

# Capítulo 1

## Introducción y objetivos

### 1.1 Introducción

En países con un número de horas elevado de radiación solar al año, la utilización de la energía solar mediante sistemas “especiales” diseñados al efecto se muestra como una solución integral a los problemas planteados de ahorro energético y de consecución para el confort de las personas. Estos sistemas reciben la denominación general de pasivos por no incorporar medios mecánicos para su funcionamiento, teniendo lugar la transmisión de calor mediante conducción, convección y radiación.

Los flujos inducidos por convección natural en sistemas pasivos de climatización han sido estudiados por distintos autores debido a la existencia de una creciente tendencia al ahorro energético en el diseño y construcción de edificios basados en el aprovechamiento de la energía solar incidente para climatización y ventilación. El flujo de aire está inducido en este tipo de problemas por los fenómenos de flotación originados por las diferencias de densidad de las masas de aire al ser calentadas, siendo un modo de transmisión de calor adecuado en los casos en los que la facilidad constructiva, la economía y el bajo nivel de ruido son consideraciones importantes de diseño. Una aplicación en auge de este tipo de sistemas, basados en la convección natural como modo de transmisión de calor, son los conocidos como paredes “Trombe” y chimeneas solares, los cuales se tratarán ampliamente en el desarrollo de este proyecto. El muro 'Trombe' debe su nombre a Felix Trombe quien, junto con Jacques Michel, inició las investigaciones sobre este sistema en Francia, a principios de 1957. En 1967 se construye un prototipo de casa con paredes 'Trombe' en Odeillo (Francia). Desde entonces, se han publicado distintas investigaciones sobre la materia en estudio. En España, destacan las investigaciones llevadas a cabo en CIEMAT. Un buen tratado sobre estos dispositivos de climatización y ventilación basados en la energía solar pasiva se puede encontrar en el trabajo desarrollado por F.J. Neila González en *Arquitectura Bioclimática* (2004).

Desde el punto de vista práctico suele interesar en la mayoría de los casos que el flujo sea turbulento para obtener una mayor eficiencia en este tipo de sistemas por lo que resulta de gran interés la determinación de las condiciones en las que se produce la transición a la turbulencia.

Entre los trabajos encontrados en la bibliografía que presentan soluciones numéricas sobre flujos inducidos por convección natural se aprecia una buena aproximación a los resultados experimentales para un amplio rango de casos en flujo laminar, utilizando la aproximación de Boussinesq (que básicamente supone constantes las propiedades del fluido) para tener en cuenta la flotación en el término gravitatorio de la ecuación de conservación de cantidad de movimiento. Cuando el número de Grashof (relación entre las fuerzas de flotación que inducen el movimiento

y las fuerzas viscosas), o bien el número de Rayleigh (producto de los números de Grashof y Prandtl) llega a un cierto umbral (Bejan, 1993), puede tener lugar la transición de laminar a turbulento, la gran escala de algunas configuraciones de este tipo de sistemas da lugar a que el flujo real inducido sea turbulento. Diversos autores han presentado estudios sobre convección natural turbulenta exponiendo las dificultades de determinados modelos de turbulencia, tales como el  $k-\varepsilon$  estándar, para predecir correctamente los flujos de calor en estos problemas de convección natural (Yuan, Moser y Suter, 1993; Versteegh y Nieuwstadt, 1999, para placas verticales; Henkes y Hoogendoorn, 1995, para un espacio cerrado, entre otros). El modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  estándar supuso la implantación de la CFD (Computational Fluid Dynamics) en aplicaciones de ingeniería. Su robustez, economía y precisión razonable para un amplio rango de flujos turbulentos explica su popularidad en simulaciones industriales de flujos y transmisión de calor. Sin embargo este modelo de turbulencia y sus variantes posteriormente desarrolladas presentan serias dificultades de simulación en la zona de transición de laminar a turbulento. En este trabajo para poder simular esta transición se utilizará fundamentalmente el modelo  $k-\omega$  propuesto por Wilcox (2003) que incluye una variante del modelo para bajos números de Reynolds, apropiado en principio para simular flujos en la transición de régimen laminar a turbulento.

Este modelo de turbulencia está basado en el modelo original  $k-\omega$  propuesto por Kolmogorov (1942) que fue el primer modelo con dos ecuaciones de transporte, presentando ecuaciones para el transporte de energía cinética turbulenta,  $k$ , y para el transporte de disipación por unidad de energía cinética turbulenta,  $\omega$ .

Estos flujos resultan ser procesos complejos en los que los modos de transmisión de calor por radiación solar, conducción de calor a través de las paredes sólidas y convección natural de las masas de aire calentadas están acoplados. Recientemente se han presentado una gran diversidad de trabajos estudiando distintos aspectos de estos flujos. No obstante, la predicción analítica, numérica o experimental de los coeficientes de transmisión de calor en estos sistemas presenta importantes discrepancias. En este proyecto se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes en forma elíptica utilizando un método de discretización de volúmenes finitos (a través del código PHOENICS), se impondrán condiciones de calentamiento isotermas y con flujo de calor constante, simétricas y asimétricas, con el objetivo de simular el calentamiento que pueden alcanzar las paredes y el cristal sometidos a la radiación solar incidente.

Algunas de las diferencias entre los resultados experimentales y las simulaciones numéricas desarrolladas a partir de los modelos de turbulencia antes citados se pueden explicar por las excesivas simplificaciones llevadas a cabo para modelizar el problema. Por tanto cabe esperar diferencias entre los resultados experimentales y los resultados numéricos obtenidos para el número de Nusselt (relación entre los coeficientes de transmisión de calor de convección y conducción) y para el gasto de aire empleando la aproximación de Boussinesq. Otras simplificaciones también pueden alejar los resultados experimentales de los numéricos como el hecho de no tener en cuenta las dimensiones de la habitación a calefactar o ventilar, suponer la uniformidad de temperatura o de flujo de calor en paredes, o la imposición de condiciones uniformes para la velocidad en las secciones de entrada, suposiciones encontradas repetidamente en la bibliografía relacionada

Aunque hoy en día se sigue profundizando en el estudio de este tipo de sistemas (Rodrigues et al., 2000) se aprecia en la bibliografía sobre el tema la falta de una sistematización de los estudios y resultados alcanzados que permita mejorar las condiciones de ahorro energético y de confort para las personas, así como facilitar la consulta de estos estudios por parte de diseñadores no expertos en el tema para la realización de diseños correctos. Este proyecto intentará aportar su grano de arena a tal fin.

Otras investigaciones que presentan soluciones de interés para flujos inducidos por convección natural y que se han utilizado como referencia a la hora de comparar los resultados

obtenidos en este proyecto, son las publicaciones de autores como H. B. Awbi (1994), que desarrolló correlaciones empíricas base para el diseño de dispositivos bioclimáticos basados en la transmisión de calor por convección natural, A. K. da Silva & L. Gosselin (2005) con un estudio de la optimización geométrica de chimeneas solares o el trabajo desarrollado por A. M. Rodrigues, A. Canha da Piedade, A. Lahellec & J. Y. Grandpeix (2000) sobre la transición a la turbulencia en una chimenea solar con flujo de calor constante en sus paredes.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal del proyecto es la simulación numérica de los flujos inducidos por convección natural que pueden aparecer en sistemas pasivos de climatización tales como chimeneas solares o paredes “Trombe” junto con la adquisición de conocimientos generales sobre los problemas referidos en la introducción.

Se llevará a cabo la simulación sistemática de los flujos en distintas configuraciones y con distintas condiciones de calentamiento, suponiendo la uniformidad de temperatura o de flujo de calor en las paredes verticales.

Se intentarán obtener correlaciones sistemáticas del coeficiente de transmisión de calor en función de los parámetros adimensionales relevantes que definen el problema, partiendo de una configuración simplificada siguiendo modelos encontrados en la bibliografía, como los mencionados en el apartado anterior. El estudio de la independencia de los resultados numéricos obtenidos respecto de la malla, y la influencia de la finura del mallado junto a las paredes, constituye un aspecto importante del presente proyecto.

En las simulaciones numéricas desarrolladas en el transcurso del presente trabajo utilizaremos el modelo de turbulencia  $k-\omega$  antes citado, intentando delimitar las condiciones de transición a la turbulencia, y se validará con resultados tanto numéricos como experimentales encontrados en la bibliografía. También se desarrollarán simulaciones laminares que nos servirán para comparar los resultados obtenidos con los de otros autores, valorando el alcance y precisión de los resultados numéricos encontrados en la simulación del régimen turbulento.

El proyecto se centrará fundamentalmente en el estudio de los flujos establecidos en chimeneas solares. Se obtendrán correlaciones prácticas para el cálculo del flujo del aire inducido y de la transmisión de calor entre el fluido y las paredes en este tipo de configuraciones.

Se intentará conseguir además la optimización geométrica y térmica de dichos sistemas a partir de los resultados numéricos para ayudar al diseño integral de edificios y construcciones industriales climatizadas de forma pasiva.

A lo largo de este trabajo se tratarán estos temas de la siguiente forma; en el Capítulo 2 se expondrán las características más significativas de los sistemas pasivos de climatización en estudio; en el Capítulo 3 se describen las configuraciones básicas consideradas, el modelo matemático, las condiciones de contorno y el modelo de turbulencia empleado para gran parte de los casos considerados; en el Capítulo 4 se expone el modelo numérico, describiendo de forma breve los algoritmos empleados para la simulación numérica de los problemas planteados; en los Capítulos 5, 6 y 7 se relacionan los resultados obtenidos para distintas configuraciones y condiciones de calentamiento; por último, en el Capítulo 8 se resumen las conclusiones más importantes alcanzadas en este trabajo.