

Simulación de Procesos Termodinámicos en una Vivienda

(Simulation of Thermodynamics Processes in a housing using OpenFOAM CFD Tools)

O. J. García Contreras^{1,2}, F. Cristancho^{1,2} y José E. García³

ojgarcia@unal.edu.co; lfcristanchom@unal.edu.co; jose.garcia@cif.org.co

*Departamento de Física¹, Grupo de Física Nuclear², Universidad Nacional de Colombia, Bogotá - Colombia.
Grupo de Física Aplicada y Desarrollo Tecnológico³, Centro Internacional de Física (CIF), Bogotá - Colombia.*

Recientemente, los esfuerzos a nivel mundial para reducir los impactos ambientales provocados por las emisiones causantes del cambio climático y el consecuente problema ambiental han ido en aumento, teniendo como propósito utilizar de manera más eficiente nuestra demanda energética. Son muchas las alternativas energéticas propuestas, entre las cuales, la vivienda bioclimática resulta como una opción de edificación en beneficio del medio ambiente. Este trabajo hace parte de un proyecto destinado a la optimización del consumo de energía en las viviendas de la ciudad de Girardot (Colombia), cuyo objetivo es simular las condiciones climáticas en el interior de las viviendas de dicha ciudad. La simulación fue desarrollada mediante el uso de herramientas CFD (Computational Fluids Dynamics) distribuidas libremente en el programa OpenFOAM, al considerar los efectos sobre las condiciones climáticas debidas a la transferencia de calor entre el medio ambiente y el interior de una vivienda. Se encuentra que los flujos de aire generados por convección son rápidos y ascendentes cerca a las paredes y lentos en el interior de la vivienda. La temperatura en el interior de una vivienda, para un día típico en la ciudad de Girardot, variará entre 24°C, para las horas de la mañana y 27,5°C hacia el atardecer. El aumento de la temperatura en el interior de las viviendas de Girardot para las horas de la tarde, ocasiona un aumento en el consumo de energía debido al aumento en el uso de sistemas de refrigeración.

Palabras Claves: Vivienda bioclimática, Transferencia de Calor, Herramientas CFD, OpenFOAM, Girardot.

Introducción

El alto crecimiento en los índices de contaminación, consumo de recursos naturales y demanda energética en sectores urbanos y rurales plantea un serio problema en el desarrollo sostenible de ciudades y países, aumentando la grave situación ecológica del planeta.

Actualmente, las edificaciones son una de las mayores fuentes de impacto sobre el medio ambiente consumiendo el 60% de todos los recursos extraídos del planeta, el 50% de la energía utilizada por el hombre y produciendo la mitad de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera [1].

Lo anterior refleja la necesidad de crear criterios de con-

strucción para edificaciones ecológicamente apropiadas que permitan reducir sus consecuencias sobre el entorno. La vivienda bioclimática resulta como una alternativa de edificación sostenible la cual utiliza materiales benéficos con el medio ambiente y posee una arquitectura capaz de aprovechar los recursos naturales para satisfacer las necesidades climáticas de quienes la habitan.

Este trabajo hace parte del proyecto "*Uso Racional y Eficiente de la Energía en las Mipymes de Girardot*", desarrollado en el *Centro Internacional de Física (CIF)*. Este proyecto consiste en un esfuerzo para la optimización del consumo energético en las pequeñas y medianas empresas en Girardot, teniendo este trabajo como objetivo simular las condiciones climáticas en el interior de las viviendas de la ciudad de Girardot.

Planteamiento del problema

El problema a tratar consiste en la simulación de las variaciones de temperatura en el interior de una vivienda por efectos ambientales durante el transcurso de un día típico en la ciudad de Girardot como resultado de la transferencia de calor entre el medio ambiente y el interior de la vivienda.

De esta manera, se desea conocer la temperatura en cada punto en el interior de la vivienda para cada instante de tiempo considerando, las condiciones ambiente típicas de Girardot.

Mecanismos de Transferencia de Calor

La transferencia de calor es el proceso por el cual se intercambia energía entre diferentes cuerpos o entre diferentes partes de un mismo cuerpo debido a una diferencia de temperatura.

El estudio de la transferencia de calor explica los mecanismos de transferencia de energía y determina la rapidez con la que se realiza este intercambio, permitiendo tratar sistemas fuera del equilibrio termodinámico a fin de describir el estado de un sistema en función del tiempo.

Los mecanismos de transferencia de calor son: conducción, convección y radiación. En general, la transferencia de calor es una combinación de estos tres mecanismos, aunque en ciertas situaciones prácticas, puede ocurrir que uno de los procesos predomine en la transferencia de calor sobre los otros dos [2].

La conducción consiste en la transferencia de calor a través de un material estacionario tal como: un sólido, un fluido en régimen laminar o entre medios diferentes en contacto físico [3]. En la conducción, la energía es transferida cuando las moléculas que reciben directamente energía de una fuente caliente aumentan su energía vibracional y chocan con las que las rodean, estas a su vez chocan con sus vecinas hasta que todas las moléculas del material se agitan, resultando en un aumento de temperatura. Además, los electrones libres de un sólido contribuyen de forma apreciable en la transferencia de calor debido a su gran movilidad.

La ecuación de conducción de calor en un material estacionario, homogéneo e isotrópico, sin generación interna de calor por reacciones en el material está dada por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (1)$$

Donde α es la difusividad térmica, cuanto sea su valor, mayor será la rapidez con la que se realiza la transferencia de calor. La conductividad térmica λ es la cantidad física que define la capacidad de transferir calor a través de un material dado. La difusividad y la conductividad térmicas se relacionan mediante:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (2)$$

Siendo ρ la densidad y c el calor específico.

La transferencia de calor por convección es un proceso que involucra la conducción y el transporte de energía por medio del movimiento de volúmenes de fluido. La transferencia de calor entre la superficie de un sólido y un fluido se efectúa mediante conducción a través de una capa intermedia y estacionaria de fluido, mientras que, el transporte de energía en el fluido es originado por las variaciones en densidad debidas a la variación de la temperatura del fluido.

Cuando el movimiento del fluido se produce por un agente externo como un ventilador o una bomba el proceso se denomina convección *forzada*. En la convección *natural* el movimiento del fluido es debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido conduciendo, en presencia de un campo gravitacional, a que el fluido más caliente y menos denso ascienda mientras que el fluido más frío y más denso descienda.

Derivada Material

Sea $\phi = \phi(x, y, z, t)$ una variable termodinámica que depende de la posición y del tiempo tal como la densidad, la temperatura o la velocidad de un fluido. El cambio total de la variable ϕ en un intervalo de tiempo Dt está dado por:

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\phi \quad (3)$$

La ecuación (3) es conocida como la derivada material de la variable ϕ . La derivada material representa el cambio total de una cantidad ϕ , medido en un elemento particular de fluido, por un observador que viaja con la misma velocidad \mathbf{u} del fluido.

Teorema de Transporte de Reynolds

Sea ϕ alguna propiedad de un fluido definida sobre cada elemento de fluido la cual varía con el tiempo tal como su masa, momento y energía. La variación temporal de la variable en el volumen V de un elemento de fluido está dada por el teorema de transporte de Reynolds:

$$\frac{D}{Dt} \int_V \phi dV = \int_V \left[\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{u}) \right] dV \quad (4)$$

El teorema del transporte de Reynolds permite calcular la variación de una propiedad del fluido como la variación temporal de dicha propiedad en el interior del volumen de un elemento de fluido más el flujo de dicha propiedad a través de la superficie del elemento de fluido.

A partir de los conceptos físicos para la derivada material y el teorema de transporte de Reynolds [4], junto al teorema de la divergencia, se derivan de las ecuaciones que describen la transferencia de calor en un fluido al utilizar las leyes de conservación de masa, momentum y energía, respectivamente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{u}) = \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{u}) - \nabla \mathbf{q} + \rho Q \quad (7)$$

donde:

$$\rho Q = -\frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) + \nabla \cdot ((\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) \mathbf{u}) \right] \quad (8)$$

siendo $\boldsymbol{\sigma}$ el tensor de stress, e la energía interna por unidad de masa del fluido, \mathbf{q} el vector de flujo de calor y Q la función de disipación. La deducción de las ecuaciones de transferencia de calor para fluidos descrita aquí considera que la fuerza por unidad de masa es debida únicamente a la fuerza gravitacional por unidad de masa \mathbf{g} .

Relaciones Constitutivas para Fluidos Newtonianos

Las ecuaciones constitutivas para un fluido permiten completar el conjunto de ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía que describen su comportamiento (Ecs. (5-7)), al definir el vector de flujo de calor \mathbf{q} , el tensor de stress $\boldsymbol{\sigma}$ y las ecuaciones de estado que relacionan la presión del fluido P y su energía interna e con su densidad ρ y temperatura T .

La viscosidad es la resistencia μ que ejerce el fluido a ser deformado cuando sobre este se aplica una fuerza. Un fluido que presenta una viscosidad muy baja ($\mu \approx 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$) y en el cual las tensiones normales y de cizalladura son directamente proporcionales al gradiente de velocidad se conoce como fluido newtoniano.

Son varios los ejemplos de fluidos que se comportan como fluidos newtonianos bajo condiciones normales de presión (1 atm) y temperatura (0 °C): **aire**, agua, sangre pura y la glicerina, entre otros. El aire tiene un interés especial en la transferencia de calor en una vivienda debido a que es el material mediador para el flujo de calor en su interior. A condiciones ambiente, el aire se comporta como un fluido newtoniano.

Para un fluido newtoniano la relaciones constitutivas son las siguientes:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} &= - \left[P + \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{u} \right] \hat{\mathbf{I}} + \mu \left[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right] \\ \mathbf{q} &= -\lambda \nabla T \\ P &= \rho R_g T + \rho g h + P_o \\ e &= c_V T \end{aligned} \quad (9)$$

Siendo la viscosidad $\mu = 1,8 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$, la conductividad térmica $\lambda = 0,02 \text{ W/mK}$, el calor específico a volumen constante $c_V = 717,63 \text{ J/kgK}$, la densidad $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$, $P_o = 1 \text{ atm}$ la presión atmosférica a condiciones normales y $R_g = 8,314 \text{ J/molK}$ para el caso del aire, h define la altura medida desde la base de la vivienda.

La transferencia de calor por radiación térmica se realiza por la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas como resultado de una diferencia de temperatura entre un cuerpo y sus alrededores. Por esto, a diferencia de la conducción y la convección, la radiación no requiere de contacto entre cuerpos ni de material mediador para transferir energía. De esta manera, la transferencia de calor por radiación térmica ocurre más eficientemente en vacío.

Aunque la radiación térmica adquiere mayor importancia a medida que aumenta la temperatura de un cuerpo, en situaciones en las que los valores de temperatura son cercanos a los del medio ambiente, la transferencia por radiación puede despreciarse [5, 6].

OpenFOAM

OpenFOAM *Open Field Operation and Manipulation*, es una herramienta **CFD** (Computational Fluids Dynamics) distribuida libremente [7] destinada a simular cualquiera de los flujos complejos que se involucran en reacciones químicas, transferencia de calor, turbulencia, electromagnetismo, biofísica, entre otros, basándose en programación dirigida a objetos.

La forma en la que simula una determinada situación es mediante la discretización. La discretización es la aproximación de un problema en cantidades discretas, similarmente, a los métodos de elementos finitos y diferencias finitas. Así, las ecuaciones que describen al problema, el espacio de solución y el intervalo de tiempo, son discretizados mediante librerías distribuidas por el software en las que se definen esquemas para la discretización de ecuaciones y dominios de espacio y tiempo [8, 9].

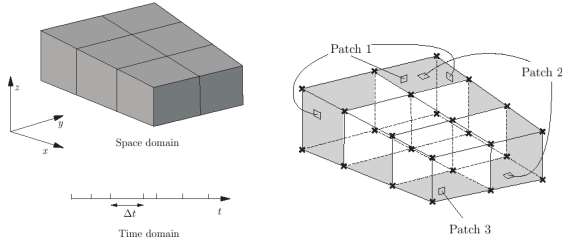


Figura 1: Esquema de discretización de dominios de espacio y tiempo.

Descripción de la simulación

Geometría de la Vivienda

La configuración característica de una vivienda, en la mayoría de construcciones, puede aproximarse a la de un rectángulo hueco de paredes de grosor variable, el cual es llenado con aire. Las propiedades físicas de las paredes del rectángulo representan las de las paredes de una vivienda común. Se han considerado paredes con conductividad térmica $\lambda = 0,52 \text{ W/mK}$, difusividad térmica $\alpha = 3,4 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ y grosor $\delta = 15 \text{ cm}$ (ladrillo tipo 4). Las dimensiones de la vivienda simulada son: $2,8 \times 2,35 \times 12 \text{ m}^3$. A continuación se presenta el esquema de vivienda descrito:

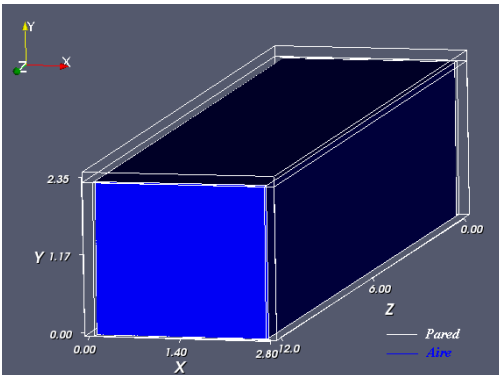


Figura 2: Esquema del problema. Dimensiones en metros.

La figura 5 ilustra la discretización realizada sobre las paredes y el interior de la vivienda:

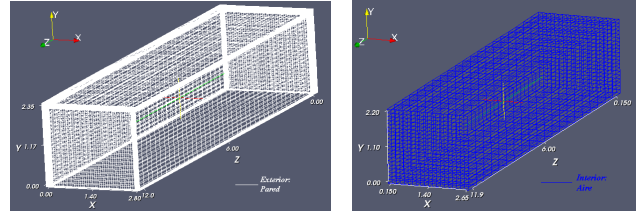


Figura 3: Discretización de los espacios interior y exterior para la vivienda simulada. Dimensiones en metros.

La discretización fue realizada teniendo en cuenta que las celdas de los espacios definidos para el exterior e interior de la vivienda definidas sobre una interfase pared-aire fueran de igual tamaño lo cual permite interpolar valor de temperatura y flujo de calor sobre las interfases [10, 11].

Condiciones de Frontera

Por defecto, OpenFOAM utiliza una sola región como dominio de solución en la que se definen las propiedades físicas del sistema a tratar. A fin de simular múltiples regiones que se encuentran en contacto físico, es necesario crear un módulo para cada región e interpolar, entre las interfases, los valores de las variables físicas definidas en el problema [12, 13].

La condición de aislamiento térmico se refiere a que el flujo de calor a través de la superficie de la i -ésima región S_i es nulo en cada uno de sus puntos:

$$\mathbf{q}_i \Big|_{S_i} = \mathbf{0} \rightarrow \frac{\partial T_i}{\partial \hat{\mathbf{n}}_i} \Big|_{S_i} = \mathbf{0} \quad (10)$$

La no generación de flujo de calor considera que en la interfase de dos regiones no existen fuentes de calor, con lo que el flujo neto entre la región i y la j a través de la interfase I es nulo, $\mathbf{q}_{neto} = \mathbf{0}$:

$$\mathbf{q}_i + \mathbf{q}_j = 0 \rightarrow \frac{\partial T_i}{\partial \hat{\mathbf{n}}_i} \Big|_I = -\frac{\lambda_j}{\lambda_i} \frac{\partial T_j}{\partial \hat{\mathbf{n}}_j} \Big|_I \quad (11)$$

donde λ_i es la conductividad térmica de la i -ésima región.

La distribución de temperatura debe ser continua a través del dominio de solución, con lo que la temperatura en la interfase I debe cumplir:

$$T(\mathbf{r}_i, t) \Big|_I = T(\mathbf{r}_j, t) \Big|_I \quad (12)$$

Con el propósito de simular los efectos climáticos del medio ambiente sobre el interior de la vivienda, debidos al contacto térmico entre el medio ambiente y las fronteras exteriores a la vivienda, la condición sobre la temperatura de las fronteras estará dada por el valor de temperatura ambiente para un día típico en Girardot.

La figura 6 muestra valores característicos de temperatura ambiente para las ciudades de Girardot y Bogotá [14]:

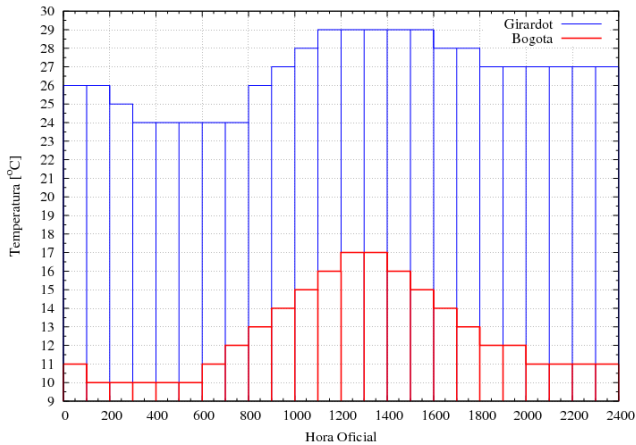


Figura 4: Temperatura ambiente característica para las ciudades de Girardot y Bogotá al transcurrir el día.

La temperatura promedio de Girardot es $\overline{T_G} = 28 \text{ }^\circ\text{C}$, bastante mayor respecto a la de Bogotá $\overline{T_B} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, teniendo un intervalo de máxima temperatura, entre 11:00 a.m y 4:00 p.m, mientras que en Bogotá es menor, entre 12:00 p.m y 2:00 p.m.

Usualmente, los cimientos sobre los cuales se construye una vivienda sirven como aislantes térmicos reduciendo la transferencia de calor entre la vivienda y el subsuelo sobre la que se encuentra construida. Así, la condición sobre la base de la estructura que simula la vivienda (veáse figura 4) está dada por (10), con lo que se tendría un aislamiento térmico perfecto en los cimientos de la vivienda.

En el caso de las interfases entre la pared de la vivienda y el interior de la misma, las condiciones de frontera impuestas vienen dadas por la no generación de calor interno (11) y la continuidad en la distribución de temperatura (12), para cada interfase.

Resultados

Las condiciones climáticas dadas para el acondicionamiento de viviendas están dadas por la generación de flujos convectivos y la temperatura en su interior. A partir de la solución numérica del sistema de ecuaciones de transferencia de calor en la vivienda ((1), Ecs. (5-9)), bajo las condiciones de frontera (Ecs. (10-12)) y las condiciones ambientales de Girardot (véase figura 4), se obtienen el campo de velocidades $\mathbf{U}(\mathbf{r},t)$ y la distribución de temperatura $T(\mathbf{r},t)$ en la vivienda. La simulación consideró el intervalo de día entre 6 : 00 a.m hasta 6 : 00 p.m, teniendo como condiciones iniciales aire en reposo, temperatura en el interior de la vivienda $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y medio ambiente a $24 \text{ }^\circ\text{C}$, condiciones iniciales dadas por la distribución de temperatura ambiental (figura 4).

A continuación se ilustra la rapidez de los flujos convectivos en el interior de la vivienda en distintos instantes de tiempo en función de la distancia entre paredes laterales:

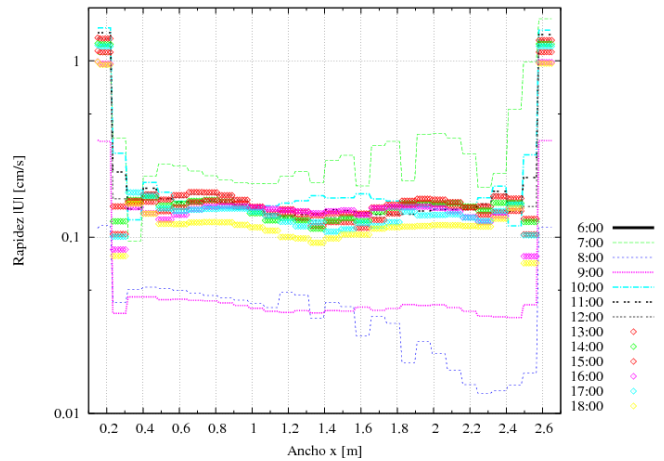


Figura 5: Rapidez de los flujos convectivos en el interior de la vivienda respecto a la distancia entre paredes laterales.

A partir de la figura 5 se observa la generación de flujos de mayor rapidez cerca a las paredes de la vivienda los cuales son debidos a la ascensión de aire a mayor temperatura a la parte superior de la vivienda, desplazando aire a menor temperatura y menor rapidez hacia el interior, resultando en una distribución de velocidades mayores hacia el techo de la vivienda y menores en la parte inferior de la vivienda como se ilustra en la figura 5:

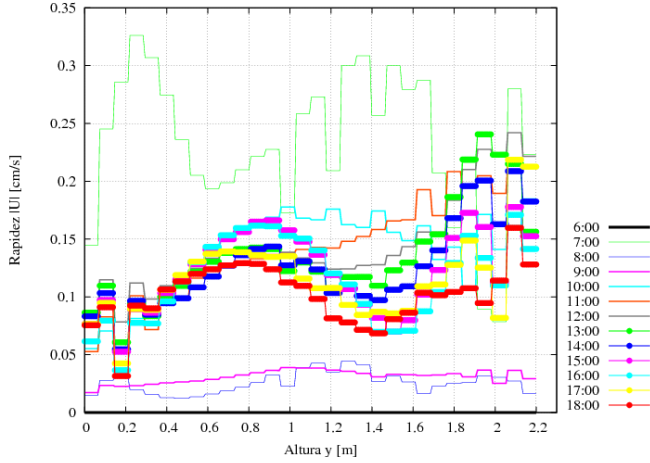


Figura 5: Rapidez de los flujos convectivos en el interior de la vivienda respecto a la distancia vertical.

El efecto de distribuciones mayores en rapidez conforme se incrementa la altura en el interior de la vivienda es causado por la no uniformidad en la distribución de temperatura, haciendo que el aire de menor densidad y mayor temperatura ascienda, mientras que el aire de menor temperatura y mayor densidad descienda, teniendo valores mayores de temperatura hacia partes superiores de la vivienda.

La figura 6 muestra las distribuciones de rapidez a lo largo del eje de profundidad para diferentes instantes de tiempo:

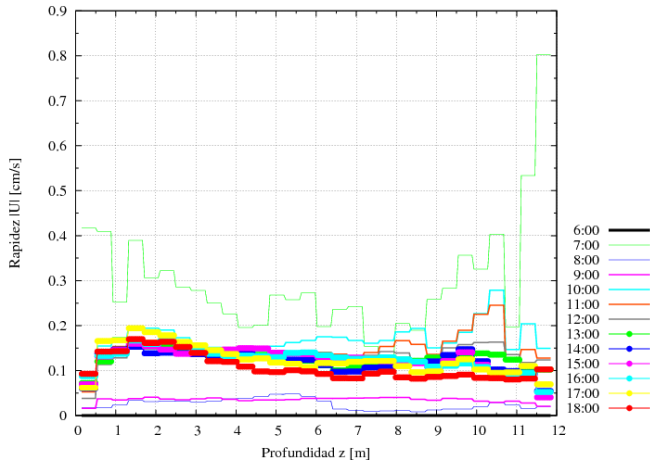


Figura 6: Rapidez de los flujos convectivos respecto a la profundidad.

Se observa una distribución de rapidez constante a lo largo de la profundidad en el interior de la vivienda, cuyo valor es $|U| \approx 0,15 \text{ cm/s}$. Además, se observa la formación de una

capa estacionaria de aire en los extremos de la vivienda. Esta capa interfase de aire es característica de la transferencia de calor por convección la cual conduce calor entre las paredes y el interior mediante conducción. Los resultados muestran que el grosor de dicha capa varía entre 3 – 17 cm, disminuyendo conforme la velocidad de los flujos de aire en el interior de la vivienda aumenta. La diferencia porcentual con valores reportados para aislamiento de viviendas [15] es de 7,7 %.

Los resultados obtenidos para la distribución de temperatura en la vivienda respecto a la distancia entre las paredes laterales y la profundidad se presentan en las figuras 7 y 8, respectivamente:

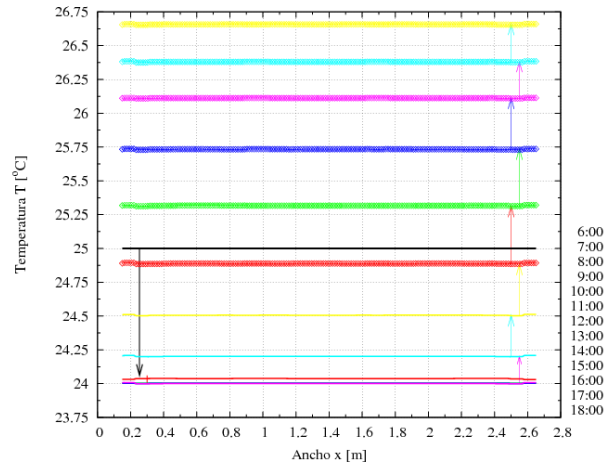


Figura 7: Temperatura en el interior de la vivienda respecto a la distancia entre paredes laterales.

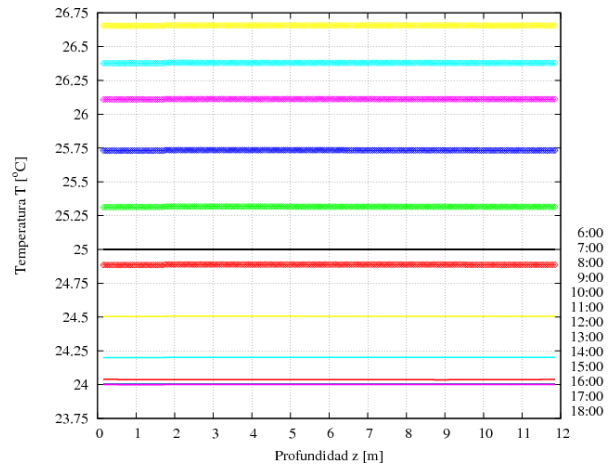


Figura 8: Temperatura en el interior de la vivienda respecto a la profundidad.

Las distribuciones de temperatura para el interior de la vivienda respecto a la distancia entre paredes, para una distancia sobre el suelo fija, es constante, presentándose un efecto de refrigeración en las primeras horas del día, entre 6 : 00 a.m. y 10 : 00 a.m., debido al contacto térmico con el medio ambiente, cuya temperatura para este intervalo del día es menor a la del interior de la vivienda. Así, la temperatura de la vivienda disminuye aproximadamente $\Delta T = 1^\circ\text{C}$. Posteriormente, la temperatura en el interior aumenta conforme transcurre el día (véase figura 7), teniendo hacia las 6 : 00 p.m., una temperatura de $T \approx 26,6^\circ\text{C}$.

La distribución de temperatura con respecto a la altura es presentada en la figura 9:

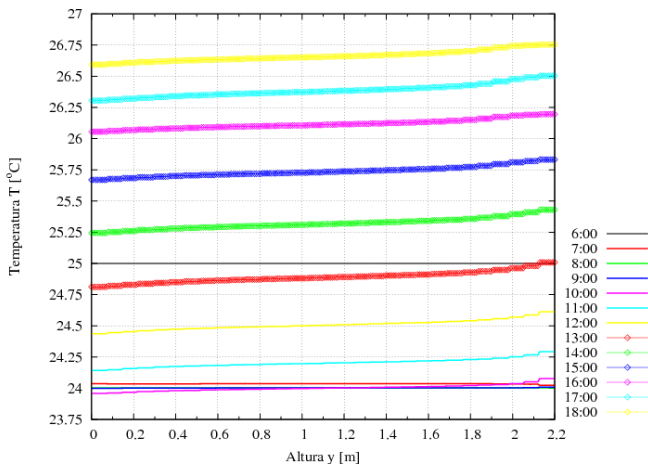


Figura 9: Temperatura en el interior de la vivienda respecto a la altura.

La figura 9 ilustra las distribuciones de temperatura en función de la altura para diferentes instantes del día. Se observa en la parte superior de la vivienda los mayores valores de temperatura. La variación de temperatura entre suelo y techo de la vivienda es $\Delta T \approx 0,3^\circ\text{C}$.

La temperatura en el interior de una vivienda, para un día típico en la ciudad de Girardot, varía entre 24°C para las horas de la mañana, intervalo del día en el cual se efectúa el proceso de refrigeración natural por contacto térmico con el medio ambiente, y $27,5^\circ\text{C}$ hacia el atardecer. A partir de las 4 : 00 p.m. la rata de aumento en la temperatura disminuye dándose nuevamente el proceso de refrigeración con el medio ambiente. La curva de temperatura en el interior de una vivienda en la ciudad de Girardot para un día típico se presenta en la figura 10:

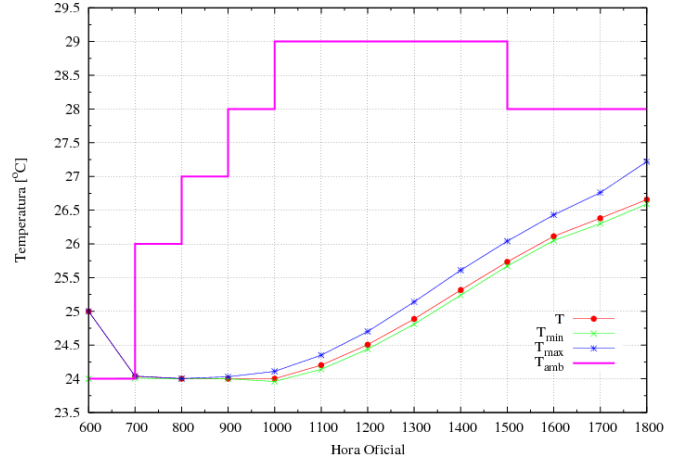


Figura 10: Valores de la temperatura máxima T_{max} , mínima T_{min} y en el centro de una vivienda T para la ciudad de Girardot.

El aumento de temperatura en la vivienda entre las 10 : 00 a.m. y las 6 : 00 p.m., descrito por la simulación, explica el incremento en el consumo energético debido, principalmente, al aumento del uso de sistemas de acondicionamiento climático:

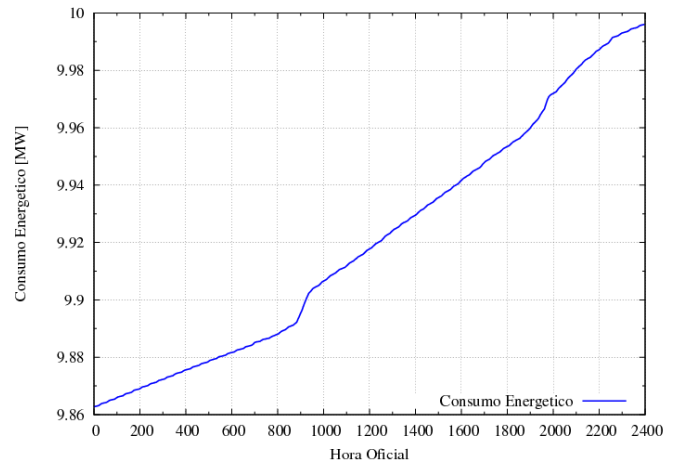


Figura 11: Curva de consumo energético característica para viviendas en Girardot. FUENTE: Grupo de Física Aplicada, Centro Internacional de Física - CIF.

Obsérvese en la figura 11 el aumento en el consumo energético en el intervalo de 10 : 00 a.m. hasta 6 : 00 p.m., intervalo en el que la rata de aumento de temperatura en viviendas de Girardot es mayor (figura 10), provocando el aumento del uso de sistemas de refrigeración, aumentando así, la demanda de energética.

Conclusiones

1. Los patrones de velocidad en una vivienda muestran flujos *lentos* de aire ($\sim 0,2 \text{ cm/s}$) en su interior, mientras que cerca a las paredes los flujos son *rápidos* ($\sim 1 \text{ cm/s}$) y ascendentes. Estos flujos rápidos permiten la ascensión de aire caliente ($\sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$), resultando en una distribución de mayor temperatura en la parte superior de la vivienda que en su parte inferior.
2. El grosor obtenido para la capa estacionaria de aire mediadora para la transferencia de calor entre paredes e interior de la vivienda varía entre $3 - 17 \text{ cm}$. La diferencia porcentual respecto a valores teóricos utilizados en aislamiento de viviendas es $7,7\%$.
3. La temperatura en el interior de una vivienda, para un día típico en la ciudad de Girardot, variará entre 24°C , para las horas de la mañana y $27,5^\circ\text{C}$ hacia el atardecer. El aumento de temperatura en la vivienda entre las $10 : 00 \text{ a.m.}$ y las $6 : 00 \text{ p.m.}$, descrito por la simulación, explica el incremento en el consumo energético como debido, principalmente, al aumento del uso de sistemas de acondicionamiento climático.
4. La construcción de viviendas grandes, altas y de paredes gruesas permitiría reducir el consumo energético al ofrecer una mayor resistividad térmica disminuyendo las pérdidas de calor en ambientes fríos y la temperatura en ambientes cálidos. Similarmente, la implementación en la construcción de viviendas de nuevos materiales que ofrezcan un mayor aislamiento térmico reducirían los gastos energéticos de una vivienda.
5. La simulación desarrollada permitirá determinar los efectos sobre los valores de temperatura en el interior de las viviendas al variar los materiales de construcción a fin de saber cuáles materiales permiten un mayor acondicionamiento en viviendas, lo cual se reflejará en la disminución de costos de climatización y en las condiciones de vida de las personas que las habitan.

Referencias

- [1] <http://www.worldwatch.org/node/5535>
- [2] J. P. Holman, *Heat Transfer*, Fifth Edition, McGraw Hill, 1986.
- [3] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, *Fundamentals of Heat Transfer*, Purdue University, John Wiley & Sons, 1981.
- [4] I. G. Currie, *Fundamental Mechanics of Fluids*, University of Toronto, Third Edition, Marcel Dekker, Inc., 2003.
- [5] H. S. Carslaw, *Conduction of heat in solids*, Second Edition, Clarendon Press, London, 1959.
- [6] A. Ríos Niños, *Transferencia de Calor*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1987.
- [7] <http://www.open CFD.co.uk/openfoam/>
- [8] H. Jasak, *Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows*, Doctoral Thesis, Department of Mechanical Engineering Imperial College of Science, Technology and Medicine, 1996.
- [9] H. G. Weller, G. Tabora, H. Jasak, C. Fureby, *A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques*, Department of Mechanical Engineering, Imperial College, London SW7 2BX, United Kingdom, American Institute of Physics, 1998.
- [10] *The Open Source CFD Toolbox OpenFOAM: Programmer's Guide*, Version 1,4, 2007.
- [11] *The Open Source CFD Toolbox OpenFOAM: User Guide*, Version 1,4, 2007.
- [12] <http://openfoam.cfd-online.com/cgi-bin/forum/discus.cgi>
- [13] <http://www.cfd-online.com/Wiki/OpenFOAM>
- [14] <http://espanol.weather.com/>
- [15] <http://www.rvalue.net/>