

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CALEFACCIÓN O REFRESCAMIENTO PRODUCIDO POR LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS Y MICROCLIMA DE UNA VIVIENDA PASIVA. UNA FORMA DE INTEGRAR EL RENDIMIENTO DEL CONFORT TÉRMICO PASIVO A SU ADMINISTRACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE UN EDIFICIO

Fabiola Wanda Marín Salgado¹

Resumen

Se presentan los primeros resultados de una modelización básica y complementaria a una existente, para observar el comportamiento térmico de un bloque de edificio y su microclima inmediato, es una propuesta para introducir el confort térmico de una vivienda solar pasiva a evaluaciones requeridas en su administración del ciclo de vida y poder evaluar su sostenibilidad real, es decir a nivel medioambiental y económica, en la etapa de diseño del edificio y de

EVALUATION OF HEATING AND COOLING PERFORMANCE PRODUCED BY CONSTRUCTION ELEMENTS AND MICROCLIMATE OF A PASSIVE HOUSING. INTEGRATING PASSIVE THERMAL COMFORT PERFORMANCE INTO THE MANAGEMENT OF THE LIFE CYCLE OF A BUILDING

Fabiola Wanda Marín Salgado¹

Abstract

The first results of a basic and complementary modelling are shown. It is intended to observe the thermal behavior of a building and its immediate microclimate. This is a proposal to introduce the thermal comfort of a passive solar housing into the requirements contained within life cycle management so as to evaluate its real sustainability at environmental and economic

su microclima aledaño. Las prácticas sostenibles demandan metodologías y evaluaciones a una aceleración nunca antes vista para la ingeniería de la construcción. Aquí se presenta una modelización que supera las dificultades de evaluar cuando hay combinación de materiales y elementos constructivos, permitiendo en la etapa del diseño conocer directamente la temperatura que alcanzara el edificio las 24 horas del día, el calor almacenado y su velocidad de entrega al entorno interior, pudiendo modificarse los parámetros del microclima en la simulación y proveer el mejor escenario futuro. Se puede constatar que la velocidad del viento juega un rol importante en la interfase de entrega del calor acumulado, pues a mayor velocidad, menor interfase, pero dicha injerencia tiene un límite de acuerdo al espesor del elemento constructivo en análisis. Para la administración del ciclo de vida del confort térmico será posible contar con un rendimiento de servicio por elemento involucrado, y definir sus costos ambientales y económicos. De aquí a obtener un valor global de la unidad funcional “confort térmico” será más sistematizado.

PALABRAS CLAVE: CONFORT TÉRMICO, VIVIENDA SOLAR PASIVA, ADMINISTRACIÓN DEL CICLO DE VIDA, MODELIZACIÓN DEL MICROCLIMA Y GUÍA SOSTENIBLE.

Fecha de recepción: 24.10.10

Fecha de aceptación: 12.06.12

1 España. Constructora Civil, Universidad de La Serena. DEA (Distinción) en el Doctorado Proyectos de Innovación Tecnológica Master de Sostenibilidad (E) (UNESCO), Fundación Politécnica de Cataluña. PHD (c) Universidad Politécnica de Cataluña, España. Correo electrónico: fabiola.marin@upc.edu.

level, as well as during the design of the building and its neighboring microclimate. Sustainable practices demand different methodologies and evaluations at an unprecedented pace in the construction engineering field. This paper presents a modelling that overcome difficulties that occur when assessing different materials and construction elements, thus forecasting the temperature reached by the building during the design stage, as well as the accumulated heat and its delivery speed within interior space. It is possible to verify that the wind speed plays a key role during the delivery of accumulated heat, the more speed, the less interface. However, such an element has a limit according to the thickness of the analyzed construction material. The life cycle assessment of thermal comfort provides a service performance according to the element involved and defines environmental and economic costs, thus standardizing a global value of “thermal comfort”

KEYWORDS: THERMAL COMFORT, PASSIVE SOLAR HOUSING, LIFE CYCLE ASSESSMENT, MICROCLIMATE MODELLING, SUSTAINABLE GUIDE

Received: 24.10.10

Accepted: 12.06.12

1 Spain. Civil engineer, Universidad de La Serena. DEA (Distinction) during the Doctorate program Technological Innovation Projects. Master in Sustainability (E) (UNESCO), Fundación Politécnica de Cataluña. Ph.D. (C) Universidad Politécnica de Cataluña, Spain. Email: fabiola.marin@upc.edu

Introducción

El objetivo de esta investigación es desarrollar una metodología de evaluación del rendimiento térmico aportado por los elementos constructivos de un edificio solar pasivo, de manera que en la etapa de diseño, facilite la administración del ciclo de vida del confort térmico de dicho edificio.

Estos elementos constructivos están compuestos por sub-elementos y materiales que pueden estar integrados directamente en el edificio, tales como su envolvente, chimenea, ventanales o en su microclima inmediato, tales como su mobiliario urbano, áreas comunes de un condominio o en una plaza intermedia en su vecindario. Dicha evaluación permitirá conducir modificaciones en estos elementos constructivos en la etapa de diseño, que tiendan a optimizar el rendimiento y servicio al comportamiento térmico integral de la vivienda.

La predicción de la(s) unidad(es) funcional(es) en el ciclo de vida de un producto es básico para la administración de su ciclo de vida y para la unidad funcional “confort térmico”, que ofrece una vivienda solar pasiva, que ha sido difícil de manejar en su etapa de diseño, porque es finalmente la suma del rendimiento térmico que ofrece un conjunto de materiales y elementos constructivos dentro de dicha vivienda.

Los problemas de incorporar una evaluación de comportamiento térmico y relacionarlo con su análisis de ciclo de vida en el caso de una vivienda solar pasiva, se presenta frente a la necesidad de combinar materiales y componentes² de manera flexible, y que finalmente nos permita tener como resultado esta unidad funcional, tan importante para el bienestar y salud del ser humano, como es su confort térmico, haciendo claramente el alcance que cada uno de estos elementos además tiene funciones primarias distintas a las de confort térmico, como son elementos estructurales u obras de protección estéticas.

Este trabajo es parte de una investigación destinada a crear una guía de diseño para el confort térmico sostenible de un edificio económico en clima templado, asumiendo que el confort térmico (valorado como una unidad funcional) puede ser muy costoso durante la vida útil de una vivienda. Este trabajo se suma al gran esfuerzo que actualmente está desarrollando la industria de la construcción para minimizar el costo del propietario del edificio en la etapa de uso³.

El aporte que hace a la sostenibilidad la vivienda solar pasiva también es importante, ya que la calefacción o el refrescamiento que aporta al confort térmico del ser humano, no generan externalidades negativas en su periodo de funcionamiento, en comparación con las externalidades negativas que

2 Peuportier, B.L.P., 2001.

3 ISO 15686-6, 2004.

conlleven los sistemas de aire acondicionados o los artefactos de calefacción/refrescamiento, porque utilizan energías externas para su funcionamiento y emiten gases de efecto invernadero⁴.

Asimismo, para estos artefactos de calefacción/refrescamiento que requieren energías externas para su funcionamiento, en el caso de la vivienda social, se utilizan derivados del petróleo económico (por ejemplo parafina), que son altamente contaminantes inclusive al interior de la vivienda, o indirectamente contaminantes como las islas de calor urbano generadas por el efecto invernadero que producen nuestras emisiones de CO₂. La actividad del ser humano está afectando nuestra atmósfera⁵ y con ello perjudicando nuestros ecosistemas, situación que demanda modificar la industria y sus emisiones en todos los ámbitos. En la vivienda es posible pensar en un diseño para el confort térmico que sea limpio y permanente, incorporando en este diseño además su microclima inmediato, especialmente el diseño de su calle aledaña y áreas verdes circundantes.⁶

Las unidades dimensionales que nos entrega el modelo de evaluación térmica de nuestros elementos constructivos, son aquellos que definen la unidad funcional, vatios/m² de calefacción o refrescamiento, temperatura aportada al edificio en grados

Celsius (°C), forma de entrega del calor o refrescamiento y duración de este servicio por cada día y noche en segundos.

ADMINISTRACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO HACIA LA SOSTENIBILIDAD

La debida administración del ciclo de vida del producto final “confort térmico” permitiría identificar en cada una de sus etapas su rendimiento, su gasto energético, las cargas medioambientales y la accesibilidad (costos y vida de servicio) que significan a sus propietarios. Nos permitirá prever en la etapa de diseño su vida útil, mantenimiento y disposición final, contemplando el medio en que será inserto y los agentes de degradación que pueden atacar a sus integrantes y que podrían interrumpir su vida de servicio o deteriorar su rendimiento⁷.

Existen tres grandes fases en los procesos industriales para analizar el ciclo de vida de un producto o servicio⁸:

- En la ingeniería: el análisis de funciones técnicas.
- En la fabricación del producto: la optimización de sus procesos.
- En el uso: funcionalidad, rendimientos, los procesos de mantenimiento, renovación o recambio

4 Comisión Cambio Climático de la Unión Europea, 2011.

5 Oke, T.R., 1987; Grimmond, C.S.B.; Cleugh, H.A. y Oke, T.R., 1991.

6 Oke, T.R., 1988.

7 ISO 15686-6, 2004.

8 Westkämper, E., Alting, L. y Arndt, G., 2000.

y final de uso. La vivienda no es un producto fácil de industrializar, porque depende de la calificación de la mano de obra y de los centros de trabajo in situ del constructor. Su proceso de creación no ocurre en un lugar para ser transportable, sino que será inserto en un lugar determinado, con características climáticas y técnicas locales claramente identificables. Pero sí hay una tendencia de industrializar ciertos componentes y ensamblajes de la vivienda, situación que permitiría desarrollar una metodología de administración del “servicio de confort térmico”, si se logra identificar todos sus componentes como una unidad COLABORATIVA con una función claramente identificada en el transcurso de su vida útil.

La aplicación de los componentes que intervienen en el confort térmico de la vivienda requieren tres disciplinas claramente identificadas como son la arquitectura, las ciencias de la construcción y la ingeniería de los servicios sanitarios y energéticos, pero existen otras disciplinas que son necesarias de considerar en el diseño como las ciencias ambientales, económicas, aspectos legales, mantenimiento, administración y consideraciones de estándares internacionales, es decir, aplicar una administración del ciclo de vida total del producto.

La aplicación de la administración del ciclo de vida total del confort térmico nos ofrece la ventaja de dar la oportunidad al cliente de elegir. Cuando

la ingeniería decide un diseño determinado, esta decisión se basa normalmente en los requerimientos técnicos, de seguridad, funcionalidad y en los requerimientos del cliente. Estos últimos generalmente se basan en estudios de demandas del mercado, pero en el caso del confort térmico de una vivienda, existen decisiones de diseño a diferentes estados de su gestación tales como la arquitectura y la construcción, que no son necesariamente coordinadas para ofrecer un confort térmico determinado, como un servicio perfectamente identificado y dimensionado y por lo tanto no existe oportunidad para que el usuario final tome una decisión acerca de un confort térmico deseable en términos sostenible y económicos, sino que estas son determinadas seccionalmente por sus “usuarios intermedios”, como son:

- En la etapa de diseño de la vivienda, el arquitecto, que cumple una importante tarea en la etapa de diseño, definiendo un alto porcentaje del funcionamiento futuro de la vivienda y sus características bioclimáticas o no;
- En la etapa de acondicionamiento de la vivienda, sus elementos y sistemas sanitarios, eléctricos, calefacción y gas (todos productos prefabricados), el ingeniero es quien define entre otras cosas el servicio, seguridad y comodidad de la vivienda, y
- En la etapa de ejecución de la vivienda y sus instalaciones complementarias, el arquitecto

(no necesariamente el responsable del diseño), el ingeniero y el constructor al pie de obra son quienes ejecutan un proyecto preconcebido y cuya prioridad principal es económica en su construcción.

Esta situación se presenta por la complejidad de lo que significa el servicio del confort térmico dentro de la vivienda, que en cierta manera es el resultado indirecto también de un bien mayor como son la seguridad estructural, la salubridad del edificio, su planificación, distribución y finalmente su comodidad.

Comparación entre confort térmico convencional y confort térmico solar pasivo

Para poder identificar claramente el resultado entre un confort térmico de una vivienda convencional y otra solar pasiva, se utiliza como modelo un edificio existente (figura 1) ubicado en Villa La Cultura de la comuna de San Ramón, Santiago de Chile (Viviendas Básicas MINVU)⁹ y se le realizan modificaciones en los materiales y en los elementos constructivos tanto en el bloque como en su microclima, de manera de mejorar su servicio. Los

elementos e intervenciones posibles están establecidas, tanto para el verano como para el invierno: vegetación en las techumbres que absorban el excesivo calor del verano por ejemplo¹⁰ o elementos que permitan al edificio capturar mejor la radiación solar a través de masa térmica que retenga el calor en invierno¹¹ o balance de las ventanas que optimiza el aprovechamiento del microclima en ambas estaciones de invierno y verano¹².

Un caso de estudio y descripción del modelo

Después de haber realizado las primeras aplicaciones en la evaluación global del comportamiento térmico del edificio en estudio (en sus condiciones originales y modificado en sus elementos y características térmicas), con una metodología que actualmente se aplica para el diseño de equipos de aire acondicionados en España¹³, se ha obtenido un resultado global parcial posible de aplicar en la evaluación térmica de una vivienda solar pasiva, pero sólo durante las horas del día cuando la radiación solar llega al edificio. Esta modelización fue diseñada para conocer algunos escenarios térmicos globales del espacio habitable, en un clima

9 Proyecto Piloto del Programa Renovación Urbana en el casco periferico central de Santiago, Región Metropolitana, Secretaría Ministerial de Vivienda y Urbanismo. Ver Marín Salgado, Fabiola, 1999.

10 Osmond, Paul, 2004.

11 CEPHEUS, 2001.

12 Citherlet, S., Di Guglielmo, F. y Gay, J. B., 2000.

13 Miranda, A.L., 2000.

FIGURA 1. CONDOMINIO VILLA LA CULTURA, SAN RAMÓN, SANTIAGO DE CHILE. PROGRAMA RENOVACIÓN URBANA EN DENSIFICACIÓN VIVIENDAS SOCIALES 1999, MINVU.



Fuente: Archivos periodísticos de Fabiola Quinteros, MINVU 2004.

dado, teniendo como objetivo exclusivo la selección de aparatos de calefacción/refrigeración que requiriera el edificio, modelo que no nos permite evaluar propiamente el comportamiento del confort térmico pasivo de la vivienda.

Para suplir estas necesidades de individualizar completamente el servicio solar pasivo (las 24 horas del día) y los aportes que realiza cada

componente constructivo (temperatura, energía calorífica y tiempo de entrega del calor) a la unidad funcional e identificar las intervenciones posibles de realizar a ambos, edificio y microclima, se ha desarrollado un simple modelo (complementario al aportado por A. L. Miranda) basado en las ecuaciones fundamentales de la termodinámica aplicado al sistema edificio - microclima.

El presente caso de estudio se ubica en la estación de invierno, igualmente se contempla acondicionar el modelo para desarrollar mediciones que apoyen el diseño del confort térmico en verano, pero en este trabajo sólo se presentan los avances obtenidos hasta ahora, los cuales son la base del trabajo futuro.

Este trabajo es multidisciplinario, involucra dos disciplinas, construcción civil y mecánica de fluidos (disciplinas generalmente paralelas) y juntarlas en este punto no sería posible sin la hospitalidad de la Universidad de Cambridge, en especial del Departamento de Ingeniería¹⁴, que integró esta investigación planteada desde el ámbito de la construcción, específicamente desde el diseño de la vivienda sostenible, a sus actuales trabajos, en “microclima” y quienes han liderado en conjunto con científicos del mundo la producción de conocimiento y herramientas para investigar los

14 En especial al Doctor Rex Britter, Profesor de Dinámica de Fluidos Medioambientales del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Cambridge, Inglaterra, Reino Unido.

microclimas y la contaminación ambiental que se producen en las zonas urbanas.

Las sinergias que afectan a las zonas urbanas son los balances energéticos de las superficies terrestres, los flujos y dispersión en zonas urbanas¹⁵. El presupuesto de energía en las superficies urbanas¹⁶ es materia de diversas herramientas que se utilizan para la modelización de estos fenómenos físicos, especialmente el aporte que entrega el proyecto que estudia en profundidad el comportamiento del viento y las energías de la superficie en las áreas urbanas, que genera diferentes herramientas de simulaciones para la aplicación de evaluaciones del viento alrededor de edificios.

MODIFICACIONES APLICADAS A LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS (ET) DEL EDIFICIO EN ESTUDIO

Después de aplicar mejoramientos a tres elementos del edificio en estudio, se logra visualizar que su comportamiento térmico global da una optimización sobre el 55 % de su rendimiento original. Las modificaciones aplicadas han sido realizadas considerando los estándares de una vivienda solar pasiva, específicamente se mejoraron las paredes del envoltorio del edificio, sus ventanas y techo, disminuyendo la transmitancia térmica (U-valor)

de estos elementos en 0.35, 2.2 y 0.25 W/m² °C respectivamente.

Para lograr ese mejoramiento térmico en el edificio se consideró adherir un aislante a las paredes y techo existentes, y cambiar la ventana con vidrio simple a una ventana con doble vidrio.

Descripción y aplicación del modelo complementario simplificado de evaluación térmica

El modelo complementario se basa en las propiedades termodinámicas que se relacionan con el estado en equilibrio de un sistema, aplicado a un material que experimenta tres fenómenos físicos tales como radiación, conducción y convección (propiedades de transporte del calor en la materia). Aquí es importante hacer una distinción de las propiedades termodinámicas de la materia, la cual Incropera y DeWitt¹⁷ dividen en dos categorías, una sobre las propiedades de transporte del calor y segundo, las propiedades de la termodinámica que nos habla del equilibrio de un sistema.

Para evaluar las propiedades de equilibrio se utilizan dos importantes propiedades de la materia,

15 Britter, R. y Hanna, S.R., 2003.

16 Piringer y Joffre, 2005.

17 Incropera y DeWitt, 1999.

como son la densidad (ρ en kg/m^3) y el coeficiente de capacidad térmica (C_p en $\text{Joule/m}^3 \text{ C}$), cuyo producto $\rho \cdot C_p$ tiene como resultado su capacidad térmica volumétrica o capacidad de almacenamiento de calor de la materia o masa térmica como es mencionada comúnmente. Este producto, para el modelo complementario aquí presentado, es muy relevante, puesto que los primeros escenarios estudiados se han dirigido específicamente a evaluar el calor almacenado en el edificio y de qué manera este calor es entregado al medioambiente en época de invierno, como también la temperatura alcanzada en el mismo edificio. En época de verano debemos contemplar cómo evitar que ese almacenamiento de calor ocurra o disminuya y que la temperatura del bloque se mantenga en los niveles recomendados por la norma ISO 7730.

Se considera la conducción de calor con cambios de temperatura periódicos (sin pérdidas ni ganancias de calor)¹⁸, donde el material absorbe y entrega calor como es el caso de la tierra que es calentada periódicamente por el sol y durante la noche se enfría. Tomando este caso y considerando un flujo de calor unidireccional, se aplica la ecuación de calor general a partir de la Ley de Fourier para análisis armónico y se aplicó una solución particular analítica a través de ecuaciones diferenciales ordinarias¹⁹.

Con esto se ha creado un código en MATLAB para crear diferentes escenarios de microclima y de soluciones de elementos constructivos, cambiando o combinando materiales. Para conocer más detalles de las ecuaciones del modelo complementario, ver Anexo.

En este caso se hace la evaluación para diferentes espesores y materiales de pared, en primer lugar se contempla el muro soportante original, luego se le aplican modificaciones en su espesor y material y finalmente se le adhiere a esta pared soportante una segunda pared no soportante, que cumple funciones sólo de aislación térmica y no estructurales.

La aplicación de la ecuación de energía de calor es aplicada a un elemento del edificio: Se aplica a la envolvente del edificio original y se le simula diferentes espesores (0.15 m de espesor) que nos permitiese ver su comportamiento térmico, la radiación media considerada es un día de invierno, 23 de julio en el Hemisferio Sur²⁰ y las características del material original del edificio es dado por los estándares aplicados en la construcción de viviendas sociales definidas por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (MINVU). Para el mejoramiento del almacenamiento de calor del envolvente se han considerado propiedades térmicas de algunos de los materiales de construcción mencionados en la tabla 1.

18 Jakob, M., 1949.

19 Boyce, W. E. y DiPrima, R., 1986.

20 American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1972.

TABLA 1. PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN ANALIZADOS.

Material	Densidad Kg/ m3	Coficiente de calor específico (Cp) (J/(kg K))
Ladrillo princesa (Minvu Chile)	1318	795.5
Ladrillo común	1920	835
Poliestireno expandido (10 mm) (Minvu Chile)	10	1210
Poliestireno expandido R-12	55	1210
Madera contra enchapada	545	1215
Aire (a nivel del mar 25 °C) 300 K	1.16	1.007
Agua líquida, a 0 °C	1005	4217.6
Agua líquida, a 5 °C	1004.15	4209.3
Agua líquida, a 20 °C	1001.5	4182.8

Fuente: Incropera, Frank y Dewitt, David, 1999.

Otras asunciones:

La temperatura es uniforme en todo el edificio, y la temperatura del interior imita la temperatura de la pared. La radiación que llega al edificio es la media que recibe el lugar durante el día, en todos sus orientaciones, norte, sur, este y oeste. Este particular defecto del modelo que no corrige de acuerdo al albedo que tiene la posición del edificio y la calle²¹ será corregido.

21 Oke, T. R., 1988.

Aplicación del modelo en diferentes escenarios

ESCENARIO INICIAL CON LAS CARACTERÍSTICAS EXISTENTES DEL EDIFICIO.

Microclima simulado:

Lugar de implantación: Santiago de Chile, Latitud 33.

Radiación: 158.53 W; Velocidad del viento = 5 m/s.

Propiedades térmicas originales del material del envolvente: Ladrillo titán (ladrillo de arcilla limosa artesanal).

Coficiente del calor específico del ladrillo: Cp=795.5 J/m3 C.

Densidad del ladrillo: 1318 kg/m3.

El primer importante resultado obtenido en las condiciones existentes, es decir analizando las propiedades que tiene el diseño actual del edificio, es que hay una interfase de 1 hora, 34 minutos y 10 segundos, desde que se recibe la radiación solar, considerando como condiciones de inicio (tiempo 0) el mediodía, hasta lograr el máximo de almacenamiento de calor del material y que coincide con la máxima temperatura alcanzada, esto es, tendríamos a las 13:34:10" horas de la tarde.

Esta misma interfase se aprecia cuando la radiación solar llega al ocaso y el material inicia a entregar su calor al ambiente que lo rodea: una hora, 34 minutos y 10 segundos (su interfase) de entrega, tal como lo muestra la figura 2.

VARIACIONES EN EL MICROCLIMA

VARIACIONES DEL VIENTO

Cuando fue reducida la velocidad del viento desde 5 m/s a 1 m/s y se mantuvo la cantidad de radiación que recibía al sistema, se pudo observar una interfase que incrementó a 3:11 horas. El calor almacenado y la temperatura del material fueron incrementados también, el almacenamiento de calor fue aumentado el doble y la temperatura aumento desde 10.3 C a 15.3 C. Esto implica que es factible medir cualquier efecto de una reducción de velocidad del viento, y cuantificar el material y costos que implican la estructura seleccionada para esos fines, aquí hablamos de balcones, chimeneas, invernaderos y cielos falsos que pudieran servir como atenuante del viento externo, entre el microclima y el edificio, como también barreras corta viento formadas por árboles en su microclima.

Actualmente se trabaja en una solución para balcones o invernaderos, con esta misma ecuación de energía aplicada a dos espacios a través de

un sistema de ecuaciones que está encontrando una solución mediante el análisis numérico con MATLAB.²²

VARIACIONES DE LA RADIACIÓN SOLAR

En cambio, cuando se modificó la radiación desde 158 Watt a 400 Watt y se mantuvo constante la velocidad del viento, sin modificar las propiedades del material ($C_p=795.5 \text{ J/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$ = Densidad= 1318 kg/m³), la interfase entre la radiación solar y el calor almacenado se mantuvo constante pero se incrementaron la cantidad de calor almacenado y su temperatura.

Esto confirma lo antes mencionado acerca de la vivienda solar pasiva²³, que la radiación lidera la cantidad de calor almacenada y las temperaturas alcanzadas, pero aquí queda claro que no tiene alcance en la interfase existente entre la radiación solar y el calor almacenado en el edificio. En otras palabras, no podría prolongar su efecto en las noches de invierno.

Los primeros resultados obtenidos por variaciones en el microclima se pueden apreciar en la figura 3.

VARIACIONES EN LOS ELEMENTOS DEL EDIFICIO

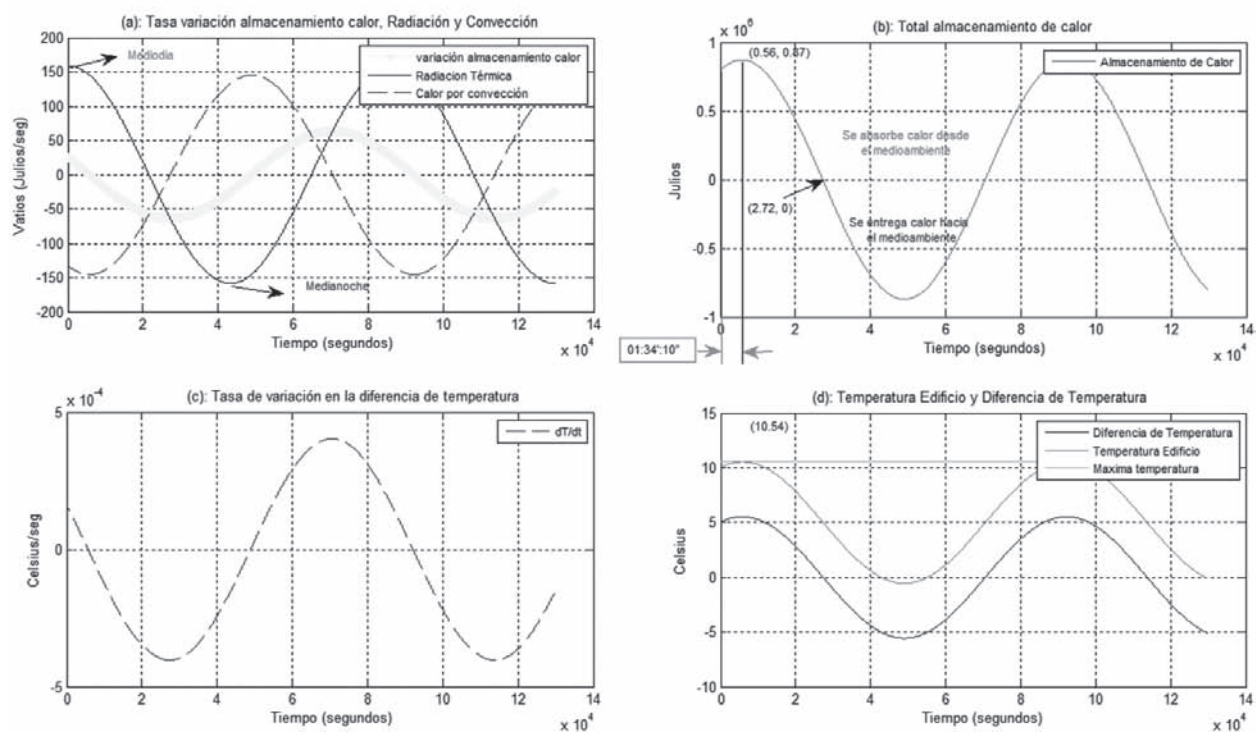
La utilidad del modelo para el diseño de un elemento constructivo de almacenamiento de calor se puede apreciar de la siguiente forma.

22 Recktenwald, G., 2000.

23 Littler y Thomas, 1984; Mazria, E., 1985.

FIGURA 2. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL ENVOLVENTE DEL EDIFICIO CON SU DISEÑO ORIGINAL. MATERIAL: LADRILLO PRINCESA.

1.- Material: Ladrillo Princesa (Original); Área: 1 m²; Espesor= 0.15 m; Tem= 5 °C; Radiación: 158.83 Vatios; Vel. Viento= 5 m/s; Cp=795.5 J/m³ °C = Densidad= 1318 kg/m³



Fuente: Elaboración propia.

Modificación en el espesor del material:

Se aplicaron modificaciones en el espesor del envolvente (desde 0.15 m hasta 0.30 m progresivamente) del edificio y se puede apreciar que a velocidad de viento y radiación constante, la interfase radiación-calor almacenado fue incrementándose con el aumento del espesor del envolvente, en este caso a razón de 5 minutos de interfase por centímetro aumentado (ver figura 4). Con estas pequeñas modificaciones se logró, inclusive al doblar el espesor, doblar la interfase entre la radiación solar y la entrega del calor del material al ambiente, pero cuando se quiso comprobar si efectivamente el comportamiento era igual para espesores mayores llegando a 1.2 m, se pudo constatar que a un determinado espesor (0.45 m), este comportamiento se quiebra y a mayores espesores no existen mayores variaciones en la interfase radiación-calor almacenado, aunque sí se aprecia que aumenta levemente la cantidad de calor almacenado, pero su temperatura comienza a descender.

Modificación a la composición del material del envolvente:

Al envolvente de ladrillo de arcilla del edificio se le incorporó un aislante, tal como se configuró en la primera evaluación global del comportamiento térmico del edificio, cuyo resultado

interno significó una disminución de sus pérdidas de calor por infiltraciones o ventilación. En este caso se contempló como aislante una placa de poliestireno de 10 cm de espesor (estándar MINVU Chile).

POLIESTIRENO:

En la secuencia de análisis, primero se aplicó la ecuación de energía de calor a la capa de aislante (poliestireno), en donde sus características térmicas, es decir, coeficiente de calor específico (Cp) y su densidad difieren completamente a las del ladrillo de arcilla, en especial su densidad que es muy inferior. Y se pudo observar que el aislante tiene una residual interfase entre radiación-calor almacenado, esto significa que ni absorbe ni entrega calor y se enfría inmediatamente apenas la radiación solar deja de llegarle a la superficie. Es decir, manteniéndose el microclima inicial y modificando los espesores del poliestireno se aprecia que este adolece de tiempo de interfase para alcanzar sus máximos niveles de temperatura y energía acumulada, siendo inferiores entre 50 segundos a dos minutos desde 10 cm de espesor a 30 centímetros y mantiene una temperatura constante (11.04 °C), con una energía acumulada muy inferior a la energía calorífica lograda por el ladrillo en muestra. Tal como se exhibe en la figura 5.

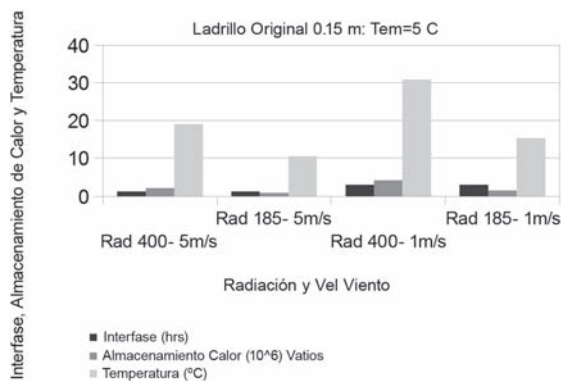
TABLA N° 2. DETALLE DE FIGURA 3.

Ladrillo original e= 0.15 m; Tam= 5 °C; Cp=795.5 J/m3 °C = Densidad= 1318 kg/m3			
Radiación y Velocidad del viento (Vatios – m/s)	Interfase (horas)	Almacenamiento (10^6 Vatios)	Temperatura °C
Rad 400 – 5m/s	01:34:00	2.2	18.98
Rad 185 – 5 m/s	01:34':10"	0.87	10.54
Rad 400 – 1m/s	03:10':00"	4.07	30.89
Rad 185 – 1 m/s	03:10':00"	1.61	15.26

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3. RESUMEN COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL EDIFICIO EN SU DISEÑO ORIGINAL CON DIFERENTES ESCENARIOS CLIMÁTICOS.

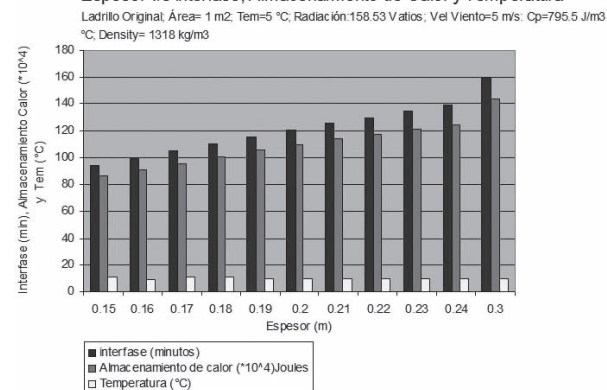
Radiación y Vel Viento v/s Interfase, Almacenamiento de calor y Temperatura



Fuente: Elaboración propia.

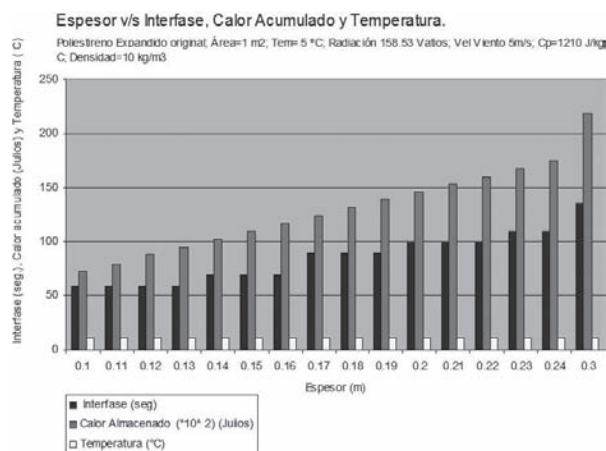
FIGURA 4. RESUMEN COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL EDIFICIO EN SU DISEÑO ORIGINAL CON DIFERENTES ESCENARIOS EN EL ESPESOR DEL ENVOLVENTE. MATERIAL LADRILLO PRINCESA.

Espesor v/s Interfase, Almacenamiento de Calor y Temperatura



Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 5. RESUMEN COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL EDIFICIO EN SU DISEÑO ORIGINAL CON DIFERENTES ESCENARIOS EN EL ESPESOR DE SU ENVOLVENTE. MATERIAL: POLIESTIRENO EXPANDIDO.



Fuente: Elaboración propia.

LADRILLO DE ARCILLA + POLIESTIRENO:

Al aplicar la ecuación de energía de calor al envolvente compuesto de estos dos materiales (ladrillo + poliestireno) y manteniendo su microclima constante, se pudo apreciar que el compuesto mantiene la interfase de radiación-calor almacenado del ladrillo, así como su temperatura y la cantidad de calor almacenado, permitiendo al edificio evitar sus pérdidas, pero también almacenar más calor a mayor temperatura.

Además, no ha logrado aumentar la interfase radiación-calor acumulado y, por lo tanto, no garantiza tener el calor mayor tiempo en el material o en otras palabras, no ha logrado disminuir la influencia del viento sobre la permanencia del calor en el material.

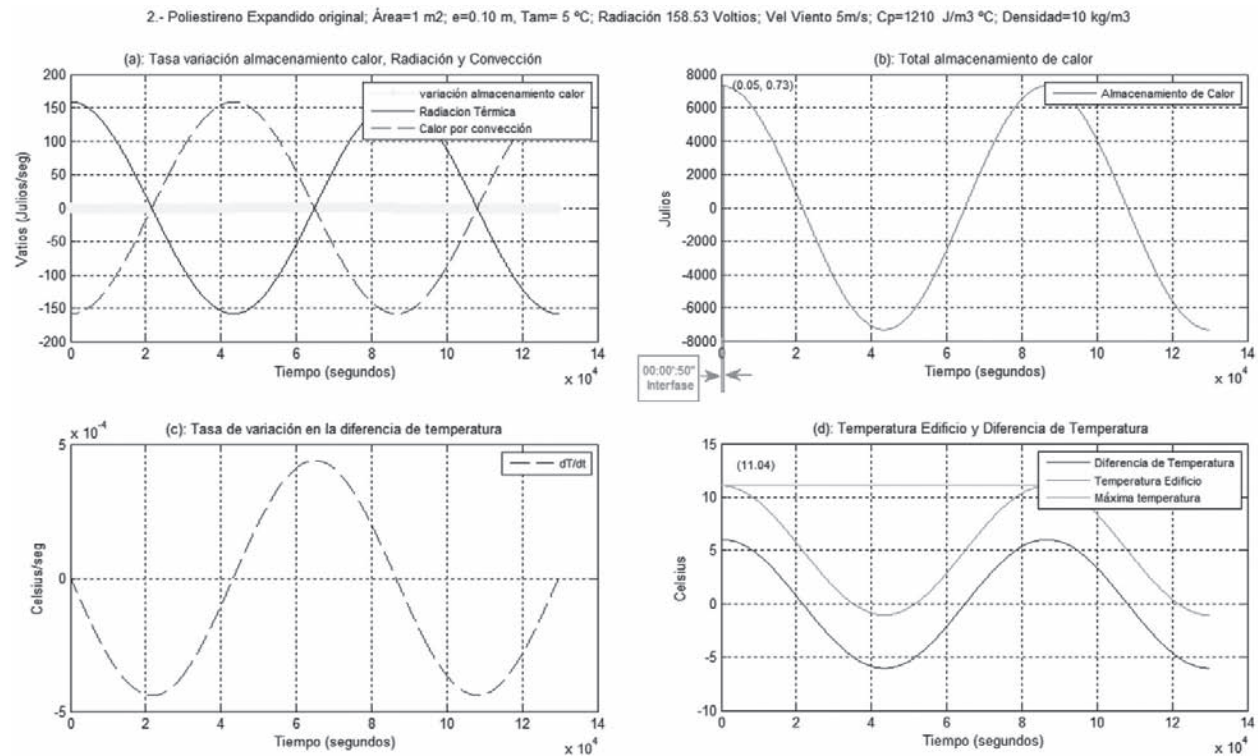
En las figuras 6 y 7 se representa el comportamiento térmico de estos materiales.

Modificaciones a las propiedades térmicas de los materiales:

Cambiando el espesor del ladrillo de 0.15 m a 0.20m, también se modificaron las propiedades térmicas del ladrillo de arcilla, eligiendo uno de mayor densidad y mayor Cp (Cp=838 J/Kg °C: Densidad=1920 Kg/m³), que permitió elevar el tiempo de desfase radiación-calor almacenado a 2:46:40” horas, su temperatura bajó de 10.54 a 9.51 C y su calor almacenado subió de 0.87 * 10⁶ a 1.44 *10⁶ Julios.

También se realizaron otras evaluaciones, con composiciones de diferentes materiales, pensando en el diseño de elementos constructivos con mayor capacidad para almacenar el calor (mayor masa térmica) ubicados en espacios preferidos del edificio. Sobre todo aquellos espacios favorecidos con mayor radiación en días de invierno y que deben ser protegidos del viento. Como ya hemos demostrado anteriormente, el viento disminuye la interfase de entrega del calor almacenado en la masa térmica, en otras palabras, la velocidad del viento acelera

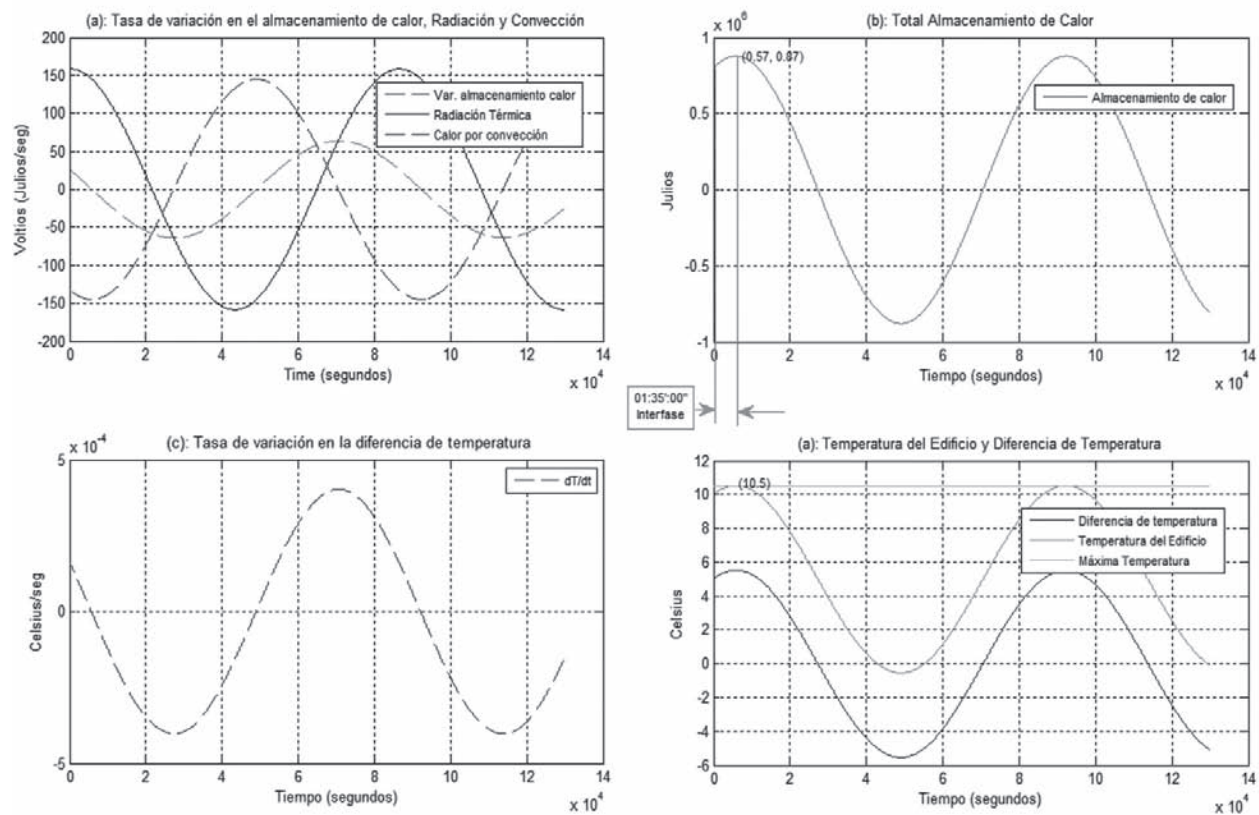
FIGURA 6. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL ENVOLVENTE DEL EDIFICIO CON SU DISEÑO ORIGINAL. POLIESTIRENO EXPANDIDO.



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 7. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE MATERIALES DEL ENVOLVENTE DEL EDIFICIO CON DISEÑO MODIFICADO. DOBLE MURO DE LADRILLO Y POLIESTIRENO EXPANDIDO.

3.- Mat. Originales: 1) Ladrillo y Poliestireno; Área= 1 m²; Espesores: eL=0.15m y eP=0.10m; CpL= 795.5 J/m³ °C y CpP= 1210 J/m³ °C; DenL=1318 kg/m³ y DenP= 10 kg/m³

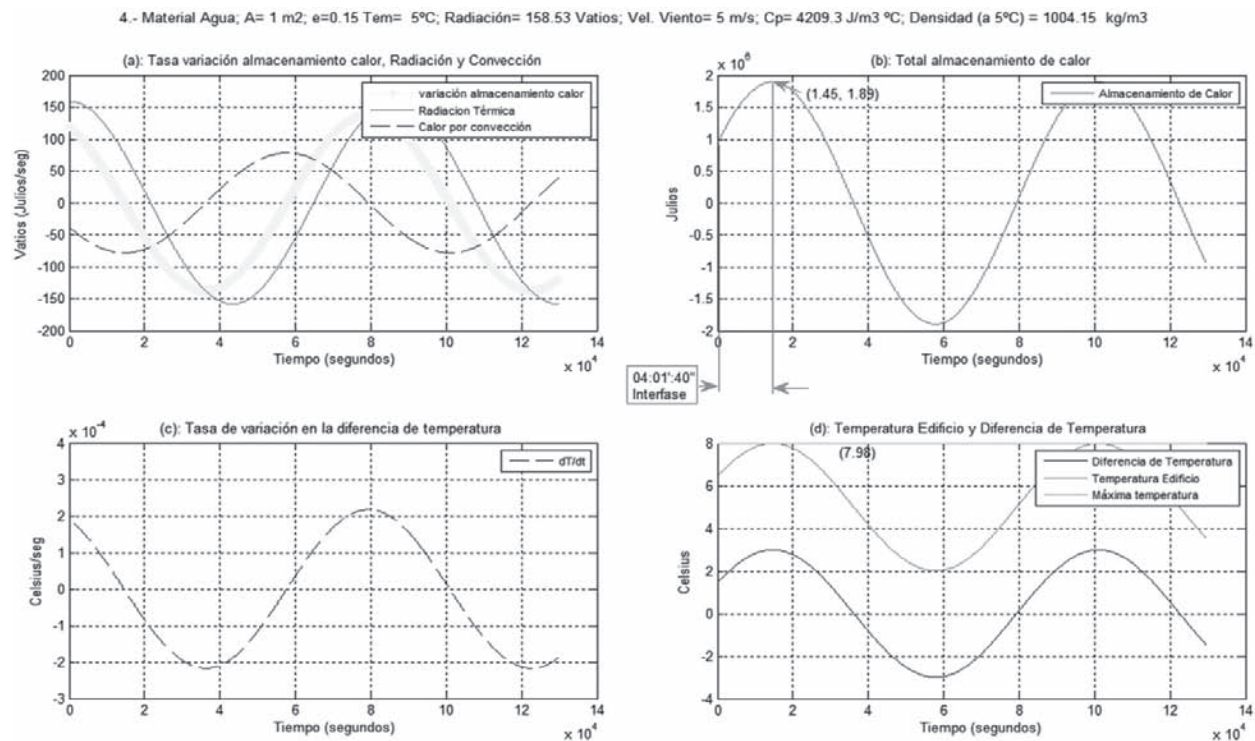


Fuente: Elaboración propia.

ARTÍCULO: Evaluación del rendimiento de calefacción o refrescamiento producido por los elementos constructivos y microclima de una vivienda pasiva. Una forma de integrar el rendimiento del confort térmico pasivo a su administración del ciclo de vida de un edificio / **Fabiola Wanda Marín Salgado**

revista INVI N° 75 / Agosto 2012 / Volumen N° 27: 171-197 187

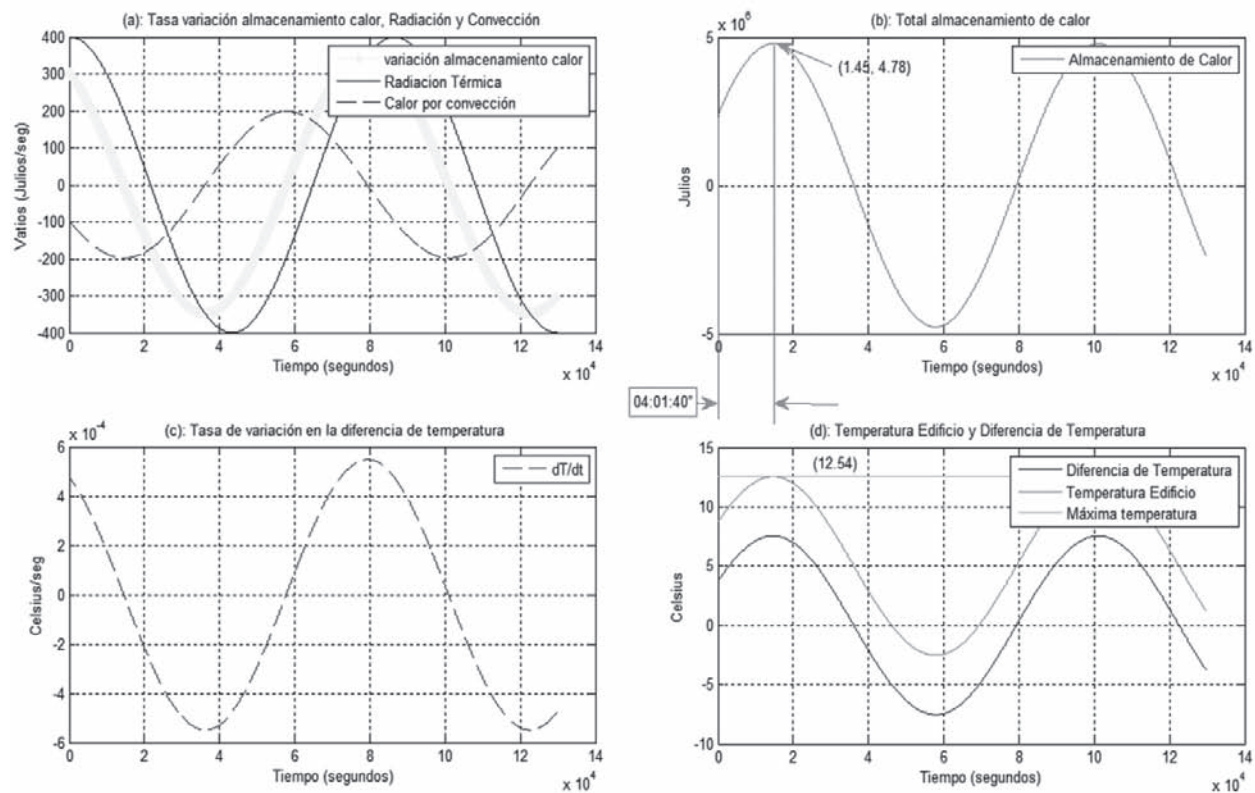
FIGURA 8. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL ENVOLVENTE DEL EDIFICIO CON DISEÑO MODIFICADO. CAPA DE AGUA SIMULADA.



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 9. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL ENVOLVENTE DEL EDIFICIO CON DISEÑO Y ESCENARIO CLIMÁTICO MODIFICADO. CAPA DE AGUA SIMULADA.

5.- Material Agua (a 5°C); A= 1 m²; e=0.15 Tem= 5°C; Radiación= 400 Vatios; Vel. Viento= 5 m/s; Cp= 4209.3 J/m³ °C; Densidad= 1004.15 kg/m³

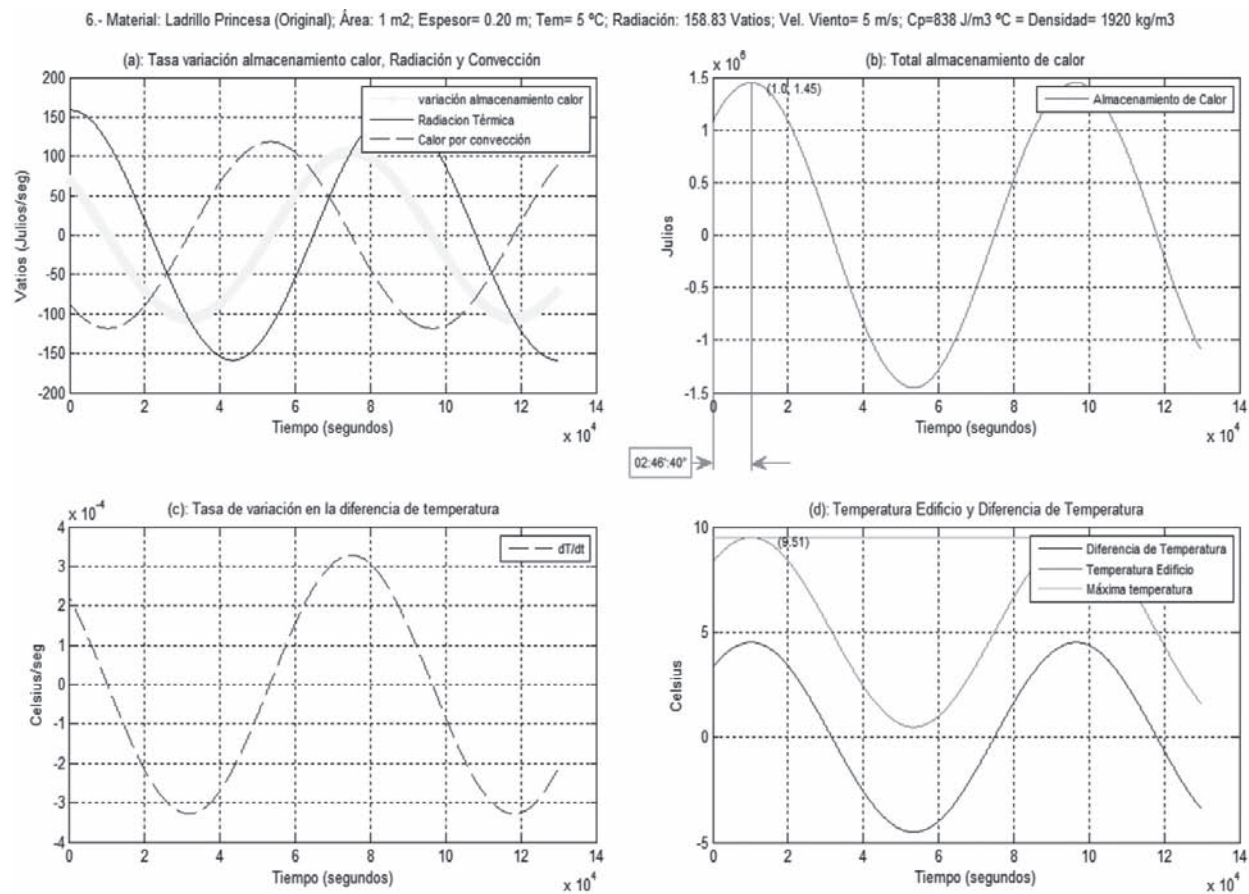


Fuente: Elaboración propia.

ARTÍCULO: Evaluación del rendimiento de calefacción o refrescamiento producido por los elementos constructivos y microclima de una vivienda pasiva. Una forma de integrar el rendimiento del confort térmico pasivo a su administración del ciclo de vida de un edificio / **Fabiola Wanda Marín Salgado**

revista invi N° 75 / Agosto 2012 / Volumen N° 27: 171-197 189

FIGURA 10. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL ENVOLVENTE DEL EDIFICIO CON SU DISEÑO MODIFICADO. LADRILLO PRINCESA.



Fuente: Elaboración propia.

el enfriamiento del elemento constructivo, de ahí que en el diseño se debe contemplar la protección contra el viento de los colectores térmicos pasivos.

El agua por ejemplo con un alto coeficiente de calor específico (C_p) cuenta con alta capacidad de almacenamiento de calor y como era de esperarse, en la simulación del envolvente con una capa de agua de espesor de 0,15 m y en un escenario similar a los aplicados a los materiales originales, es decir velocidad del viento 5 m/seg por unidad de superficie, se logró 04 horas 1 minuto, 40 segundos de interfase de entrega de calor, ya sea con 158 o 400 watts de radiación neta (ver figuras 8, 9 y 10)

Conclusiones

Esta evaluación permite conocer en más detalle la función térmica del edificio desde sus elementos constructivos, pudiendo establecer a futuro indicadores que den cuenta de estos detalles en su etapa de diseño, tales como visualizar cómo es afectada la masa térmica del envolvente del edificio por la velocidad del viento, energía que en este caso lidera la interfase entre el calor solar almacenado y el aportado desde el material al ambiente que lo rodea.

Se considera factible ganar conocimiento de las interacciones posibles entre el microclima y el edificio, de manera más simplificada que otros modelos de la termodinámica, permitiendo tener una administración del ciclo de vida del confort térmico

de la vivienda, en un sitio determinado, con un diseño determinado.

Para las disciplinas de construcciones civiles es mucho más factible saber si es posible reducir o aumentar un espesor de un elemento constructivo y poder conocer su comportamiento térmico, o cambiar las propiedades térmicas de dicho material por ejemplo en la densidad del ladrillo de arcilla in situ, para el caso de la construcción artesanal de estos elementos.

Para la administración del ciclo de vida del confort térmico será posible contar con un rendimiento de servicio por elemento involucrado, y definir sus costos ambientales y económicos, de aquí a obtener un valor global de la unidad funcional “confort térmico” será sistematizada, tanto para la administración de obras de la construcción como para el futuro usuario.

El siguiente paso de perfeccionamiento del modelo aquí presentado, será incorporarlo a un sistema de almacenamiento de calor en un balcón o un entretecho por ejemplo, en donde se permita disminuir la velocidad del viento y exponer al balcón y su masa térmica a una mayor cantidad de radiación durante los días de invierno.

La perfección del modelo para los días de verano deberá buscarse en la mejoría del microclima, que facilite a ambas épocas el confort térmico de sus residentes, como por ejemplo vegetación, fuentes de agua, etc.

Además, si bien es cierto que las recomendaciones de hacer comparaciones entre productos de naturalezas distintas es válido²⁴, también es cierto que existen vacíos en el análisis del ciclo de vida del confort térmico entre una vivienda convencional y otra solar pasiva por país y por región, y entre los sistemas de calefacción y refrescamientos tradicionales y los pasivos.

Por lo tanto, no es erróneo buscar un perfil completo de iguales unidades funcionales, los que deben tener parámetros coincidentes y por supuesto el mismo servicio, es decir, en nuestro caso podrían ser:

- Rendimiento y servicios de la unidad funcional: temperatura, energía calorífica aportada o extraída, tiempo que dura el servicio, calidad, etc.
- Costos de producción: utilización de recursos materiales y recursos humanos en la construcción del artefacto o de los elementos, costos financieros.
- Costos medioambientales: unidades mili puntos aplicando Eco indicador 99 por artefacto o elemento.
- Costos de uso y manutención: uso de personal, energía consumida y reposición del artefacto o elemento.

Para la administración del ciclo de vida del producto aquí en estudio, es necesario tener información lo más fidedigna a la realidad con respecto al servicio

24 Goedkoop, Mark, Effting, Suzanne y Collignon, Marcel, 1999.

entregado (la función térmica resultante del edificio), al rendimiento de la función y su relación con los costos que ello conlleva en su etapa de uso del producto final, la vivienda. Esto permitirá a los diseñadores y profesionales de la construcción, comparar sus propios diseños y alternativas a la hora de hablar de costos y protección medioambiental como también tener diferentes alternativas que ofrecer a sus clientes.

Anexo

APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE ENERGÍA DE CALOR PARA LA MASA DEL EDIFICIO EN ESTUDIO.

Alcance de la modelización: Las suposiciones siguientes han sido consideradas para la elaboración del modelo complementario:

- La temperatura del edificio (T_b) en cualquiera parte es uniforme.
- La temperatura del aire es constante a una temperatura dada (la elegida para la evaluación).
- Sólo es considerada la radiación solar neta que entra y sale del edificio.
- El calor por convección transferido desde las paredes del envolvente del edificio debido al viento, su velocidad y paredes son a temperatura del edificio.

Los dos principales elementos que lideran la calefacción en una vivienda pasiva son la radiación solar y el viento de su microclima respectivamente. En esta etapa se ha logrado calcular el flujo de calor entre el microclima y el edificio, cuanto calor almacenado podemos tener en las paredes del envolvente del edificio, qué interfase de tiempo tenemos entre que la radiación solar deja de incidir sobre la superficie del envolvente y este hace entrega del calor al medio ambiente que lo rodea, principalmente en la noche, y la temperatura que alcanza el edificio.

Existen tres fenómenos físicos que actúan en un microclima urbano:

La radiación neta que entre al edificio por conducción, en Vatios/m².

Esta ecuación proviene de una solución particular de la ecuación de difusión de calor general por conducción desarrollada para cambios periódicos de temperatura de la superficie de un plato de espesor infinito²⁵, quien consideró sólo una dirección del flujo de calor de la ecuación general de difusión de calor, $d\theta/dt = \alpha d^2\theta/dx^2$, con θ tomada como la diferencia de temperatura entre el material y el ambiente que lo rodea y α es la difusividad térmica, en m²/s. La solución particular aquí simplificada es:

25 Jakob, M., 1949.

$q_{\text{radiación in}} = q_0 \coseno(w t)$ – Una solución simplificada

Donde:

q_0 = Radiación neta recibida, la radiación recibida en Vatios/s de acuerdo a tablas de radiación recibidas en la latitud 33 Hemisferio Sur²⁶.

$w = 2\pi/Tc$, ($w/2\pi = 1/Tc$ es la frecuencia de oscilación de la onda de calor).

Tc = Tiempo necesario para completar un ciclo, en nuestro caso es un día.

t = Es el tiempo en segundos.

Almacenamiento de calor dentro del envolvente del edificio

Almacenamiento de calor = $M_b * Cp * dT_b/dt$

M_b = Masa del material en Kg/m³.

Cp = Coeficiente de calor específico del material.

dT_b/dt = es la tasa de cambio de la temperatura del material.

Calor transferido por convección desde el edificio al aire exterior y al aire interno.

$q_{\text{convección}} = A * h_{se} * (T_b - T_{amb})$

donde

h_{se} es coeficiente de transferencia de calor por convección, y aquí ha sido considerada la ecuación $h_{se} = 3.96 * (u^2 + v^2 + z^2)^{1/2} + 6.42$ (27), que

26 Tablas producto de la extrapolación de tablas de latitudes 40 y 30, Hemisferio Norte, Carrier, 1997.

27 Hagishima y Tanimoto, 2003.

mantiene una relación entre la velocidad del viento y el coeficiente de transferencia de calor por convección para la superficie del envolvente del edificio en zona urbana.

BALANCE DEL PRESUPUESTO DE ENERGÍA CALORÍFICA EN LA SUPERFICIE DEL EDIFICIO

La ecuación debe cumplir el principio de conservación de la energía en la termodinámica, es decir, el balance energético entre el microclima y el edificio, en la superficie del edificio:

Energías almacenadas en el edificio = energías que entran al edificio – energías que salen del edificio.

Almacenamiento de energía térmica del material	=	Energía recibida por radiación en la superficie de la pared	-	pérdidas de calor por convección ocurridas en la superficie del envolvente del edificio
$(M_b * (Cp)*dT_b/dt$		Q radiación = $A*q_0 \cos \theta$		$h_{se} * A * (T_b - T_{amb})$

Siendo,

A = Superficie del envolvente del edificio.

T_b = Temperatura del edificio.

T_{amb} = Temperatura ambiente.

M_b = Masa del material en Kg/m^3 .

Cp = Coeficiente de calor específico del material.

dT_b/dt = Es la tasa de cambio de la temperatura del material.

La solución analítica de esta ecuación del balance de energías aplicada a la masa del edificio se encuentra a través de ecuaciones diferenciales ordinarias²⁸, que tienen la forma general $y=f(x, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$, o mejor expuesta de la forma $y' + ay = b \cos \theta$ y se resuelve una ecuación lineal diferencial elemental en primer orden.

Se logra obtener una solución que nos entrega los valores de los coeficientes y de la función general, los cuales han sido manejados en MATLAB. Esta ecuación se considera básica para el desarrollo de futuros avances y aplicaciones del modelo.

28 Riley, K.F., Hobson, M P y Bence, S J., 2006.

29 Boyce, William E. y DiPrima, Richard C., 1986.

Bibliografía

- AMERICAN Society of Heating**, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE pocket guide for air conditioning, heating, ventilation, refrigeration. Atlanta, ASHRAE. 2005.
- AMERICAN Society of Heating**, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE handbook of fundamentals. New York, ASHRAE 1972.
- BOYCE, William E. y DIPRIMA, Richard C.** Elementary differential equations and boundary value problems. New York, Wiley. 1986.
- BRITTER, R. E. y HANNA, S.R.**, Flow and dispersion in urban areas. [En línea]. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 35:469-496, 2003. ISSN 0066-4189. Disponible en: <http://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161147>.
- CARRIER Air Conditioning**. Manual de Aire acondicionado. Barcelona, Marcombo. 1997.
- CEPHEUS**. Cost efficient passive houses as European standards. [En línea]. 2001. Disponible en: <http://www.cepheus.de/eng/index.html>.
- CITHERLET, S.; DI GUGLIELMO, F. y GAY, J. B.** Window and advanced glazing systems life cycle assessment. *Energy and Buildings*. 32 (3): 225-234, septiembre 2000. ISSN 0378-7788.
- COMISIÓN Cambio Climático de la Unión Europea**. Reducción de los gases fluorados de efecto invernadero. [En línea]. *Síntesis de la legislación de la UE*. 2011. Disponible en: http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/128138_es.htm.
- DANIELS, Klaus**. The technology of ecological building: basic principles and measures, examples and ideas. Basel, Switzerland, Birkhauser. 1994.
- EDWARDS, Susie, BARTLETT, Ed y DICKIE, Ian**. Whole life costing and life-cycle assessment for sustainable building design. Watford, CRC. 2005. Serie: Digest Building Research Establishment v. 452.
- GRUPE de Travail Répertoire des Données Climatologiques**. Climatologie Appliquée Construction et Logements Meilleurs et moins Chers. Vienne, Lowengasse, Comité Permanent Climatologie, Urbanisme et Architecture. 1977.
- GALLO, Cettina y NICOLETTI, Manfredi**. Architettura ecosistemica: equilibrio ambientale nella città. Roma, Gangemi. 1998.
- GAUZIN-Muller, Dominique**. L'architecture écologique. Paris, Editions du Moniteur. 2001.
- GOEDKOOP, Mark, EFFTING, Suzanne y COLLIGNON, Marcel**. Eco-indicator '99. Bilbao, Pré Consultants, IHOBE. 1999.
- GRIMMOND, C.S.B., CLEUGH, H.A. y OKE, T. R.** An Objective Urban Heat Storage model and its comparison with other schemes. [En línea]. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*. 25(3): 311-326, 1991. ISSN: 1352-2310. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/0957-1272\(91\)90003-W](http://dx.doi.org/10.1016/0957-1272(91)90003-W).
- HAGISHIMA, Aya y TANIMOTO, Jun**. Field measurements for estimating the convective heat

ARTÍCULO: Evaluación del rendimiento de calefacción o refrescamiento producido por los elementos constructivos y microclima de una vivienda pasiva. Una forma de integrar el rendimiento del confort térmico pasivo a su administración del ciclo de vida de un edificio / **Fabiola Wanda Marín Salgado**

revista invi N° 75 / Agosto 2012 / Volumen N° 27: 171-197 195

- transfer coefficient at building surfaces. [En línea]. *Building and Environment* 38(7): 873–881, 2003. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00033-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00033-7).
- HANSELMAN, Duane y LITTLEFIELD, B.** Mastering matlab 5. A comprehensive tutorial and reference. New Jersey, Prentice Hall. 1998.
- HOWELL, Ronald Hunter, SAUER, Harry J. y William J. COAD.** Principles of heating, ventilating and air conditioning : a textbook with design data based on the 2005 ASHRAE handbook-Fundamentals. Atlanta, ASHRAE. 2005.
- INCROPERA, Frank P. y DEWITT, David P.** Fundamentos de transferencia de calor. México, Person. 4a ed. 1999.
- ISO 15686-6:2004.** Buildings and constructed assets -- Service life planning -- Part 6: Procedures for considering environmental impacts. 2004.
- ISO 7730:2005.** Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. 2005.
- IZARD, Jean-Louis y GUYOT, Alain.** Arquitectura bioclimática. Barcelona, Gustavo Gili. 1990. Serie Tecnología y Arquitectura.
- JAKOB, Max.** Heat transfer. New York, Wiley, 1949.
- LITTLER, John y THOMAS, Randall.** Design with energy: the conservation and use of energy in building. New York, Cambridge University Press. 1984.
- MARÍN SALGADO, Fabiola.** Documento N°3: Programa renovación urbana en densificación. En: MINISTERIO de Vivienda y Urbanismo, Chile. Secretaría Regional Ministerial Metropolitana. Evaluación de la inversión sectorial. Logros por líneas de acción, período 1994-1999. Santiago, MINVU. 1999.
- MAZRIA, Edward.** El Libro de la energía solar pasiva. Editorial México, G. Gili. 1983. Serie Tecnología y Arquitectura.
- MINISTERIO de Vivienda y Urbanismo.** Listado oficial de soluciones constructivas para acondicionamiento térmico en Chile. Santiago, MINVU. 2006.
- MINISTERIO de Vivienda y Urbanismo.** Manual de aplicación de reglamentación térmica, Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Santiago, MINVU. 2006.
- MIRANDA, Ángel Luis.** Nueva enciclopedia de la climatización – aire acondicionado. Barcelona, CEAC. 2000.
- OKE, T.R.** Street design and urban canopy layer climate. [En línea]. *Energy and Buildings*. 11(1-3): 103-113, 1988. ISSN: 0378-7788. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6).
- OSMOND, Paul.** Rooftop “greening” as an option for microclimatic amelioration in a high-density building complex. [En línea]. Conference on Urban Environment (5a, 2004, Vancouver). Fifth Conference on Urban Environment. Boston, MA, American Meteorological Society. 2004. Disponible

en: http://ams.confex.com/ams/AFAPURBBIO/techprogram/paper_79532.htm.

PAHL, G. y BEITZ, Wolfgang. Engineering design. A systematic approach. London, Springer. 1996.

PEUPORTIER, B.L.P. Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context. [En línea]. *Energy and Building*. 33(5): 443-450, 2001. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00101-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00101-8).

PIRINGER, Martin y JOFFRE, Sylvain (eds.) The urban surface energy budget and mixing height in European cities: data, models and challenges for urban meteorology and air quality. Final report of Working Group 2 of COST-715 Action. Bulgaria, Demetra Publishers. 2005.

PREK, Matjaz. Environmental impact and life cycle assessment of heating and air conditioning systems, a simplified case study. [En línea]. *Journal Energy and Buildings* 36(10): 1021-1027, 2004. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.008>.

RATTI, C., SABATINO, S. di, BRITTER, R., BROWN, M, CATON, F. y BURIAN, S. Analysis of 3-D urban databases with respect to pollution dispersion for a number of European and American cities. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*. (2): 459-469, 2002.

RECKTENWALD, Gerald. Numerical methods with MATLAB: implementations and applications. New Jersey, Prentice Hall. 2000.

RILEY, K.F.; HOBSON, M P y BENCE, S J. Mathematical methods for physics and engineering. Cambridge, Cambridge University Press. 2006.

WESTKÄMPER, E.; ALTING, L. y ARND, G. Life cycle management and assessment: Approaches and visions towards sustainable manufacturing. [En línea]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 215(5): 599-626, 2001. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1243/0954405011518557>.