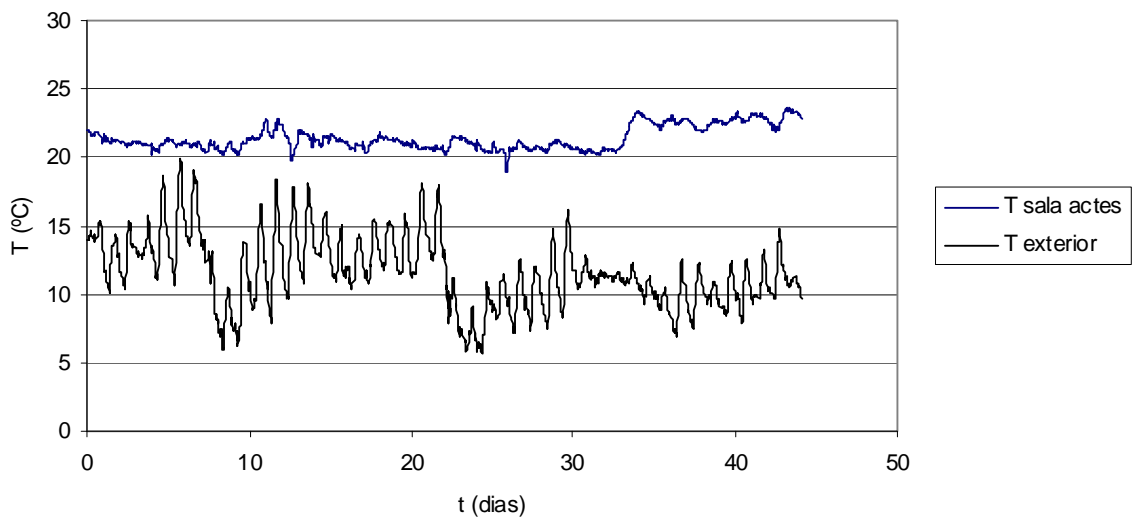


Figura 57: Planes de Son, evolución de la temperatura a la sala de actos, 27/9/2006-23/3/2007

Primera planta este

La zona presenta un perfil de temperatura mucho menos estable que los de las zonas norte del edificio. La oscilación diaria es acentuada, mientras que la variación anual no se nota mucho.

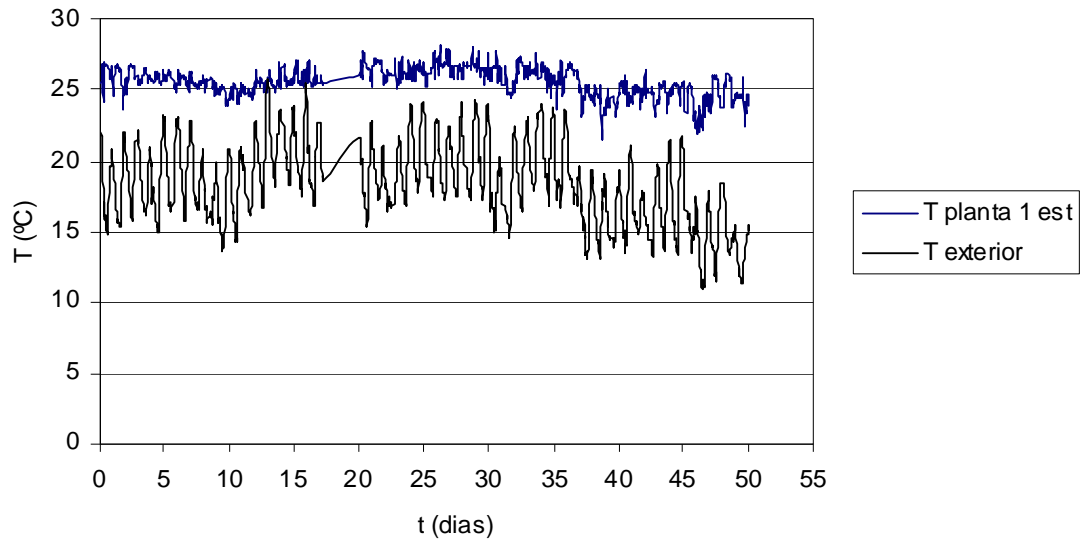


Figura 58: Planes de Son, evolución de la temperatura a la planta 1 este en el periodo 26/6-17/8/2006.

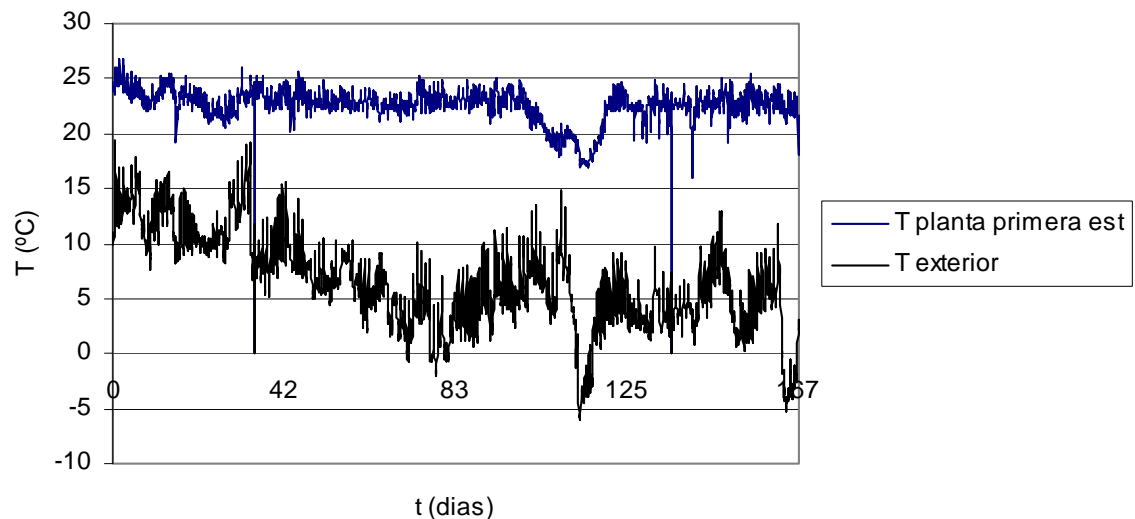


Figura 59: Planes de Son, evolución de la temperatura a la planta primera este (27/9/2006-23/3/2007)

Planta primera oeste

Tiene un perfil muy parecido al anterior. La baja utilización diurna explica parte de este.

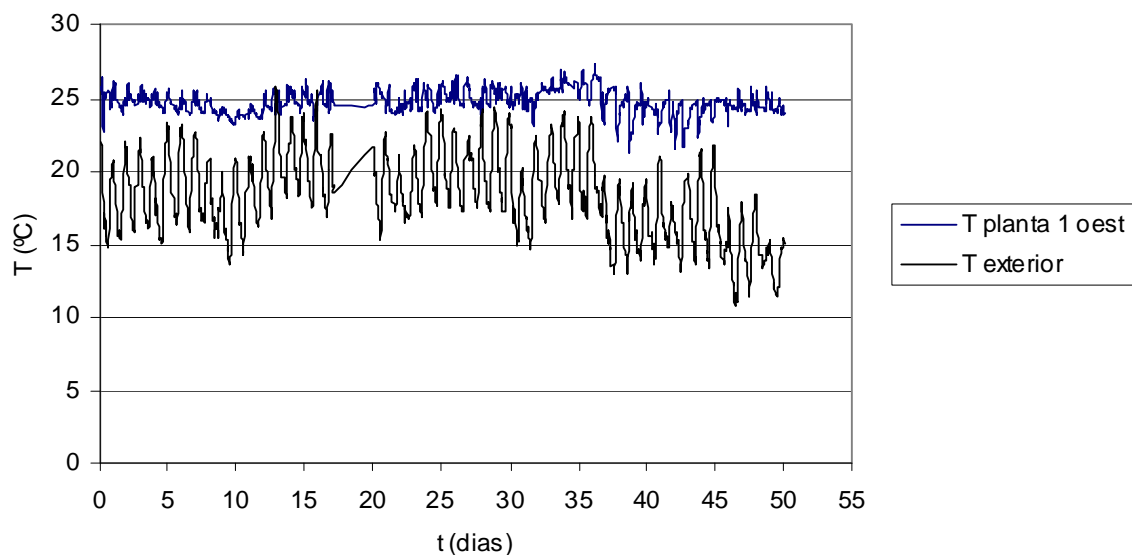


Figura 60: Planes de Son, evolución térmica a la planta 1 oeste en el periodo 26/6-17/8/2006.

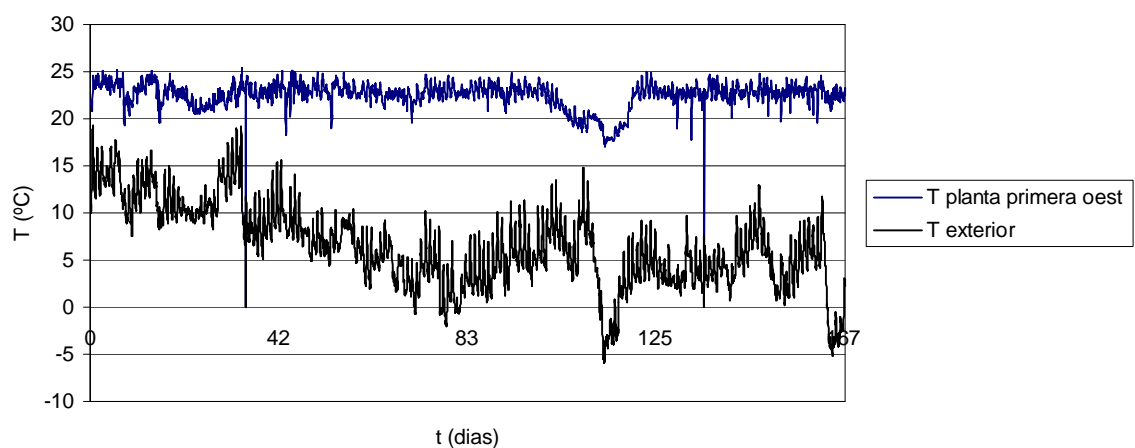


Figura 61: Planes de Son, evolución de la temperatura a la planta 1 oeste (27/9/2006-23/3/2007)

Planta baja este

Esta zona presenta unas oscilaciones diarias muy agudas. El efecto se debe a la gran cantidad de vidrio que permite la entrada de la radiación solar. Esta es captada por el panel que se encuentra detrás del vidrio. Como ese está aislado y comunica con el aire interior, la energía adsorbida es reemitida y transferida por convección al aire interior. La temperatura resultante en la zona es casi siempre por encima de la zona de confort, con picos diarios de más de treinta grados también durante el invierno.

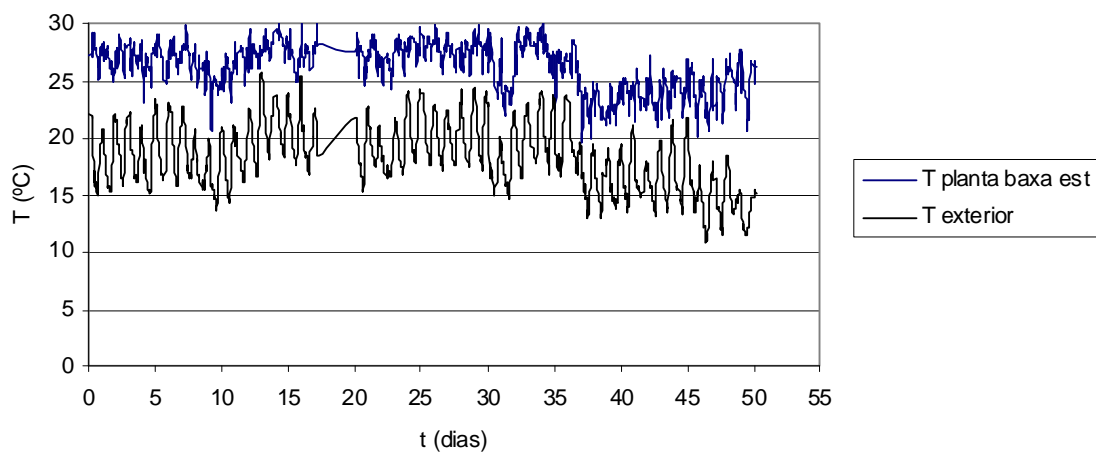


Figura 62: Planes de Son, evolución de la temperatura interior a la planta baja este (26/6-17/8/2006).

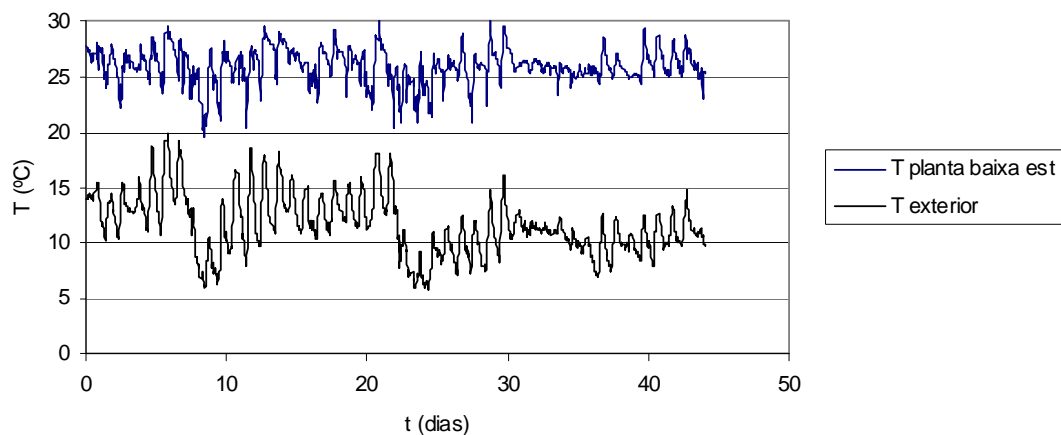


Figura 63: Planes de Son, evolución de la temperatura interior a la planta baja este (10/9-23/10/2005).

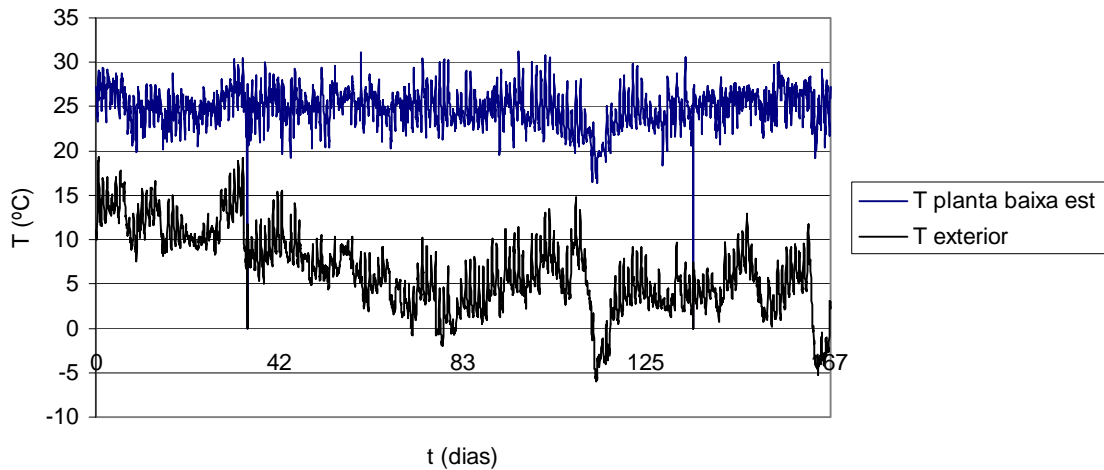


Figura 64: Planes de Son, evolución de la temperatura a la planta baja este (27/9/2006-23/3/2007)

Análisis in situ determinaron la velocidad de calentamiento del panel adsorbente, que en invierno con pocas horas de sol llega a los 80 grados. Toda esta energía no se aprovecha, porque directamente vuelve al aire interior, generando además la sensación desagradable de los usuarios.

Planta baja oeste

La planta oeste presenta los mismos problemas que la parte este, aunque algo reducidos en términos de temperatura interior.

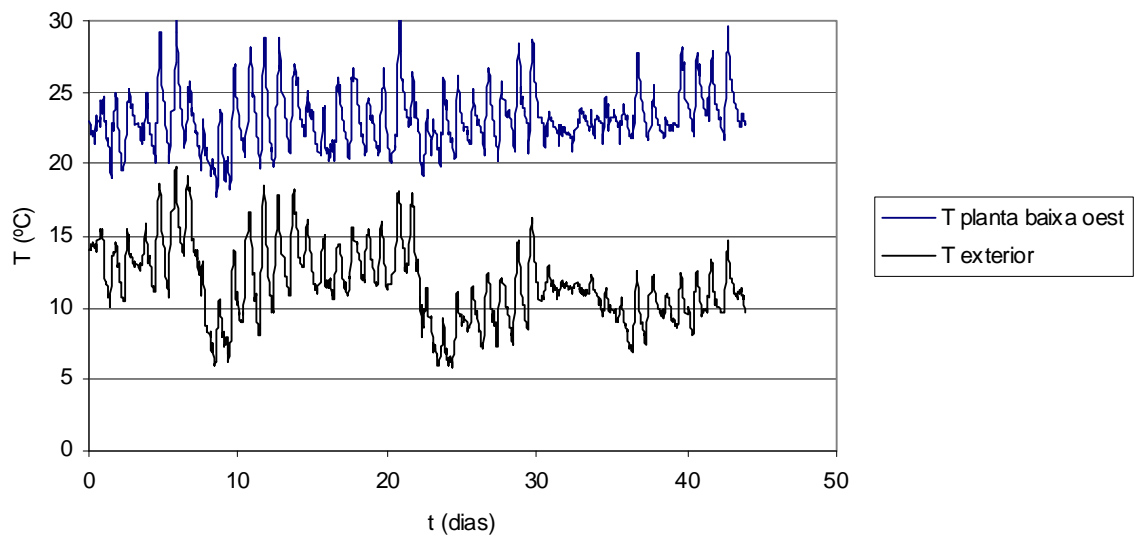


Figura 65: Planes de Son, evolución de la temperatura interna a la planta baja oeste (10/9-23/10/2006)

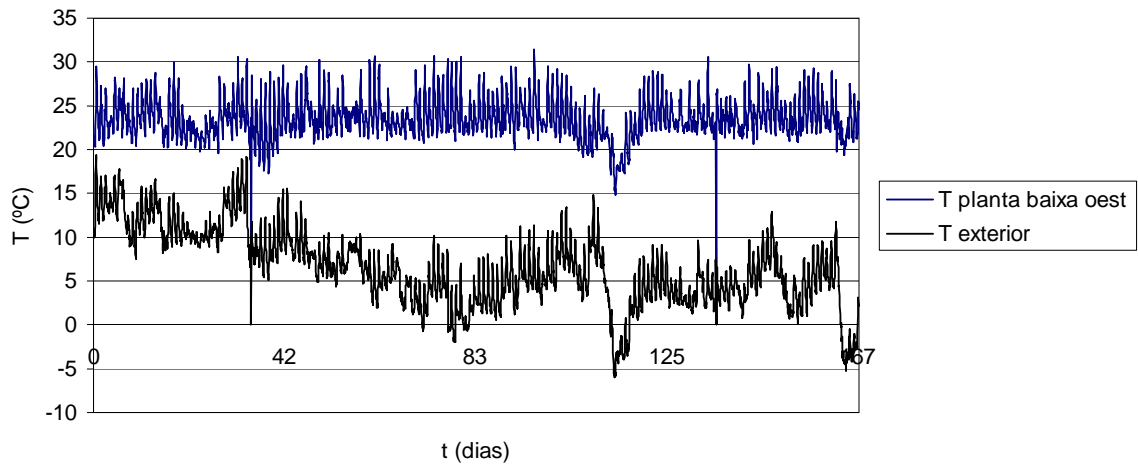


Figura 66: Planes de Son, evolución de la temperatura a la planta baja oeste (27/9/2006-23/3/2007)

Casa del Guarda

Esta zona presenta una buena estabilidad térmica, con oscilaciones diarias aceptables.

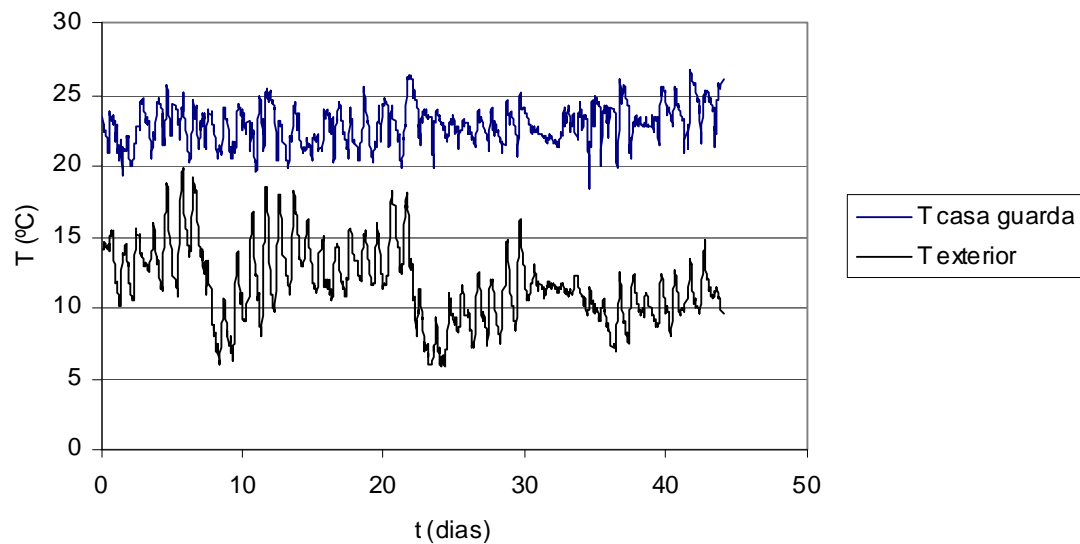


Figura 67: Planes de Son, evolución de la temperatura en la casa del guarda (10/9-23/10/2005).

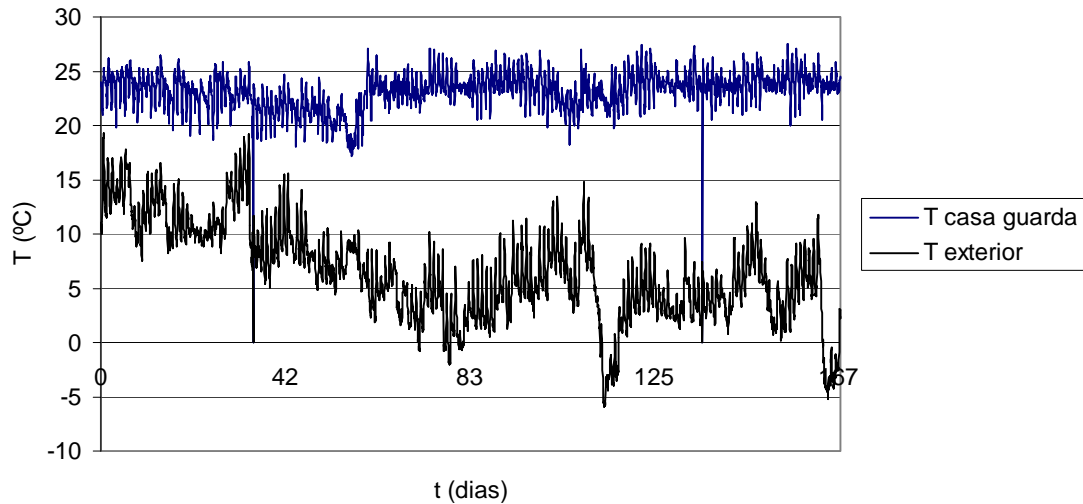


Figura 68: Planes de Son, evolución de la temperatura en la casa del guarda (27/9/2006-23/3/2007)

Durante el invierno de 2007 el sistema de calefacción por suelo radiante se paró por algún motivo durante varios días. Esto permitió evaluar la respuesta térmica dinámica del edificio en sí. Se puede apreciar que

- la inercia térmica de la cara norte funciona bien y el descenso de la temperatura de las zonas contiguas es inferior a los 4°C y nunca se pasa por debajo de los 18°C.
- Las aportaciones solares en la cara sur mantienen su ritmo y se puede notar como las zonas sur dependen casi totalmente de estas aportaciones. Durante los días de paro del sistema de calefacción, el perfil de la temperatura interior no varía casi, mientras que sucesivamente la ausencia de sol durante unos días seguidos tiene un efecto mucho más importante.

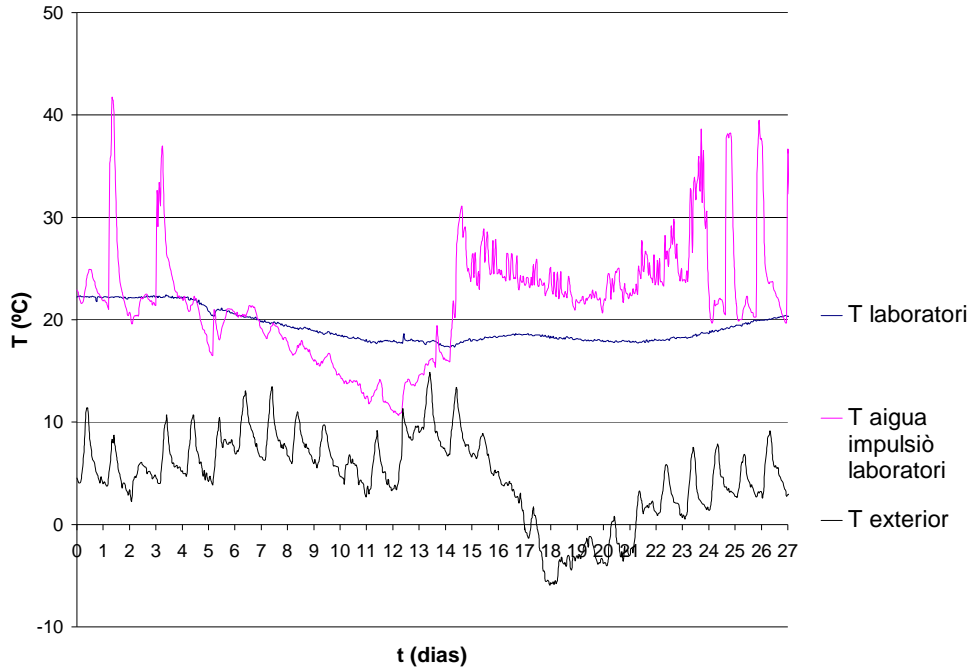


Figura 69: Planes de Son, evolució de temperatures del ambient i de impulsió del aigua del sòl radiant, laboratori 6/1-4/2 2007

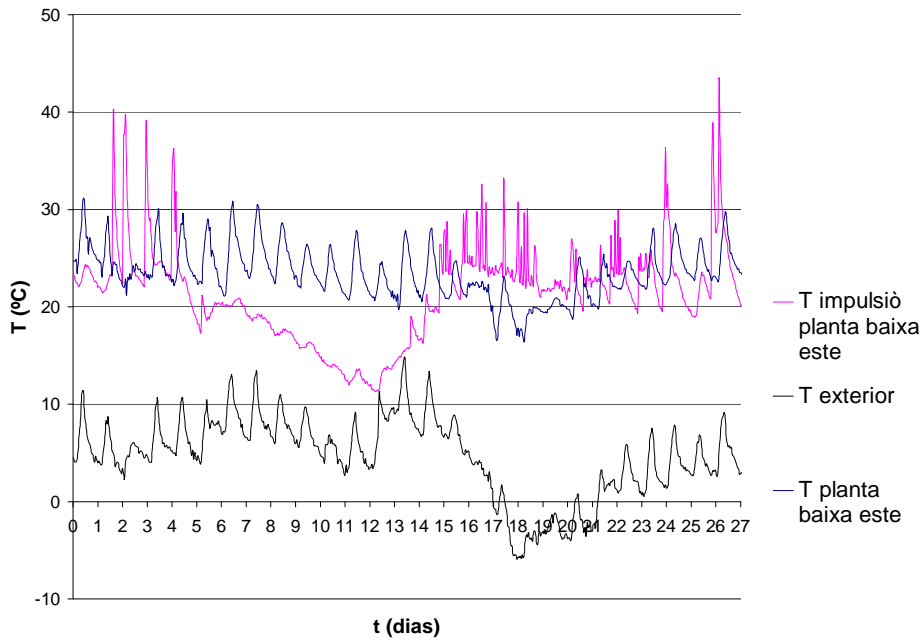


Figura 70: Planes de Son, evolució de temperatures del ambient i de impulsió del aigua del sòl radiant, planta baixa este 6/1-4/2 2007

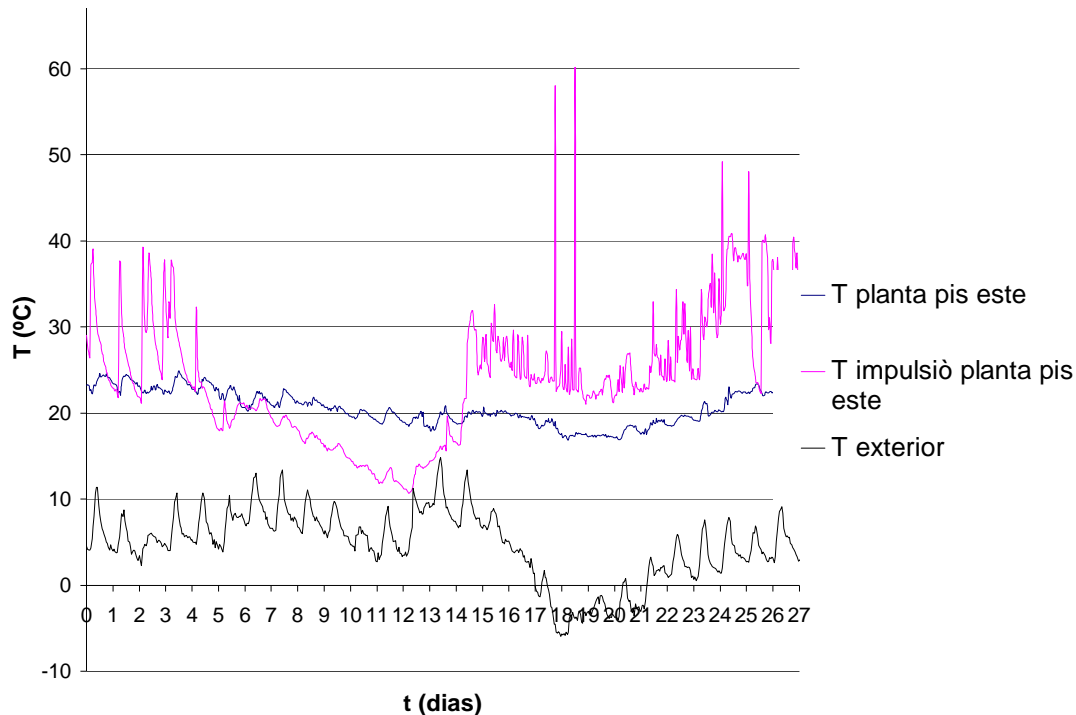


Figura 71: Planes de Son, evolución de temperaturas del ambiente y del agua de impulsión del suelo radiante, planta primera este 6/1-4/2 2007

El consumo de energía final durante el año 2007 fue de 47 kWh/m^2 . El potencial de captación de radiación en invierno es importante: 212 m^2 de superficie transparente vertical que donan unos 850 kWh por mes. Sin embargo, el grado de aprovechamiento de esta energía es menor de lo posible, debido a la distribución imperfecta de estas ganancias energéticas. Las características estructurales que explican estos resultados son las siguientes:

- ausencia de movimiento convectivo de aire entre los espacios de la cara norte y sur
- baja inercia térmica interior en los espacios de la cara sur (suelo de madera, muebles de colores claros, paredes ligeras, y sobre todo aislamiento térmico detrás de los captadores). La ausencia de inercia provoca una oscilación aguda de temperaturas en la zona sur, que casi siempre se encuentra afuera de la zona de confort.
- la ventilación no está diseñada para llevar mecánicamente aire de un lado al otro del edificio, sino para mantener la calidad del aire interior y efectuar las renovaciones de aire necesarias en función de la ocupación. Las ventanas de la planta baja se diseñaron como no practicables y no permiten la evacuación del calor al exterior. El cambio sucesivo de hacerlas practicable en parte resolvió solamente el problema de algunos picos de calor, pero no propuso ninguna utilización racional de la energía captada.
- La mayor parte de la masa térmica del edificio se encuentra en el pasillo y en los espacios de la zona norte enterrada, que son las zonas donde habría que llevar la energía solar captada para almacenarla.

La tabla resume las mediciones efectuadas *in situ* durante el mes de marzo de 2007.

Tabla 45: Planes de Son resumen de temperaturas superficiales, marzo 2007

Data	Hora	Cel	T (°C) exterior	T (°C) vidre costat exterior	T (°C) vidre costat interior	T (°C) panell gris	T (°C) pedra exterior	T (°C) fusta interior	T (°C) formigó exterior
02/03/2007	16.00	net	20	30	40	56	18	44	24
02/03/2007	17.00	net, enfosquit	18	24	32	40	16	32	22
02/03/2007	18.30	net, fosc	16	18	22	28	16	26	22
02/03/2007	21.00	net, nit	8	12	18	20	13	21	18
03/03/2007	8.00	enuvolat	9	10	15	17	8	21	15
03/03/2007	10.00	enuvolat	12	14	30	38	12	23	18
03/03/2007	13.00	enuvolat	13	15	28	38	14	24	18
03/03/2007	22.00	enuvolat	9	8	10	15	11	21	15
04/04/2007	8.00	sol	9	8	10	18	11	20	17
04/04/2007	9.30	sol	15	18	24	38	15	27	20
04/03/2007	12.00	molt sol	18	28	33	54	20	35	22
04/03/2007	13.00	molt sol	20	38	54	78	25	62	24



Figura 72: Planes de Son, detalle de la fachada



Figura 73: Planes de Son, detalle de los captadores térmicos



Figura 74: Planes de Son, detalle de fachada

4.4 Conclusiones parciales

4.4.1 Comparativa entre simuladores

En todos los proyectos analizados, el simulador Archisun resulta el menos sensible a variaciones en los parámetros editables elegidos. Sin embargo, no se pueden editar datos de ventilación que son muy relevantes en todos los otros casos. El simulador trnsys permite menos elección de los demás simuladores en el parámetro tipología de vidrio, por lo que resulta muy sensible a esta variable. El parámetro que más influye sobre los resultados es en todo caso la tasa de renovación de aire.

En el análisis del proyecto de escuelas Protoceip, se evidencia la sensibilidad de Calener GT a las potencias de los equipos, especialmente en la iluminación. Cuando el edificio se hace más complejo como construcción o simplemente como uso previsto, más difícil se hace la comparación entre diferentes programas. Esto depende del número de variables y también de las grandes diferencias de cálculo. Se decidió no considerar la potencia de iluminación como variable para poder comparar los resultados. Con esta exclusión, Calener GT resulta un software no demasiado sensible, cosa que realmente no es cierta.

Tabla 46: vectores sensibilidad Lider-Calener VYP

	aislamiento	vidrios	renovación	persianas	permeabilidad
Les Franqueses	15,5	17,4	97,0	12,4	3,4
Vallforners	2,8	0,2	6,8	0,8	0
Planes de Son	6,8	3,2	8,3	2,4	1,5
Promedio	8,3	6,9	33,4	5,2	1,6

Tabla 47: vectores sensibilidad Ecotect

	aislamiento	vidrios	renovación	persianas	permeabilidad
Les Franqueses	4,2	4,6	90,7	0	23,5
Vallforners	14,7	0,8	78,8	0	14,2
Planes de Son	1,0	21,6	78,4	0,2	32,8
Protoceip	3,5	10,2	130,0	0	38,8
Promedio	5,8	9,3	94,5	0,05	27,3

Tabla 48: vectores sensibilidad Trnsys

	aislamiento	vidrios	renovación	persianas	permeabilidad
Les Franqueses	9,0	67,5	35,8	9,2	1,8
Vallforners	0,9	1,7	12,8	0	0,3
Planes de Son	0,4	20,5	24,7	1,4	0,5
Protoceip	6,7	29,5	76,5	6,3	1,4
Promedio	4,2	29,8	37,4	0,2	1

Tabla 49: vectores sensibilidad Archisun “piel”

	aislamiento	vidrios	renovación	persianas	permeabilidad
Les Franqueses	11,0	14,1	/	0,8	0
Vallforners	8,1	1,4	/	0	0
Promedio	9,5	7,8	/	0,4	0

Tabla 50: vectores sensibilidad Archisun “forma”

	compacidad	alargamiento	esbeltez	peso	aislamiento
Planes de Son	3,7	0,2	6,8	0,2	1,8
Protoceip	1,7	0,4	0,1	0,4	0
Promedio	2,7	0,3	3,5	0,3	0,9

Tabla 51: vector de sensibilidad Calener GT

	vidrio	ventiladores	recuperador	renovación	infiltración
Protoceip	1,2	14,6	3,9	4,2	1,6

Tabla 52: sensibilidades globales de los simuladores

	Calener VYP	Ecotect	Trnsys	Calener GT	Archisun
sensibilidad	11,1	27,3	14,5	5,1	2,9

4.4.2 Comparativa entre tipologías arquitectónicas

Aparece evidente que todos los simuladores den como resultado una baja sensibilidad en el caso del proyecto de reformas de la Massia de Vallforners. Esto depende de la gran inercia térmica de la construcción de piedra, con muy poca superficie de vidrio, en un emplazamiento protegido por vegetación y por la montaña al norte, aunque en un clima bastante rígido en invierno. El consumo de este edificio es bastante alto, pero su sensibilidad extremadamente baja hace pensar que sea una tipología constructiva privilegiada. La sensibilidad de les Planes de Son no corresponde totalmente a lo evidenciado en la monitorización: especialmente, parece demasiado baja. Esto se debe al hecho de que en la simulación no se evidencian las asimetrías entre la cara norte y la cara sur del edificio, que continuamente generan una elevada sensación de discomfort. Es cierto que el resultado de la simulación es coherente con los datos de consumo de gas registrados, pero también resulta evidente que no se detectan los cambios de temperatura que la monitorización deja relevar.

El edificio de vivienda de Les Franqueses resulta sensible a la ventilación, mientras que es muy poco sensible a los otros factores. Esto tampoco sorprende, siendo una construcción destinada a vivienda, sector para el cual la edición de datos es más clara y sencilla. Este resultado es coherente con los obtenidos en una reciente investigación, que relaciona además la ventilación con el tamaño de las viviendas (anexos A y H).

Tabla 53: comparación entre tipologías arquitectónicas

	Les Franqueses	Planes de Son	Vallforners	Protoceip
Calener VYP	29,1	4,4	2,1	/
Calener GT	/	/	/	19,9
Trnsys	24,7	9,5	3,1	24,8
Ecotect	24,6	26,8	21,7	36,5
Archisun	6,3	2,5	2,4	0,4
Promedio	21,1	10,8	7,3	20,4

Las simulaciones indican la Massia de Vallforners como el edificio menos sensible entre los analizados, en coincidencia con la evaluación previa.

El edificio de Les Planes de Son, que resultaba el más sensible en la evaluación, parece tener una sensibilidad menos a las simulaciones. Esto es un efecto de la elevada inercia térmica de la que dispone. Sin embargo, la monitorización relevó que su comportamiento no es lo simulado, por lo menos en términos de confort. Esto se debe a la distribución fuertemente asimétrica de la masa térmica del edificio y de las superficies de captación de la radiación.

Hay otra cuestión, que no se trató en los apartados anteriores. El efecto del cambio climático sobre los proyectos arquitectónicos.

Previsiones suficientemente optimistas sitúan la temperatura de verano en Cataluña entre 2 y 4 grados superior a la actual para 2050; para 2100 las previsiones son de una subida de entre 5 y 8 grados.

La sensibilidad energética aquí discutida resultará elemento clave para la predicción del comportamiento de los edificios en el futuro, en un momento histórico de cambios muy agudos.

Es bastante lógico esperar que edificios generalmente poco sensibles tendrán la capacidad de adaptarse mejor a la nueva situación climática, cosa que es más que dudosa en el caso de los edificios muy sensibles, aunque bien proyectados para la situación actual.

Diferentes estrategias resolutivas de un problema actual pueden, entonces, resultar útiles también en una óptica a largo plazo, o no serlo en absoluto.

Los fenómenos asociados a la radiación solar y su aprovechamiento, especialmente, deberán ser muy bien considerados, en la perspectiva de un calentamiento global muy importante en verano, que podría incluso transformar zonas actualmente definidas “frías” en zonas “calientes”. Una resolución de los problemas actuales sin tener en cuenta el futuro más o menos próximo podría ser un error muy grave.

Los materiales y las técnicas constructivas mejores, frente a esta variabilidad tan importante, podrían ser los así llamados “alto efusivos”, y sobre este concepto se centra parte del capítulo conclusivo.

Resumen:

En este capítulo se han analizado los resultados de la investigación. El análisis se dividió en cuatro partes: análisis de los resultados de una evaluación básica para los cuatro edificios, análisis de los resultados de los estudios de sensibilidad de las simulaciones efectuadas con los cuatro simuladores elegidos para cada edificio, análisis del edificio monitorizado y análisis comparativa, entre simuladores y entre edificios.

Los resultados permitieron sacar unas conclusiones parciales, que resumidas son las siguientes:

- los resultados generales que dan diferentes simuladores son comparables solamente a través de un difícil proceso de asignación de parámetros de manera congruente y en todo caso solamente para tipologías edificatorias no complejas (quedan excluidos todos los edificios singulares, por tamaño, utilización, materiales, etc...)
- los resultados del análisis de sensibilidad relativo a la evaluación básica no son muy diferentes de los obtenidos analizando los simuladores y promediando para obtener un dato representativo del edificio
- el simulador menos sensible es claramente Archisun, pero eso es debido en parte a la no editabilidad de parámetros muy influyentes como los relativos a la ventilación y al comportamiento de los usuarios en general
- el edificio menos sensible es claramente la masía de Vallforners, que resulta por otro lado un edificio de alto consumo. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que la rehabilitación de esta masía no prevé la sustitución de ningún cerramiento, exceptuada la cubierta, ni la puesta en obra de aislamiento interior. Con sencillos pasos este edificio se podría convertir en un edificio perfectamente bioclimático, de bajo consumo, cero emisiones y muy baja sensibilidad.

La presencia de elevadas sensibilidades a variaciones difícilmente controlables, tanto en los procesos de simulación como en las evaluaciones sencillas, hace pensar que la simulación dinámica de un proyecto sea en general poco fiable; se puede recomendar entonces de hacer por lo menos dos simulaciones y promediar entre ellas para tener un resultado indicativo, además parece muy adecuada la idea de analizar siempre la sensibilidad del proyecto, posiblemente incluyéndola en el proceso de certificación o valoración del edificio.

CAPÍTULO 5:

DISCUSIÓN

En este capítulo se ponen las bases para el desarrollo futuro de esta investigación, fundadas en los resultados obtenidos y en las primeras conclusiones que se pudieron extraer.

Resulta muy importante incluir análisis de sensibilidad en los procesos de evaluación básica, simulación y certificación de los edificios. Todos estos procesos parecen tener al momento muchas imperfecciones que el análisis de sensibilidad puede contribuir a eliminar, disminuir o por lo menos a delatar.

En este capítulo se avanzan hipótesis sobre la posibilidad de una rápida evaluación de la sensibilidad de un edificio a través de la definición de un coeficiente de sensibilidad global o bien gracias a un concepto poco utilizado: el de efusividad térmica. La definición de una efusividad térmica global del edificio podría ser un índice directo de su sensibilidad, permitiendo valorar al mismo tiempo fenómenos de transmisión de calor a través de la piel del edificio y fenómenos de intercambio de aire entre el interior del mismo y el ambiente exterior.

Se ha dedicado además mucho espacio a la discusión del problema del confort, ya que los fenómenos que resultaron ser los más relevantes sobre el resultado final (la evaluación de un consumo de un edificio) fueron los directamente o indirectamente asociados al comportamiento de los usuarios. Una profunda revisión de los estándares del confort y sobre todo la inclusión de problemas de tipo dinámico en la definición de bienestar parecen ser una de las urgencias de la arquitectura sostenible.

5.1 Inclusión de análisis de sensibilidad en las evaluaciones

Los resultados muestran como los edificios mismos, más allá de las simulaciones, resulten sensibles a cambios en los parámetros de funcionamiento. Consecuentemente, es muy importante que en los criterios de evaluación energética de la construcción se fije la mirada en los fenómenos dinámicos en todo el espectro de frecuencia temporal que interviene en los fenómenos ambientales. De momento se utilizan sobre todo ecuaciones de balance y ecuaciones dinámicas fundadas en ciclos de baja (estacional) y media frecuencia (diario). Las mismas simulaciones no toman en cuenta para los parámetros más importantes (como los relacionados con los intercambios de aire) las variaciones de alta frecuencia. Resulta un aspecto fundamental la próxima inserción de evaluaciones de sensibilidad en la general evaluación energética de la arquitectura. Para ello aquí se sugieren dos caminos a recorrer: la estimación de vectores sensibilidad y la definición de la efusividad térmica global de un edificio.

5.1.1 El vector sensibilidad

Una manera de valorar la sensibilidad energética de un edificio, consiste en definir un vector de sensibilidades, evaluando separadamente las sensibilidades a cada variación definidas como (8)

$$S = \frac{\delta T_i}{\Delta T}$$

o bien como

$$S = \frac{\delta D}{D} \quad (14)$$

la sensibilidad global se puede expresar como

$$S = \frac{\sum_i S_i f_i}{n} \quad (15)$$

donde f_i son las frecuencias con las que se estima tenga lugar la variación correspondiente, S las respectivas sensibilidades y n el numero total de variaciones consideradas.

Por ejemplo, se puede evaluar la sensibilidad frente a variaciones en los coeficientes I , G y D ; entonces n será 3 y para cada variación deberemos tener una sensibilidad y una frecuencia estimada de tal variación.

Evaluar las frecuencias de variación es una tarea nada fácil. Estas dependen de factores climáticos, accidentales y sobre todo determinados por el uso que se hace del edificio y de sus sistemas. Por este motivo resulta muy importante un análisis exhaustivo de las acciones de los usuarios y de sus motivaciones fisiológicas, psicológicas, socio-culturales.

Tal análisis no puede ser realizado ahora integralmente, pero podemos dar unas cuantas líneas directrices sobre las cuales moverse para futuras investigaciones. Aparece evidente como la evaluación del confort dinámico sea el punto cardinal de investigaciones sucesivas, ya que sólo una estimación fiable de esas dinámicas permitirán la predicción de las frecuencias de eventos que dependen de los usuarios. La única alternativa, que aparece sinceramente poco viable, sería una recogida de datos estadísticos muy completos sobre usos y costumbres, sin relación directa con la fisiología del confort.

Recientes investigaciones se intentaron en este sentido, como las de E. De Groot [De Groot 2008]; A. Mahdavi [Mahdavi 2008]; R. Schiano-Phan [Schiano-Phan 2008] y T. Fukazawa [Fukazawa 2008].

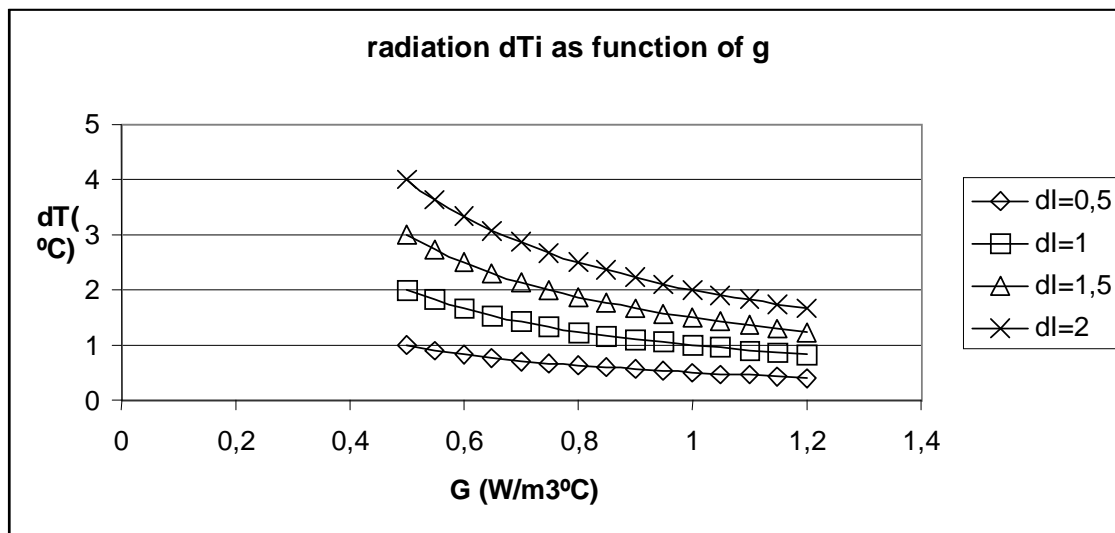


Figura 75: variación de temperatura interior por variaciones de radiación en diferentes tipologías arquitectónicas

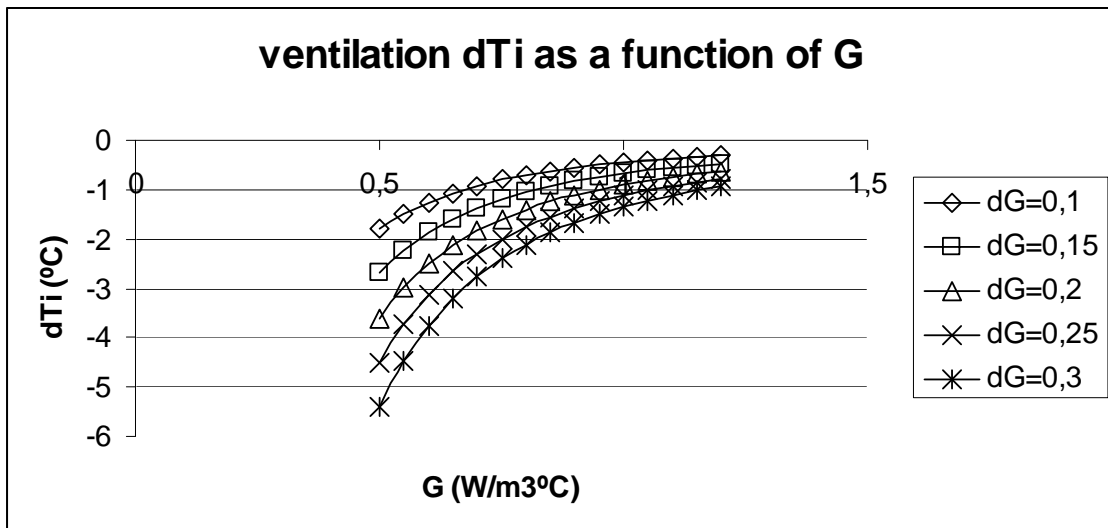


Figura 76: variación de temperatura interior por variaciones de ventilación en diferentes tipologías arquitectónicas

5.1.2 La efusividad térmica global

Difusividad y efusividad térmica

Estudiando el comportamiento dinámico de los materiales, los simples conceptos de resistencia e inercia no son suficientes. Realmente lo que importa es el efecto combinado de las dos propiedades que caracterizan los materiales, resistencia y calor específico. Cuando pasamos a analizar un edificio en su conjunto, quizás puede ser útil pensar de una manera análoga, buscando entonces la combinación de unas características globales de pérdida (G) y acumulación (M).

En un cerramiento, se define como difusividad térmica la relación entre la conductividad lineal y el producto de la densidad por el calor específico. La efusividad, por otro lado, es la raíz cuadrada del producto de esos tres términos.

Podríamos proponer entonces para un edificio la definición de difusividad:

$$\frac{G}{M} = D \quad (1/s) \tag{16}$$

y de efusividad

$$\sqrt{MG} = E \quad (Ws^{1/2}/m^3K) \tag{17}$$

El concepto de efusividad debería de ser una buena manera de medir la capacidad de absorción del calor, y entonces de la robustez del edificio.

A nivel de materiales, la efusividad térmica es una propiedad de la materia, a veces llamada “coeficiente de contacto”, definida por

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{\sqrt{\alpha}} = \sqrt{\rho c \lambda} = \rho c \sqrt{\alpha} \quad (18)$$

donde

λ es la conductividad térmica lineal [W/mK]

ρ es la densidad [kg/m³]

c es el calor específico [J/kgK]

α es la difusividad térmica [m²/s].

Mide la inercia térmica de un material y su unidad de medida es [W/s^{0.5}m²K].

La importancia de este concepto aparece cuando se estudia la propagación del calor en un material considerando variaciones temporales.

“La conductividad térmica es definida por la ley de conducción del calor de Fourier y mide el flujo de energía por unidad de tiempo, superficie y espesor a través de un material cuando se le aplica una diferencia de temperatura de un grado a las dos caras. Por otro lado, un fenómeno dependiente del tiempo es descrito por la ecuación diferencial de difusión del calor, que requiere los conceptos de difusividad y efusividad. La primera es una cantidad asociada a la velocidad de propagación de la energía en un material cuando su temperatura varía. Si el cambio es periódico, entra en juego la efusividad, que determina la magnitud de la temperatura a la superficie del material.” [Marín 2006].

La efusividad térmica es considerada, por varios autores, como la mejor expresión de la inercia térmica de un material. Efectivamente, si la inercia térmica es la resistencia que ofrece un material a la variación de su estado energético cuando las condiciones al contorno varían, parece ser este el concepto que mejor describe el fenómeno.

Sin embargo, es muy difusa la idea de que sea la masa térmica, y no la efusividad, a medir la inercia de un material.

“La inercia térmica es la dificultad que ofrece un cuerpo a cambiar su temperatura, y se obtiene cuantificando su masa térmica” [Neila 2004].

La confusión al momento de definir la inercia térmica es evidente si analizamos un cerramiento, la mayoría de las veces formado por un conjunto de materiales:

“La efusividad térmica indica la capacidad efectiva que ofrecen los materiales para acumular calor. El material ideal es aquel con gran inercia térmica y por el que se mueve la energía con facilidad, para calentarse rápido y ceder calor igualmente rápido. Efusividades altas representan materiales con densidad y calor específico altos, es decir,

gran masa térmica, y con alta conductividad térmica, es decir, el calor se mueve por ellos con facilidad; estos son, desde el punto de vista de la acumulación de calor en procesos bioclimáticos, los ideales.” [Neila 2004].

Parece que, en un cerramiento, la efusividad térmica sea, de nuevo, el parámetro más adecuado para identificar la inercia térmica efectiva. En un edificio, sin embargo, hay que tener en cuenta la geometría. Como demuestra el caso de Les Planes de Son, analizado exhaustivamente en el capítulo 4, la distribución de la masa térmica, la posible asimetría en la puesta en obra de los aislamientos y, sobre todo, la localización de los fenómenos de ventilación, dificultan la definición de un término volumétrico representativo de todo el edificio. La expresión completa que se propone entonces es:

$$E = \sqrt{\Phi \xi G M} \quad (19)$$

donde

G es el coeficiente de pérdidas volumétrico del edificio [W/m^3K]

M es la masa térmica global [J/m^3K]

Φ es un coeficiente de corrección por orientación

ξ es un coeficiente de corrección por distribución.

La efusividad global se mide en [$W/m^3s^{0,5}K$].

A confirmación se procedió a graficar la sensibilidad de un edificio (medida como la variación de la temperatura de sensación interior producida por un cambio en las condiciones de contorno) frente a la efusividad global.

La sensibilidad se calculó con la integración de la ecuación:

$$M \frac{\partial T_i}{\partial t} = I + D + (T_e - T_i)G \quad (20)$$

$$M \frac{T_i^{t+\tau} - T_i^t}{\tau} = I + D + (T_e - T_i^t)G \quad (21)$$

$$T_i^{t+\tau} = T_i^t + \left[I + D + (T_e - T_i^t)G \right] \frac{\tau}{M} \quad (22)$$

utilizando un tiempo de integración de 20 minutos y variando I, D o la misma G como escalones.

Consideramos por ejemplo una variación del coeficiente de pérdidas G del 40%. La simulación dinámica se realiza como sigue:

- se fijan unos valores iniciales para I, G, Ti, Te media
- se determina el valor de D necesario a garantizar el valor inicial de Ti (depende de G)
- se establece una variación temporal para Te
- en un cierto instante se aplica una variación a la G del 40%
- se sigue con la simulación hasta cierto instante final
- se calcula la Ti mínima de la simulación (depende de G y M)

por ejemplo:

$I=1,5 \text{ W/m}^3$; $G=1 \text{ W/m}^3\text{K}$; $T_i=22,5 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{em}=10 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ev}= 5 \text{ }^\circ\text{C}$, $M=100 \text{ J/kgK}$

entonces $D= 16 \text{ W/m}^3$ para garantizar estos valores

la variación de Te es por ejemplo

$$T_e = 10 + 5 \times \cos(2\pi\tau - \pi)$$

se simula la evolución de Ti durante una semana con un tiempo característico de 20 minutos

se aplica una nueva $G=1,4 \text{ W/m}^3\text{K}$

se simula la evolución de Ti durante otra semana con el mismo tiempo de integración

En la figura se aprecia la dependencia de la sensibilidad de la efusividad global para una variación de G del 40%, considerando diferentes combinaciones de M (entre 5 y 100 J/kgK) y G (entre 0,4 y 1 W/m³K) y los valores de D que garantizan la Ti inicial 22,5.

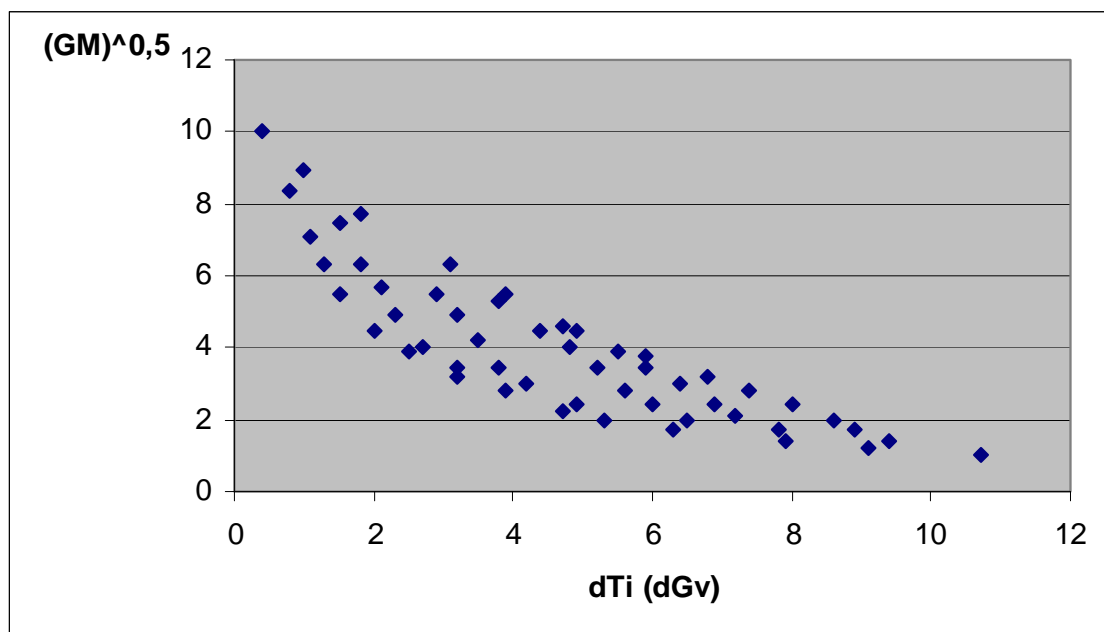


Figura 77: sensibilidad a cambios de ventilación y efusividad térmica global

Con la misma estrategia descrita para los cambios de ventilación, se pueden evaluar diferentes variaciones. La figura 78 muestra la dependencia de la efusividad global y de la sensibilidad a cambios del 40% en el término de radiación I

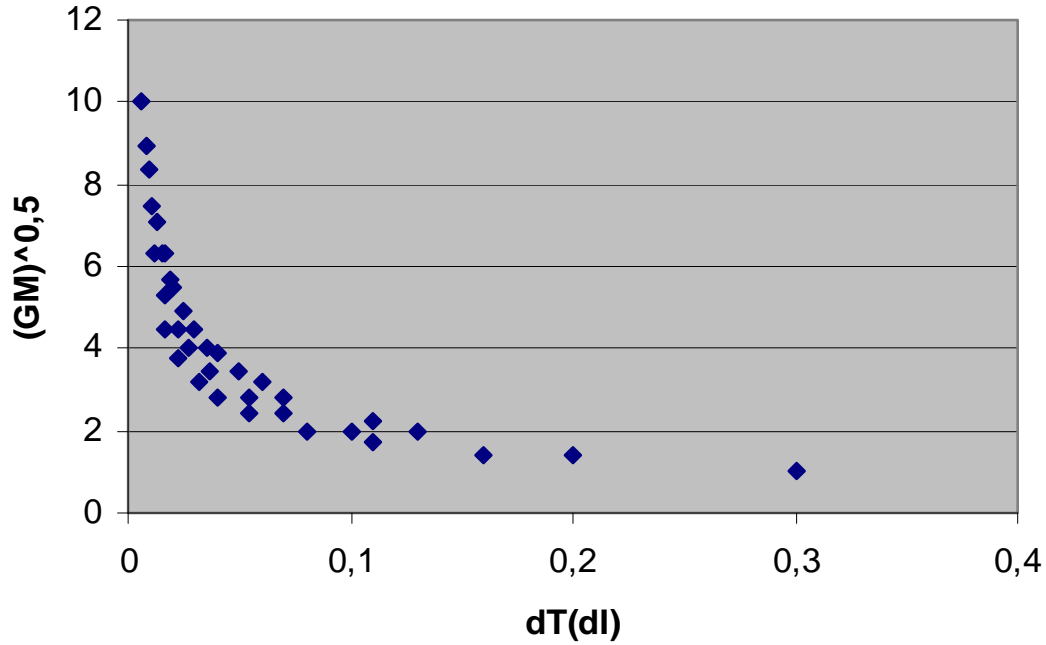


Figura 78: sensibilidad a intercambios de radiación y efusividad térmica global

En los gráficos siguientes se analizan por separado las dependencias de la sensibilidad y de los términos G y M. En la figura 81 se propone una visualización tridimensional para el caso de ventilación.

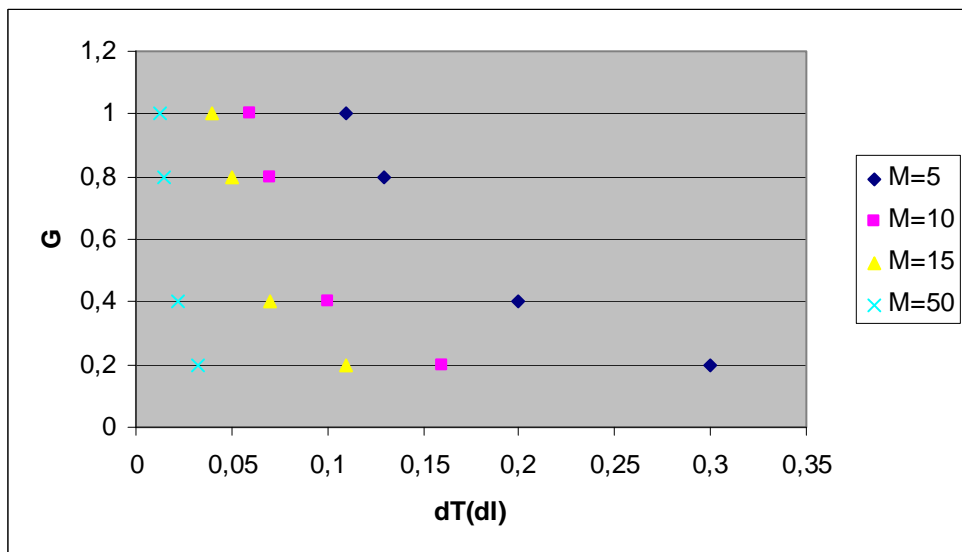


Figura 79: sensibilidad a cambios de radiación, masa térmica y coeficiente de pérdidas

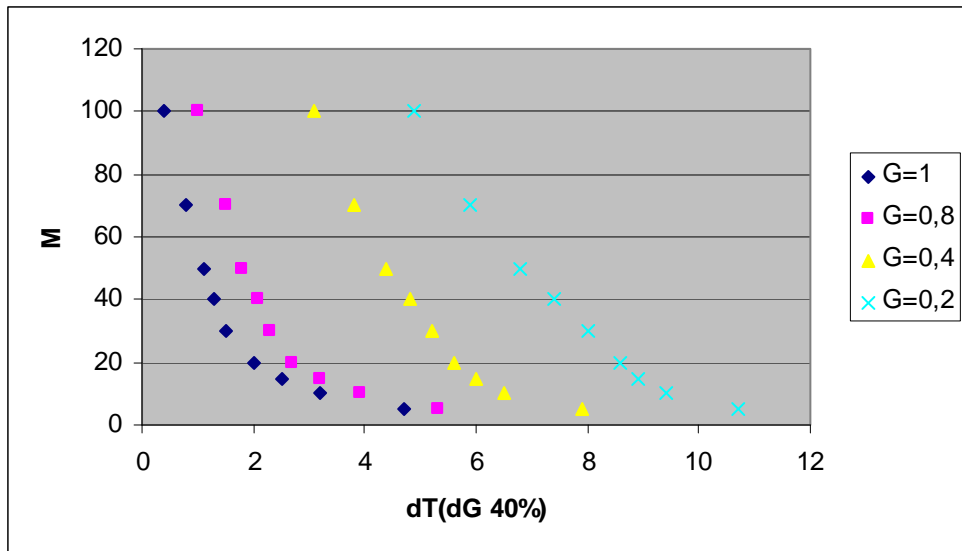


Figura 80: sensibilidad a cambios de ventilación, masa térmica y coeficiente de pérdidas

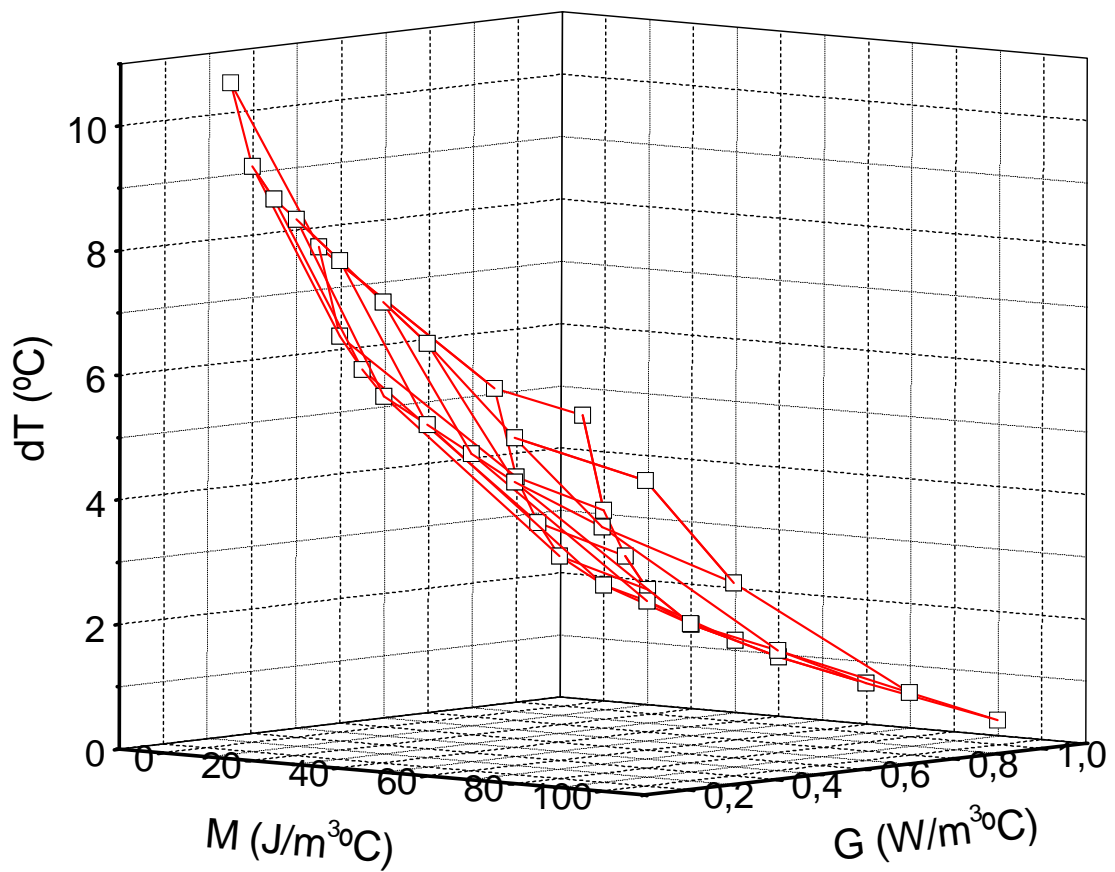


Figura 81: sensibilidad a cambios de ventilación en función de M y G

5.2 Inclusión de análisis de sensibilidad en los simuladores

5.2.1 Ecotect

Ecotect es un software bastante oscuro, en el sentido que no hay grande accesibilidad en la modificación del sistema de cálculo. Para incluir una análisis de sensibilidad la única vía que parece se pueda recorrer es la progresiva iteración (no automática) de las simulaciones y una lectura separada de los resultados.

5.2.2 Trnsys

Trnsys permite editar casi todos los datos como inputs, por lo que es posible variar los parámetros de manera automática. La herramienta resulta muy poderosa en cuanto a editabilidad por el usuario, por lo cual se podría construir una type “sensibilidad” y asociarla a la simulación.

5.2.3 Archisun

Archisun no permite automatizar la inserción de datos y un análisis vectorial de sensibilidad, pero su concepción permite otro enfoque al problema.

Archisun, utilizando coeficientes volumétricos representativos del edificio, favorece la inserción de un nuevo concepto, el definido como efusividad térmica global. Este concepto, mezclando los fenómenos de transmisión, ventilación y acumulación, puede ser un buen indicador de la sensibilidad. Como visto en los apartados anteriores, existe una clara dependencia de la sensibilidad de los valores de G y M, y especialmente de la E definida como efusividad.

Se podría fácilmente insertar un pequeño cálculo final en el programa, que permita una clasificación de la sensibilidad a través de una correlación con la efusividad que habrá que definir numéricamente. Esta podría ser una importante línea de desarrollo futura de esta investigación.

5.3 Inclusión de análisis de sensibilidad en la certificación energética

Actualmente la implantación de la directiva citada en la introducción en la mayoría de los países europeos se hizo a través de la definición de unos valores estándar de calidad sobre materiales, sistemas constructivos e instalaciones. En muchos casos los gobiernos también se hicieron cargo de desarrollar y difundir herramientas informáticas de análisis y simulación de la performance energética de los edificios. Sin embargo, por lo largamente discutido en este trabajo, estas herramientas parecen no tener la transparencia necesaria y los resultados no son repetibles, causa principal la incertidumbre sobre muchos de los factores que intervienen en el cálculo, algunos quizás controlables pero otros absolutamente aleatorios, como los dependientes del clima y de los usuarios. El esquema lógico de la actual evaluación energética es resumido en la figura 82.

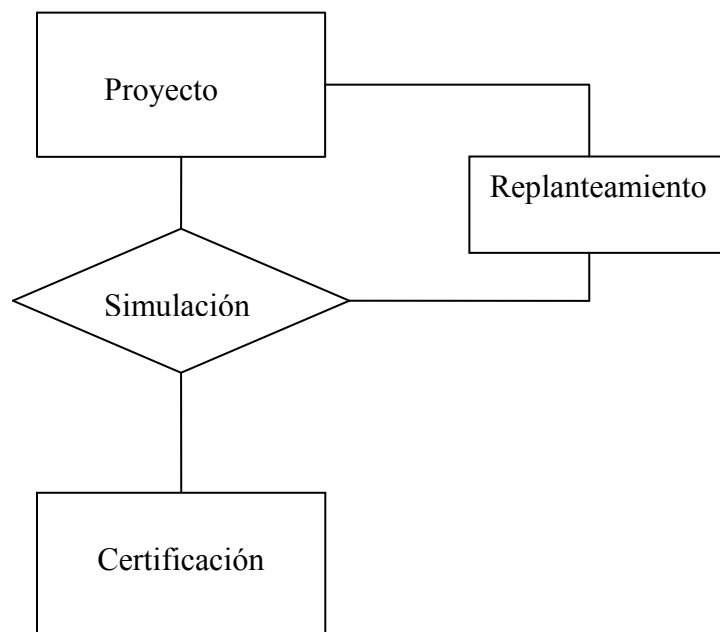


Figura 82: diagrama de flujo de la certificación energética estándar

En algunos casos, como es el español, se introdujo una evaluación de la eficiencia energética en dos pasos: primero una verificación del cumplimiento de los requisitos estándar mínimos y luego la evaluación de la performance global y la asignación de una etiqueta energética. Este esquema lógico es representado por el diagrama de flujo de la figura 83. Después de cada paso tiene lugar un eventual replanteamiento del proyecto.

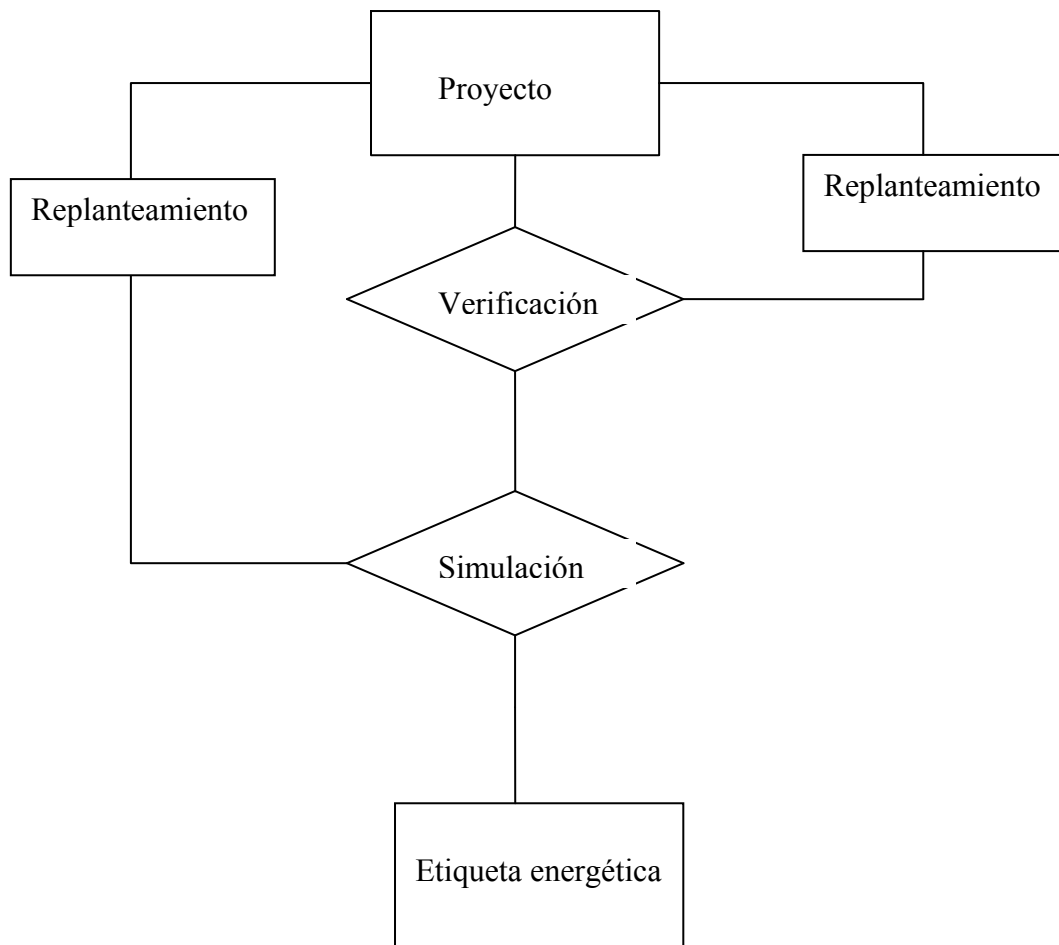


Figura 83: diagrama de flujo de la certificación energética española

Considerando ahora los resultados de los análisis de sensibilidad, no resulta ilógico proponer una nueva dinámica de evaluación y certificación, que incluya el análisis de variación. El esquema lógico, en el caso español, sería entonces el siguiente:

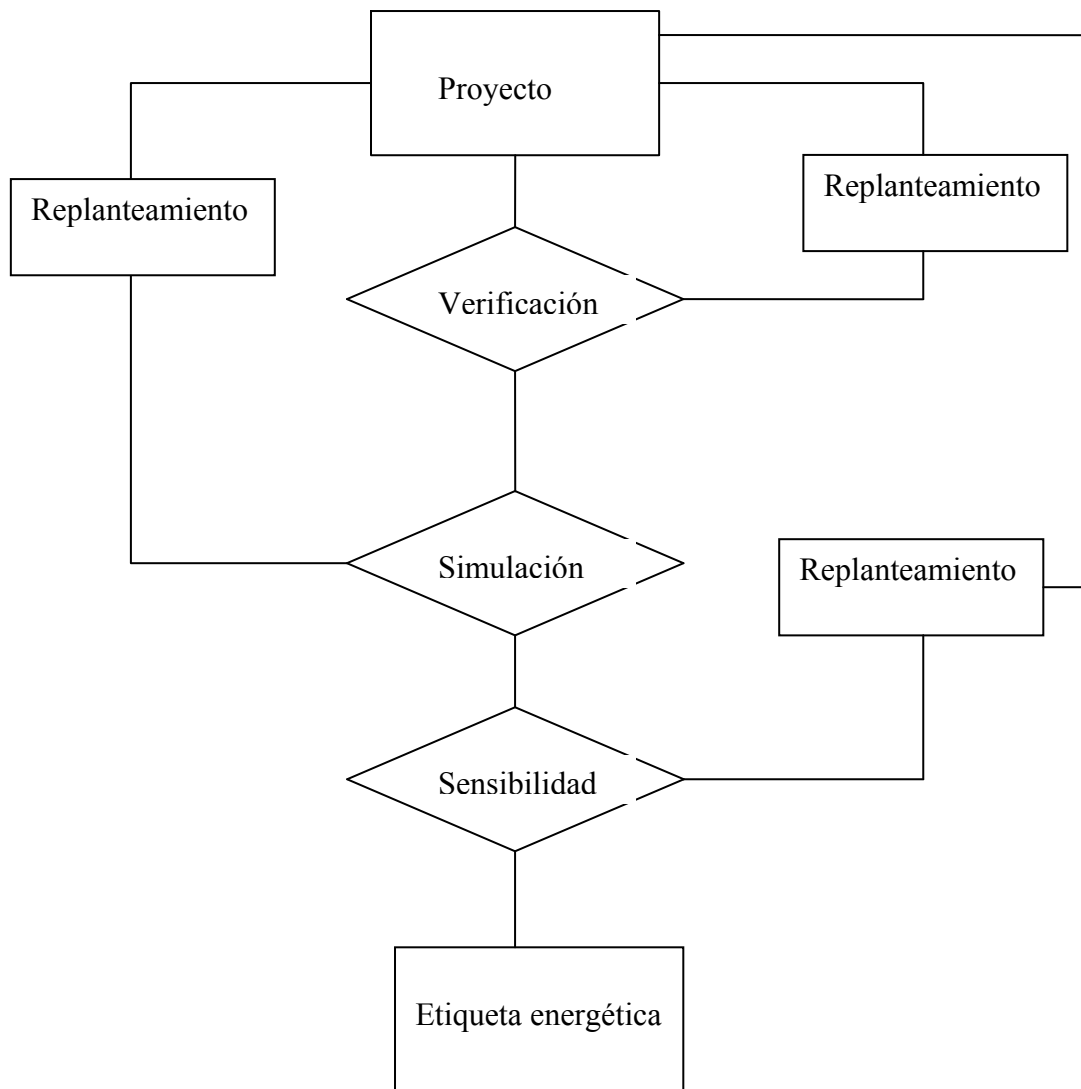


Figura 84: propuesta de diagrama de flujo incluyendo análisis de sensibilidad

Esta evaluación de sensibilidad se puede efectuar de varias maneras. Por ejemplo, estableciendo un conjunto de valores máximos de sensibilidad según los parámetros involucrados. Más sencillamente, poniendo una sensibilidad máxima para todos los parámetros. Para obtener un resultado más real, se podría por otro lado calcular las frecuencias de todas las variaciones involucradas y obtener un valor global de sensibilidad energética en general. Por ende, es posible buscar alguna propiedad global de los edificios, de la misma forma que los coeficientes globales de pérdida o ganancia, que represente o sea función de la sensibilidad. Un intento en esta dirección se hizo a través de la definición de la efusividad térmica global.

Un buen edificio, entonces, será el que obtenga una buena valoración de performance (caso base) y una sensibilidad relativamente baja a las variaciones inducidas en los parámetros que le describen. Es muy importante entender que esta resistencia a las variaciones, o robustez, no es una propiedad efímera que aparece en las simulaciones informáticas, sino una capacidad real del edificio de absorción de los cambios, sea en su piel (almacenando calor por ejemplo), sea en su funcionamiento (por ejemplo respondiendo rápidamente y con eficacia a cambios en ventilación, radiación, etc.)

La definición de la efusividad térmica nos permitió relacionar la estructura (masa, conductividad) con la sensibilidad general a cambios en las variables. Una primera evaluación puede entonces ser constituida por una estimación de esta propiedad.

Más allá de estas consideraciones, es evidente que la efusividad crece con la conductividad de los materiales, haciendo parecer inconciliables las dos exigencias, de bajo consumo y baja sensibilidad, por lo menos en los climas fríos y extremadamente fríos. Evidentemente, un bajo valor de conductividad significa poca capacidad para reaccionar rápidamente, eliminando en parte la importancia de la acumulación en la masa, aunque esta esté presente. Por eso, adquiere siempre más importancia la limitación si no eliminación de las variabilidades. Las más aleatorias, sobre todo, han de ser controladas estrictamente. Por esto en los últimos años se hizo un gran esfuerzo de investigación post-ocupación, sobre el comportamiento y la satisfacción de los usuarios. Parece que los tiempos ya reclamen una nueva y más flexible definición de confort, posiblemente relacionada con las situaciones transitorias e inestables. La parte conclusiva de este trabajo quiere entonces mirar a la actual investigación sobre confort y proponer algunas líneas de trabajo que pueden ser muy importantes a desarrollar en el futuro más próximo. Otro tema, relacionado con el anterior, es el del control. Evidentemente una redefinición de lo que es confortable tiene necesariamente que llevar a una nueva impostación de los aparatos de climatización, sean esos naturales o mecánicos, utilicen energía renovable o tradicional.

El tema de la robustez se encuentra tratado en la física aplicada a la arquitectura, por ejemplo en los trabajos de C. Ghiaus [Ghiaus 2006 A y B]. La resolución “robusta” de las dinámicas energéticas de los edificios puede eliminar algunos de los problemas que los casos analizados evidenciaron, principalmente los que pueden acabar en la generación de bifurcaciones en las funciones matemáticas representativas del comportamiento energético de los edificios. Para una extensa discusión sobre la teoría de las bifurcaciones, desde su definición por H. Poincaré hasta sus aplicaciones e investigaciones abiertas, se pueden consultar los trabajos del mismo Poincaré [Poincaré 1901], de A. M. Liapunov [Liapunov 1949], O. Gurel [Gurel et al. 1979] y M. Golubitsky [Golubitsky et al. 1985].

5.4 El confort en condiciones dinámicas

Las temáticas planteadas en esta tesis doctoral y la metodología de análisis propuesta evidencian la presencia de sensibilidad en la prestación energética de los edificios y de incertidumbre en las evaluaciones y simulaciones energéticas de los proyectos. Mucha de esta variabilidad depende de las características constructivas de los edificios, por lo que se propuso una doble evaluación y certificación, teniendo en cuenta la sensibilidad. Un buen edificio resultará ser entonces un edificio de bajo consumo y de baja sensibilidad. Sin embargo, queda pendiente el problema de la gran dependencia del usuario. Si la solución de construcciones alto efusivas puede parecer demasiado costosa y poco afín al estilo arquitectónico contemporáneo, resulta muy importante proponer alternativas, que de ninguna manera pueden confiar simplemente en los sistemas de regulación si no se plantea el problema del confort, y especialmente del confort en condiciones dinámicas. Mucho esfuerzo se está haciendo hoy en día para determinar a través de la estadística y de la psicología el origen de los comportamientos de los usuarios de un espacio arquitectónico. La definición de confort, no obstante, queda la propuesta por Fanger en 1970 [Fanger 1970] y es hija de un planteamiento bien específico de la cuestión. Sucesivas investigaciones se centraron en el desplazamiento de los resultados en otros lugares del mundo con respecto a los primeros donde se obtuvieron, y en la consideración de la parte adaptativo-cultural del confort [Fanger et al. 2002], [De Dear et al. 2002], [Marincic et al. 2005].

Falta, y la sensibilidad energética converge aquí con el tema del confort, la evaluación de las variaciones de expectativa que dependen de las dinámicas ambientales. Esta parece ser una de las perspectivas futuras de desarrollo más importantes de la investigación aquí presentada.

El confort térmico es solo parte del difícil bienestar que la arquitectura quiere conseguir para sus usuarios. Consideraciones generales sobre el confort nos pueden llevar a considerar fenómenos acústicos, lumínicos y térmicos como creadores de una condición ambiental; esta condición genera una sensación que puede acercarse más o menos a lo que se describe como confort. Hay dos dificultades en definir lo que es comfortable. Primero, los sentidos se influyen mutuamente, es decir que lo que se percibe con la vista puede influir sobre la sensación térmica y viceversa; segundo, no está muy clara la diferencia entre percepción y sensación, es decir que a veces el conocimiento de la presencia de un estímulo altera nuestra sensación, mientras que la percepción del estímulo siempre es la misma. Así, siempre pensando en las teorías psicológicas de la Gestalt, podemos proponer como ecuación general de valoración del confort la siguiente [Serra et al. 1995]:

$$S_g = \Phi(S_k) \quad (23)$$

$$S_k = f_{i=k}(P_i, P_i^t, F_c) + \sum_{j \neq k} f_j(P_j, P_j^t, P_j^e, F_c) \quad (24)$$

donde:

S_k es el método de cálculo del confort para cada caso (lumínico, acústico y térmico)

$f_{i=k}$ es la influencia de un parámetro determinado en el cálculo del confort k considerado

P_i y P_j son los parámetros específicos para cada sentido

P^t es la derivada temporal del parámetro específico i o j

P^e es la derivada espacial del parámetro específico i o j

F_c son los factores del confort aplicables en cada caso

$f_{i\neq k}$ es la influencia de los restantes parámetros en el cálculo del confort k considerado

S_g es la sensación de confort global, incluyendo los efectos sinestésicos

Φ es la función que relaciona los diferentes tipos de sensaciones

Valorar numéricamente estos efectos es muy difícil. Ya la simple valoración de la parte térmica tiene muchas variables. Además esta tesis se centra en los efectos dinámicos, que multiplican las variables y complican las verificaciones experimentales. Por ese motivo, a partir de ahora nos centraremos en el confort térmico, daremos unas indicaciones sobre su valoración en condiciones estáticas y pasaremos a describir los estudios llevados sobre las condiciones dinámicas, que constituyen la aportación experimental de la tesis al problema del confort.

La metodología más rigurosa de tratar el confort térmico es la propuesta en 1970 por P.O. Fanger. La idea es calcular el balance térmico del cuerpo humano y encontrar una manera de definir el confort a partir de este balance.

El balance normalmente se escribe así:

$$H - E_d - E_{sw} - E_{re} - L - K = S \quad (25)$$

donde

H	=	calor metabólico producido por el cuerpo
E_d	=	perdida de calor por difusión del vapor de agua a través de la piel
E_{sw}	=	perdida de calor por evaporación del sudor a la superficie de la piel
E_{re}	=	perdida de calor latente por respiración
L	=	perdida de calor sensible por respiración
K	=	transmisión del calor desde la superficie de la piel hasta la superficie externa del cuerpo vestido
S	=	solicitud térmica que recibe el cuerpo, normalmente igual a 0

Calor metabólico

El calor metabólico producido por el organismo se expresa con la

$$M = H + W \quad (26)$$

Donde M es la potencia metabólica producida y W es la potencia gastada en trabajo debido al movimiento. M y W se pueden relacionar a través de un rendimiento η :

$$W = \eta M \quad (27)$$

Así que el calor metabólico resulta

$$H = (1-\eta) M \quad (28)$$

M y η dependen del actividad desarrollada por la persona en objeto. Además, M es diferente para una persona u otra, dependiendo de la masa corporal. Por esto es frecuente referirse a la superficie de piel A_{Du} , que se puede calcular a través de

$$A_{Du} = 0.202 m^{0.425} h^{0.725} \quad (29)$$

Donde m es el peso y h la longitud de la persona.

Fanger propuso como unidad de medida de M/A_{Du} el met, equivalente a 50 kcal/h m^2 (58 W/m^2).

Perdidas por difusión de vapor de agua a través de la piel

Las perdidas por difusión de vapor de agua a través de la piel se pueden evaluar como

$$E_d = \lambda m A_{Du} (p_s - p_a) \quad (30)$$

Donde

- λ = 575 kcal/kg es el calor latente de vaporización del agua a 35 °C
- m = $6.1 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{h m}^2 \text{ mmHg})$ es el coeficiente de saturación de la piel
- p_s = presión de saturación, en mmHg, a la temperatura de la piel t_s
- p_a = presión parcial de vapor de agua en el ambiente, en mmHg

p_s se puede calcular como

$$p_s = 1.92 t_s - 25.3$$

en el intervalo de temperaturas 27-37 °C

p_a se puede calcular a partir de la humedad absoluta w_a (kg vapor / kg aire seco)

$$w_a = 0.622 p_a / (760 - p_a)$$

Perdidas de calor latente por respiración

Dependen del hecho que la humedad del aire varía cuando pasa a través de los pulmones:

$$E_{re} = V \lambda (w_{ex} - w_a) \quad (31)$$

Donde

V	=	ventilación pulmonar en kg/h (expresable como 0.0060 M)
λ	=	calor latente de vaporización del agua
w_{ex}	=	humedad absoluta del aire expirado
w_a	=	humedad absoluta del aire en el ambiente

Perdidas de calor sensible por respiración

Dependen del hecho que la temperatura del aire expirado es diferente de la temperatura del aire ambiente:

$$L = V c_p (t_{ex} - t_a) \quad (32)$$

Donde

V	=	ventilación pulmonar
c_p	=	calor específico del aire presión constante (0.24 kcal/kg °C a 20 °C)
t_{ex}	=	temperatura del aire expirado (normalmente 34 °C)
t_a	=	temperatura ambiente

Perdidas por conducción a través de los indumentos

Los indumentos presentan una resistencia térmica R_{cl} que normalmente se expresa a través de un índice adimensional I_{cl}

$$I_{cl} = R_{cl}/0.18 \quad (33)$$

Donde el valor 0.18 kcal/m² h °C corresponde al típico vestuario interior invernal (camisa, traje, zapatos).

El calor conducido a través de los indumentos resulta entonces:

$$K = A_{Du} (t_s - t_{cl}) / R_{cl} \quad (34)$$

Donde t_{cl} es la temperatura de los indumentos.

Este calor se supone que venga cedido al aire por radiación y convección. Hay que observar que no se considera que parte del calor será perdido directamente por convección y radiación desde la piel. Esta es una de las posibles mejoras que se pueden aportar a la ecuación de balance.

Calor perdido por radiación desde los indumentos

Se puede calcular como

$$R = A_{eff} \mu \sigma_0 (T_{cl}^4 - T_{mr}^4) \quad (35)$$

Donde

A_{eff} = superficie efectiva radiante
 μ = emisividad global del cuerpo vestido, se asume 0.97
 σ_0 = constante de Boltzmann, 4.96×10^{-8} kcal/m² h °C

A_{eff} se puede relacionar con A_{Du} a través de dos coeficientes:

$$A_{eff} = A_{Du} f_{cl} \quad (36)$$

f_{eff} es un factor que depende de la postura y expresa la presencia de interacciones radiantes entre partes del cuerpo, mientras f_{cl} es un factor que depende del vestuario, que tiene en general una superficie diferente de la del cuerpo desnudo.

El calculo de estos coeficientes no es nada sencillo y puede efectuarse a través de estudios fotográficos sobre indumentos y posturas. A veces se relaciona f_{cl} con I_{cl} , pero la aproximación no parece demasiado legítima, sobre todo porque no permite diferenciación entre indumentos para hombre y para mujer.

Calor perdido por convección desde los indumentos

Se expresa con

$$C = A_{Du} f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \quad (37)$$

Donde h_c es el coeficiente de convección, que se calcula diferentemente en el caso de ventilación natural y forzada. La ventilación forzada prevale por velocidades del aire mayores de 0.1 m/s.

$$h_c = 2.05 (t_{cl} - t_a)^{0.25} \quad \text{convección natural} \quad (38)$$

$$h_c = 10.4 v^{1/2} \quad \text{convección forzada} \quad (39)$$

la velocidad del aire tiene que ser la relativa, es decir que es función de la actividad de la persona.

Si el resultado del balance S no es 0, la temperatura interior del cuerpo puede bajar o subir respecto a los 37 grados que la caracterizan, causando hasta la muerte. Por esto el sistema de regulación actúa sobre los parámetros que puede controlar cuando el ambiente externo nos pone en situaciones de no equilibrio. Los parámetros bajo control del sistema de autorregulación son la temperatura de la piel y la tasa de sudoración. El cuerpo humano, entonces, puede cambiar la sección de los vasos sanguíneos y de los poros sudoríficos, y regular así los parámetros citados. Haciendo esto se pone afuera de las condiciones normales, y el cerebro registra posteriormente la sensación de no confort. Se pueden calcular los valores normales de temperatura de piel y de tasa de sudoración. Esos valores se pueden introducir en la ecuación de balance y el resultado será una S equivalente, que en realidad no se presenta, pero que se presentaría si el cuerpo tuviera fijados los valores confortables de los dos parámetros.

Los valores de confort de t_s y E_{sw} son

$$t_s = 35.7 - 0.032 H/A_{Du} \quad (40)$$

$$E_{sw} = 0.42 A_{Du} (H/A_{Du} - 50) \quad (41)$$

Esos valores son los de la hipótesis hecha por Fanger y confirmados por sus experimentos, pero no es cierto que sean los verdaderos: como ya discutido y como se profundizará más adelante sobre el confort influyen parámetros culturales y psicológicos que aquí evidentemente no se han tomado en cuenta.

La sollicitación S que se obtiene está relacionada con el concepto de PMV (predict mean vote = voto medio previsto) propuesto por el mismo Fanger. El PMV es una valoración

de los votos que las personas darían a un ambiente, en una escala desde -3 (mucho frío) hasta 3 (mucho calor). Estudios experimentales permitieron a Fanger afirmar que

$$PMV = \left(0.352e^{-0.042 \frac{M}{A_{Du}}} + 0.032 \right) S \quad (42)$$

A muchos años de distancia, ya podemos decir que la metodología tiene sin duda su importancia, y que es la más utilizada y conocida en el mundo para valoraciones de confort. No obstante, los valores experimentales de esta ecuación no corresponden necesariamente a la realidad. Muchas investigaciones han demostrado que existe un fenómeno de adaptación climática, por lo que gente que vive en diferentes lugares del mundo tiene una diferente idea de lo que es confortable y de lo que no lo es. Cada persona puede experimentar en su vida cotidiana de cómo la situación influya sobre su sensación térmica, aún cuando la percepción sea la misma. Si nos vamos a la playa, estaremos bajo el sol en unas condiciones que no aceptaríamos en nuestra vivienda o paseando por la ciudad. Si nos hacemos la sauna finlandés, nos parecerán una maravilla los cambios repentinos de temperatura que en otros lugares nos harían asustar. Así funciona nuestra psique, que relaciona lo que percibe con lo que sabe, a veces subconscientemente (se dice de los pintores flamencos, que no pintaran lo que *veían*, sino lo que *sabían*. A confirmación, se puede citar el hecho de que el Canaletto utilizaba la maquina óptica en la copia de la naturaleza, por no dejar influir sobre sus dibujos las cosas que sabía, ya que había sido escenógrafo en teatro y tenía una visión demasiado perfecta de lo que pintaba).

Otro problema es la variación continua del entorno, que altera nuestra percepción. Cuando vivimos una transición, mecanismos homeostáticos de regulación intervienen muy de prisa, y puede que el sistema de regulación térmica esté entre estos. Por otro lado, nos tardamos en darnos cuenta con el cerebro de lo que está pasando, dependiendo de cuanto inesperado sea el cambio. Por todo ello se necesita un estudio dinámico de los fenómenos aquí brevemente descritos. La idea fundamental puede ser que S haya de ser modificada según lo que pasa en el momento, además que según la historia de la persona considerada.

En formulas:

$$\| S' \| = \| S \| - \int_1^n \| S dt \| + \Delta \left\| \frac{\delta S}{\delta t'} \right\| \quad (43)$$

Existen diferentes maneras de acercarse al problema del confort térmico, la mayoría de experimentales, que tienen en cuenta la adaptación. G. Brager y R. De Dear hicieron en 1998 [Brager et al. 1998] una exhaustiva revisión de lo que la literatura científica había

producido hasta entonces sobre el argumento. La adaptación puede ser, según sus categorías, psicológica, fisiológica o determinada por el comportamiento, a su vez legado al ambiente cultural de proveniencia. La adaptación psicológica depende de las expectativas que las personas puedan tener. Es muy frecuente, en estudios realizados en los países subdesarrollados, de que la gente defienda su propia vivienda como si fuere el mejor lugar del mundo, con la sola justificación de que es lo único que tienen. Así, si se hace una encuesta sobre el confort que estos lugares proporcionan, los resultados serán excesivamente buenos, por la presencia de este condicionamiento. La adaptación fisiológica sería la más importante de aislar e interpretar, ya que es la más físicamente comprensible, dependiente de los tiempos de respuesta del organismo frente a los estímulos externos. Desafortunadamente, es muy difícil separar este efecto desde los demás.

La adaptación cultural es quizás la más relevante. Nos regulamos nuestro mismo funcionamiento a través de ella, por ejemplo regulando la velocidad de nuestros movimientos cuando hace más calor. Toda la vida de las comunidades, los horarios de trabajo, los sistemas de desplazamiento, los periodos de vacaciones responden a exigencias climáticas. Cuando cambiamos de ambiente, tardamos un periodo en acostumbrarnos a las nuevas situaciones. En las minas de Sur África, muchos europeos eran a riesgo de vida durante los primeros treinta días de trabajo, debido a su incapacidad de elevar la tasa de sudoración después de un límite. Pasado el mes, se acostumbraban. Este caso tal vez nos indique la posibilidad de un nivel más profundo de adaptación, quizás transmisible con tiempo al nivel genético. Los habitantes de Australia pueden dormir al exterior en condiciones mortales para un europeo.

Un estudio muy detallado de las influencias de la adaptación se puede encontrar en las actas de la conferencia “Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century” de 2001 [Jones 2001], [Roaf 2001], [Fanger et al. 2001], [Tanabe et al. 2001], [Humphreys et al. 2001].

Desde el punto de vista dinámico, se puede pensar que el cuerpo humano reaccione como un PID (o bien que un PID sea una reproducción fiel de nuestros mecanismos psico-fisiológicos). La parte derivativa sería la que más interesa el trabajo, y en primera aproximación fue tratada así durante un estudio en Italia, España y México [Palme et al. 2007 A y B]:

$$\| S' \| = \| S \| + \left\| \frac{\delta S}{\delta t} \right\| \Delta \quad (44)$$

La comparación se obtuvo calculando un pmv teórico y uno modificado, y buscando por regresión numérica un coeficiente de correlación adimensional. Los datos fueron obtenidos con encuestas a grupos de veinte estudiantes que asignaron un voto de confort cada minuto al principio y cada diez minutos durante una hora de experimento.

La fórmula de cálculo del pmv tradicional fue la conocida:

$$\text{pmv} = (0.352e^{M/A_{du}} + 0.032)S \quad (45)$$

El cálculo del pmv modificado se efectuó con la siguiente:

$$pmv = (0.352e^{M/A_{du}} + 0.032)[S + (S - S_p)\Delta/t] \quad (46)$$

La correlación se obtuvo con dos integraciones sucesivas, para determinar primero S_p y después el valor Δ . Los resultados se expresan en la tabla. La regresión se obtuvo con el programa EES (Engineer Equation Solver).

Tabla 54: coeficientes de corrección experimentales

	S	S_p	Δ
Roma	-9.45	10	-21
Barcelona	-9.30	10	-22
Hermosillo	-5.20	30	-20

El experimento demuestra la presencia de un factor de inercia térmica corporal, aunque en algunos casos aparezcan fenómenos de sobrenfriamiento. En general podemos esperar tres tipologías de respuesta: una inercial, una con sobreesensación de frío o calor, y una con un tiempo de transición a sensación más o menos constante.

En las figuras se enseñan las posibles respuestas a esperar. De todas formas se necesitará mucha más investigación sobre los asuntos levantados con estas hipótesis. Para más información, se pueden consultar los anexos E y F.

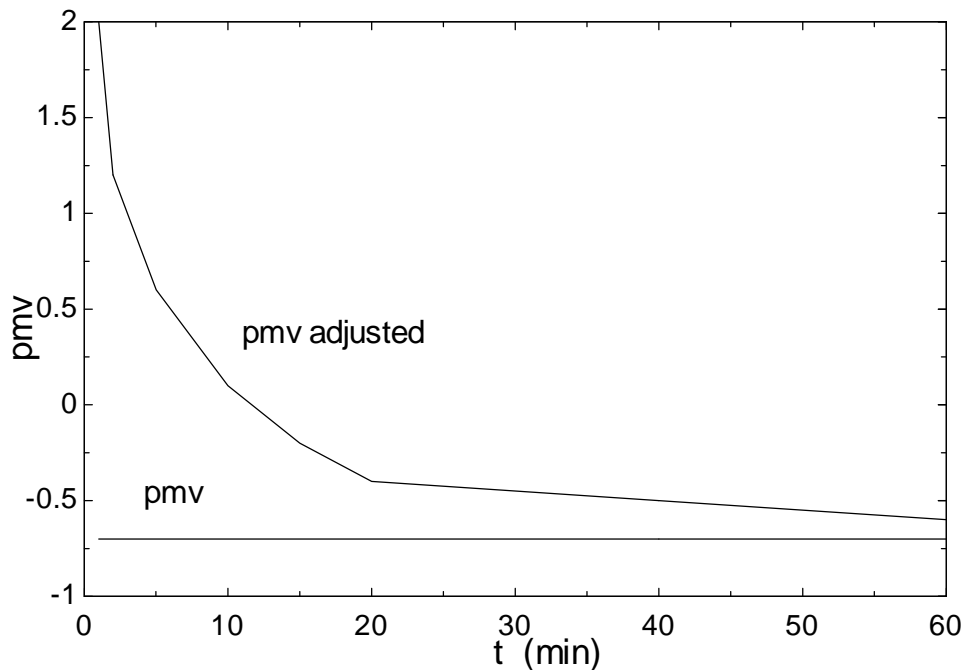


Figura 85: efecto de la inercia térmica corporal

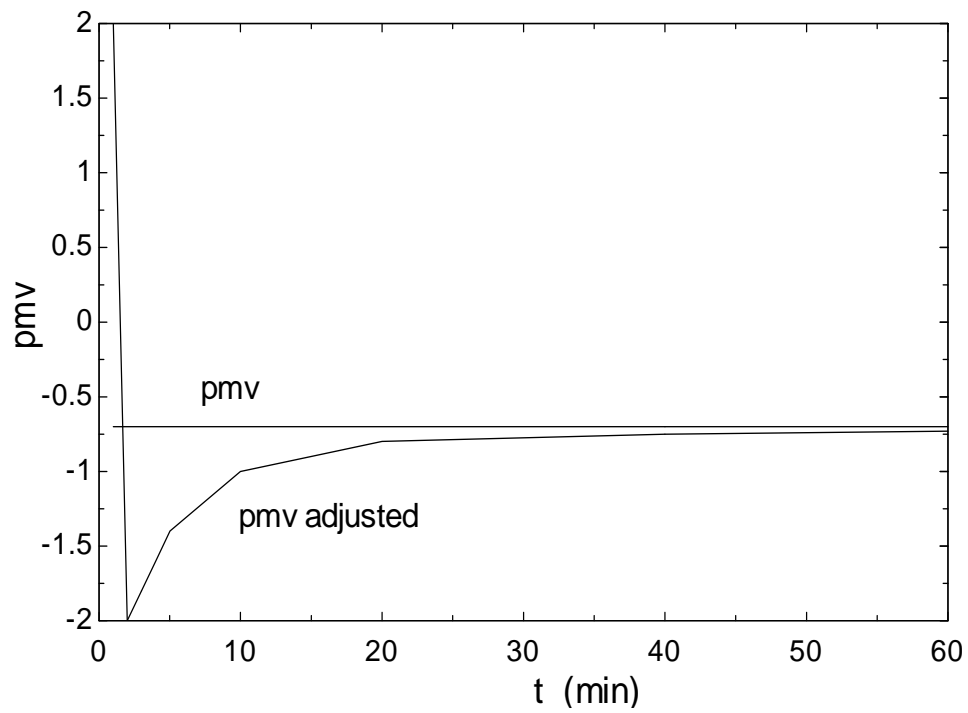


Figura 86: efecto de sobrenfriamiento

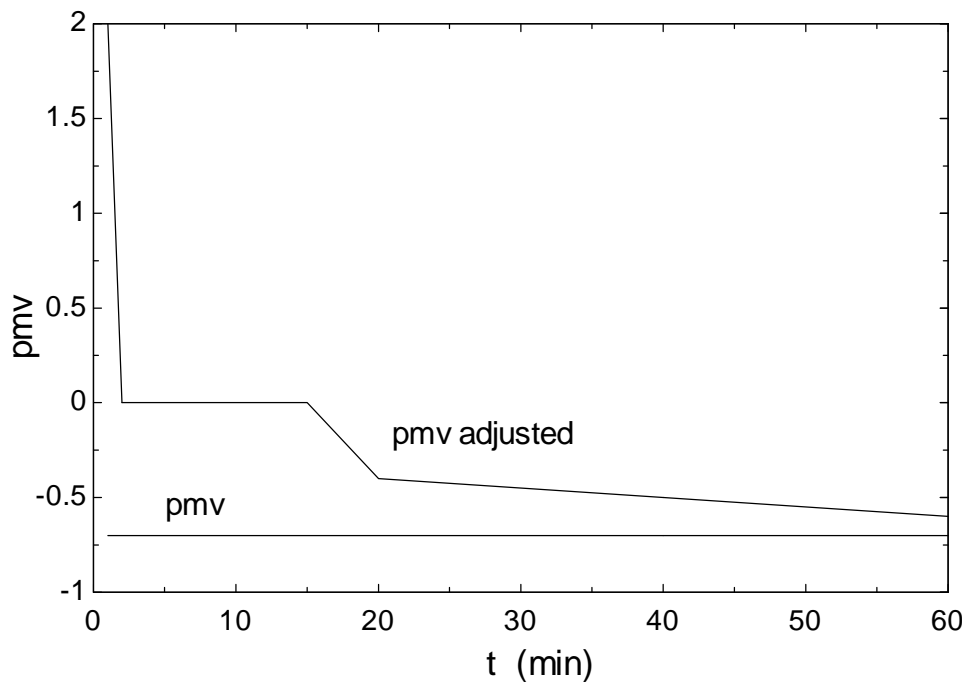


Figura 87: efecto de transición

Resumen:

En este capítulo conclusivo se pusieron las bases de futuras investigaciones en las temáticas relacionadas con la sensibilidad energética de los edificios. Particular énfasis se dedicó a la definición dinámica del confort y a la propuesta de la elaboración de una nueva estrategia de evaluación del funcionamiento energético de los edificios, relacionada con su capacidad para responder a variaciones repentinas incontrolables en los parámetros que regulan su comportamiento.

La efusividad térmica global, el coeficiente de sensibilidad promediado y un nuevo estándar de confort podrían ser los conceptos fundamentales sobre los cuales construir nuevas maneras de ver, proyectar y imaginar la arquitectura en el futuro más próximo.

La revisión de los estándares de confort, proceso ya en evolución, parece ser la línea de desarrollo privilegiada de esta investigación, que pretende abrir definitivamente el debate sobre la utilidad de una simulación dinámica cuando las temperaturas equivalentes representativas del bienestar, o los parámetros del confort en general, se calculan de forma estática, muchas veces sin tener en cuenta la adaptación, ni (en la totalidad de los casos) las componentes de transición entre espacios.

La presencia de factores psicológicos y culturales hace además urgente la necesidad de unos estudios estadísticos sobre las preferencias de las personas, teniendo en cuenta los efectos sinestésicos, en diferentes tipologías arquitectónicas de las que son usuarios. Esta evaluación podría llevar a determinar las frecuencias de las acciones necesarias a definir correctamente el coeficiente global de sensibilidad.

CONCLUSIONES

Como conclusión general de ese trabajo, se pueden hacer algunas afirmaciones y determinadas propuestas para sucesivas investigaciones y para la implementación de los resultados en las dinámicas de evaluación, simulación y certificación de los edificios. Especial atención merece, como ya analizado en el capítulo conclusivo, la definición de confort en régimen dinámico, a la que se dedicaron algunas investigaciones paralelas al desarrollo de este trabajo (anexos E y F).

En general, se puede evidenciar que:

1. Los resultados de las simulaciones demuestran que diferentes softwares son comparables solamente en pocos casos sencillos, es decir donde el perfil de usuario resulta relativamente estable, como es el caso de los bloques de vivienda. Esto implica que para evaluar correctamente un proyecto se necesite un análisis comparado con diferentes estrategias y que de ninguna manera se podrá tener confianza total en los resultados.
2. Los simuladores analizados resultan muy sensibles a cambios en los parámetros más relevantes de la simulación. Hace excepción el Archisun, que pero no permite editar el fundamental dato de ventilación, y que reduce el papel del usuario a una elección entre tres perfiles definidos. De todas formas, este resultado valora especialmente la herramienta por su sencillez y rapidez, además de su estabilidad. Siendo como un intermediario entre simulaciones detalladas y evaluaciones teóricas generales, resulta un óptimo instrumento para el trabajo del arquitecto, que a menudo debe decidirse sobre volúmenes, orientaciones y en general sobre la tipología constructiva del edificio. También resulta muy visual, tanto en la introducción de datos como en la visualización de resultados, cosa que hace de él una óptima herramienta educativa. Parece efectivamente inútil trabajar con detalle de transmisión de calor, como permiten simuladores más sofisticados, cuando el funcionamiento real del sistema se determinará por los valores de los parámetros más importantes, como los de intercambio de aire, cosa que hace Archisun preferible también en el momento de hacer ejecutivo el proyecto.
3. Los mismos edificios presentan una sensibilidad muy aguda a las variaciones en los parámetros dependientes del uso que se hace de ellos. Sin embargo, algunas tipologías arquitectónicas parecen ser más estables. La revaloración de la arquitectura tradicional, con sus materiales y sus estrategias constructivas, parece dar resultados de robustez mucho más altos respecto a nuevos edificios high-tech. Véase por ejemplo la comparación entre el Centro de cultura “Les Planes de Son” y la antigua masía de Vallforneres, comparables por clima, por uso e incluso por forma. La elección de la piedra, la presencia de pequeñas ventanas, el grosor de las paredes hacen de esa masía un edificio especialmente robusto, todo lo contrario del difícil equilibrio del moderno edificio de Son, muy expuesto a la radiación solar en invierno.

4. Se puede introducir el concepto de robustez de un edificio en sentido energético, directamente relacionado con la efusividad térmica y con los vectores sensibilidad. Incluso se puede pensar en su definición matemática como producto de conductividad volumétrica global y masa térmica, corregidos por los coeficientes del caso. También la misma efusividad térmica, definida como en capítulo anterior, podría ser directamente la unidad de medida de la robustez. En alternativa, a través de los vectores sensibilidad se podría definir una categoría o clase de robustez, comparable con el procedimiento actual de calificación.
5. Resulta importante incluir análisis de sensibilidad en la simulación y automatizarlos cuando es posible, como bien propusieron recientemente varios investigadores. La automatización del cálculo sólo aparece viable en Trnsys y en Archisun, pero por vías muy diferentes: en Trnsys aprovechando la iteración del cálculo y generando vectores sensibilidad; en Archisun a través de la generación (muy rápida y sencilla) de un valor “efusividad global”.
6. Resulta fundamental una radical revisión del mecanismo de certificación energética, que deberá fundarse en parámetros de energía consumida y de robustez más allá de las emisiones de CO₂ equivalentes. Este concepto es muy debatido y fue central en las últimas reuniones de PLEA, por ejemplo. Aparece claro como el problema de la arquitectura sostenible y pasiva empieza mucho antes de la actual urgencia de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y de agotamiento del combustible fósil. Sea bajo la mirada del confort, sea bajo la mirada de la energía en sentido amplio, arquitectura sostenible significa revisión del concepto de hacer arquitectura, puesta en discusión de la función del habitar, de los cánones estéticos y de la relación entre usuario y entorno construido.
7. Serán imprescindibles estudios sucesivos, los que tendrán como referencia el control sobre la dinámica ambiental, sea bajo el punto de vista de los sistemas, sea bajo el de las personas que viven la arquitectura. Este punto es esencial. Actualmente la tendencia es la siempre más abundante oferta de sistemas alternativos de generación de confort, más o menos aprovechadores de energía llamada “renovable”. Sin embargo, esto supone una ulterior reducción de la función del usuario en relación al ambiente donde vive, un gasto siempre mayor de tecnología y materiales (esos renovables o menos no se sabe muy bien...). Valga como ejemplo el generador de frío radiante a instalar en el techo, que necesita un sistema bomba de calor para enfriar el líquido y un controlador de humedad para evitar condensaciones (es decir un aparato eléctrico, aunque sólo cambie el calor latente del aire del ambiente y consume menos de un aparato normal de aire acondicionado).
8. El concepto de confort debe ser revisitado pensando en los fenómenos de adaptación y de transición. Lugares públicos como escuelas, hospitales, centros comerciales, y aún más lugares con fuertes fluctuaciones dinámicas como estaciones y aeropuertos o lugares con altísima densidad de ocupación como metropolitanas y trenes deberán ser replanteados, con previsión de espacios de transición y con la división de los diferentes espacios según el usuario que se encuentra en su interior. Las transiciones serán el punto crítico del buen

funcionamiento energético y al mismo tiempo de la sensación (actualmente en general muy desagradable) de bienestar interior.

9. La simulación energética, para ser fiable, deberá de subir los estándares de reproducibilidad y transparencia de los resultados que proporciona. Este objetivo es muy ambicioso y quizás imposible de alcanzar. Una buena línea de desarrollo parece ser, de todas maneras, la creación de unos ficheros de usuario a utilizar paralelamente y de manera parecida a los actuales ficheros climáticos. Esta investigación es actualmente en curso en algunas instituciones europeas y estadounidenses.
10. La evaluación energética, más allá de simulación y de certificación, deberá tomar en cuenta las desviaciones respecto a los estudios estáticos de funcionamiento. Eso se puede hacer con el sencillo cálculo del vector sensibilidad de las acciones más frecuentes o probables. Es importante que los jóvenes arquitectos y investigadores se formen sobre esas herramientas, acostumbrándose siempre más a hacer una evaluación general y un análisis de robustez.
11. Se necesita la creación de un nuevo canon estético y al mismo tiempo energético para la arquitectura del siglo 21. Como ya anticipado, el papel estético de la arquitectura deberá ir adaptándose a las nuevas condiciones ambientales, sociales y culturales del mundo a venir. Parece evidente que la responsabilidad ética será quizás el primer objetivo de la construcción, con la estética a su lado, para conseguir al mismo tiempo la funcionalidad y la belleza de ese hacer tan antiguo e importante que es la arquitectura.
12. La recuperación de la sabiduría de la arquitectura popular y tradicional parece buen camino para conseguir una eficiencia energética de los edificios en sí mismos, independientemente de las instalaciones sobrepuestas. Los casos aquí analizados lo demuestran bastante bien, y en general se puede constatar este hecho en la vida cotidiana en muchos lugares.
13. A nivel de formación, se presenta como siempre más urgente la transmisión del conocimiento entre disciplinas, y en la arquitectura sostenible la necesidad es aún más fuerte que en otros sectores. La experiencia de esta tesis doctoral ha sido también la de haber trabajado mucho en el campo de la integración de energías renovables, entonces creo que pude tocar con manos lo que realmente se hace, y es absolutamente poco. Sigue viva la idea de la instalación sobrepuesta y externa al proyecto, con la única pretensión de que sea “verde”, “de clase A” o, peor, que “tenga subvención”. Si la profesión real es tan diferente de la investigación... no iremos muy lejos.
14. La certificación según robustez permitirá pasar de lado las eficiencias de los sistemas convencionales y la tipología de combustible a la hora de determinar la buena o mala performance energética de la edificación. Sería de verdad importante desvincular las emisiones de la bondad energética o sostenible de los edificios. La robustez puede contribuir fuertemente en este sentido.

CONCLUSIONS

As a general conclusion of this work, it is possible to do some affirmations and some propositions for future researches and for the implementation of the results in the dynamic of building energy efficiency evaluation, simulation and certification.

Especially attention has to have, as discussed in the final chapter, the definition of comfort in dynamic conditions, to what were dedicated some researches at the time of developing this work (annex E and F).

Generally, it can be said that:

1. The results of simulations show that different softwares are comparable only in a little of simple cases, when the user's profile results to be relatively stable, such as in the case of housings. This fact implicates that, to correctly evaluate a project, it needs a comparative analysis between different strategies and that it will be impossible to believe totally the result.
2. Analysed simulators result to be very sensible to changes in the main parameters of simulation. Archisun is the exception, but this software does not permit to edit the important ventilation dates, and reduce the role of the user to a selection between tree defined profiles. However, this result exploits especially the software for its simplicity, rapidity and stability. As it is like an intermediate between general analysis and detailed simulations, it results to be a great instrument for the work of the architect, who has often to decide over volume, orientations and generally over the type of construction of the building. Moreover, it results to be very visual, as in the dates introduction as in the result visualization, this fact makes of it a great educative software. It seems really have zero utility to work with detailed heat transmission, like with more sophisticated simulators, when the real performance of the system will be determined from values of the main parameters, as the parameters regarding the air interchanges, fact that makes Archisun really suitable for the executive project too.
3. The same buildings have a high sensitivity to variations in the parameters dependent on the use that one does of it. However, some architectural typologies seem to be more stable. To exploit traditional architecture, with its materials and constructive strategies, seems give results more robust respect to new high tech buildings. See for example the comparison between the Planes de Son Nature Center and the retrofit of the old massia of Vallforners. The buildings are comparable for use, climate and form. The selection of the stone, the small windows and the thickness of the walls make this building as especially robust, just the opposite of the difficult dynamical equilibrium of the modern Planes de Son building, very exposed to radiation.

4. It is possible to introduce the concept of energetic robustness of a building, directly related to the thermal effusivity and to the sensitivity vectors. Even is possible to think on its mathematical definition as product of global volumetric conductivity and thermal mass, with the correction coefficient if necessary. The same global thermal effusivity, defined in the previous chapter, can be directly regard as the unit of robustness. Alternatively, using the sensitivity vectors it will be possible to define a category or class of robustness, comparable with the usual qualification process.
5. It seems very important to include sensitivity analysis in the simulation tools and make it automatic if possible, as proposed recently various researchers. The automatic tool only seems really viable in the case of Trnsys and Archisun, but in very different ways: in Trnsys using the iteration of the calculation and generating sensitivity vectors; in Archisun with the generation (very fast and simple) of a global effusivity value.
6. It is fundamental a radical revision of the energy certification mechanism, that will have to found in parameters of consumed energy and robustness more than in the CO₂ equivalent emissions. This concept is very debated nowadays and was central in the last reunions of PLEA, for example. It seems clear that the problem of the sustainable and passive architecture starts much before the actual urgency of reduction of CO₂ emissions and of the combustible fossil depletion. As under the comfort point of view, as under the energy point of view, sustainable architecture signifies revision of the concept of doing architecture, discussion of the function of the housing, of the esthetical canons and of the relation between users and building environment.
7. There will be unavoidable future investigations, that will consider as a reference the control over the environmental dynamic, as under the system point of view, as under the user one. This point is essential. Nowadays, tendency is the copious offer of alternative systems generating comfort, some using the energy named “renewable”. However, this fact suppose another reduction of the user’s function related to the ambient on live, a bigger and bigger cost of technology and materials (these ones renewable or not we don’t know at well...). As an example, the cooling roof that use a heat pump to cool and a humidity controller to avoid condensation (is to say an electrical machinery that change the latent energy of the air consuming electricity).
8. The concept of comfort has to be changed, thinking in the dynamical phenomena of adaptation and transition. Public spaces as schools, hospitals, commercial buildings, and moreover spaces with high dynamical fluctuations as stations and airports or spaces with enormous occupation density as subways and trains have to be reconsidered, with prevision of transition spaces and with the division of the different zones depending on the user that use it. Transitions will be the critical point of the good energy performance and at the same time of the sensation of well-being (now really very uncomfortable).

9. Energy simulation, to be credible, has to rise the repeatability and transparency standards of the results. This goal is very ambitious and maybe impossible to achieve. A good way of development seems to be the creation of some user's files, similar to the current climatic files. This research is currently on course in some European and USA Universities.
10. Energy evaluation, beyond simulation and certification, has to take into account deviations respect to the steady-state performance studies. It is possible to do with the simple evaluation of the sensitivity vector of the actions more frequent and probable. It is very important that the young architects and researchers studied these tools, going even more used to do a general evaluation and a sensitivity analysis of robustness.
11. It is necessary the creation of a new aesthetic and energy canon for the architecture of the 21th century. Architecture will have to go use to the new environmental, social and cultural future world's conditions. Seems evident that ethical responsibility will be the first aim of the construction, with aesthetic, to reach at the same time functionality and goodness of this doing as old as important that is architecture.
12. To recover the old popular and traditional knowledge seems a good way to reach energy efficiency of the building themselves, independently to the over placed installations. Cases analysed here demonstrate it as well, and generally it is possible to see this fact in the all-day life in few places.
13. At the level of the formation, it seems ever more urgent the transmission of knowledge between disciplines, and the sustainable architecture needs it more than other sectors. The experience of this PhD thesis was a interdisciplinary work in the renewable energy sector, so I think that I have touched with my hands that is really on going, and this is absolutely insufficient. There are still alive the idea of the installation over constructed and external to the project, with the unique pretension of to be "green", "class A" or, worse, that "has a subvention". If the real profession is so different from the research.... We don't go so far away...
14. Robustness certification will permit to not consider efficiency of the conventional systems and typology of combustible at the moment to determinate the good or poor performance of the buildings. It will be really important to separate the CO₂ emissions evaluations from the energy goodness or sustainability of the construction. Robustness concept will help highly to this goal.

Bibliografía

- Arham, H.; 2006; *La valoración de la respuesta térmica en edificios, la repercusión dinámica de la envolvente*; Tesis Doctoral; Barcelona. <http://tdx.cesca.es/>
- Ashcroft D., Mermin H.; 1976; *Solid State Physics*; Sanders College Publishing; New York.
- Bollnow, O. F.; 1969; *Hombre y espacio*; Ed. Labor; Barcelona.
- Bateson, G.; 1972; *Steps to an ecology of mind*; Chandler publishing Company; New York.
- Borgonovo, E.; 2007; *A new uncertainty importance measure*; Reliability Engineering and System Safety 92, pp. 771-784.
- Brager, G., De Dear, R.; 1998; *Thermal adaptation in the built environment: a literature review*; Energy and Buildings 27, pp. 83-96.
- Bruke, K., Kenny, P., Finn, D.; 2005; *The transparency and repeatability of building energy performance certification*; Dynamic analysis, simulation and testing applied to the energy and environmental performance of buildings Conference; Athens.
- Carrier AIC; 1996; *Manual de aire acondicionado*; Ed. Marcombo; Barcelona;
- Carslaw, H. S.; *Conduction of heat in solids*; Clarendon Ed.; Oxford; 2001
- Clevenger, C., Haymaker, J.; 2006; *The impact of the building occupant on energy modelling simulations*; Joint international conference on computing and decision making; Montreal.
- Coch, H.; 2003; *L'utilitat dels espais inutils*; Tesis Doctoral; Barcelona. <http://tdx.cesca.es/>
- Comini, G.; 1997; *Lezioni di termodinamica applicata*; SGE Edizioni; Padova.
- Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M., Griffith, B. T.; 2005; *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*; 9th IBPSA Conference; Montreal.
- David, A.; 1973; *La cybernétique et l'humain*; Gallimard Ed.; París.
- De Dear, R. ; Brager, G. ; Cooper, D. ;1997 ; *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference* ; final report ASHRAE RP-884 ; American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc, and Macquarie Research, Ltd.

- De Dear, R., Brager, G.; 2002; *Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55*; Energy and Buildings 34, pp. 549-561.
- De Groot, E.; 2008; *Dutch research into user behaviour in relation to energy use of residences*; 25th Passive and Low Energy Conference; Dublin.
- De Wit, S.; 1997; *Identification of the important parameters in thermal building simulation*, Journal of Statistical Computation and Simulation 57, pp. 305-320.
- De Wit, S.; 2001; *Uncertainty Analysis of Building Design Evaluations*, 7th International Building Performance Simulation Conference; Rio de Janeiro; Book of Proceedings, p. 319.
- Dou, A.; 1970; *Fundamentos de la matemática*; Labor Ed.; Barcelona.
- Fanger, P. O.; 1970; *Thermal Comfort*, Danish Technical Press, Copenhagen.
- Fanger, P. O., Toftum, J.; 2001; *Thermal comfort in the future – excellence and expectation*; Moving thermal comfort standards into the 21st century; Windsor; Conference Proceedings, pp. 11-18.
- Fanger P. O., Toftum, J.; 2002; *Extension of PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates*; Energy and Buildings 34, pp.533-536.
- Feynman, R.; 1964; *Lectures on physics*; Addison-Wesley; New York.
- Fukazawa, T.; 2008; *Thermal comfort zone in daily life considering adjustments by residents*; 25th Passive and Low Energy Conference; Dublin.
- García Casals, X.; 2004; *Regulación y certificación energética de edificios: asignatura pendiente en España*; Informe interno del Instituto de Investigaciones Tecnológicas.
- García Casals, X.; 2009; *Efecto del dimensionado de los equipos: certificación energética de edificios*; Era solar: energías renovables 149, pp. 40-54.
- Giusti, E.; 1983; *Analisi matematica 1*; Bollati Borlinghieri Ed.; Torino.
- Giusti, E.; 1983; *Analisi matematica 2*; Bollati Borlinghieri Ed.; Torino.
- Ghiaus, C.; 2003; *Free-running building temperature and HVAC climatic suitability*; Energy and Buildings 35, pp. 405-411

- Ghiaus, C., Allard, F.; 2003; *Statistical interpretation of the results of buildings simulation and its use in design decisions*; 8th International IPBASA Conference; Eindhoven; Book of Proceedings, pp. 387-390
- Ghiaus, C.; 2006 A; Experimental estimation of building energy performance by robust regression; *Energy and Buildings* 38, pp. 582-587.
- Ghiaus, C.; 2006 B; *Equivalence between the load curve and the free-running temperature in energy estimating methods*; *Energy and Building* 38, pp. 429-435.
- Golubitsky, M., Schaeffer, D.; 1985; *Singularities and groups in bifurcation theory*; Springer-Verlag Editions; New York.
- Gurel, O. Rössler, O.; 1979; *Bifurcation theory and applications in scientific disciplines*; The New York Academy of Science; New York.
- Heidegger, M.; 1951; *Bauen, wohnen, denken*; conference available as Construir, habitar, pensar; Apuntes ETSAB 1995; Barcelona.
- Humphreys, M., Nicol, J. F.; 2001; *The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments*; Moving thermal comfort standards into the 21st century; Windsor; Conference Proceedings, pp. 406-430.
- Knowles, R.; 1974; *Energy and form*, MIT press.
- Isalgué, A.; Cusidó, J. A., Puigdomènech, J., Roset, J.; 1985; *Distribution of the energetic needs of multi-storey buildings in mediterranean climate*; 2^e Journées Internationales de Thermique; Rabat.
- Isalgué, A.; 1994; *Les énergies viatjan als edificis* ; UPC Edicions; Barcelona.
- Isalgué, A.; 1997; *Física de la llum y del só*; UPC Edicions; Barcelona.
- Isalgué, A., Scudo, G.; 1997; *Scambi energetici terra-cielo*; Ambiente costruito n. 3; pp. 17-22.
- Jones, B. W.; 2001; *Capabilities and limitations of thermal methods*; Moving thermal comfort standards into the 21st century; Windsor; Conference Proceedings, pp. 112-120.
- Liapunov, A. M.; 1949; *Problème général de la stabilité du mouvement* ; Princeton University Press ; Princeton.
- Lutzenhiser L.; 1993; *Social and Behavioral Aspects of Energy Use*; Annual Review of Energy and Environment, 18, pp. 247-289.

- Lyotard, J. F.; 1979; *La condition postmoderne*; Les edicions de minuit; Paris.
- Mach, E.; 1833 ; *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*; Praga.
- Mahdavi, A.; 2008; *Observation-based models of user control actions in buildings*; 25th Passive and Low Energy Conference; Dublin.
- Mara, T., Tarantola, S.; 2008; *Application of global sensitivity análisis of model output to building thermal simulation*; Journal of building simulation, vol. 1, pp. 290-302.
- Marín, E.; 2006; *Thermal Physics Concepts: The Role of the Thermal Effusivity*; The Physic Teacher 44, pp. 432-434.
- Marincic, I.; 1999; *Respuestas térmicas en edificios, el control térmico a través de la climatización natural*; Tesis Doctoral; Barcelona. <http://tdx.cesca.es/>
- Marincic, I., Ochoa, J. M., Isalgué, A.; 2005; *Thermal comfort educational software for hot climates*; 1st Passive and Low Energy Cooling Conference, Santorini.
- Neila, J. F.; 2004; *Arquitectura bioclimática*; Ed. Munilla-Lería; Madrid.
- Nicol, F., Humphreys, M.A.; 2002; *Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings*; Energy and Buildings 34; pp. 563-572.
- Pagés, A., Palme, M., Isalgué, A., Coch, H.; 2008; *Energy consumption and CO₂ emissions in construction and use of buildings according to floor area*; World Renewable Energy Congress X, Glasgow.
- Palme, M.; 2003; *Il tocco del visibile*; Tesi di Laurea; Trieste. Fucine Mute n. 61, www.fucine.com
- Palme, M., Isalgué, A., Coch, H., Serra, R.; 2006 A; *Energy consumption in small flats*; World Renewable Energy Congress IX, Firenze.
- Palme, M., Isalgué, A., Coch, H., Serra, R.; 2006 B; *The importance of the user's actions on the sensation of comfort in buildings*; 23th Passive and Low Energy Architecture Conference; Geneve; Book of proceedings, vol. I, pp. 393-398.
- Palme, M., Isalgué, A., Coch, H., Serra, R.; 2006 C; *Robust design: a way to control energy consumption from human behaviour in buildings*; 23th Passive and Low Energy Architecture Conference; Geneve; Book of proceedings, vol. I, pp. 311-316.

- Palme, M., Isalgué, A., Coch, H., Serra, R.; 2006 D; *On the influence of user's actions on the thermal performance of buildings*; 4th European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings; Lyon; Book of proceedings, vol. I, pp. 13-18.
- Palme, M., Isalgué, A., Coch, H., Marincic, I., Fanchiotti, A., Serra, R.; 2007 A; *Comfort evaluation: the relevance of the transition time*; AsiaSustainability Conference; Hanoi.
- Palme, M., Isalgué, A., Coch, H., Marincic, I., Fanchiotti, A., Serra, R.; 2007 B; *Dynamic sensation of comfort in buildings: the temperature changes effects*; Passive and Low Energy Cooling Conference; Crete; Book of proceedings, vol. I, pp. 746-750.
- Palme, M.; 2007 C; *La simulación energética de los edificios*; Habita Conference, Hermosillo. Conferencia.
- Palme, M., Isalgué, A., Coch, H., Serra, R.; 2008; *Building sensitivity to climatic fluctuations and user's actions: a challenge for high-tech buildings*; 25th Passive and Low Energy Conference, Dublin.
- Poincaré, H.; 1902 ; *Figures d'équilibre d'une masse fluide*; Ed. Gauthier Villars; Paris.
- Rius, F. ; 2008 ; *Centre mediambiental a les Planes de Son, Pallars Sobirà*; Quaderns d'Arquitectura i Urbanismo n. 257; Barcelona.
- Roaf, S.; 2001; *Standards for sustainability*; Moving thermal comfort standards into the 21st century; Windsor; Conference proceedings, pp. 1-10.
- Russel, B.; 1945; *History of western philosophy and its connection with political and social circumstances from the earliest times to the present day* ; Allen and Unwin Ltd ; London.
- Saltelli, A., Ratto, M., Tarantola, S, Campolongo F.; 2004; *Sensitivity analysis in practice*; Ed. John Wiley; New York.
- Schiano-Phan, R.; 2008; *Post-occupancy evaluation of not-domestic buildings using draught cooling: case studies in US*; 25th Passive and Low Energy Conference; Dublin.
- Sobol, I.; 1993; *Sensitivity analysis for nonlinear mathematical models*, Mathematical Modelling and Computational Experiment, vol. 1, pp. 407-414.
- Sennet, R.; 1997; *Carne y Piedra: el cuerpo y la ciudad en civilización occidental*; Alianza Ed.; Madrid.

- Serra, R., Coch, H.; 1995; *Arquitectura y energía natural*, Ed. UPC; Barcelona.
- Serra, R.; 2004; *Arquitectura y clima*; Gustavo Gili Ediciones; Barcelona.
- Smil, V.; 1999; *Energies*, MIT Press.
- Tanabe, S., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y., Konishi, M.; 2001; *A comprehensive combined analysis with multi-node thermoregulation model (65MN), radiation model and CFD for evaluation of thermal comfort*; Moving thermal comfort standards into the 21st century; Windsor; Conference proceedings, pp. 122-134.
- Tanizaki, J.; 1933 ; *Éloge de l'ombre* ; Chuokoron-Sha.
- Vernon, M. D.; 1962; *The psychology of perception*; Penguin Books; Harmondsworth.
- Westphal, F., Lamberts, R.; 2005; *Building simulation calibration using sensitivity analysis*; Building Simulation conference; Montreal; Book of proceedings, pp. 1331-1339.
- www.codigotecnico.es (Feb. 2010) - programa Lider y manuales
- www.mytic.es (Feb. 2010) - programa Calener VYP y GT y manuales
- www.ecotect.com (Feb. 2010) - programa Ecotect y manuales
- www.trnsys.com (Feb. 2010) - programa TRNSYS y manuales
- www.upc.es/aie (Feb. 2010) - programa Archisun y manuales

ANEXOS

Anexo A

Energy consumption in small flats;
World Renewable Energy Congress
IX, Firenze, Italia, 2006.

Energy consumption in small flats

M. Palme, A. Isalgué, H. Coch, R. Serra

AiEM, School of Architecture of Barcelona, Av. Diagonal No. 649, 08028 Barcelona
(Spain)

ABSTRACT

Recent years have seen an increase in economy-minded small flats, which have furthermore been proposed as a solution for getting young people to move out of their parents' homes. This study examines the sensitivity of the computed energy consumption of these flats to changes in ventilation and comfort requirements, based on the occupant density.

For a large flat in a cold climate, if one assumes average occupancy, the need for ventilation represents a relatively small portion of the total energy bill per person, though the downside is that heat loss through the skin of the flat is considerable. In a very small flat, the surface area of the skin is significantly reduced, as are losses through the skin, though this causes ventilation needs per person to increase for health and comfort. In warmer climates, however, densely occupied flats might not be very pleasant without a substantial amount of ventilation.

Assessments of the net energy flow in model flats in a given city suggest the existence of a "preferred configuration" or optimal occupant density, which depends on issues related to comfort and health considerations, as well as on the characteristics of the local climate.

INTRODUCTION

Recent years have seen an increase in economy-minded small flats, which have also been proposed as a solution for getting young people to move out of their parents' homes. In this study, we analyse the ramifications of this phenomenon on energy consumption, and partially investigate the sensation of comfort that is generated inside these spaces. We consider the net energy flow, in addition to issues affecting comfort, space and privacy, and ways of economising the construction, maintenance and living process. A more complete study, however, would also have to consider issues pertaining to business, economy and politics. Herein, we limit our work to issues concerning architecture and energy consumption that help to create an awareness of both energy consumption and comfort.

The case study we focused on is represented by a flat in a block of flats. We compare different internal layouts and sizes that share an identical external appearance. To facilitate the assessment of solar gain, we put the orientation of the main façades as North and South. Finally, the study entails an analysis of the winter thermal behaviour of different internal layouts in order to determine which offered the best performance in terms of energy savings.

ANALYSED CASE

Prior to starting, we define the dimensions and geometry of the flats that are to be compared (Figure 1). To obtain a representative comparison, we selected flats of 30, 60, 90 and 120 m² that share identical interior heights of 2.6 m and comparable locations in the

block (in the central part). We are thus able to assess their thermal behaviour; the relevant parameters that appear in the equations are underlined. In particular, discussion is made herein regarding the importance of ventilation in small flats.

Furthermore, we consider the significance of the occupation density, and assess the energy saving performance based on different numbers of inhabitants in the flats. The results show evidence of an optimal configuration in terms of density.

Finally, we make some discussion of the relevance of architectural, psychological and comfort factors. The situation in summer is also analysed in part to further illustrate the sensation of comfort inside the flats.

From a psychological point of view, the only conclusion we draw is that the residents' sensation of space and privacy cannot be overlooked in architectural designs and in the economics of property development because of its importance for the residents' satisfaction and the decisions they will ultimately make.

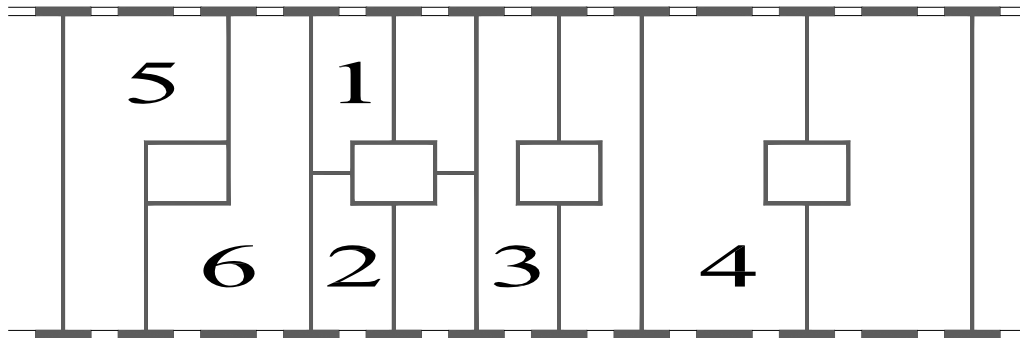


Figure 1.- Plant of the considered flats (see the text)

PARAMETERS RELEVANT TO ENERGY CONSUMPTION

The main parameters relevant to assessing energy consumption in a building are as follows [2, 3]:

- The thermal resistance (or the loss coefficient) of the walls and windows
- The solar radiation contribution (direct and indirect)
- The ventilation needed to guarantee comfort
- The presence of electrical apparatuses and people (internal heat gains)
- The climatic situation (external temperature, wind, solar orientation, humidity)

All these factors are inserted in an equation that may be solved in terms of consumption. To obtain a comparison between the various flats, the terms are expressed here in W/m^3 .

The equation used to calculate the energy consumption is the following [3]:

$$M \frac{dT_i}{dt} = I + D + G (T_e - T_i)$$

where T_i is a representative internal temperature, T_e is the external temperature, I is a term for radiation gains, D stands for internal gains, G is a loss coefficient (which includes thermal conductivity and air exchanges) and M is the thermal mass. In average conditions, or when the accumulation term in the mass is not very significant, the energy

consumption needed to obtain a desired interior temperature T_i can be computed by [3]:

$$D_c = G (T_i - T_e) - I - D_0$$

where D_c corresponds to the heating/cooling contributions needed and D_0 corresponds to the other energy dissipation contributions (including lighting). The D_0 is evaluated at the following values: 2, 1.2 and 1 W/m^3 in cases 1-2, 3 and 4-5-6 respectively [3]. The loss coefficient, G , is divided into two parts: one corresponding to

thermal losses through walls and windows, and the other to ventilation or air exchanges [2, 3, 4]. The importance of these terms is different in small and large flats; the need for ventilation is greater in small flats in particular.

For instance, the ASHRAE 62 guide (2000) [1] estimates 50 l/s for the kitchen, 25 l/s for the bathroom, 5 l/s/100 square metres of conditioned floor space, and 7.5 l/s per person. Thus, the air needs are as indicated in table 1 for different flats:

Table 1: determination of the ventilation coefficient from ASHRAE norms

Flat No.	m ³	kitchen (m ³ /h)	bathroom (m ³ /h)	surface (m ³ /h)	persons (m ³ /h)	total (m ³ /h)	rh (h ⁻¹)
1	78	180	90	5.4	54	329.4	4.2
2	78	180	90	5.4	54	329.4	4.2
3	156	180	90	10.8	81	361.8	2.3
4	312	180	180	21.6	135	516.6	1.6
5	234	180	90	16.2	108	394.2	1.6
6	234	180	90	16.2	108	394.2	1.6

These results are obtained for a full day's occupancy, so we consider smaller values in the future: for Flats 1 and 2, $rh = 3$; for Flat 3, $rh = 1.2$; and for Flats 4, 5 and 6, $rh = 1$ in a temperate climate; $rh = 2, 0.8$ and 0.6 (all rh in h^{-1}) respectively in a cold climate. The G ventilation factor is obtained using the following simple formula: $Gv = 0.3 rh$ [3].

As the G conductivity factor depends on the walls and windows, we decided to consider good insulation for the cold climate, and an average amount of insulation for the temperate climate.

The K factors are as follows [4]: 0.49 W/m^2C for the external walls, 1.29 W/m^2C for the internal walls and 5 W/m^2C for the windows in the temperate climate; and 0.28 W/m^2C for the external walls, 1.06 W/m^2C for

the internal walls and 2.5 W/m^2C for the windows in the cold climate.

Then the G factor is obtained using Equation [3, 4]:

$$G = (K_{ext} * S_{ext} + K_{win} * S_{win} + K_{int} * S_{int} / 2) / V$$

where V is the volume.

Term I depends on the solar radiation and on the absorption and transmission factors in the walls and windows. We considered the climate of Barcelona as representative of a temperate climate, and that of the Pyrenees as representative of a cold climate. The temperate- and cold-climate flats are thus solely distinguished by the different thicknesses of their respective walls: they were considered as being located at the same latitude and solar declination. Table 2 shows the energy consumption obtained per person.

Table 2: consumption per person in temperate climate

G (W/m ³ °C)	Gv (W/m ³ °C)	Gt (W/m ³ °C)	I (W/m ³)	D (W/m ³)	Ti-Te	Flat No.	D per user (W)
1.15	0.90	2.05	0.00	22.66	12	1	883.74
1.15	0.90	2.05	2.99	19.66	12	2	766.85
1.09	0.36	1.45	1.49	14.70	12	3	764.50
0.87	0.30	1.17	1.49	11.60	12	4	723.96
0.97	0.30	1.27	1.16	13.08	12	5	765.18
0.97	0.30	1.27	2.32	11.92	12	6	697.32

Table 3: consumption per person in cold climate

G (W/m ³ °C)	Gv (W/m ³ °C)	Gt (W/m ³ °C)	I (W/m ³)	D (W/m ³)	Ti-Te	Flat No.	D per user (W)
0.89	0.60	1.49	0.00	35.45	25	1	1382.55
0.89	0.60	1.49	2.06	33.38	25	2	1301.93
0.84	0.24	1.08	1.03	24.89	25	3	1294.33
0.66	0.18	0.84	1.03	19.19	25	4	1197.51
0.74	0.18	0.92	0.75	21.25	25	5	1243.12
0.74	0.18	0.92	1.50	20.50	25	6	1199.25

The relatively large energy consumption of the small flats is due to their greater need for ventilation, which does not decrease proportionately with the decrease in space due to the presence of a full kitchen and bathroom.

The best behaviour seems to be that of a 90 m² flat with two windows facing south. Even the largest flat (120 m²), however, exhibits a better performance than the smallest flat facing south. For cold climates, the largest flat seems to have the best behaviour (table 3).

THE RELEVANCE OF OCCUPANCY

The previous results were obtained based on an occupancy of two individuals in the 30 m² flat, three in the 60 m² flat, four in the 90 m² flat, and five in the 120 m² flat. Clearly, a variation in these densities brings about significant changes in the above results. Though energy consumption decreases linearly with the increase in the occupation density, other factors

are indeed relevant in this situation: it is not appropriate to consider occupation densities of four or five individuals in a small flat as being similar to occupation densities of 10 or more in a 120 m² flat.

We go on to calculate possible “reasonable” variations in the test variables: one, two or three inhabitants to a small flat; two, three or four to a 60 m² flat; three, four or five to a 90 m² flat; and three, four, five or six to a 120 m² flat.

The graph obtained (figure 2) shows a linear increase in energy consumption per inhabitant with the decrease in density in each case. The lines corresponding to different flats have different slopes; in particular, the line corresponding to the small flat shows a higher slope than the others. One person in a 30 m² flat is much more expensive than four people in a 120 m² flat (though they are at the same density): 1650 W/m³ per person for the former and 850 for the latter. This can be understood as due to the presence of the kitchen and bathrooms.

Clearly, the best results for energy consumption correlate to high densities, but it does not seem unreasonable to think that in flats (of eight to ten residents), privacy should be reasonably easy to maintain, and that flats could have a density of one person per 15-30 m². The example of a

single person in a micro-flat is expensive, but the (psychological) satisfaction might be greater. Also, the trend for energy consumption to decrease in densely-occupied, larger flats is negated if more bathrooms (or even more than one kitchen) are considered

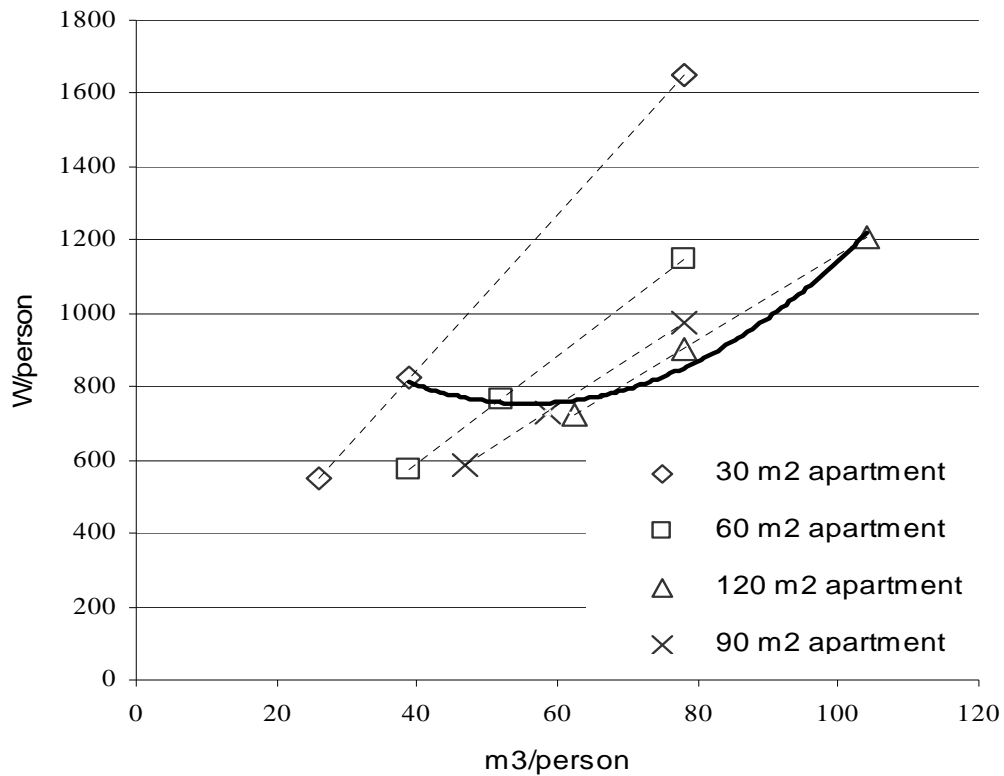


Figure 2.- Energy consumption per person as a function of density

The main analysis considers the more frequent arrangements: two people in a 30 m² flat; three people in a 60 m² flat; approximately four people in a 90 m² flat; and 3, 4 or 5 people in a 120 m² flat. The graph shows that a 60 or 90 m² flat is a better match for a family of three to four individuals.

The results are shown in the graph, where it is clear that there is an optimal energy consumption corresponding to a point near the lines traced by the 60 m² flat with three occupants; the 90 m² flat with four occupants and the largest flat with five occupants. The continuous curved line represent the

best compromises among comfort, reasonable density situations and energy consumption

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Small flats potentially exhibit a less efficient consumption of energy than traditional 60 or 90 m² flats. However, though larger flats might exhibit a better energy efficiency, this is only in the case of high occupancy.

The arrangements that appear to be the most energy-efficient are that of a 90 m² flat for a family and a 60 m² flat for young people sharing the rent. Because

of privacy issues, larger flats appear to be the best match only for families with more than two or three children.

We should also point out that we did not consider that the ventilation needs for a small flat will mostly likely be even higher due to the likelihood that an American-style kitchen will be built into the dining room (or even together in a single space along with the bedroom, as is the case of a studio flat). The increased need for ventilation causes the consumption of energy to increase. Furthermore, the way in which blocks of flats are built forces one to consider averages for the flats facing South as well as for the more expensive flats facing North. A good building solution must also consider the number of elevators, stairways and ventilation shafts, whose relative importance decreases with the increase in the surface area of the flats, as shown in Figure 1.

The data corresponding to the summer is difficult to evaluate in terms of energy consumption, as the sensation of comfort of residents is the determining factor for the suitability of any given building. Clearly, south-facing smaller flats will be more problematic due to the higher incidence of solar radiation and the difficulty of cross-ventilating the flat. A formula for determining comfort may be obtained using the following equation:

$$T_i = T_e + \frac{I + D}{G}.$$

The increase in interior temperature may be partially eliminated with cross ventilation (a large increase in G), but in the small flat this is not possible due

to the absence of exterior walls opposite one another. A further point to consider is the possibility in larger flats of changing the interior layout with the seasons in order to maximize comfort, as well as changing where people congregate in the house at different times of the day. This was the traditional approach to interior design in temperate climates, before people had air conditioning and modern-day appliances, machinery and comforts; maybe it still has a place for consideration in contemporary architecture.

As a final conclusion, we can say that small flats do not appear to be particularly energy-efficient: they are more expensive to build (they entail a higher number of stairwells and elevators) and to heat (in winter); the comfort sensation is diminished (in summer) and beyond all this one is faced with there is a diminished sensation of space, which may be very significant in determining comfort.

REFERENCES

- [1] Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality; ASHRAE 62; 11-08-2000 version
- [2] Carrier AIC; Manual de aire acondicionado; Ed. Marcombo; Barcelona 1980
- [3] Serra, R; Coch, H.; Arquitectura y energía natural; Edicions UPC; Barcelona 1995
- [4] Basic Norm: Thermal conditions for buildings in Spain (Norma Básica de la Edificación) NBE-CT-79

Anexo B

The importance of the user's actions on
the sensation of comfort in buildings;
23th Passive and Low Energy
Architecture Conference, Geneve,
Suisse, 2006.

The importance of users' actions for the sensation of comfort in buildings

M. Palme, A. Isalgue, H. Coch, R. Serra

AiEM. School of Architecture UPC, Av. Diagonal 649, 08028 Barcelona (Spain)
Tel. +34 934016422 Fax. +34934016426 massimopalme@hotmail.com

ABSTRACT: The sensation of comfort one feels inside a building is difficult to assess due to the number of parameters involved, such as internal temperature, thermal exchanges with the external atmosphere (air, radiation, heat), the presence of electrical appliances and – in particular – the behaviour of its users. The ability to make choices and control the environment is critical to the satisfaction of users, and psychological and sociological effects are a determining factor in the comfort they feel. However, a regular user of a building may make decisions that are inconsistent from an energy efficiency point of view, and the addition of more users to a building may indeed worsen the situation.

This work focuses on determining the significance of the actions that users can undertake, such as opening windows, turning on lights or other appliances, opening or closing shutters or blinds, and changing the décor.

Furthermore, we compare different buildings that have different designs, in order to show that users' control over their actions and choices determines whether they will experience comfort in these buildings. Scenarios are compared that posit simultaneous, yet distinct actions, due to the importance of comfort in buildings designed for use en masse. The aim of this study is to underline the fundamental role played by design solutions, and to emphasize the need for appropriate design choices, in particular when mechanical appliances cannot completely solve the problems that users generate.

Keywords: comfort, human behaviour, users

1. INTRODUCTION

The ability to make choices and control the environment is critical to the satisfaction of users, and psychological and sociological effects are a determining factor in the comfort they feel. Therefore, being able to determine the relevance of different decisions and actions is of primary importance in drafting policies regarding energy efficiency and comfort.

The first possibility is to have two distinct schemes for classification, the first one ranking buildings based on how well they reduce energy consumption and the second ranking buildings based on the sensation of comfort perceived inside them. Though classification schemes related to energy consumption might be easier to codify, comfort-based schemes should distinguish the relevance of factors and actions that might be not as important in determining energy consumption, such as users changing their décor to keep up with new trends, and ones that might be relevant to both comfort and energy consumption, such as using shutters and blinds.

Uncomfortable environments may be remedied by the use of mechanical appliances, or alternately by changing criteria for design and construction. Comfort solutions achieved via design and construction decisions may include appropriate solar orientation, the arrangement and protection of windows, and the selection of materials.

Energy efficiency will always be relevant in architecture. As a large part of the total energy bill in any building comes from the building itself, designers must understand the physical behaviour of buildings in order to produce efficient solutions to issues of comfort and energy efficiency.

This study discusses the topic of comfort and the relationship between comfort and energy consumption, in order to correlate good thermal and energy behaviour with the real sensation felt by users. Furthermore, we present a preliminary analytical method that might be expanded and completed in the future. Moreover, we discuss the ramifications of these preliminary results for design, and we lastly underline why architects must produce designs that are "robust" when faced with the sorts of actions taken by the users of buildings.

2. A PRELIMINARY CLASSIFICATION

In order to assess the influence of a number of factors on comfort and energy consumption, we first postulated that the buildings we studied would have a simplified geometry and materials, and we also simplified the climatic data.

To classify the significance of the actions carried out by users for the sensation of comfort, we referred

to a temperature index. Here, our base temperature was the internal temperature first sensed by the users, and we came to the following conclusions:

- any action that increases or decreases the internal temperature by 0-1 °C has a relatively low repercussion on comfort
- any action that increases or decreases the internal temperature by 1-2 °C has a medium repercussion on comfort
- any action that increases or decreases the internal temperature by 2-4 °C has a high repercussion on comfort
- an action that increases or decreases the internal temperature by more than 4 °C has a very high repercussion on comfort

Also, to classify the importance of actions for energy consumption, we referred directly to a consumption variation index and, after looking at various possibilities, we decided to look for a specific consumption, as power per unit volume of building, and in an initial approach we assumed that:

- any action that increases or decreases the energy consumption by 0-0.5 W/m³ has a very low repercussion on consumption
- any action that increases or decreases the energy consumption by 0.5-2 W/m³ has a low repercussion on consumption
- any action that increases or decreases the energy consumption by 2-4 W/m³ has a medium repercussion on consumption
- an action that increases or decreases the energy consumption by 4-10 W/m³ has a high repercussion on consumption
- any action that increases or decreases the consumption by more than 10 W/m³ has a very high repercussion on consumption

The importance of an action such as “forgetting to close the shutters” may also be assessed using simple energy balance equations. For instance, the influence of the solar radiation that gets inside because someone “forgot to close the shutter” may be assessed using an average energy balance formula [1]:

$$T_i = T_e + \frac{I + D}{G}$$

where T_e is the external temperature, I is the term for radiation transfer, D stands for internal dissipation, and G is a loss coefficient (which includes thermal conductivity and air exchanges). Forgetting to close a shutter changes the effective value of I , and changes in the interior temperature will then come about if no mechanical appliance is turned on at the time to monitor the interior temperature. Alternately, if a mechanical appliance controlling interior temperature is turned on, either the heating will be turned down, or the cooling needs will be greater.

The graph in Figure 1 shows the increase in this “perceived” interior temperature in the presence of

different increases due to solar radiation and using different coefficients of ventilation (expressed as air changes per hour, rh) in a flat of 8 x 8 m² situated in a temperate climate. No mechanical appliance is assumed to have contributed to these internal temperature changes.

The ventilation contribution to the loss factor, G , is calculated as follows:

$$G_v = \rho c rh$$

where ρ and c are respectively the density and the specific heat of the air and rh stands for a term of air exchange dependent on the velocity of the air.

For architectural purposes, this formula is typically reduced to:

$$G_v = 0,30 rh$$

In the above equation for architectural evaluations, the ventilation coefficient rh is expressed as the total air changes in one hour (1/h).

As the repercussion on comfort of a 2-3 °C increase in temperature is relevant, an action such as “forgetting to close a shutter” must be classified as having “high” repercussions on comfort.

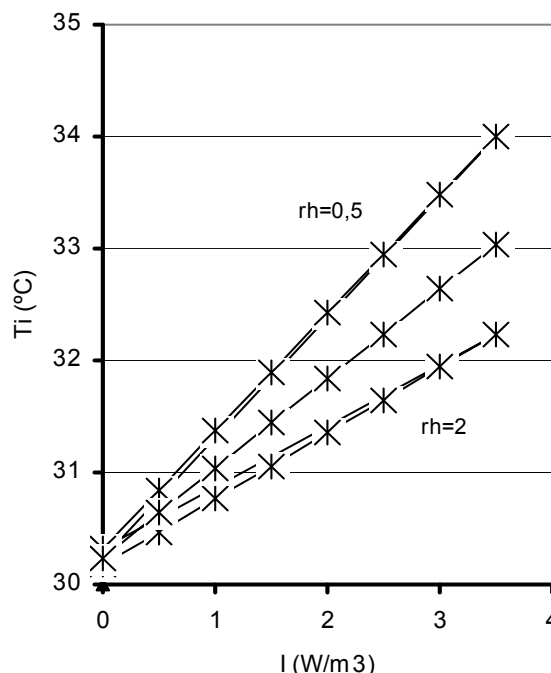


Figure 1: increase in internal temperature due to incoming solar radiation for different air renewal rates (ventilation coefficient). Incoming solar radiation is given as specific contributions, in power per unit volume (W/m³)

A similar assessment for other actions leads us to Table 1, in which the relevant energy consumption has been calculated using the same average balance equation, and the relevance to comfort is correlated

with the corresponding changes in internal temperature based on free thermal evolution.

As the consumption relevance is expressed using a cooling/heating index, we separate the heating/cooling contributions and the other contributions (dissipations inside a building, such as from the human body or electrical lamps and appliances).

Table 1: Classification of actions by relevance on energy consumption and sensation of comfort

Action	Energy repercussion	Comfort repercussion
Opening an ordinary window	high	high
Opening an internal door	very low	low
Turning artificial lights on	low to medium	medium to high
Turning electrical appliances on/off (not the heating system)	medium	low
Opening or closing shutters/blinds	medium	high
Resetting base temperature for heating system	high to very high	medium to high
Resetting base temperature for cooling system (air conditioning)	very high	high

The actions analysed here are those that are most typical for an ordinary flat and the way in which it is used. Actions such as change dressing are not included here because of the low relevance they have to the energy balance, though they may in fact be significant for the sensation of comfort.

In the following graph (Figure 2), we show the increase in the internal temperature when one turns on the light, which totals 60 W of power: a dissipated 60 W entails a specific dissipation (power per unit volume of space) of 0.3 W/m³ in a space of 200 m³. We started at an average of 1 W/m³ due to the presence of other appliances and residents. Turning on a light raises the internal temperature by 0.25 °C; thus, turning on five light bulbs increases the temperature by 1.2 °C. Of course, especially bright lighting can sometimes use even more power.

Turning on the lights is classified as “highly relevant to comfort”, as an analysis of comfort cannot be based solely on the internal average temperature.

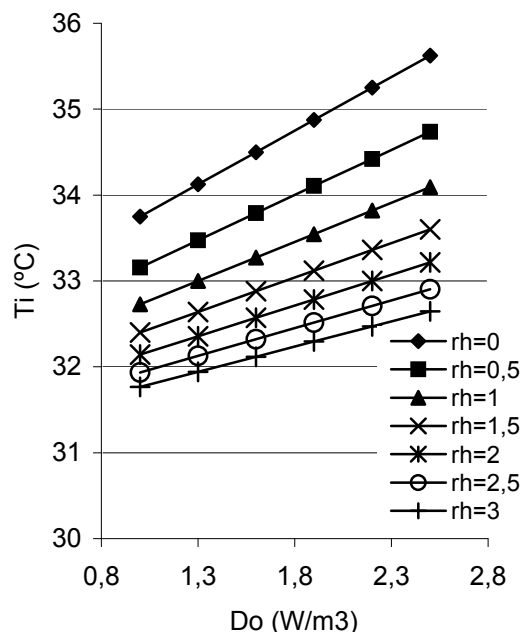


Figure 2: Increase in energy consumption and internal temperature when a user turns on one to five 60 W light bulbs for different air changes (*rh*) in the space and as a function of specific dissipation in the space.

To obtain more satisfactory results, we must move on to a zone study on the influence of this particular action: for example, turning on a 60 W light bulb increases the average internal temperature by 0.25 °C (a low repercussion), though near the light the comfort sensation may be highly affected (due to the presence of lighting), and there will also be temperature gradients in the room.

3. DISCUSSION OF DESIGN RELEVANCE

The figure in the first example shows that different configurations entail different behaviours: equal amounts of radiation have a larger effect in buildings in which there is less ventilation.

Generally, a good configuration has to be versatile and robust, which means that user must be able to change the configuration. However, users' actions might not come in time, might not be carried out at an appropriate scale, or could even simply be wrong. Thus, there should be some way of filtering the way in which these users control their actions. While filters are a traditional means of controlling the actions of mechanical appliances, we posit architecture itself as a way to limit possible wrong actions taken by users.

For example, if a user forgets to close a shutter, it is preferable that the building should not be overly sensitive to this change. If one user desires heating and another desires cooling in adjacent locations in a building, the building must limit the possibility of there being a simultaneous use of heating and cooling systems in a single place.

Thus, the main conundrum is that users must be led to believe they have control, while in reality this is only partially true. A building with substantial thermal insulation whose component materials and protective features were subjected to strict monitoring in the design process should not leave a wide range of control to the users. In a building with a "robust" design, a greater degree of control can be given to the users without causing problems to arise due to the building's decreased sensitivity to any changes that might occur.

Let us consider a simple example: one building facing South and one facing West, whose remaining parameters are equal in every way to one another. In summer, the solar contribution (term 'I') is higher in the latter, which means that the action of forgetting to close the window or shutters may cause a substantial increase in the internal temperature. Thus, the first configuration appears more "robust" than the second.

The following examples, tables and discussions illustrate the aforementioned effects:

Table 2: Climatic situation, dissipation coefficients, consumption terms and internal temperature of a building with a "robust" design

Te (°C)	Gt (W/(m ³ °C))	I (W/m ³)	D1(W/m ³)	Ti (°C)
11	1	10	2	19
	Gv (W/(m ³ °C))		D2 (W/m ³)	
CASE 1	1		4	
	G (W/(m ³ °C))		D (W/m ³)	
	2		6	

Table 2 corresponds to a South-facing building receiving a significant amount of solar radiation that is not heavily insulated (thermal insulation is less necessary if there is a significant contribution from solar radiation) and has a ventilation coefficient (*rh*) of approximately 3-3.5. The D coefficients may correspond to different consumption contributions: for example, a person (D1) and the heating contribution (D2), which added together yield D (6 W/m³).

Table 3: Climatic situation, dissipation coefficients, consumption terms and internal temperature of a very well insulated building

Te (°C)	Gt (W/(m ³ °C))	I (W/m ³)	D1 (W/m ³)	Ti (°C)
11	0.425	1	2	19
	Gv (W/(m ³ °C))		D2 (W/m ³)	
CASE 2	0.45		4	
	G (W/(m ³ °C))		D (W/m ³)	
	0.875		6	

Table 3 corresponds to a building in the same climate and possessing the same internal dissipation (D) as the building in Table 2. However, this building receives a lower amount of solar radiation, and it is well insulated. It therefore achieves the same results for energy consumption as the building in Table 2, and the air renewal coefficient is lower (1.5 *rh*).

In Tables 4 and 5, we compare the cases with that of a very well insulated building with low solar radiation (G_{tot} = 0.875 (W/(m³ °C)); I = 1 W/m³) and that of one with high radiation and ventilation (G_t = 1 (W/(m³ °C)), G_v = 1 (W/(m³ °C)), I = 10 W/m³) [2], when the ventilation coefficient G_v increases by 0.5 W/m³.

The values for insulation and ventilation have been selected according to the Spanish Official Guidelines [2] and to the guidelines published by ASHRAE [4] and Carrier [5].

Table 4: Change in the internal temperature caused by an increase in the ventilation coefficient. Compare the interior temperature (Ti) with the interior temperature in Table 5.

Te (°C)	Gt (W/(m ³ °C))	I (W/m ³)	D1 (W/m ³)	Ti (°C)
11	1	10	2	17.4
	Gv (W/(m ³ °C))		D2 (W/m ³)	
Change of G (W/(m ³ °C))	1.5		4	
	G (W/(m ³ °C))		D (W/m ³)	
0,5	2.5		6	

Table 5: Change in the internal temperature, Ti, produced by an increase in the ventilation coefficient (G_v), in a very well insulated building.

Te (°C)	Gt (W/(m ³ °C))	I (W/m ³)	D1 (W/m ³)	Ti (°C)
11	0.425	1	2	16.09
	Gv (W/(m ³ °C))		D2 (W/m ³)	
Change in G (W/(m ³ °C))	0.95		4	
	G (W/(m ³ °C))		D (W/m ³)	
0.5	1.375		6	

The results show that the second case (Table 5, related to Table 3) is more sensitive than the first (Table 4, related to Table 2): the same variation in G yields different variations in Ti. Thus, with an external temperature of 11°C, we discover that by increasing the value of G by 0.5, the internal temperature of 19°C drops to 16°C in the second case and to 17.4°C in the first.

The differences in the internal temperatures are 1.6°C in the former case and 3°C in the latter. A very well insulated building is nearly twice as sensitive as

the other buildings, in which both solar radiation and ventilation are relevant. Thus, we can state that the building shown in Tables 2 and 4 has a "less sensitive design" in the sense that changes in ventilation produce only subtle changes in its internal temperature.

Clearly, the buildings that experience a relevant amount of solar radiation have other problems that affect the sensation of comfort. For example, in winter the thermal sensation near the windows may be very different from the thermal sensation in other parts of the building, and different users may desire different amounts of heating based on their location in the building.

The examples show that the project's preliminary design plays an important role in achieving the results: the solar orientation and selection of materials, the distribution of zones and local climatic conditions must all be considered in terms of how they each influence comfort.

Other important aspects to take into consideration include the electrical appliances, in particular the lights, the choice of which affects energy usage and perhaps even the sensation of comfort more than energy efficiency.

The graph in Figure 3 shows the importance of using low-wattage lighting: the temperature increase caused by turning on the lights clearly decreases with the use of low, 15 or 30 W lights as compared to 60 W lights.

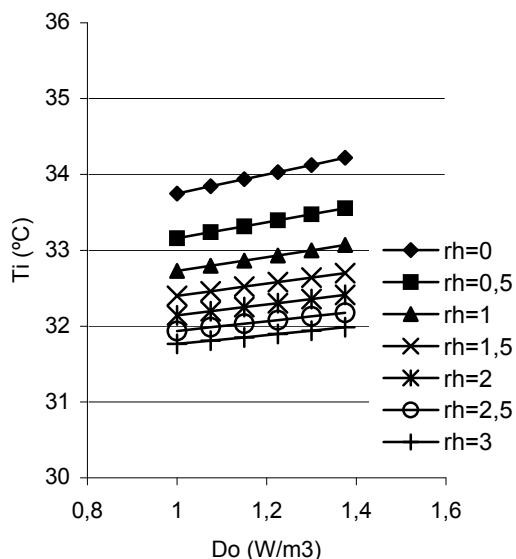


Figure 3: Increase in internal temperature and energy consumption when a user turns on one to five 15 W lights; internal temperature changes for different air renewal conditions.

When one turns on five lights, the internal temperature increases by 0.3°C, while for 60 W lights the increase is 1.2°C.

This linear effect may be more important to

obtaining a true sensation of comfort than simply reducing energy consumption, as was discussed in previous sections. Table 6 shows the summer values for 15, 30, 45 and 60 W lighting.

Table 6: Effects of turning on 15, 30, 45 and 60 W lighting on energy consumption and on the perceived interior temperature

light (W)	consumption (W/m ³)	interior temperature (°C)
60	1.5	33.6
45	1.25	33.4
30	0.75	33
15	0.36	32.7
0	0	32.4

4. CONCLUSIONS

Analysing comfort may be more difficult than assessing energy consumption, in particular when human behaviour plays a relevant role. For this reason, a complete classification of the actions and decisions that users can carry out is needed.

Average thermal balance equations are clearly insufficient when one is making a full analysis of the summer scenario, because when changes in internal temperature are not mechanically controlled, there is typically an ample amount of ventilation. Furthermore, changes in use over the course of the day and thermal mass are also significant when one is assessing the dynamic behaviour of the building.

One must also discuss the spaces of a typical building layout in order to provide a reference framework for analysing unique scenarios. Temperature and lighting gradients and particularities of air movement, in addition to other factors, may have a large influence on energy savings and a very high repercussion on comfort.

Buildings with different designs have been analysed, and further examples have been discussed in other papers [3].

We highlight the significance of a building's design with regard to its ability to effectively "resist" the actions of its users – that is, its ability to remain thermally stable in the light of inappropriate actions carried out by its users given its energy and/or comfort conditions. These actions could be due to erroneous judgement or other causes, such as simple omissions. When architects tackle issues concerning energy efficiency and comfort, all design solutions should aim to make it easy, or even "unavoidable", for users to inhabit these buildings in a correct fashion.

In conclusion, training users may not be enough to ensure that buildings are used in a suitable way. Design strategies and project solutions must be taken into serious consideration in order to minimise the possibilities of misusing energy and stifling comfort.

Furthermore, the sensations of users must be correlated to the actions and decisions they can actually carry out, as we should recall that cultural and sociological factors play a significant role in determining human behaviour.

Future investigations should consider all these factors. As we have pointed out, however, the current situation underscores the fundamental role played by design strategies on the sensation of comfort inside buildings. Suitable designs should not only be energy-efficient and comfortable, but also robust in order to make it difficult for incorrect actions to take place.

REFERENCES

- [1] R. Serra, H. Coch; *Arquitectura y energía natural*; Edicions UPC; Barcelona 1995
- [2] Basic Norms: Thermal conditions for buildings in Spain. (Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79)
- [3] M. Palme, A. Isalgue, H. Coch, R. Serra; *Robust design: a way to control energy use from human behaviour in architectural spaces*; PLEA 2006 (Geneva, Switzerland)
- [4] *Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*; ASHRAE 62; 11-08-2000 version
- [5] Carrier A/C; *Manual de aire acondicionado*; Ed. Marcombo; Barcelona 1980

Anexo C

Robust design: a way to control energy consumption from human behaviour in buildings; 23th Passive and Low Energy Architecture Conference, Geneve, Suisse, 2006.

Robust design: a way to control energy use from the human behaviour in architectural spaces

M. Palme, A. Isalgue, H. Coch, R. Serra

AiEM. School of Architecture UPC, Av. Diagonal 649, 08028 Barcelona (Spain)
Tel. +34 934016422 Fax. +34934016426 massimopalme@hotmail.com

ABSTRACT: Human behaviour is an important factor to consider in making an accurate assessment of the thermal exchanges between a building and its surroundings. The actions of a building's users, such as opening windows or doors, resetting the default temperatures of heating or cooling systems, or turning on electrical lights or appliances, can have a significant effect on energy consumption and the subsequent sensation of comfort. Basing our work on schemes for classifying these actions, in this study we determine which ones are to have precedence over the others. The effects of these actions can then be computed based on energy transfer equations for different types of buildings. An analysis of the changes caused by users to thermal parameters shows that different design solutions lead to different sensitivities. The stability of the thermal transfer in the building is analysed in part. From the results, it seems reasonable to limit what actions users can carry out by making appropriate design choices. The system is thus "robust" in its response to users' actions while it continues to provide them with the feeling that they are in control. This work emphasises the importance of the concept of "robustness" of energy efficiency and comfort in building design. Robust design here refers to the design process as a whole, carried out in such a way that it is difficult for users to make inappropriate decisions. This is accomplished by permanently sealing windows, or installing mechanisms to control lighting, heating, cooling or ventilation systems.

Keywords: energy, comfort, users, robustness

1. INTRODUCTION

Energy consumption and the sensation of comfort are two very different terms, but both are very important for evaluating the energy efficiency and performance of buildings. As has been shown in other studies [4], a preliminary criterion for assessing comfort and energy consumption can be obtained from the heat transfer equation. This equation may be written as [1]:

$$M \frac{dT_i}{dt} = I + D + G (T_e - T_i)$$

where T_i is a representative internal temperature, T_e is the external temperature, I is a term for radiation gains, D stands for internal gains, G is a loss coefficient (which includes thermal conductivity and air exchanges), and M is the thermal mass. It is typical for the terms in the above equation to be expressed as specific terms, and here we use the terms for unit volume of the space considered.

In this work, we calculate and compare the energy consumption of two buildings with very different designs, and discuss the sensation of comfort that is generated inside each of them. To obtain a good comparison, the terms are expressed as the specific energy consumption, in W/m^3 , and are obtained using a shape factor (f) for the buildings.

We begin by examining a winter scenario. Furthermore, we start with the average values, which are more significant when the term of accumulation in the mass is small. We then go on to discuss the more complex summer scenario.

Table 1: Planes de Son building, surfaces and transmission coefficients of the walls and roof

Wall	S (m ²)	K (W/m ² °C)	S*K (W/ °C)	Global
EXTW2	194.4	0.438	85.147	Stot (m ²)
EXTW7	14.0	2.812	39.368	3391.2
EXTW9	160.0	0.469	75.040	
EXTW10	17.9	0.449	8.037	Ktot
EXTW11	27.3	2.935	80.125	(W/m ² °C)
EXTW12	67.8	0.443	30.035	0.99
EXTW14	151.2	0.280	42.336	
EXTW3	261.0	0.395	103.095	V (m ³)
UND	18.0	0.042	0.756	7268.16
FLO1	37.0	0.498	18.426	
FLO4	370.1	0.173	64.027	F (1/m)
FLO5	691.5	0.172	118.938	0.47
AUD	201.1	0.249	50.074	
ROOF	927.9	0.269	249.605	Gtot
SOST1	96.0	0.187	17.952	(W/m ³ °C)
WIN	156.0	2.800	436.800	0.17

2. ASSESSMENT OF CONSUMPTION

The real-life example referred to herein is the Planes de Son building located in the Alt Aneu region of Catalonia, in the Pyrenees (Figures 1 and 2).

The external temperature is relatively low and the levels of solar radiation are high.



Figure 1: Planes de Son, south façade

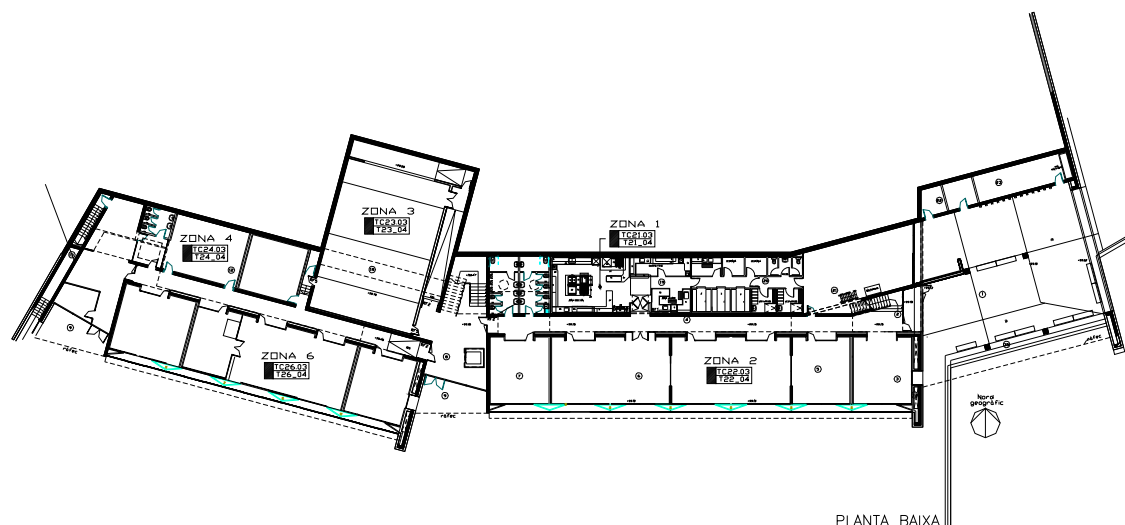


Figure 2: Planes de Son, ground plan

The building is very well insulated from a thermal point of view; the K_{tot} coefficient is 0.99 W/m^2 and the G_t coefficient is $0.17 \text{ (W/(m}^3 \text{ } ^\circ\text{C))}$, as shown from the data and the computation in Table 1.

With this G coefficient value, the building is very sensitive to small changes in the rh coefficient ($T_i - T_e = 15^\circ\text{C}$), as shown in Table 2.

In Table 2, one can see that energy consumption may increase by 264% when users open the windows

in order to ventilate the building in the absence of solar radiation.

If we consider a radiation of 2 W/m^3 and a rh variation of 1 (ranging from 1.5 to 2.5), the energy consumption increases by 60%, as shown in Table 3.

These examples apply to the current climatic conditions, in which the average horizontal radiation in winter is approximately 115 W/m^2 ($10 \text{ MJ/m}^2\text{day}$: see Table 4).

Table 2: changes in consumption in the absence of solar radiation and with a low ventilation term

G(W/m ³ °C)	Rh(1/h)	Gtot(W/m ³ °C)	D(W/m ³)	dD(%)
0.17	0.00	0.17	2.55	0
0.17	0.50	0.32	4.80	88.2
0.17	1.00	0.47	7.05	176.4
0.17	1.50	0.62	9.30	264.7

The coefficient to be multiplied by the solar radiation in order to obtain the solar energy entering south-facing windows is 0.017 m²/m³. This coefficient depends in particular on the windows facing true south (156 m²), which have a contribution of 0.013 m²/m³.

Table 3: Changes to energy consumption given the real conditions at the Planes de Son building

Rh(1/h)	Gtot(W/m ³ °C)	I(W/m ³)	D(W/m ³)	dD(%)
1.50	0.62	2	7.3	0
2.00	0.77	2	9.55	30.8
2.50	0.92	2	11.8	61.6
3.00	1.07	2	14.05	92.4

The other contribution depends on the remaining windows on the rest of the walls (0.004). The *rh* factor of 1.5 (air renewals per hour) is, according to [2], the value required for an acceptable internal air quality in the presence of occupants, though a value of 2.5 is more likely if the windows are to be opened.

Table 4: Radiation near Planes de Son in 1996-1998 and the average

Month	KJ/m ² day 1996	KJ/m ² day 1997	KJ/m ² day 1998	KJ/m ² day average
January	6400	7300	8000	7233
February	9400	14500	12600	12167
March	17200	17600	17400	17400
April	17600	19900	17600	18367
May	24800	20700	19100	21533
June	22300	20800	23800	22300
July	22100	22400	24800	23100
August	21800	19500	19400	20233
September	15800	17500	13400	15567
October	12300	14200	14300	13600
November	7200	7900	10700	8600
December	6800	7000	7800	7200

Comparing this with another example shows that a building with a lower *G* value exhibits a very different behaviour: for instance, if we consider an 8 x 8 x 3 m³ building with a *G* value of 0.8 W/m³°C (the value given the guidelines [2] for this location), with windows placed so as to maximise incoming solar radiation in order to achieve appropriate conditions.

The energy consumption in this case may change by 56% in the absence of solar radiation. In the presence of solar radiation, the consumption clearly decreases. More remarkably, the effect of ventilation is also lower: the energy consumption changes only by 20%. The sensitivity is thus much lower.

If we evaluate the increase in consumption caused by an increase of 1 *rh* over the consumption present in a normal scenario (at 1.5 *rh*) and calculate the sensitivity, we obtain a result of 0.62 for the Planes de Son building, and 0.31 in the other scenario (see Table 5). The sensitivity to changes in ventilation of the Planes de Son building is higher (nearly double).

Table 5: sensitivity to *rh* variation

G	rh (1/h)	d rh (1/h)	D (W/m ³)	dD (W/m ³)	dD/D
0.17	1.5	1	7.30	4.5	0.62
0.8	1.5	1	16.25	5.0	0.31

The graphs (Figures 3 and 4) show the respective scenarios:

Increase in consumption with ventilation

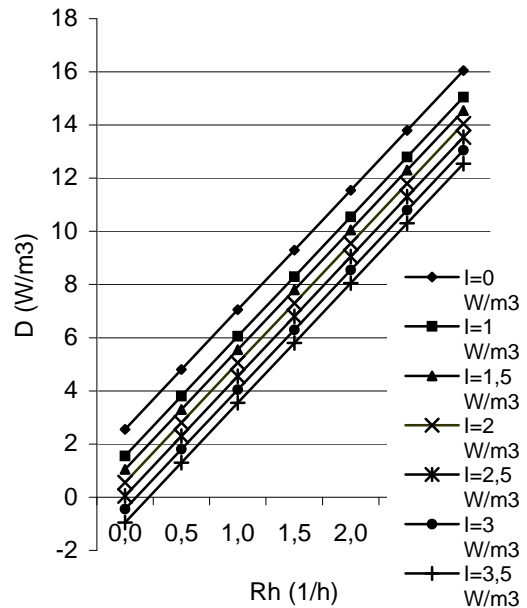


Figure 3: Changes in energy needs for the building at Planes de Son, based on different levels of incoming solar radiation and ventilation (see text).

As a preliminary conclusion, we can point out that the highly insulated building has – of course – an energy consumption that is smaller than the other buildings, though its sensitivity to changes is much greater.

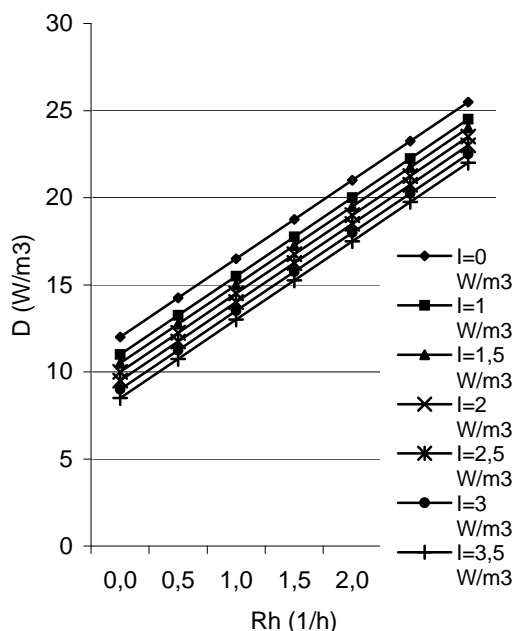


Figure 4: Changes in energy needs for the 8 x 8 x 3 m³ building, based on different levels of incoming solar radiation and ventilation (see text)

3. COMFORT DISCUSSION

Energy and sensitivity to changes in conditions are not the only significant points in this discussion. The sensation of comfort, as discussed in [4], may also be strongly affected even when the results of the equation analysis indicate it to be of little relevance. This depends on the spatial distribution of the internal temperature, which may generate a very uncomfortable sensation in areas adjacent to windows, for example.

This is the case of the Planes de Son building, in which the south-facing windows can generate a large energy gain in the area adjacent to them, yet only in this area. The sensation of comfort may thus be strongly affected in the area adjacent to the windows while at the other side of the building the sensation may be very different. This may generate a "schizophrenic" use of energy: one user may wish to turn on the air conditioning while another simultaneously desires heating. The increase in consumption might be high and the actions undertaken by the users might end up driving a feedback loop.

Clearly, if a building is sensitive to temperature changes, the sensation of comfort one perceives in it is more difficult to assess, as it can change rapidly with time and space, but the building will always be

less comfortable than a building that is not highly sensitive.

The iconic modern buildings clad entirely in glass – the buildings that use the most advanced materials known to science in order to keep themselves properly insulated – are very sensitive to heat fluctuations. The sensation of space and the satisfaction derived from the buildings' glazed façades do not counteract the fact that the spaces inside them may have significant thermal gradients, and the sensation inside is often one of discomfort.

The sensation of control is another highly significant factor: the more a building is insulated and its indoor atmosphere controlled by mechanical appliances, the more the user forgets that he or she is actually in control. This can lead to an uncomfortable sensation of helplessness if one cannot attain "perfect" conditions for one's work or dwelling space, or can lead to residents engaging in actions that call the utility of the whole into question.

Extreme scenarios can come into play when different individuals feel opposite sensations and consequently carry out opposing actions. In such cases, a highly sensitive building may easily cause some sort of feedback loop to arise and the situation will only be exacerbated. For example, in winter a user near a large, southerly window may wish to lower the ambient temperature. However, if opening the window is not possible or does not remedy the situation, the user may decide to turn on the air conditioning. Nevertheless, a colleague sitting a few metres away and outside the reach of direct sunlight could just as easily feel that the temperature is too cold. He or she then turns on the heating, only to have the first user sense the room getting hotter and try to turn the air conditioning up further.

This kind of phenomenon that tends to snowball is very dangerous: we have termed it energy efficiency "schizophrenia". It is very important that architects should focus on this problem and try to prevent it from happening. Resolving these issues once the building is finished may be impossible, very expensive, or at best highly inefficient.

4. SUMMER SCENARIO

The summer scenario is more difficult to evaluate. Generally speaking, solar orientation and ventilation are relevant factors. The cases analysed here have a good orientation: the windows face South or North. Thus, the solar radiation plays a significant role in winter, but not so much so in summer. The possibilities for ventilating these spaces are very different.

The Planes de Son building has windows on the south façade, but not on the north side, and proper ventilation in elongated buildings requires cross-ventilation (see plan in Figure 2). Furthermore, a change in the ventilation coefficient yields rapid changes in the internal temperature distribution, as well as some changes in the solar radiation conditions. In summer, users of the building may wish to turn on the air conditioning in one particular spot and the heating in another. Alternately, they may want

heating now and cooling later. In short, these issues make the Planes de Son building relatively unstable in terms of its being able to ensure user comfort.

When faced with abrupt changes in temperature, the Planes de Son building's consumption of energy over time is clearly worse than that of other buildings: even if the building's baseline energy consumption is low, a climatic change or abrupt user action can cause all the building's internal parameters to shift. The heating/air conditioning system will then immediately try to resolve this situation, which entails a significant expenditure of energy. The term of mass accumulation, which is not particularly relevant in the winter scenario, is more important in summer. Though a building such as the Planes de Son building seems to have a very relevant thermal inertia, this inertia is more apparent than real. A term of accumulation would not be particularly significant, as much of the thermal inertia of the building is concentrated in the north, which is the side that is less affected by solar radiation.

Furthermore, the presence of a large number of wooden tables increases the shadows cast over building components and raises the local internal air temperature. The relatively heavy construction materials, which entail a large contribution to thermal inertia, receive a reduced amount of solar radiation. As discussed in other papers [4], the internal layout of the furniture is also significant and must be taken into consideration.

Unlike the Planes de Son building, more "traditional" buildings exhibit a moderate thermal inertia, though the filter effect on climatic changes and users' actions is relatively strong. The conditions that are generated inside may be much more comfortable.

5. GENERAL SENSITIVITY ANALYSIS

A general sensitivity analysis shows that the lower the term G (it is low when buildings are very well insulated), the higher the sensitivity. A change in climatic conditions or users' actions causes a considerable perturbation to the behaviour of the building.

This may be understood in correlation to thermal balance equations [5]:

$$T_i = T_e + \frac{I+D}{G}$$

where T_i is the internal temperature. By differentiating this equation, one obtains the following:

$$\delta T_i = \delta T_e + \frac{\delta(I+D)}{G} - \frac{I+D}{G^2} \delta G$$

where dT_i is the internal temperature change induced by changes to T_e , I , D and G .

If T_e is constant, we get the following:

$$\delta T_i = \frac{\delta(I+D)}{G} - \frac{I+D}{G^2} \delta G$$

If we further consider that I and D are constant, we get:

$$\delta T_i = - \frac{I+D}{G^2} \delta G$$

This equation clearly shows that variations in G have a high repercussion when G is low, because of the presence of a quadratic term on the denominator.

If the terms I or D change, the effect is very nearly the same: the quadratic term G^2 is critical when assessing the significance of the climatic variation to thermal performance.

To employ a numerical example, we consider a variation in the solar contribution, I , of 1.5 W/m^3 . Assuming a G value of $0.17 \text{ W/m}^3\text{C}$, the variation in T_i is then 9°C . If the G value is $0.8 \text{ W/m}^3\text{C}$, the variation in T_i is 2°C . While a 2°C variation in the internal temperature might be acceptable or relatively easy to compensate for, a variation of 9°C is very difficult to accept in ordinary conditions, and will inevitably entail a need for comprehensive measures to be taken.

6. CONCLUSIONS

The results show that careful attention to design is very important in the building process. Here, by design, we mean energy and comfort strategies. In particular, this paper underlines the fact that a good design may be "robust" even when coping with users' actions and climatic changes. "Robust" means not just highly sensitive to changes in climatic parameters, but also more stable. One, yet not the only, method for achieving "robustness" is to increase the mass of the building.

Furthermore, the possibilities for exchanging energy are great. The dimensions, orientation, proportions, materials, geometry, protection, and distribution of the spaces with respect to their use: all influence the results.

Natural ventilation, the presence of thermal mass adjacent to windows and the low resistance of glass to solar radiation are the most important problems at the Planes de Son building. Now that it is built, however, it is more difficult to indicate what may have been better solutions: it is the architectural design process that must work these natural phenomena in an intelligent manner. At the moment, we are working on further studies of the Planes de Son and other buildings, based on the real energy consumption figures and internal temperatures over the years. The users' sensation of comfort must also be considered, and possible improvements for each scenario will be indicated in the future.

The behaviour of the Planes de Son building is not intended to be the main focus of this work – it is not a particularly bad building, and should actually be recognised for being an example of forward-minded design thinking regarding energy consumption. Our main purpose was to provide an overview of the relevance of the design process on the thermal and comfort behaviour of buildings, and we simply illustrated this with some examples. The significance of building sensitivity in response to changes carried out by users or climatic fluctuations could also be extended to address building irregularities or last-minute changes in the construction details.

In the future, due to the pending energy crisis the need to make a more intelligent use of natural resources will be ever more pressing. The concept of a “natural architecture” still needs to be formulated in terms of comfort, sustainability, and also the “robustness” of its energy efficiency and comfort.

Human behaviour and the actions undertaken by users are indeed highly significant, due to their effects on energy consumption and the sensation of comfort that human actions generate inside the buildings.

With this study we aim to underline the role of architectural design on the future use of the buildings. Thermal and comfort robustness should be taken into account in future designs.

REFERENCES

[1] Serra, R.; Coch, H.; *Arquitectura y energía natural*; Edicions UPC; Barcelona 1995

[2] Basic Norms: Thermal conditions for buildings in Spain. (Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79)

[3] Serra, R.; *Arquitectura y clima*; Editorial Gustavo Gili, Barcelona 1999

[4] Palme, M.; Isalgue, A.; Coch, H.; Serra, R.; The importance of user's actions on comfort sensation in buildings; Plea 2006 (Geneve, Switzerland)

[5] Palme, M.; Isalgue, A.; Coch, H.; Serra, R.; On the influence of users' actions on thermal performance of buildings; EPIC 2006 (Lyon, France)

Anexo D

On the influence of user's actions on the thermal performance of buildings; 4th European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon, France, 2006.

On the influence of users' actions on thermal performance of buildings

M. Palme, A. Isalgue, R. Serra, H. Coch

ETSAB, UPC, Diagonal 649, Barcelona 08028 (Spain)

ABSTRACT: The thermal exchanges between the buildings and its surroundings may be easily evaluated from balance equations. However, some parameters in the equations are prone to changes due to decisions taken by the users at some time, and further decisions and even computations on thermal behaviour may be strongly affected by the users' attitudes and actions. This can produce wrong computation of energy consumption and savings, and then they have to be avoided. On the other hand, "wrong" actions of the users or misuses might produce uncomfortable conditions that are difficult or expensive to handle. One of the ways to avoid wrong actions of the users is through "training" them, but another reliable way to avoid problems is by means of "robust design", where robust design stands for whole architectural design that difficults the taking of inappropriate decisions by the users, concerning for instance door use, protection of windows, ventilation and related, and some protections on the use of machinery (heating, cooling, air conditioning). In this work, we analyse the sensitivity of the thermal performance results to some actions taken by users in buildings with different building designs. The importance of the control on the conditioning devices, and on the actions that the users can undertake, is emphasized, and the effect on energy consumption and on comfort is also considered.

KEYWORDS: energy, comfort, user's actions, robust design

INTRODUCTION

In this study we classify some actions that the users can undertake in two different schemes, the first one ranking actions based on the influence on the consumption of the buildings and the second ranking actions based on the sensation of comfort perceived inside them. The purpose of the work is to obtain a preliminary classification that underlines the role of an action in the thermal behaviour of the buildings and in the sensation of comfort that generates inside. Then, a sensitivity analysis on the actions of the users that produce changes in the parameters that define the thermal performance of a building is done, for buildings with different designs. The sensitivity analysis of the thermal parameters changes that the users can undertake shows that different building designs lead to different sensitivities. Also, the actions on the control systems and machinery might have large influence on thermal performance. Then, it seems reasonable to limit the actions the users' can do, taking care to preserve the appropriate control impression by the users. Our results suggest the importance to choose correctly the design, in order to be "robust" facing users' actions, maintaining an appropriate thermal and comfort performance.

EVALUATION METHOD

Energy consumption and the sensation of comfort are two very different terms, but both are very important for evaluating the energy efficiency and performance of

buildings. A primary criterion for assessing comfort and energy consumption can be obtained from heat transfer equation. This equation may be written as Eqn. 1 [1] [2]:

$$M \frac{dT_i}{dt} = I + D + G (T_e - T_i) \quad (1)$$

where T_i is a representative internal temperature depending on the temperature of the ambient and on the velocity of the air, T_e is the external temperature, I is a term for radiation gains, G is a loss coefficient (which includes thermal conductivity and air exchanges), D is the consumption term and M is the thermal mass. These terms are expressed as specific terms (W/m^3 and $W/m^3 \text{ } ^\circ\text{C}$), in order to assess the behaviour of a generic portion of space and to compare buildings with different plan shape and space distribution. For a first asses, average values may be used, and the above equation may be written as a balance equation Eqn. 2, without the accumulation term (the first term of the heat transfer equation):

$$D_c = G (T_i - T_e) - I - D_o \quad (2)$$

where the consumption term is divided in two parts, the first one related to the cooling/heating system and the second one related to others contributions, as human body, electrical lights and appliances, presence of animals or plants. This equation refers to average conditions, and is most useful in relative stable conditions, when the variations with the time of all the terms are small. In order to evaluate changes in the temperature or in the consumption caused for actions of the users, the balance equation may be used. Clearly, the first step is determine which actions are to be considered. This work focused on actions that frequently a normal user can undertake, as opening or closing windows and doors, turning on or off lights and others appliances, opening or closing shutters or blinds, resetting base temperature for heating or cooling system. The actions selected are representative of a normal use of a flat or of a working space.

To obtain an indicative classification of the actions that have relevant influence on the comfort is more difficult. The sensation of comfort depends on a lot of factors, and cultural and social influences can be determinant on the experienced comfort. The more easy way to evaluate the sensation of comfort is relate this sensation to a temperature index that may asses with the same balance equation used to asses the energy consumption.

The equation is also written as Eqn. 3:

$$T_i = T_e + \frac{I + D}{G} \quad (3)$$

where T_i is the temperature first sensed by the users.

The method of analysis of the relevance of all these actions is the following: once selected an action,

1. the action changes one or more of the terms of the balance equation, these terms are evaluated before and after the action (the others terms are considered constant);
2. the increase or decrease of the temperature T_i is evaluated with Eqn. 3, in order to classify the relevance of the action on the sensation of comfort;

3. the increase of the consumption necessary to maintain an acceptable T_i is evaluated with Eqn. 2, in order to classify the relevance of the action on the consumption;
4. the action is classified in a scale of very low, low, medium, high or very high repercussion on comfort and energy saving.

To obtain a numerical asses of the relevance of these actions on the energy consumption, we assumed that:

- any action that increases the consumption by 0-0.5 W/m³ has a very low repercussion on consumption
- any action that increases the consumption by 0.5-2 W/m³ has a low repercussion on consumption
- any action that increases the consumption by 2-4 W/m³ has a medium repercussion on consumption
- any action that increases the consumption by 4-10 W/m³ has a high repercussion on consumption
- any action that increases the consumption by more than 10 W/m³ has a very high repercussion on consumption

and to obtain a numerical asses of the relevance of these actions on the comfort, we assumed that:

- any action that increases or decreases the internal temperature by 0-1 °C has a relatively low repercussion on comfort
- any action that increases or decreases the internal temperature by 1-2 °C has a medium repercussion on comfort
- any action that increases or decreases the internal temperature by 2-4 °C has a high repercussion on comfort
- any action that increases or decreases the internal temperature by more than 4 °C has a very high repercussion on comfort
-

A complete study of the comfort dependence on various parameters has to consider the presence in the space of important differences in this temperature. An action as “turn on one light of 15 W” has not a strong influence on the average internal temperature of the space, but the sensation of a user near this light may be strongly affected of this action [3]. In this first approach the actions selected to be compared are:

- opening a ordinary window
- opening an internal door
- opening two windows in opposite façades to cross ventilate
- opening or forgetting to close a shutter in presence of relevant solar radiation
- turning on from one to five lights of 15 W
- turning on from one to five lights of 60 W
- turning on various appliances for a total of 500 W

NUMERICAL ASSES OF THE ACTIONS

1 – Opening an ordinary window: the parameters that change with this action are G and I, but in a first approach the variation of the term I can be not considered (is low if the window is an ordinary window). So, the variation of G is the change to be considered. The G term of loss is divided in two terms, one depending on the thermal transmission and other depending to ventilation. Is the second that strongly changes with this action (the first has only a low variation). The G ventilation term is normally expressed with $G_v = 0.30 \text{ rh}$, where rh is the total air exchange in one hour. The unit is 1/h. So, opening an ordinary window causes an increase of rh. We consider for rh the value of 1.5 before the action (according to the indications of Carrier and ASHRAE [4] [5]) and 2.5 after the action. All the others terms are constant, and its values are: $T_e = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $I = 1.5 \text{ W/m}^3$, $G_t = 0.2 \text{ W}/(\text{m}^3 \text{ }^\circ\text{C})$, $D_c = 0 \text{ W/m}^3$ and $D_o = 1 \text{ W/m}^3$. The internal temperature decreases with the action by 23.8 to 22.6 $^\circ\text{C}$. The action so will considerate having a medium repercussion on the comfort.

2 – Opening an internal door: we expect that this action has a low repercussion. The asses is done with the values: $T_e = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $I = 1.5 \text{ W/m}^3$, $D_c = 0 \text{ W/m}^3$, $D_o = 1 \text{ W/m}^3$, $G_t = 0.2 \text{ W}/(\text{m}^3 \text{ }^\circ\text{C})$, $\text{rh} = 1.5$ before and at most 1.7 after the action. The decrease of the T_i is very low: 0.3 $^\circ\text{C}$. The increase of the consumption to maintain $T_i = 23.8 \text{ }^\circ\text{C}$ is also very low: 0.2 W/m^3 . A change on the climatic dates for this action is not very important and the action is also classified to have a “very low repercussion”.

3 – Opening two windows in the opposite façades to cross ventilate: with the climatic dates of the first asses and considering the variation of rh from 1.5 to 4, the internal temperature decreases of 2.2 $^\circ\text{C}$. This action is classified also to have a “high repercussion on the comfort” in this climatic situation. The increase on the consumption to maintain $T_i = 23.8 \text{ }^\circ\text{C}$ is 2.8 W/m^3 . The repercussion on the consumption is also classified as “medium” in this climatic condition. As well in the first asses, the winter conditions change strongly the results: the action is clearly very relevant on the comfort and on the consumption. The summer conditions analysis shows that the relevance of this action is not very high. In fact, it should be very important, because of the importance on the sensed temperature of a user of the velocity of the air. The comfort sensation depends strongly on this factor: a high temperature can be tolerated if in the ambient the air velocity is relatively high.

4 – Opening or forgetting to close a shutter in presence of relevant solar radiation: the term that changes is I. We suppose a relevant radiation contribution of 10 W/m^3 , which in presence of the shutter is reduced to 1.5 W/m^3 . First we assume climatic dates of summer: $T_e = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_o = 1 \text{ W/m}^3$, $G_t = 0,2 \text{ W}/(\text{m}^3 \text{ }^\circ\text{C})$, $G_v = 0.75 \text{ W}/(\text{m}^3 \text{ }^\circ\text{C})$, $D_c = -8.2 \text{ W}/(\text{m}^3 \text{ }^\circ\text{C})$. A positive D_c term in Eqn. 2 is a contribution in heating, a negative term means cooling. The increase of the temperature T_i when the shutter is opened is asses on 9 $^\circ\text{C}$. This is clearly a very high variation that generates a very uncomfortable sensation. The increase on the consumption to maintain an acceptable internal temperature is also very high: 9 W/m^3 . The action is classified to have a very high repercussion on the comfort and consumption. This result shows the importance of the solar radiation, maybe not always considered. The case of winter is much more difficult to evaluate. The solar radiation is a consumption gain and the internal temperature increases, so the consumption can decrease. Here the

problem is other: in proximity of the window the sensation of heat can generate in the users the idea to reset the temperature base in the heating system, but others users, don't standing near this window, have also the opposite sensation of cold. The snow ball effect that this situation can generate is absolutely dangerous and has to be controlled. The importance of the design (orientation of the windows and presence of protections, for example) appears to be fundamental.

5 – Turning on from one to five lights of 15 W: this case is illustrated in Figure 1: the increase of the internal temperature is low (0.5 °C for 5 lights), so the action is considered as have a low repercussion on the comfort sensation. The energetic repercussion is also very low.

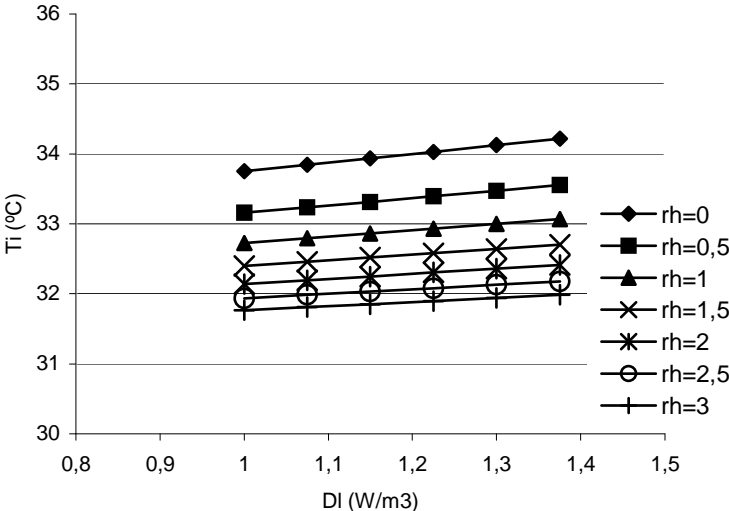


Figure 1: variation of the internal temperature turning on for one to five lights of 15 W

6 – Turning on for one to five lights of 60 W: this case is the same of the precedent, but with an higher value of the power of the light. The result is also different, Table 1 compare the values:

Table 1: increase of the consumption and of the internal temperature turning on five lights of 15, 30, 45 or 60 W

light (W)	consumption (W/m³)	internal temperature (°C)
60	1.5	33.6
45	1.25	33.4
30	0.75	33
15	0.36	32.7
0	0	32.4

Turning on five lights of 60 W causes an increase of 1.2 °C, the action is also considered to have a medium repercussion on the comfort. The relevance on the consumption is always relatively low.

7 – Turning on a computer or others appliances: it is clear that the following results may be extended, and that the role of 500 W of various appliances is starting to be important. These appliances may be increased the internal temperature of 2-3 °C, and the relevance on the comfort may be high.

The consumption increase proportionally, is not comparable with the power of the heating or cooling systems, but we can considerate that it is relevant in an ordinary flat.

CONCLUSIONS

Analysing comfort or assessing energy consumption might be difficult, in particular when human behaviour plays a relevant role. For this reason, a complete classification of the actions and decisions that users can carry out is needed.

Average thermal balance equations are clearly insufficient when one is making a full analysis of the summer scenario, because when changes in internal temperature are not mechanically controlled, there is typically an ample amount of ventilation with considerable incertitude on its value. Furthermore, changes in use over the course of the day and thermal mass are also significant when one is assessing the dynamic behaviour of the building. One must also discuss the spaces of a typical building layout in order to provide a reference framework for analysing unique scenarios.

Temperature and lighting gradients and particularities of air movement, in addition to other factors, may have a large influence on energy savings and a very high repercussion on comfort. We highlight the significance of a building's design with regard to its ability to effectively "resist" the actions of its users – that is, its ability to remain thermally stable without consumption singularities in the light of inappropriate actions carried out by its users given its energy and/or comfort conditions. These actions could be due to erroneous judgement or other causes, such as simple omissions. When architects tackle issues concerning energy efficiency and comfort, all design solutions should aim to make it easy, or even "unavoidable", for users to inhabit these buildings in a correct fashion. Training users may not be enough to ensure that buildings are used in a suitable way. In conclusion, design strategies and project solutions must be taken into serious consideration in order to minimise the possibilities of misusing energy and stifling comfort. Furthermore, the sensations of users must be correlated to the actions and decisions they can actually carry out, as it should be recalled that cultural and sociological factors play a significant role in determining human behaviour.

Future investigations should consider all these factors. As we have pointed out, however, the current situation underscores the fundamental role played by design strategies on the sensation of comfort inside buildings. Suitable designs should not only be energy-efficient and comfortable, but also robust in order to make it difficult for incorrect actions to take place.

References:

- [1] H. Coch, R. Serra; *Arquitectura y energía natural*; Edicions UPC; Barcelona 1995
- [2] Basic Norms: Thermal conditions for buildings in Spain. (Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79)
- [3] H. Coch, A. Isalgue, M. Palme, R. Serra; *Robust design: a way to control energy use from human behaviour in architectural spaces*; PLEA 2006 (Geneva, Switzerland)
- [4] *Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*; ASHRAE 62; 11-08-2000 version
- [5] Carrier AIC; *Manual de aire acondicionado*; Ed. Marcombo; Barcelona 1980

Anexo E

Comfort evaluation: the relevance of the transition time; AsiaSustaynability Conference, Hanoi, Vietnam, 2007.

Comfort evaluation: the relevance of the transition time

M. Palme¹, I. Marincic², A. Isalgué¹, H. Coch¹, A. Fanchiotti³, R. Serra¹

¹Escuela de Arquitectura de Barcelona, UPC, Diagonal 649, Barcelona 08028, (Spain)

²Arquitectura, Universidad de Sonora (Mexico)

³Dip. Ingegneria Meccanica e Industriale, Univ. Roma Tre, (Italy)

ABSTRACT: Comfort evaluation of indoor spaces is generally done with the well know Fanger's method, which considers a static situation and average values for the variables of the thermal balance equation. However, the reality is quite different and the dynamic effects are often dominant over the sensation of comfort that users feel, for instance, when entering in a conditioned space from the street: The first impression is different from what is sensed after some time in the space. With the addition of a transition term, the Fanger's equation for the PMV can better approximate the reality, but it is important to determine the time dependence of the feeling of the users after changes, in order to evaluate the empiric coefficient of this additional term. Field studies will be conducted to this effect, in different climates and countries: Mexico, Italy and Spain. Expected results are the definition of time dependence and the coherence with the predicted values obtained from the use of the additional terms in the Fanger's equation. The results of previous Mexican analyses have demonstrated the necessity of another correction term, dependent on climatic adaptation. The final form proposed for the equations to evaluate comfort has points in common with a PID processor, where the integrative term is the adaptation correction and the derivative term is the dynamic correction.

Keywords: users, comfort, pmv

1. Introduction

Comfort evaluation of indoor spaces is a very important need of the architectural project. Normally, this is conducted with the method developed by Fanger in the 70s. This method is based on the thermal balance of the human body.

Other methods have been proposed before and after the Fanger's equations publications, but today it is very common to refer to the PMV index of the Fanger's method. All these evaluations use average values, or, it can be said, static conditions. A dynamic method of calculation is also an urgent need.

The comfort sensation of a person moving from one spaces in to another could be evaluated with a simple derivative correction in the formulas used to assess comfort. The aim of this work is to propose this correction term for the Fanger's standard method. Possible applications of the new formula will also be discussed. The final proposed form of the equations will have the form of a PID processor, well know instrument to assess physical phenomena with an internal control.

Architects may think that evaluations like these are not very important, but everyone experiments all days the impact of situations like feeling cold in a restaurant, very warm in a metro station, or when shopping in winter one has to enter in a large mall with very uncomfortable temperatures for the clothes he is wearing.

2. Methodology

The Fanger's equations evaluate the comfort based on six variables [1]: air temperature, mean radiant temperature, air velocity, relative humidity, metabolic rate and clothing. The variables are inserted into an energy per unit time balance equation (1):

$$H - E_d - E_{sw} - E_{re} - L - K = S \quad (1)$$

where H is the internal heat production in the human body, E_d is the heat loss by water vapour diffusion through the skin, E_{sw} is the heat loss by evaporation of sweat from the surface of the skin, E_{re} is the respiration latent heat loss, L is the dry respiration sensible heat loss, K is the heat transfer from the skin to the outer surface of the clothed body, and S represents the energy that the human body would have to loose or receive in the unit time to keep the energy balance while feeling comfortable, that is, assuming for the skin temperature and for E_{sw} the comfort values. This value is directly connected with the PMV (Predicted Mean Vote) concept [1] expressed in equation (2):

$$PMV = \left(0.352e^{-0.042 \frac{M}{A_{Du}}} + 0.032 \right) S \quad (2)$$

where S is the result of equation 1 in comfort conditions and M/A_{Du} is the metabolic power for body surface unit. The difference between M and H is that M is the total power production of the metabolism, where H is the heat production of the metabolism, the difference being mechanical work done by the body.

For a dynamic evaluation, a first approach can be

$$\| S' \| = \| S \| + \left\| \frac{\delta S}{\delta t} \right\| \Delta \quad (3)$$

where the derivative term is 0 in static conditions. The value of Δ to be used will be obtained from field studies, and probably it depends on the user's expectations. A first tentative value could be set at 60 s. An alternative method is the ACT program, developed by Isalgué and Serra [2]. The variables to be calculated are in this case the equivalent temperature (that takes into account the ambient) and a desired temperature (that takes into account the expectations of the users). ACT and PMV results are something different, because of the different weight of the single factors. Future works will compare the results obtained with these and other methodologies.

3. Results

With these equations we can simulate some dynamic situations, but all the results have to be confirmed by field studies. At the moment, we are doing the first experiment, with the values of the parameters of Table 1 for the internal space. In all the tables it is used the Met unit ($1\text{Met}=58\text{ W/m}^2$).

Table 1: Internal values of the parameters

Ta (°C)	Tmr (°C)	Vair (m/s)	HR (%)	Met	Clo
18	20	0,2	35	1,0	0,8

The values of the external ambient parameters will only be known the day of the experiment, but let's suppose they are as shown in Table 2.

Table 2: External values of the parameters (supposed)

Ta (°C)	Tmr (°C)	Vair (m/s)	HR (%)	Met	Clo
24	24	1	35	1,0	0,8

Expected results have to show the very different behavior between the pmv and the adjusted pmv. The predicted behavior is described in Figure 1.

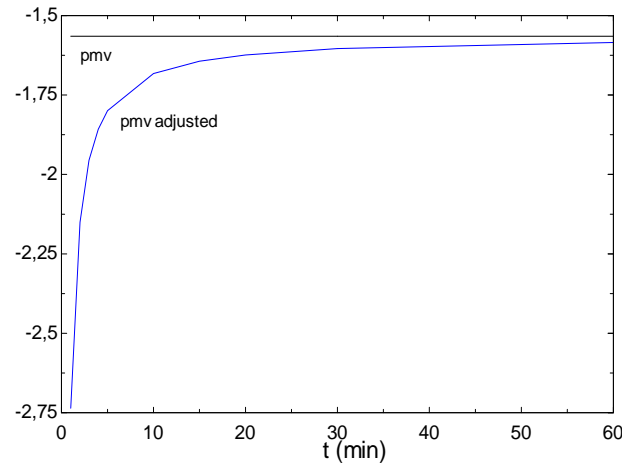


Figure 1: PMV and PMV adjusted of the prediction

In the Mexican case it will be considered the adaptation term proposed by the same Fanger for hot dry climates [3].

The field study will be conducted this way: a group of 40 students is divided in two groups of 20. All students are asked to mark down their vote. This action is done outdoor. One group is then moved inside a classroom, while the other stays outside for 20 minutes, then joins the other group inside. All students vote for the second time, and are asked to vote every minute, during 15 minutes. After, they vote every 5 minutes, during 45 minutes. The experiment takes 1 hour and half in total. The votes are expressed in the PMV scale, from -3 to 3, were -3 is very cold, -2 is cold, -1 is cool, 0 is the neutrality, 1 is little warm, 2 is hot and 3 is very hot.

The predicted results of the equations taken into consideration here have been computed using the EES program.

4. Applications

A general approach, valid in all cases, would be very useful. While working on this hypothesis, some specific case can be analyzed, which will be evaluated in the future.

One important application would be the determination of the comfort temperature in the hallways of commercial centers. There, in winter, shoppers typically wear clothes and have metabolic rates different from the ones of salespersons.

Obviously, the temperature in the hallways should be different from the temperature in the shops. In fact, often commercial centers are kept at a uniform temperature in all the structure.

With the proposed method, it is possible to underline that temperatures have to be different, and to evaluate the value for the temperature in the hallways. Table 3 shows the supposed values for people working in a center.

Table 3: Typical values of the parameters for people working in a commercial center

Ta (°C)	Tmr (°C)	Vair (m/s)	HR (%)	Met	Clo
20	24	0,2	30	2,0	0,8

Table 4 shows the supposed values for people shopping in a center (winter conditions).

Table 4: Typical values of the parameters for people shopping in a commercial center in winter

Ta (°C)	Tmr (°C)	Vair (m/s)	HR (%)	Met	Clo
20	24	0,2	30	1,6	1,3

Table 5 shows the supposed external values.

Table 5: Supposed external values of the parameters for people shopping in winter

Ta (°C)	Tmr (°C)	Vair (m/s)	HR (%)	Met	Clo
0	10	1	30	2,0	1,3

Figure 2 compares the PMV working and shopping people, considering the correction term and not considering it.

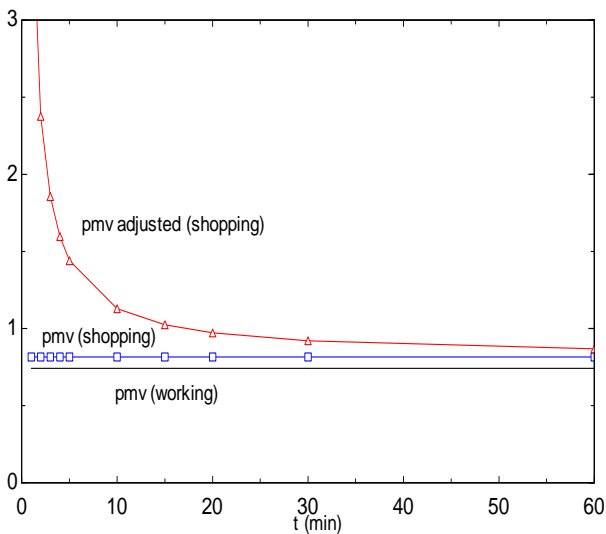


Figure 2: PMV and PMV adjusted for people working and shopping in a commercial center in winter

By setting the hallway temperature at 15 °C instead of 20, and Tmr at 18 °C instead of 24, we obtain the results of Figure 3, which show that comfort conditions for shoppers entering the shopping center from the outside are reached much more rapidly

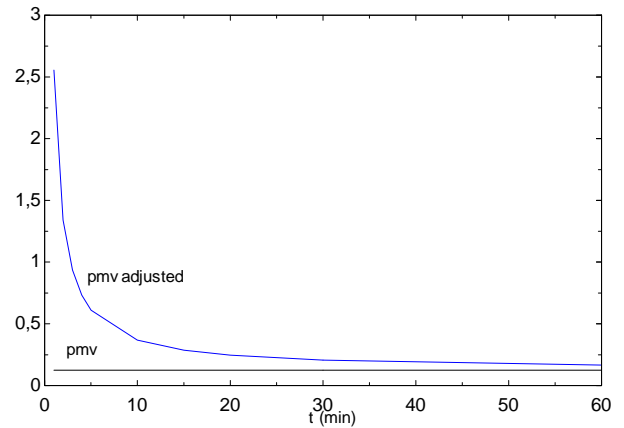


Figure 3: PMV and PMV adjusted for people shopping in a commercial center with a hallway temperature of 15 °C

Another application can be that of summer air conditioning in restaurants. Conditions can range from very uncomfortable near the vents, to generally uncomfortable for people coming from the supposed hot outside conditions. Table 6 shows the values of the parameters for people sitting in a restaurant in summer. Table 7 shows the typical external values in summer. Figure 4 shows the PMV of people coming from outside, with and without the correction term.

Table 6: Typical values of the parameters for people sitting in a restaurant in summer, with air conditioning

Ta (°C)	Tmr (°C)	Vair (m/s)	HR (%)	Met	Clo
24	30	0,2	30	1,0	0,6

Table 7: Supposed external values of the parameters in summer

Ta (°C)	Tmr (°C)	Vair (m/s)	HR (%)	Met	Clo
30	30	0	50	1,5	0,6

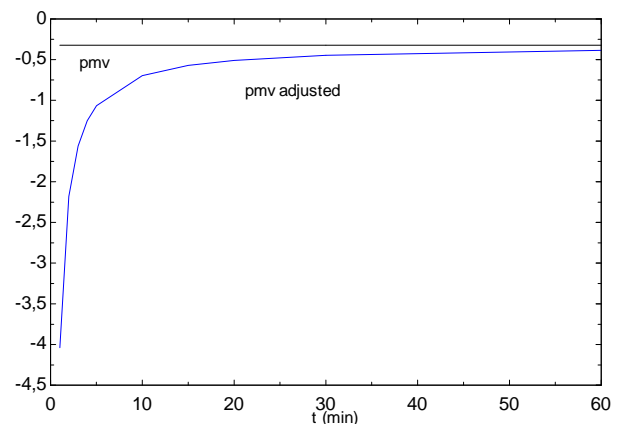


Figure 4: PMV and PMV adjusted in a restaurant with air conditioning

To make a comparison, we analyze the situation of a restaurant with a shaded outdoor space. Values of the parameters are shown in Table 8.

Table 8: Typical values of the parameters in a restaurant with a shaded outdoor space

Ta (°C)	Tmr (°C)	Vair (m/s)	HR (%)	Met	Clo
28	26	0,3	50	1,0	0,6

Figure 5 shows the PMV obtained in this condition. It has to be noted that the sensation of comfort is better than in the previous situation. The effect of air conditioning in a restaurant is rather negative, both from the energy and the comfort point of view.

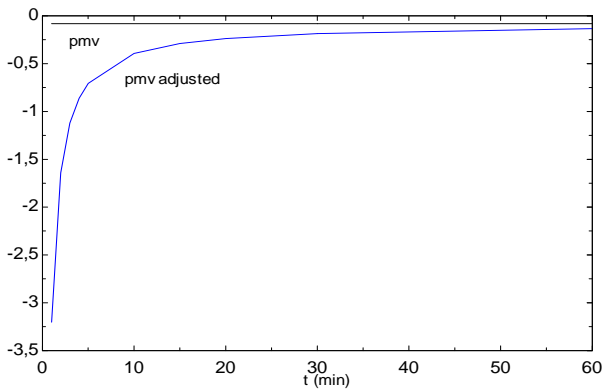


Figure 5: PMV and PMV adjusted for a natural conditioning restaurant

The last application we consider is a subway or metro station. There, a normal evaluation shows that the situation is not good, but an evaluation conducted considering the addition term shows that it is even worse. Clearly, it is not simple to solve the problem of metro stations: people are changing environment very rapidly, from warm to hot and from hot to very cold. A possibility can be higher natural ventilation of the stations, and the reduction of the set temperature inside the trains to values nearer to external temperature. Table 9 presents the initial condition, for example in spring. Table 10 shows the values inside of the passageways of the station.

Table 9: Supposed values of parameters in spring

Ta (°C)	Tmr (°C)	Vair (m/s)	HR (%)	Met	Clo
24	26	0,6	40	1,6	0,8

Table 10: Typical values of the parameters in the passageways of the station

Ta (°C)	Tmr (°C)	Vair (m/s)	HR (%)	Met	Clo
28	30	0,3	60	2,0	0,8

Figure 6 shows the first step of the transition, from the outside to the corridors. Users feel very warm during the transition.

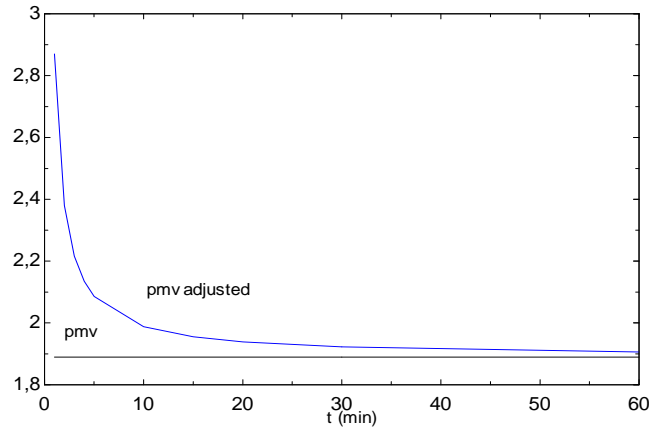


Figure 6: PMV and PMV adjusted for a person entering in a corridor of the metro station

Table 11 shows the values of the parameters inside the trains.

Table 11: Typical internal values of the parameters inside the trains

Ta (°C)	Tmr (°C)	Vair (m/s)	HR (%)	Met	Clo
20	24	0,3	30	1,0	0,8

Figure 7 shows the second step of the transition, from the corridors to the metro, where users feel very cold during all the stay.

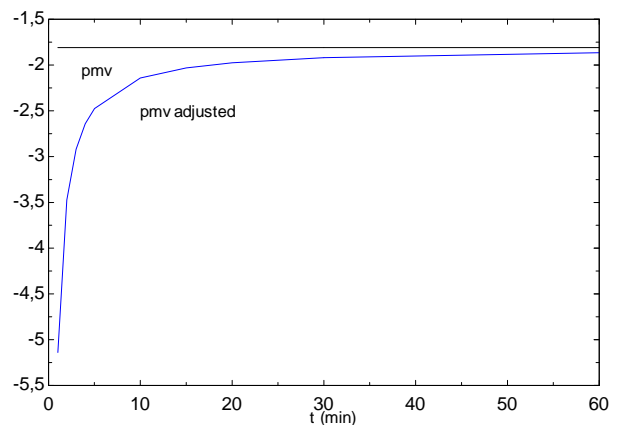


Figure 7: PMV and PMV adjusted inside of the trains

The situation is very uncomfortable. It is very difficult to solve the problems of transition in a space as complex as a metro station, but it seems reasonable to accommodate the set temperature of the air conditioning system inside the trains and to better ventilate the stations. Another possibility is, when feasible, to control the number of passengers entering at the same time into the station, with barriers or waiting spaces.

5. Discussion

In this work we have discussed the PMV theory and some changes that can improve it. Many methods have been developed to this effect, but normally these methods have not the physical basis of the Fanger's equations. The discussion over the acclimatization, started immediately after the publication of Fanger's book, showed that it is possible to enrich the method by adding new terms. So, for hot dry climates, the same Fanger proposed a correction to his equation.

The dynamic situations here studied, are an important part of the general phenomena called acclimatization. It is very common to refer at three different types of acclimatization: physiological, psychological and behavioral [4]. Under the time point of view, we can also refer to a long time acclimatization or to a short time acclimatization.

In this work, another term is introduced: the rapid change acclimatization. It is difficult to say which phenomena are present in the three different acclimatization times. It seems reasonable to assume the long time acclimatization to be both behavioral and physiological. Short time acclimatization (with the months of the year, for instance) can be probably more psychological. The newly introduced rapid acclimatization is clearly physiological, and it depends strongly on the metabolic processes of the body.

It has to be remarked that psychological effects can also be present. For example, people entering a very cold space, coming from a very hot environment, can vote expressing satisfaction. This it is not in contrast with the rapid change acclimatization. People feel, in reality, very cold, but this cold sensation is exactly what they desired. So, the psychological effect can be dominant over the physiological adaptation. This fact would not affect the importance of the transition evaluations.

The final form for the evaluation is proposed in equation (4):

$$\|S'\| = \|S\| - \frac{1}{n} \int \|S\| dt + \left\| \frac{\delta S}{\delta t} \right\| \Delta \quad (4)$$

The integral term represents the long term acclimatization, the derivative term the rapid change effect. This equation has the form of a PID processor, and it seems a correct approach to the body response to environment. The coefficients of the correction terms will be obtained from field studies, which will start soon. The value of the coefficient n would be the number of integration steps, in a first approach.

In the future, a method of evaluation of this kind will probably be needed. To obtain this, it is important to describe very well the dynamic

mechanisms of our body. For example, it has to be expected the perception of cold discomfort to be faster than the perception of hot discomfort, because of the different number of regulation processes used to maintain the thermal neutrality: only one (vase constriction) in the case of cold and two (vase dilatation and sweat increase) in case of hot conditions. On the other hand, discomfort sensation due to hot conditions would be worse in the long term than cold discomfort sensation: initially, we can regulate skin temperature and energy losses associated to sweat, but we don't dispose of any metabolic regulation to eliminate the discomfort sensation created by wet clothes. Moreover, wet clothes can cause cold discomfort sensations, even once the environment becomes otherwise comfortable: it is hard to restore a good situation, not to mention unpleasant smells, ambient humidity increase due to sweat evaporation, etc...

So, the first need is to understand well the regulatory phenomena of the body, under critical dynamic conditions. Secondly, a general equation similar to the equation proposed here can be pursued. Finally, such an equation would, hopefully, become part of the architectural design process. Only with practice and experience we will be able to correctly use energy in order to realize the best comfort conditions for all the spaces we live in.

REFERENCES

- [1] P.O. Fanger, Thermal Comfort, Danish Technical Press, Copenhagen 1970
- [2] R. Serra, H. Coch, Arquitectura y energía natural, Ediciones UPC, Barcelona 1995
- [3] P. O. Fanger, J. Toftum, Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates, Energy and Buildings 34 (2002), 533-536
- [4] G. S. Brager, R. J. de Dear, Thermal adaptation in the built environment: a literature review, Energy and Buildings 27 (1998), 83-96

Anexo F

Dynamic sensation of comfort in buildings:
the temperature changes effects; Passive
and Low Energy Cooling Conference,
Crete, Greek, 2007.

Dynamic sensation of comfort in buildings: the temperature changes effects

M. Palme, A. Isalgué, H. Coch and R. Serra

Universitat Politècnica de Catalunya, ETSAB, Diagonal 649 – Barcelona 08028, Spain

I. Marincic

Universidad de Sonora, Mexico

A. Fanchiotti

Università di Roma Tre, Italy

ABSTRACT

The sensation of comfort in buildings depends on external and internal variables: the well-known PMV method relates the expected temperature with the physiological behavior of the human body. Some models have discussed the relevance of adaptation factors, in order to explain the higher expected “good” temperature of users living in warm climates. The same PMV method has been modified for these climatic situations. An adaptation term has clearly to be considered, but other effects are important to determine the real expected temperature. In this paper temperature changes are considered to play an important role determining the expected “good” temperature. Effects of ventilation, rapid thermal changes when people move inside or outside of a building, continuous change in the temperature rate in the HVAC controlled spaces, are investigated here.

Results show how to determine a dT/dt dependent term, which has to be considering in the PMV evaluation, in warm as in temperate climate. These results will be compared with field studies for different climates. A PID (proportional integrative derivative) correction in the PMV predict results seem to have to be expected, to consider at the same time adaptation and temperature rate effects.

1. INTRODUCTION

The thermal comfort evaluation is an important need in architectural project and in HVAC

system design. Different methodologies were developed in the past half of century, in order to approach the evaluation of comfort, but the more complete appears the method that utilize a thermal balance for the human body. The exact solution of the balance equation is complicated to obtain, but Fanger (1970) propose the values of the internal variables “skin temperature” and “heat loss by evaporation of sweat secretion” that lead to a comfortable sensation. With these values is possible to evaluate the thermal charge of the body, and the consequent comfort perception.

The PMV method is now the best method proposed for the thermal comfort evaluations, because of his generality (all the variables are considered) and of the good accord with the field studies conducted in USA and Denmark by the author. However, a lot of problems in the application of the PMV theory are open today. The influence of the climate over the concordance of the results obtained from the PMV analysis with the field studies is a reality. In the recent past some authors have discussed the relevance of the climate over the results, and the possible ways to complete the Fanger’s equations with an acclimatization term. In Europe, Van Hoof and Hensen (2005) discuss the relevance of the acclimatization factor in temperate climate. In Mexico, Marincic, Ochoa and Isalgué (2005) propose a correction for the ACT program (a program for the evaluation of comfort based on the PMV method), in order to consider the acclimatization. The same Fanger discuss the possibility of correct the PMV in some climates (Fanger, 2002).

The importance of the acclimatization is really large, but other factors may influence the

results of a PMV analysis. Particularly, the presence of a fast change in the external temperature or in the heat exchange of the body, can generate a strong discomfort sensation, that has not been fully evaluated. In this work the eventual addition of a “fast temperature change” term in the Fanger’s equations is discussed. The results obtained with the model are compared with field studies conducted in three countries: Spain, Mexico and Italy.

2. METODOLOGY

2.1 Overview

Considering the transition from one space into another, it is possible that the physiological response of the body assumes different forms. Particularly, when the transition crosses the zero PMV line, it is possible to feel an overheating or an overcooling sensation. Otherwise, thermal mass of the body can cause a delay in perception of the new situation. Psychological and cultural factors also play an important role. For example, if the start situation locates in a +2 PMV and the final situation locates in a -1 PMV, people can feel a strong cold sensation in the first minutes of the transition and vote -2, or can feel a relief sensation and vote 0. In order to determine the real behavior of people, field studies have to be conducted. The relief sensation has probably a psychological origin, but a completely physiological definition of the transition is very difficult to obtain, due to the presence of expectations conditioning. Expected results are the choice between a gradual passage into the second environment and an overheating or an overcooling sensation. A psychological relief sensation can also be expected. Figure 1 shows the possible characteristic of a gradual passage, Figure 2 shows the characteristic of an overcooling. Figure 3 shows the relief sensation and corresponding votes.

2.1 PMV calculation

The Fanger’s method starts from the heat balance of the body expressed in equation (1):

$$H - E_d - E_{sw} - E_{re} - L - K = S \quad (1)$$

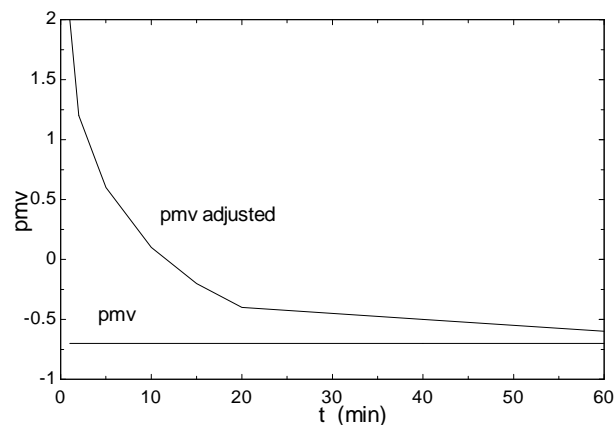


Figure 1: gradual passage from pmv 2 to pmv -0.7

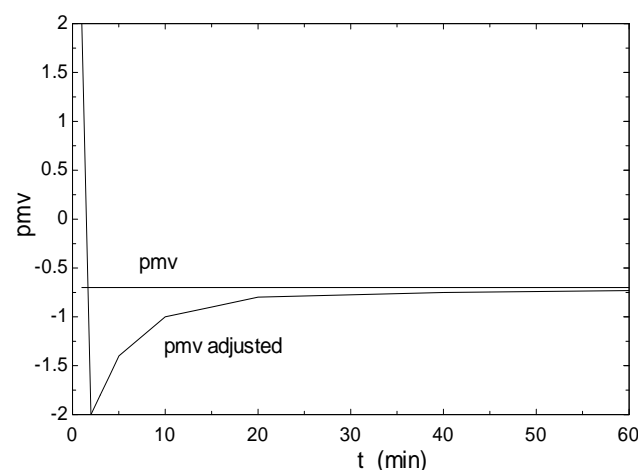


Figure 2: overcooling sensation passing from pmv 2 to pmv -0.7

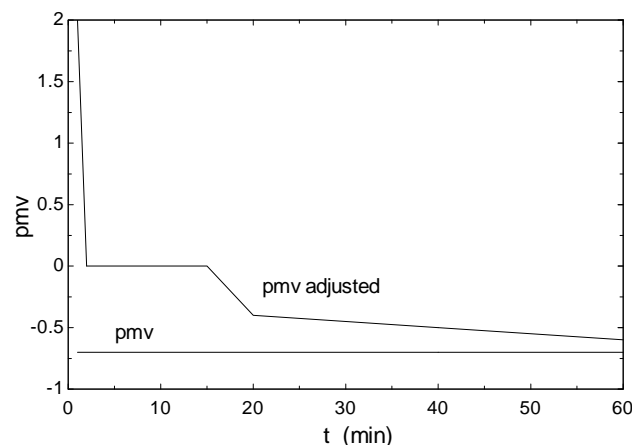


Figure 3: relief sensation during transition from pmv 2 to pmv -0.7

were:

- H: internal heat production in the human body
- E_d : heat loss by water vapour diffusion through the skin
- E_{sw} : heat loss by evaporation of sweat from

- the surface of the skin
- E_{re} : respiration latent heat loss
- L: respiration sensible heat loss
- K: heat transfer from the skin to the outer surface of the clothed body
- S: energy that the human body would have to loose or receive in the unit time to keep the energy balance while feeling comfortable, that is, assuming for the skin temperature and for E_{sw} the comfort values.

The value S is directly connected with the PMV (Predicted Mean Vote) concept (Fanger, 1970) expressed in equation (2):

$$PMV = \left(0.352e^{-0.042 \frac{M}{A_{Du}}} + 0.032 \right) S \quad (2)$$

were:

- S: result of equation (1) in comfort conditions
- M: metabolic power of the body. The difference between M and H is that M is the total power production of the metabolism, where H is the heat production of the metabolism, the difference being mechanical work done by the body.
- A_{Du} : surface of the human body

In dynamical conditions, the value S has to be changed for a new value S':

$$\| S' \| = \| S \| + \left\| \frac{\delta S}{\delta t} \right\| \Delta \quad (3)$$

were Δ is an empiric coefficient (time dimension). A positive value would mean an overestimation of any change, and a negative value, a tracking effect, smoothing fast changes.

With this new value is possible to predict a dynamical transition vote. Evaluation of PMV and adjusted PMV with the new S value was made with the EES software. The coefficient Δ has to be obtained from field studies, fitting the empiric results always with the EES software. More difficult appears to determine the sign of

the new S term, as it might depend on the previous PMV, and the same concordance of sign between S and its variation is not secure, as it might also depend on the previous S or PMV.

2.3 Experimental conditions

As first experiment, the dynamical transition from the external situations resumed in Table 1 (Rome), 2 (Hermosillo) and 3 (Barcelona) to the internal situation resumed in Table 4 and Table 5, was evaluated.

Table 1: external conditions in Rome on 17/05/2007, 13.00 h. Ta: air temperature, Tmr: mean radiant temperature, v air: speed of air movement, rh: relative humidity, Met: estimated metabolism of the subjects, Clo: average dressing of people.

Ta (°C)	Tmr (°C)	v air (m/s)	rh (%)	Met	Clo
23	24	0,5	50	1,0	0,66

Table 2 : external conditions in Hermosillo on 10/05/2007, 12.00 h.

Ta (°C)	Tmr (°C)	v air (m/s)	rh (%)	Met	Clo
32	33	0,3	15	1,0	0,66

Table 3 : external conditions in Barcelona on 17/05/2007, 12.00 h.

Ta (°C)	Tmr (°C)	v air (m/s)	rh (%)	Met	Clo
23	24	0,5	50	1,0	0,66

Table 4 : internal conditions in Rome and Barcelona

Ta (°C)	Tmr (°C)	v air (m/s)	rh (%)	Met	Clo
20	21	0,2	40	1,0	0,66

Table 5: internal conditions in Hermosillo

Ta (°C)	Tmr (°C)	v air (m/s)	rh (%)	Met	Clo
23	24	0,2	30	1,0	0,66

Internal conditions differences between Mexico and Europe makes the results more comparative, due to the different adaptation of people living in the Sonora desert, that feel comfort in a different range of temperatures, displaced to high values.

The experiment was conducted with students 20-25 years old, divided in two groups. First all students voted outside, then one group moved inside. Past 20 minutes, the second group moved inside and immediately all students voted. They voted every minute during 15 minutes, and every 5 minutes during other 45 minutes.

Clo values were estimated according to D'Ambrosio, Fato, Piccininni, Alfano and Cirillo (1986). Met values were estimated according to Fanger (1970).

All the environmental parameters were registered during the experiment with Babuc and Escort systems. Type of experiment has also to be considered as Class II, according to De Dear classification (De Dear, 1998).

3. RESULTS

Figures 4, 5 and 6 show the votes of students in the tree experiments. It has to be noted that the internal conditions were not completely stable (Figs. 7-9), so the relation between the first and the second group is the fundament parameter of the analysis.

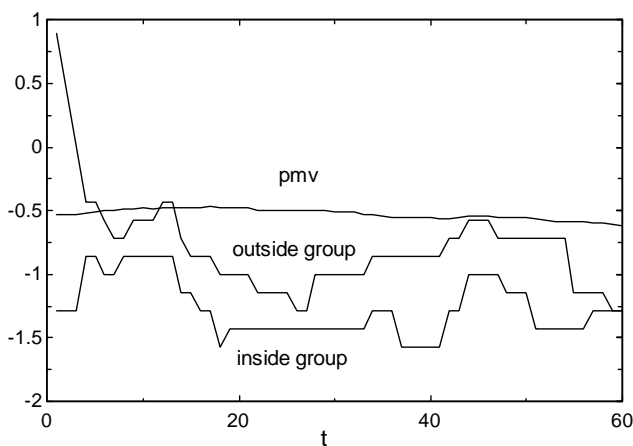


Figure 4: pmv and real votes in Hermosillo, as a function of time.

Results for PMV are something lower than the predicted votes, due probably to a low estimation of the increase in the metabolic rate during the transition. In the present case, it seems that long time in a “cold” ambient leads to an overestimation of cold sensation (Barcelona and El Hermosillo values) in most

situations. In Rome, the evolution of temperature with time might influence further and avoid seeing this effect.

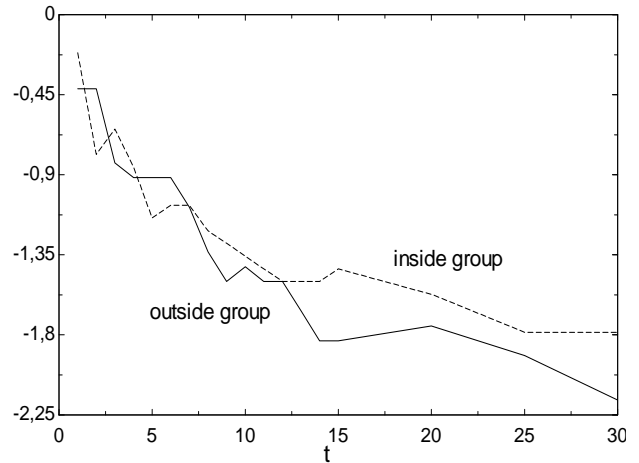


Figure 5: real votes in Rome, as a function of time

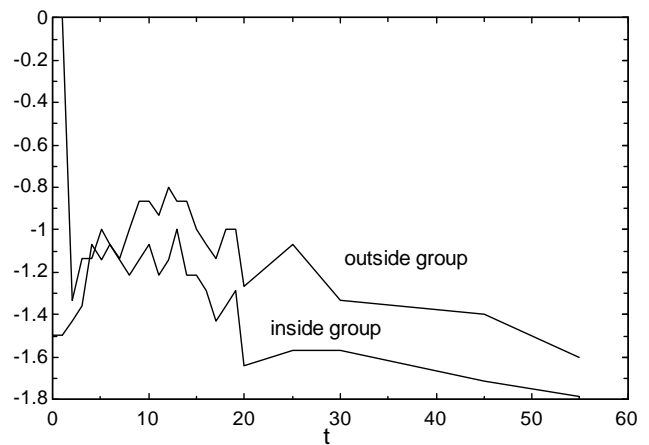


Figure 6: real votes in Barcelona, as a function of time

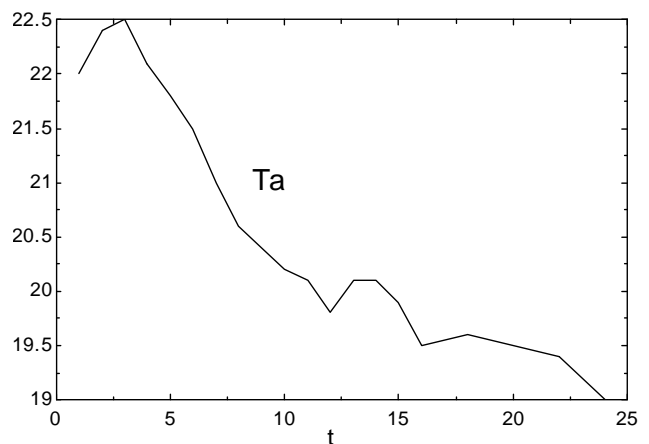


Figure 7: internal temperature variation in Rome

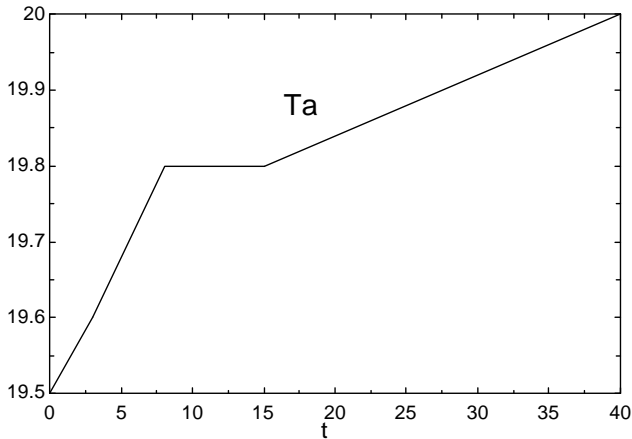


Figure 8: internal temperature variation in Barcelona

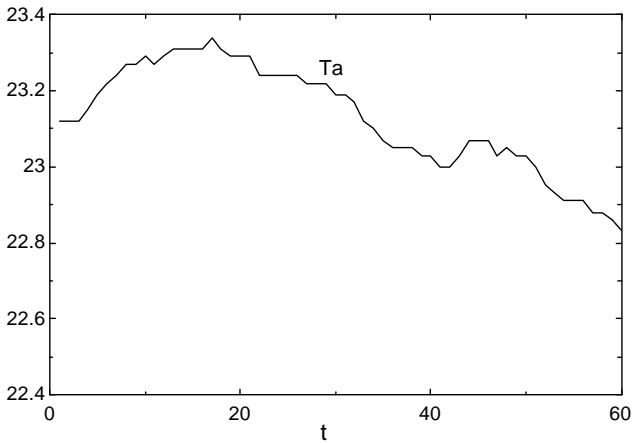


Figure 9: internal temperature variation in Hermosillo

The influence of entering in a new environment might be different in the different cases studied, because of different conditions. Also, the 20 min in exterior conditions might be insufficient in some cases, but this time was chosen as a compromise to avoid excessive exterior changes, and to avoid also boring the people involved.

Probably the thermal mass of the body, with the delay that causes on the perception of the new conditions, plays the more important role in our experiments. It seems that a large time adaptation (more than one hour) could be present. Comparison between Mexican and Europe students shows the existence of an adaptation important correction. The expectation factor is fixed for the Sonora desert at 1.6, extending the Fanger (2002) results for the hot sensation to the cold case.

4. DISCUSSION

The first objective of this work was the estimation of the Δ coefficient. It was made fitting the experimental curve with the EES software. This operation had two parts: first the temporal dependence (due to variations in the HVAC system control) of the thermal charge S present in the internal environment was substituted with the average value, and second the dynamical coefficient was evaluated in dependence from the static vote of the internal group, assumed as reference for the second group. The form selected to fit the curve was:

$$pmv = (0.352e^{M/Adu} + 0.032)S \quad (4)$$

to evaluate the first time dependence, and

$$pmv = (0.352e^{M/Adu} + 0.032)[S + (S - Sp)\Delta/t] \quad (5)$$

to determine the coefficient Δ .

Empirical values of S , Sp and Δ calculated are resumed in Table 6.

Table 6: empirical values of S , Sp and Δ

	S (W)	Sp (W)	Δ (s)
Rome	-9.45	10	-21
Barcelona	-9.30	10	-22
Hermosillo	-5.20	30	-20

The negative value of the coefficient means a “smoothing” or tracking effect. This might be interpreted as the effects of the delay caused by the thermal mass of the body. However, it is a common idea that, in some cases, to enter in a cold environment coming from a very hot one may lead to an “under cooling” sensation. This is not observed here, but more experiments have to be done, with different values of the change of solicitation $S-Sp$.

5. FUTURE PERSPECTIVES

The obtained results show that, in the considered cases, the most important thing in considering the time variations is the “smoothing” which manifest in the first 20 minutes in the new environment. Due to the

conditions present, we think that more experiments have to be done. Transitions from cold to warm have also to be studied, for various differences of temperature. A further task will be the comparison between the Fanger's method and others methods like ACT in dynamical situations.

Normally, adaptive methods are based on the difference between an equivalent temperature (dependent on the parameters of the environment) and a desired temperature (dependent on the factors of the perception, including expectations). This fact permit to adjust the difference between the two temperatures by adding an average term, which takes in account the adaptation, directly related with the yearly or monthly average temperature. PMV is calculated in ACT by equation (6)

$$PMV = 3 \tanh \frac{T_e - T_d}{4} \quad (6)$$

were:

T_e = equivalent temperature sensed by users

T_d = desired temperature of the users

Taking into account the dynamical transition and also the adaptation, it is possible to propose the form of a PID (proportional integrative derivative) processor for the total complex behavior of the human body.

So, the proposed equations can be

$$\| S' \| = \| S \| - I \int_1^n S dt \| + \Delta \left\| \frac{\delta S}{\delta t'} \right\| \quad (7)$$

for the Fanger's adjusted method, and

$$\| T_e' - T_d' \| = \| T_e - T_d \| - i \int_1^n \| T_e - T_d \| dt + d \left\| \frac{\delta(T_e - T_d)}{\delta t'} \right\| \quad (8)$$

for the adaptive adjusted methods.

Comparison between PMV obtained from adaptive and PMV obtained from Fanger's adjusted methods will shows the goodness of the adaptive approach, which is clearly less rigorous (in physical sense) than the balance approach of Fanger.

6. CONCLUSION

Field studies over the comfort sensation are an important verification of the ideas that were developed in the numerous investigations on human relation with the environment. Dynamical evaluations require also a very large number of experiments, which have just started. Only when a large database is obtained, it would be possible a really critical discussion over the questions related. In this way authors program to work continuously on the themes opened with this first approach. As a final conclusion, it is possible to say that people vote under a lot of conditions and conditioning, with differences from the actual prediction obtainable from the theories. Separate physical phenomena and psychological expectation in order to understand how the different factors influence the perception is also an important need, in times of energy savings attention and comfort request.

ACKNOWLEDGMENTS

Thanks to all the students that answered the questionnaire in Rome, Hermosillo and Barcelona; and to Anna Pagès and Angelo Filippi for assistance during the field studies.

REFERENCES

- D'Ambrosio, F. , Fato, I. , Piccininni, F. , Alfano, G. & Cirillo, E. (CUEN, 1986). L'isolamento termico dell'abbigliamento. Napoli, Cooperativa Universitaria Editrice Napoletana.
- De Dear, R. J. (1998). A global database of thermal comfort field experiments, ASHRAE Transactions 104 (1b), pp 1141-1152
- Fanger, O. P. (DTP, 1970). Thermal Comfort. Copenhagen, Danish Technical Press.
- Fanger, O. P. (2002). Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates, Energy and Buildings 34, pp. 533-536
- Marincic, I. , Ochoa, J. M. , Isalgué, A. (2005). Thermal comfort educational software for hot climates, Proceedings, Passive and Low Energy Cooling Conference, Santorini, May 19-21, pp. 309-314.
- Van Hoof, J. , Hensen, J. L. M. (2005). Quantifying the relevance of adaptive thermal comfort models in moderate thermal climate zones, Building and Environment 42, pp. 156-170

Anexo G

La simulación energética de los edificios; Habita Conference, Hermosillo, México, 2007.

La simulación energética de los edificios

M. Palme, Universidad Politécnica de Cataluña, España

En los últimos cincuenta años se ha desarrollado una gran variedad de software para la evaluación del funcionamiento energético de los edificios. Esta relación quiere presentar las características de algunos de ellos, ya que tanto los esquemas de cálculo como la presentación gráfica son muy diferentes y los resultados que se obtienen con su utilización pueden presentar diferencias significativas. Para profundizar las comparaciones, les reenviamos al artículo "Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs"¹, que ofrece una sintética mirada sobre veinte programas.

Primero dividimos tres categorías de software:

1. Los que verifican el cumplimiento de las normativas. Tienen carácter local, dependiendo de las normativas en vigor en cada país. No son muy utilizables por evaluaciones más generales o comparaciones. Su único resultado es una hoja de certificación de cumplimiento. Programas como estos son, por ejemplo, el Lider y el Calener en España y el Termus en Italia.
2. Los que permitan una evaluación general del edificio. Existe una gran cantidad de estos programas, que privilegian diferentes aspectos: el térmico, el lumínico, el acústico. Algunos, como el Ecotect, son muy visuales y permiten insertar gráficamente el edificio directamente en el programa. Otros, como el Trnsys, necesitan de una interfaz gráfica por ello. Algunos permiten hacer simulaciones lumínicas y estudios de iluminación natural. Otros permiten calcular gastos energéticos dependientes de las instalaciones, como el DOE.
3. Los que están hechos a medida del usuario y de sus necesidades. Desarrollados en muchas empresas y universidades, son normalmente muy poco generales, pero resuelven bien problemas específicos. Entre ellos se puede recordar el Archisun, programa desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña, que permite la inserción de parámetros arquitectónicos como la esbeltez o los coeficientes de adosamiento y asentamiento de las construcciones.

Mirando a esta clasificación, hace falta un comentario. Los programas del primer grupo solo sirven para verificar las normativas. No tienen ninguna aplicación general. Los del tercer grupo, además de resolver problemas puntuales muy concretos, tienen alguna utilidad en la fase de anteproyecto, cuando lo que importa es la comparación de diferentes situaciones espaciales y soluciones arquitectónicas, a veces bajo una mirada muy específica (por ejemplo: como se porta esto frente la radiación, o al viento, o a las acciones de los usuarios, ecc...)

Los más importantes son los programas del segundo grupo. Entre ellos, los mejores son los flexibles, es decir los que permiten cambiar las ecuaciones de cálculo de los fenómenos atmosféricos o los parámetros internos del edificio. En este sentido el mejor programa entre los probados es seguramente el Trnsys, que le permite al usuario impostar las ecuaciones de cálculo de todos los flujos energéticos entre el edificio y su entorno. Su único defecto es necesitar de un gran trabajo analítico para insertar los datos con el fin de definir geometría, materiales, color de todos los cerramientos del edificio. Recientemente se desarrolló la interfaz Simcad, que facilita mucho el trabajo. Por otro lado, programas como Ecotect resultan muy sencillos y presentan una gran componente visual, cosa que les hace ser muy atractivos para el trabajo profesional, donde es muy importante cuidar la presentación para el comitente.

¹"Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs"; D.B. Crawely, J.W. Hand, M. Kummert, B. T. Griffith; Ninth International IBPSA Conference, Montréal 2005 proceedings, pgg. 231-238

Anexo H

Building sensitivity to climatic
fluctuations and user's actions: a
challenge for high-tech buildings;
25th Passive and Low Energy
Conference, Dublin, Ireland, 2008.

Building sensitivity to climatic fluctuations and user's actions: a challenge for high-tech buildings

M. Palme, A. Isalgué, H. Coch, R. Serra
AiE, ETSAB, UPC, Diagonal 649, 08028 Barcelona

Building sensitivity to climatic fluctuations and users' actions: a challenge for high-tech buildings

Due to the current concern about energy consumption and CO₂ emissions, buildings are increasingly insulated and equipped with controlling machinery. However, the effective energy consumption of high-tech buildings is often higher than expected, and users' sensation of temperature comfort is not as good as it should be. One reason for the poor performance of these new buildings could be the high sensitivity to changes in weather and user-dependent variables. A sensitivity analysis can be conducted using thermal equations or a software simulation, or by directly analyzing real measurements. Sensitivity analyses show that the zone performance of high-tech buildings often varies in different spaces. This variation can be found in the Planes de Son centre located in the Catalan Pyrenees, which was built with low-energy strategies in mind. The performance of the different spaces depends very strongly on the orientation of the different zones that make up the building. This work analyzes data measured in 2006 and 2007 and shows that extreme sensitivity to changes is the factor that most contributes to the imperfect performance of the building. The results show that the south-facing glass façade does not perform as well as expected, despite abundant solar radiation. The dimensions of the building and the thermal systems are also analyzed to determine their influence on sensitivity. Potential ways of increasing the efficiency of the building are discussed, and a generic case is analyzed. In conclusion, the consumption and emissions of high-tech buildings could be further reduced if they respond appropriately to variations in weather and user actions.

Keywords: energy consumption, sensitivity, users, climatic fluctuations

1. Introduction

Due to the current concern about energy consumption and CO₂ emissions, buildings are increasingly insulated and equipped with controlling machinery. However, the effective energy consumption of high-tech buildings is often higher than expected and, importantly, they are not as comfortable for users as they should be. One reason for the poor performance of these new buildings might be their high sensitivity to changes in weather and user-dependent variables. Recently, some studies centred on the sensitivity of the building's thermal performance to changes in the various parameters that appear in the thermal exchanges of the building [1].

In this work, we analyse the thermal sensitivity of well-insulated buildings in an elemental way. We use the Planes de Son centre in the Pyrenees as a case study and analyze measurements taken in this building and simulations of it. Finally, some conclusions are drawn.

2. Elementary thermal sensitivity analysis

This section analyses buildings' sensitivity to fluctuations in the variables that influence thermal performance. A general sensitivity analysis can be performed by differentiating the balance equation:

$$T_i = T_e + \frac{I+D}{G};$$

$$\delta T_i = \delta T_e + \frac{\delta(I+D)}{G} - \frac{I+D}{G^2} \delta G$$

where T_i is the internal temperature, T_e is the external temperature, I is the solar radiation contribution (W/m^3), D is the internal contribution (people and systems, W/m^3), and G is the volumetric loss coefficient of the entire building (transmission and ventilation, in $W/m^3\text{°C}$). The equation shows that I and D fluctuations have a greater effect on internal temperature variation when the loss coefficient G is small. The loss coefficient varies, particularly when users carry out different activities in the building. The G^2 term in the equation shows that a G fluctuation is greater when the G coefficient is small, and can easily be more significant than the I and D changes.

For instance, assume a building is in a cold climate, $T_e = 2\text{°C}$; if the building is well insulated, G can be 0.35. If we have $I = 3.5 W/m^3$, and $D = 3.5 W/m^3$, then $T_i = 22\text{°C}$, which is a good result. But if G changes by 30% due to an increase in ventilation on a windy day (here G is low and the contribution of ventilation to G is relatively high), then T_i is nearer to 16°C . Similarly, with the same initial G conditions on a cloudy day, the solar contribution becomes negligible, and the indoor temperature is nearly $T_i = 12\text{°C}$.

3. A case study of sensitivity

3.1 Introduction

An analysis of thermal sensitivity is important, even if it is not exhaustive. The following factors must be considered: the accumulation in thermal mass, the spatial distribution of the internal temperature and the time-dependent displacement of the thermal wave in the walls. Therefore, it is important to perform a simulation in the design phase, and to analyse real data when the building is in use.

The main objective of this study is to compare a general sensitivity analysis with data measured in a real building that was designed with low-energy strategies in mind by the architect Francesc Rius. The building is the Planes de Son Nature Centre. The data were collected in 2006 and 2007, as part of the EULEB project of the Intelligent Energy Europe Programme in collaboration with TramaTecnambiental SA.

3.2 Location

The Planes de Son Nature Centre is located in the Catalan Pyrenees at 1350 m. above sea level. The “*Fundació territori i paisatge*” of the *Caixa de Catalunya* savings bank financed this building, which was designed and constructed to be sustainable. The architect Francesc Rius was commissioned to achieve this objective. The final result was a south-oriented and semi-buried building that improves solar radiation income and avoids day-night fluctuations. The insulation values are also higher than average in this zone.

Table 1. Average external temperature, solar radiation (horizontal plane) and relative humidity of the location

	External average temperature (°C)	Solar radiation (horizontal plane) (kJ/m ²)	Relative humidity (%)
January	4.8	7478	75.5
February	3.4	10889	60.4
March	3.6	15200	56.4
April	8.7	18489	68.8
May	11.5	21811	72.7
June	14.1	23233	77.7
July	19.5	23100	71.0
August	16	20378	70.6
September	10.3	16122	75.6
October	12.2	12567	68.8
November	8	8433	71.4
December	3.4	7033	63.9

The building is used as a nature centre where groups or individual users can be in close contact with nature for a period of time. Courses last from one day to two weeks and a lot of activities are arranged. The centre functions as an isolated hotel in the mountains, so all the facilities are provided in the main building.

The location is 42°N, 1°E, 1350 m. The external temperature, the relative humidity and the radiation values are shown in Table 1 [2].

3.3 The zones of the building

The building is divided into different zones with different uses and occupancies. These include:

- The laboratory, located in the north, on the lower floor below ground level.
- The auditorium, located in the north, on the lower floor below ground level.
- The kitchen, located in the north, on the lower floor below ground level.
- The living rooms, located in the south-west on the lower floor
- The reception and the dining room, located in the south-east on the lower floor
- The bathrooms, located in the north, on the lower floor below ground level.
- The bedrooms, located in the south-east and south-west on the upper floor

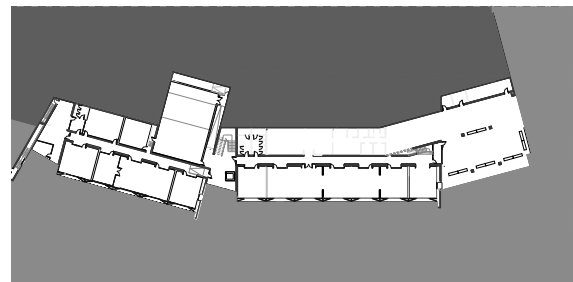
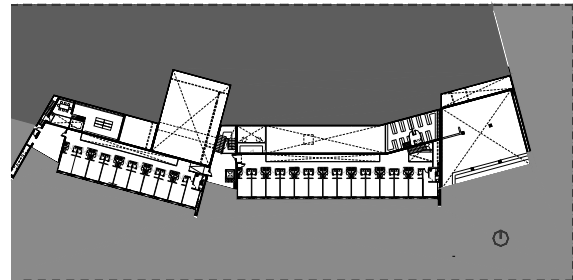


Figure 1. Planes de Son first and lower floor

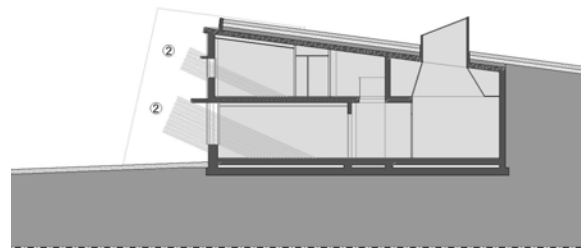
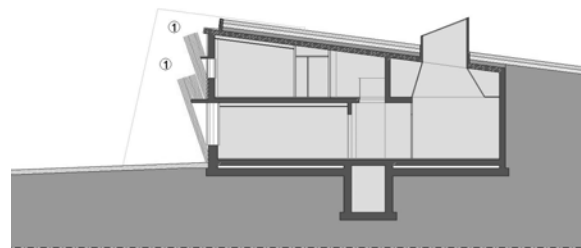


Figure 2. South-north section of the Planes de Son Centre

3.4 Materials

The building was constructed using typical regional materials as far as possible. The north zone is completely below ground level and the roof is green and 1.5 m thick. The east and west façades are composed of 0.5 m thick concrete, insulation and granite on the external surface. The south façade is a light façade, made entirely of glass. Water and photovoltaic solar panels are located on the upper floor. Behind some of the glass on the lower floor and part of the upper floor is a high absorption panel, to increase the solar energy gain.

After a year of occupancy, uncomfortable internal temperatures have been reported. The Nature Centre's management was surprised when informed of the overheating problem in winter, leading to windows being opened during hours of solar radiation. Though the energy consumption was not far from the expected results, which indicates that the indoor temperature comfort was good, this does not tally with the users' perceptions.

To explain this behaviour, it is necessary to analyze the performance of the different zones throughout the year.

3.5 Analyzed data

Temperature sensors were placed at different points of the building to obtain measurements of its performance. Data were registered hourly from July 2006 to June 2007. In March 2007, both the superficial and radiant temperatures were recorded in different places and at different times. The daily minimum, maximum and average temperatures were obtained from data for various points. Then, the monthly absolute minimum, the absolute maximum, the average daily maximum and minimum and the monthly average temperatures were obtained. These data were used to undertake a zone analysis, in which the temperature of the different zones, the correspondence with the impulsion temperature of the heating system (a radiant floor) and the daily evolution of the supposed temperature comfort were compared. The data showed that variations in the performance of the different zones were very high. Therefore, a surface temperature analysis was undertaken for the most interesting places. Finally, the data were used to find an explanation for the claims of the centres' staff and users.

4. Results

4.1 Sensitivity analysis

The transmission and ventilation coefficients per unit volume can be calculated by [3]:

$$G_T = \frac{\sum U.S}{V}$$

and

$$G_V = 0,29 \frac{V(\text{airperhour})}{V(\text{building})}$$

Table 2 shows the transmission coefficients per unit surface of the walls and the corresponding surfaces.

Table 2. Transmission coefficients of the walls

Wall	U (W/m ² °C)	S(m ²)	U.S (W/°C)
ext. east	2.9	23	66.7
ext. west	4	60	240
ext. south	0.48	192	92.1
ext. north (buried)	0.38	478	181
windows	1.7	267	453.9
green roof	0.28	1200	336

The floor is 4 meters under the ground. Consequently, it does not contribute to the transmission.

With these values and the total volume of the building (7000 m³), the G coefficient is 0.2 W/(m³°C).

The ventilation coefficient depends on the volume of air per person needed to guarantee comfort. It varies from 0.29 to 0.87 W/(m³°C) in normal use conditions, depending on the occupation density of the zones. Users can open lower floor windows and open or close a thermal protection system in the upper floor bedrooms. Therefore, the users' actions can change the ventilation coefficient values considerably.

The radiation term I depends strongly on the absorption panels. An absorption coefficient of 0.8 can be considered very high. Data measured on site demonstrate that the absorption level is very good.

With equation [4]:

$$I = S_{\text{windowsouth}} R_{\text{verticalsouth}}$$

and considering the values in Table 1 (to convert data from the horizontal plane to the vertical southern plane, a coefficient of 1.67 can be used in winter and a coefficient of 0.45 in summer), I assumes the values shown in Table 3.

Table 3. Irradiation values (W/m³°C)

month	Jan	Feb	March	April	May	June
I(W/m ³)	5.5	5.6	5.3	4.8	4.4	3.9
month	July	August	Sept	Oct	Nov	Dec
I(W/m ³)	3.8	3.9	4.2	4.6	5.2	5.3

These values were obtained from average values of radiation incoming in a horizontal plane. This means that the I fluctuation can be very high. The real values of I change range from 0 (no direct radiation incoming) to 10 or more watts per cubic meter.

The internal contributions can be estimated as 58 W per person, and 8 kW from the computers, lights and other electrical apparatus. For an average occupancy of 80 people, the D value is 1.8 W/m³. Notice that the heating-cooling power was not considered in the D coefficient evaluation. The building is supposed to have zero energy performance.

With these values, it was possible to determine a sensitivity coefficient for each fluctuation. For example, the sensitivity to a change in the incoming solar radiation from 5 to 10 W/m³ is:

$$\frac{\delta T_i}{T_i} = 0,4$$

for an external temperature of 10°C and a ventilation term of 0.3 W/(m³°C).

Changes due to users' actions, such as a fluctuation in the G ventilation term from 0.3 to 0.6 W/(m³°C), can be represented by:

$$\frac{\delta T_i}{T_i} = -0,35$$

The values of the changes in the internal temperature (40% for a fluctuation in the solar radiation and 35% for a fluctuation in the ventilation coefficient) are very high. In comparison, a traditional building, constructed using typical regional techniques, has a G transmission coefficient near to 1, and an extremely high accumulation of heat in the thermal mass. Its sensitivity coefficient is 0.2 for a fluctuation in incoming solar radiation and 0.05 for a fluctuation in the ventilation term, in the same conditions as the Planes de Son evaluation.

4.2 Simulation

As the above sensitivity analysis is not exhaustive, to confirm the results an Ecotect software simulation was performed. The heating demand was small, but there was a cooling demand due to the incoming solar radiation. In fact, the solar radiation energy is not well distributed in the building and the accumulation in mass is lower than expected. A zone analysis shows that the south-facing zones have a highly different performance to the north-facing zones and to the zones protected from the incoming radiation. The south-facing zones require cooling, when only ventilation is available. The net result is that thermal energy which cannot be collected is simply dissipated without being used.

4.3 Measured data analysis

The sensitivity analysis and the Ecotect simulation suggest that the Planes de Son building has a bad distribution of the solar power incoming throughout the year. The data measured on site confirm this hypothesis. Figure 3 shows the monthly average temperature, and Figure 4 shows the absolute maximum temperature. The lower floor, south-facing zone has a very different performance to the other zones, including the upper floor zones that also face south. The reason for this difference in performance is the high incoming solar radiation. In fact, the incoming radiation depends on the orientation and, clearly, on the obstruction of the façade. On the upper floor, the thermal panels for warm water occupy nearly 60% of the surface. On the lower floor, the whole façade is occupied by windows, which are the cause of overheating in this zone. As explained by the Centre's staff,

people always feel warm in the south-facing zone of the lower floor, especially in winter.

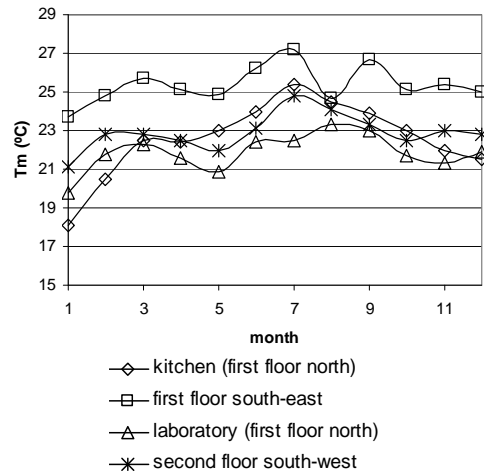


Figure 3. Monthly average temperature in various zones of the building

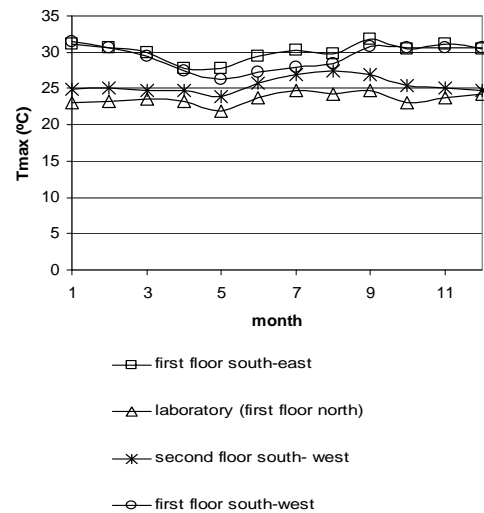


Figure 4. Monthly absolute maximum temperature in various zones of the building

Figures 5 and 6 show the temperature evolution on 13 January 2007 in the laboratory and in the dining room. The temperature in the dining room fluctuated from 22 to 29°C, while in the laboratory it only varied from 19.5 to 20 °C.

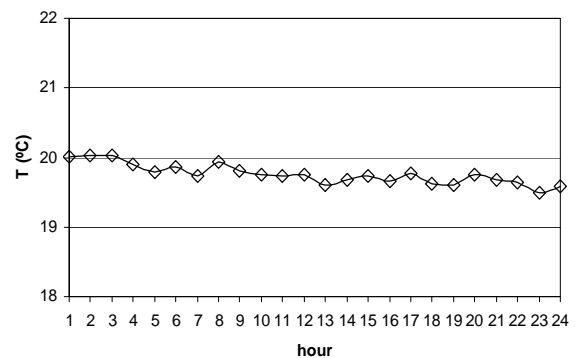


Figure 5. Temperature in the laboratory on 13 January 2007

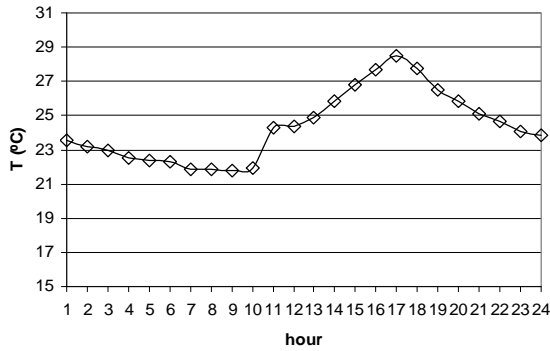


Figure 6. Temperature in the dining room on the 13 January 2007

The main cause of the building's performance problems seems to be the irregular distribution of absorbed energy. In March 2007, surface temperatures were measured to confirm this hypothesis. Figure 7 shows the absorption panel and its location on the façade. Table 4 shows the external temperature, the temperature of the glass (internal and external) and the absorption panel temperature in different conditions of incoming solar radiation. The temperatures of the absorption panel and of the glass increased very rapidly when the sun was out. On 4 March 2007, which was a sunny day, the temperature of the absorption panel changed from 18°C at 8.00 am to 78°C at 1 pm. The temperature on the inside of the glass increased from 10 to 54°C in this time. These rapid changes mean that the energy is not correctly accumulated. A significant part is immediately returned to the air between the panel and the glass. This generates an increase in the internal temperature in winter in the south-facing zones of the building, and discomfort to the users.

Table 4. External temperature, glass temperature and absorption panel temperature registered on site

day time	T ext (°C)	T glass external (°C)	T glass internal (°C)	T absorption panel (°C)
2/3/07 16.00	20	30	40	56
2/3/07 17.00	18	24	32	40
2/3/07 18.30	16	18	22	28
2/3/07 21.00	8	12	18	20
3/3/07 8.00	9	10	15	17
3/3/07 10.00	12	14	30	38
3/3/07 13.00	13	15	28	38
3/3/07 22.00	9	8	10	15
4/3/07 8.00	9	8	10	18
4/3/07 9.30	15	18	24	38
4/3/07 12.00	18	28	33	54
4/3/07 13.00	20	38	54	78



Figure 7. Absorption panel on the south-oriented façade.

The absorption zones communicate directly with the internal zones of the building, so the air moves towards the interior and generates the sensation of overheating.

5. Conclusions

The sensitivity analysis, the ecotect software simulation and the analysis of the data measured on site explain the poor performance of the Planes de Son building. Ineffective distribution of the solar energy causes overheating on the south-facing lower floor. The zero energy heating performance obtained in the simulation is not real: the system is always functioning, and the north zones are not heated sufficiently with solar power. The thermal mass is also concentrated in the north of the building, where absorbed energy is not transferred. The dimensions of the building affect the function of the absorption: if the distance between the windows and the north walls were lower, the thermal mass would be able to accumulate. Below are some potential solutions:

- Close off part of the windows to obtain warm air between the glass and the absorption panel. This air has to circulate in tubs or plenums and heat the north zones of the building.
- Increase the number of water solar panels. Currently, the radiant floor is not the only energy source for the heating system. Increasing the number of solar panels could reduce the sensation of overheating on the lower floor.
- Transfer the solar energy to the building's north zone using a transition phase material,

which conserves the latent energy in the phase transition.

- Protect the windows on the lower floor. This solution does not improve the performance of the building, but will make it more comfortable for users.

The following general conclusions can be drawn:

- The insulation of buildings is not always consistent with the solar energy absorption. This relationship depends on the geometrical arrangement of the thermal mass. Passive absorption systems must be designed accurately in terms of their dimensions and strategies.
- Increasing the insulation leads to higher sensitivity to climatic and user-dependent fluctuations. Users must be prepared to use the building control systems, which include windows and protection systems.
- In the design phase, when a real data analysis is not possible, a sensitivity analysis has to be considered as an instrument for assessing the performance of the construction. However, simulation programs do not always provide a realistic view of the situation.
- An appropriate orientation of the building is the most important factor for zero energy performance. However, the dimensions of the building and its zone divisions must also be considered to achieve zero energy.

An energy demand analysis is not sufficient to evaluate the performance of a building. The zonal distribution of temperature, climatic fluctuations and users' actions must also be considered. The case of the Planes de Son building demonstrates that imperfect temperature distribution generates user discomfort and a deviation from the calculated performance. A sensitivity analysis can be a rapid and simple instrument for assessing a design, and is associated with the current dynamic simulations.

Users play an essential role in obtaining real zero energy performance of the building. Users' actions depend on their perceptions of whether the temperature in the rooms is comfortable. Therefore, a study of the definition of comfort in dynamic conditions is needed for future architecture. For more information, see [5, 6]. Alternatively, a control system that dynamically regulates all the elements of a building could be considered.

6. Acknowledgements

This study was made possible by the UPC research grant programme and TramaTecnambiental, SA. We are also grateful for the use of the Planes de Son facilities and the help from this centre's management..

7. References

1. Saporito, A., Day, A.R., Karayannis T.G., Parand F.(2001) Multi-parameter building thermal analysis using the lattice method for global optimisation; *Energy and buildings* 33, p. 267-274,
2. Catalan Meteorology Service (2008) <http://www.meteocat.com>
3. Spain. *CTE Código Técnico de la Edificación (2008)*. Ministerio de Vivienda, Spain
4. Serra, R.; Coch, H. (1995) *Arquitectura y energía natural*; Edicions UPC; Barcelona
5. Palme, M.; Isalgue, A.; Coch, H.; Serra, R. (2006) On the influence of users' actions on thermal performance of buildings; 4^a EPIC Conference proceedings, Lyon, France 29 November – 1 December 2006, p. 746-750
6. Palme, M.; Coch, H.; Isalgué, A.; Marincic, I.; Fanchiotti, A. and R. Serra (2007) Dynamic sensation of comfort in buildings: the temperature changes effects; 2^a PALENC Conference proceedings, Crete, Greece 27-29 September 2007, p. 13-18

Anexo I

Energy consumption and CO₂ emissions
in construction and use of buildings
according to floor area; World
Renewable Energy Congress X,
Glasgow, UK, 2008.

Energy consumption and CO₂ emissions in the construction and use of flats according to floor area

Anna Pagès, Massimo Palme, Helena Coch, Toni Isalgué

Architecture, energy and environment. School of Architecture. Technical University of Catalonia (UPC) Barcelona, Spain. Tel: +34 934010868, Fax: +34 934016426 Email: apages@gmail.com

1 Introduction

In recent years, a number of circumstances, including the decrease in average family size and the increase in house prices, have led to the construction of smaller flats.

This paper analyse the case of Spain, where the convenience of this construction typology has been discussed in these years. Result can be extended to all the mediterranee area, where the climate and the construction typology are similar.

In the present paper we analyse the environmental advantages and disadvantages of small flats in comparison with large flats. The environmental parameters used to do the evaluation were the energy consumption and CO₂ emissions, since they are a simple and good representation of the sustainability in buildings.

The approach of this study takes into consideration all the energy and all the emissions associated with the creation and maintenance of habitability, which is the service that buildings must supply. Thus, it is necessary to emphasize that in this paper, we do not only take into consideration the energy demand during the use of the flats but also the impact of the construction phase, i.e. the embodied energy of the building materials.

The importance of building construction impact in Spain is proved analysing the emissions associated with the building sector: in 2005, with respect to the total emissions attributable to the building sector, 27% were related to the construction of buildings.

2 Description study case

This study compares the energy demand and CO₂ associated with the use and construction of 4 flats of different sizes according to their

floor areas. The areas studied are 30 m², 60 m², 90 m² and 120 m².

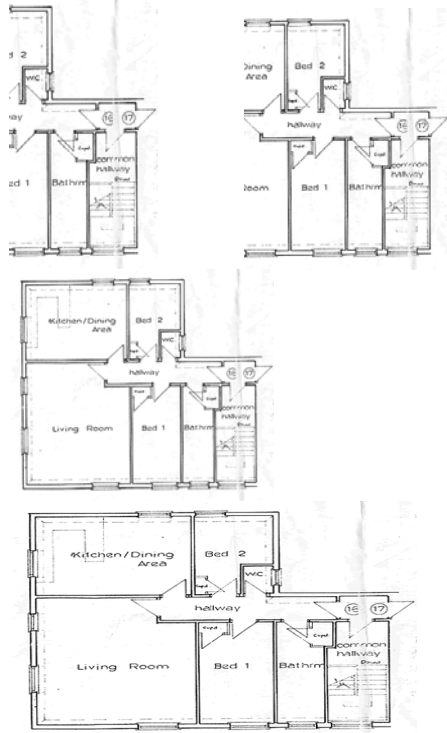
In order to make the results comparable, the flats belong to buildings with the same characteristics. They are as follows:

- It is a four-storey building with business premises in the ground floor and a car park in the basement (Figure 1).
- The building has a rectangular sharp: the width is always the same while the length is variable (Figure 2)
- All the flats have two exterior façades, south and north.
- The surroundings of the building are clear without any element which cast shadow on the building studied.
- The access to the flats is through a stairwell and elevator shaft which allows the access to two flats every storey.
- All the flats are built according to the most commonly used construction system in Spain. It consists of a reinforced concrete structure, two-layer exterior walls with insulation, inverted roofing and plastered interior partitions.
- The study was based on a Mediterranean climate, specifically that of Barcelona.

Figure 1. Section plan of the building analysed



Figure 2. Floor plan of the 4 buildings analysed



The difference among the flats compared, apart from their floor areas, are the number of bathrooms/toilets and the windows surfaces which are according to the most commonly dwellings built in Spain. These differences are shown in Table 1.

Table1. Specific characteristics of the flats analysed

Flats	30 m2	60 m2	90 m2	120 m2
number of bathrooms	1	1	1	2
window surface south (m2)	4,9	7,15	9,4	12
window surface north (m2)	2,25	4,5	5,7	7,95

3. Methods

To obtain the energy demand and CO₂ associated with the use and construction of the flats two methodologies were followed one for the construction phase and another for the use phase.

3.1. Construction phase.

To quantify the energy consumption and CO₂ associated with the manufacture of the building materials used in the construction of the buildings analysed the TCQ 2000 software by ITeC was used.

TCQ 2000 has an Environmental Management Module with UPC-validated data that can calculate the CO₂ emissions and energy used in the construction of a specific building on the basis of its component materials, as quantified in ITeC's price database for 2006, and provides environmental particulars for the building.

We calculated the energy consumption and CO₂ emissions of the entire building where the flats belong. All this impact was only attributed to the floor area of the dwellings and business premises. Thus, the common elements (structure, roof...) and the common zones of the building (entrances, staircases and the car park) affect the impact of the flats studied.

3.2. Use phase

For to evaluate the energy consumption in the use phase, only the heating and cooling demand has been considered. Other possible uses of the dwellings, that don't depend of the architect, as a different set point temperature in the heating and cooling systems or the illumination demand was not calculated. In the energy demand evaluation, only the central flats of the block have been considered.

The main parameters relevant to assessing energy demand in the building are as follows:

- The thermal resistance (or the loss coefficient) of the walls and windows
- The solar radiation contribution (direct and indirect)
- The ventilation needed to guarantee comfort
- The presence of electrical apparatuses and people (internal heat gains)
- The climatic situation (external temperature, wind, solar orientation, humidity)

All these factors are inserted in an equation that may be solved in terms of demand.

The Trnsys software solves the equation by integration in dynamical conditions.

The buildings have the minimum insulation required to meet the thermal regulation currently in force in Spain. It is the Spanish Technical Building Code [1]. Values are resumed in table 2.

The values of the ventilation needs used are the minimum values established by the law in Spain for the climate of Barcelona, according to the ASHRAE indications [2]. These values are resumed in table 3.

Table 2. Ventilation needs for a dwelling established by the Spanish law

	bedroom	dinning	bath	kitchen
l/s	5 pp	3 pp	15	50

Table 3: values of the thermal resistance of wall and windows

	extwall	roof	floor	intwall	window
W/m ² K	0.7	0.5	0.6	0.95	2.45

Due to the relevance of the ventilation needs on the energy demand, table 4 shows the air changes per hour of each flat that guarantee comfort.

Table 4: Air changes per hour for the analyzed flats.

Flats	30 m ²	60 m ²	90 m ²	120 m ²
1person	3.5	nc	nc	nc
2 persons	3.6	2	1.3	nc
3 persons	nc	2.1	1.4	1
4 persons	nc	nc	1.6	1.2
5 persons	nc	nc	nc	1.3
6 persons	nc	nc	nc	1.5

The result of the simulation is the energy demand of the flats. To compare the different dimensions and to relate the use phase to the construction phase, is necessary to calculate the effective energy consumption, which depend on the efficiency of the systems.

To calculate the energy consumption and the CO₂ emissions associated with the use of the building, we assumed constant occupancy and applied the performance of air conditioning systems to the demand values. Gas-fired radiators (80% efficiency) were used for heating and heat pumps (200% efficiency) for cooling.

To pass the energy consumption to CO₂ emissions, the following factors were applied:

- Gas: 1kwh = 204 g CO₂

- Electricity (Spain, 2005): 1kwh = 501 g CO₂

3.3. The whole useful life

To be able to aggregate the emissions and the energy consumed associated with the construction phase with those of the use phase, the construction impact was distributed over the useful life of the flats which is supposed to be of 60 years.

In order to make the results comparable, the comparisons were made with constant area per person values. This means that the comparison was made for the same values of occupation density.

4 Results

There are three sets of results. Section 3.1 compares the energy and CO₂ emissions associated with the construction phase, section 3.2 compares the same impacts for the use phase and, finally, in section 3.3 the impacts of the whole useful are compared for the four flats studied.

4.1. Construction phase

Before analysing the energy and CO₂ results, it is interesting to observe the different repercussion that the common elements and zones of the building have on the studied flats according to their different floor areas.

Table 5 shows, for each flat studied, the relation between the constructed area (the entire building area) with the useful area (the habitable area) which includes dwellings and business premises but not the common zones. We can observe that the bigger the flat, the smaller the coefficient. Therefore the 120 m² flat has the biggest quantity of useful area in relation to the constructed area, specifically; the coefficient difference between this flat and the 30 m² flats is 19%.

Table 5: relation between the constructed and the useful areas of the flats

Floor area flats (m ²)	30	60	90	120
Constructed area / useful area	1.72	1.54	1.48	1.44

Table 6 shows the energy and the emissions per flat and per habitable surface. In this case, unlike the use phase analysis, the number of

people does not influence on the environmental impact.

The flat with the most efficient habitable square metre is the biggest one, with 570 kg CO₂/m² (or 6048 MJ/m²). The 90m² flat emits 4% more for habitable square metre, the 60m² flat 15% more and the 30m² flat 41% more. It can be notice that the inefficiency increases with a not linear dependence of the flat's dimension.

Table 6. Energy and emissions per flat and per habitable floor area.

Flats	30m2	60m2	90m2	120m2
MJ/flat	257537	415019	566272	725713
MJ/habm2	8585	6917	6292	6048
KgCO2/flat	24177	39156	53410	68443
KgCO2/habm2	806	653	593	570

The smallest flat is the more inefficient during the construction phase in terms of energy and CO₂ emissions. There are two reasons to explain this:

- The smallest flat needs more surface to supply the same quantity of service, this means that the smaller the flat, the bigger the proportion of common areas.
- The square metre of the smallest flat is more intensive in terms of energy and emissions. It is due, for example, to the kitchen or the bathroom which need materials with a higher embodied energy. The biggest flats have a lower proportion of these areas in relation to the total floor area of the flat.

Table 7 and 8 show the environmental impact percentages of the building subsystems. The structure has the highest impact in all the buildings compared. Taking into account both the structure and the foundation, they represent between 40 and 50% of the impact of the construction phase. The other significant impacts are associated with the exterior walls, the “coatings” and the installations subsystems which have around 10% of the impact respectively.

It is possible to observe that the exterior walls, the “coatings” and the installations have a higher percentage in the smallest flats whereas

the structure has a higher percentage in the biggest ones.

Table 7: environmental impact percentages of the building subsystems (%MJ)

Flats	30	60	90	120
excavation	0,1	0,1	0,1	0,1
cements	14,3	15,4	16,1	16,3
structures	31,5	33,8	35,2	35,5
roofs	2,7	2,9	3,0	3,1
walls	13,9	12,8	12,3	12,1
insulation and rubbers	0,4	0,4	0,4	0,4
paints and finishes	9,1	8,1	7,5	7,8
floors	6,6	6,9	7,0	7,1
windows and doors	8,6	9,2	8,8	8,7
glass	1,1	1,1	1,1	1,1
installations	10,3	8,4	7,6	7,2
varies	1,3	1,2	1,2	1,2

Table 8: environmental impact percentages of the building subsystems (%KgCO2)

Flats	30	60	90	120
excavation	0,1	0,1	0,1	0,1
cements	12,8	13,7	14,3	14,5
structures	28,8	30,8	32,1	32,4
roofs	3,5	3,8	3,9	3,9
walls	12,0	11,0	10,5	10,4
insulation and rubbers	0,5	0,5	0,6	0,6
paints and finishes	10,5	9,3	8,6	9,0
floors	6,5	6,7	6,9	6,9
windows and doors	12,2	13,0	12,7	12,5
glass	0,8	0,8	0,7	0,8
installations	11,0	9,3	8,7	8,3
varies	1,0	0,9	0,8	0,9

4.2. Use

To compare the result of the use phase, it is necessary to express the values in GJ per person. For this reason, the comparison were made with constant area per person.

Considering this parameter, tables 7, 8 and 9 show the energy demand, the energy consumption and the CO₂ emissions for one year, respectively. The small flats consume more energy for heating than the bigger ones. Cooling energy demand is lower for the smallest flats. Cooling energy demand represent between the 1% and the 4% of the total, due to the orientation and to the location

in the centre of the building, where the solar radiation contribution is small.

Table 8: yearly energy demand (GJ/person) for the occupation density of 30 m² per person.

	30 m ²	60 m ²	90 m ²	120 m ²
heating	11	6,47	4,75	4,52
cooling	0,09	0,11	0,15	0,17
total	11,09	6,58	4,9	4,69

Table 9: yearly energy consumption (GJ/person) for the occupation density of 30 m² per person.

	30 m ²	60 m ²	90 m ²	120 m ²
heating	8,8	5,18	3,8	3,62
cooling	0,18	0,22	0,3	0,34
total	8,98	5,4	4,1	3,96

Table 10: yearly CO₂ emissions (kg per person) for the occupation density of 30 m² per person.

	30 m ²	60 m ²	90 m ²	120 m ²
heating	498	292	215	205
cooling	25	31	42	47
total	523	323	257	252

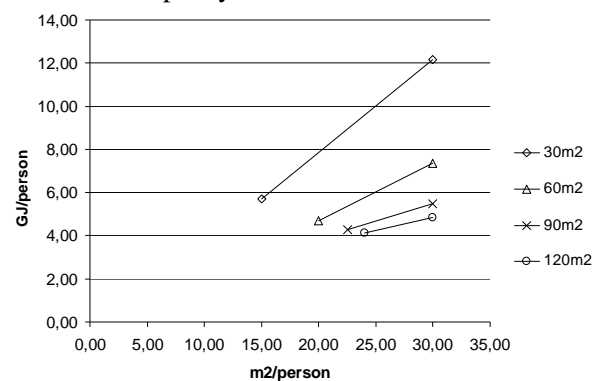
For the 30 m² per person occupancy, the energy consumption of the 60 m² flat is 40% lower than the 30 m² flat; the energy consumption of the 90 m² flat is 25% lower than the 60 m² flat and the energy consumption of the 120 m² flat is 5% lower than the 90 m² flat.

For the same occupation, the CO₂ emissions of the 60 m² flat are 38% lower than the 30 m² flat; the emissions of the 90 m² flat are 20% lower than the 60 m² flat and the emissions of the 120 m² flat are 2% lower than the 90 m² flat.

The reason of this result is that the ventilation needs of kitchen and bathroom is a fixed value, not dependent to the surface of the flat and to the number of occupants. So, the 50 l/s of air necessary to ventilate the kitchen cause that the final ventilation coefficient assumes the elevated value of 3,6 in the small flats. In a bigger flat, the same ventilation need leads to a ventilation coefficient smaller, due to the bigger volume of the flat. For an extended analysis of the influence of ventilation on the thermal performance in flats, see [3].

Figure 2 resumes the yearly energy demand for various occupancy levels. It can be seen that the differences of the energetic performances between two flats are higher when the flats are smaller. For a density level of 30 m² per person, for example, the difference between the case of 3 persons in 90 m² and the case of 3 persons in 60 m² is lower than the difference between the case of 2 persons in 60 m² and 1 person in 30 m². It can be seen also that the passage from one density to another causes a change in the consumption higher in the smaller flats.

Figure 2: energy demand per person for different occupancy levels.



4.3. Total

Table shows the relation between energy consumed in use and construction for one occupation density of 30 m²/person.

Table 11. Relation between energy consumed in use and in construction

%	30	60	90	120
Construction	28	34	39	39
Use	72	66	61	61

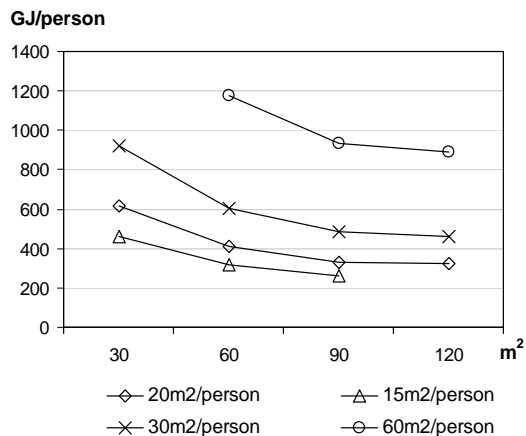
The results indicate that the energy consumption over 60 years' use is greater than the embodied energy. In the 120 m² flat it represents 61% of the total energy, compared with 72% in the 30 m² flat.

Figure 1 shows the comparable situations with a constant area per person value, indicating that as a flat's floor area increases, the energy consumption per person decreases. Moreover, it can be notice that the greater the area per person, the greater the difference in consumption between 2 flats of different dimensions (see the inclination of the lines in

the figure, for example between the values 60 and 90 in the x axis).

Finally, it can be said that, to reduce the consumption, changes in the occupancy density are more effective in the smallest flats (see the vertical steps between one line and another, for each flat).

Figure 3: Total energy consumption (use and construction) per person according to the flat's floor area.



The CO₂ emissions results are similar, but the differences between the flats are a little lower, due to the application of the efficiency coefficients and to the energy production process (gas, electricity, etc...)

For the same space per person, small flats are worse than large ones in terms of energy consumption and CO₂ emissions during their useful lives.

Specifically, the 30 m² flat is between 103 and 126% worse than the 90 m² flat during its use and around 36% worse in its construction. If we consider both construction and use together, the 30 m² flat is around 85% less efficient than the 90 m² flat.

5 Conclusions

Smaller flats are always worse in terms of energy consumption and CO₂ emissions. They are worse in the both phases, construction and use.

The large difference between the 30m² flat and the others is due to the high values of ventilation required by Spanish regulations. According to other reasonable parameters – in terms of use and ventilation rates – it could be

possible to reduce this difference considerably, although it cannot be eliminated entirely.

The most efficient way to improve the environmental performance of flats is to take action in the smallest ones, where the inefficiency is greater.

Changing the design, would be possible to reduce the environmental impact of the smallest flats. A more efficient design includes a change in the access to the flats, with external horizontal passages instead of the vertical accesses considered in this study. In this case, 30 m² flats can improve its performances, but not arrive to the performance of the 60 m² flats.

A really improve in the performance of the small flats require a change in the distribution and in the use of the dwelling, which takes in account a different habitability concept. Service spaces as kitchen and laundry have to be separated from the living room and, if possible, have to be common spaces for various flats.

6. References

- [1] Basic Norm: Thermal conditions for building in Spain NBE-CT-79
- [2] Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality; ASHRAE 62, 11-08-2000 version
- [3] M. Palme, A. Isalgué, H. Coch, R. Serra, Energy consumption in small flats, WREC IX Congress, Florence, 2006

This study was made possible thanks to the FPU grant programme of the Spanish Ministry of Education and Science and to the UPC-research grant programme.

Anexo L

Proveniencia de los datos analizados
para el edificio de Les Planes de
Son y características de los
instrumentos de medición.

Proveniencia de los datos analizados para el edificio de Les Planes de Son y características de los instrumentos de medición

- Datos de temperatura ambiente (exterior e interior) y de impulsión de los sistemas de acondicionamiento: datos recogidos durante 2005, 2006 y 2007, proporcionados por Trama Tecnoambiental SA.
- Datos de radiación: datos recogidos por las estaciones meteorológicas de Molló, Pardines y Odeillo.
- Datos de temperatura superficial: mediciones in situ con la instrumentación que se detalla.
 - Sonda de temperatura superficial Fluke 80PK-27:
Rango de medición -127 a 600 °C
Precisión $\pm 4,4$ °C -127 a 366 °C; $\pm 1,2$ % 366 a 600 °C ASTM-E230-1993
 - Termómetro Fluke 53:
Rango de medición -200 a 1372 °C
Precisión $\pm [0,05\% + 0,3^\circ\text{C}]$ -100 a 1372 °C; $\pm 0,15\%$ -200 a -100 °C
Coeficiente de temperatura $+0,01\% + 0,03$ °C por °C para temperaturas fuera del rango 18 a 28 °C; $+0,04\%$ para temperaturas inferiores a -100 °C
- Datos de temperatura de radiación: mediciones in situ con la instrumentación siguiente.
 - Termómetro infrarrojo Fluke 66:
Rango de medición -32 a 600 °C (temperatura ambiente 23°C)
Precisión $\pm 1\%$ 23 a 510 °C; ± 2 °C -18 a 23 °C
Resolución 0,1 °C
Repetibilidad $\pm 0,5\%$ o ± 1 °C
Respuesta espectral 8 a 14 μm