

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Análisis del diseño de una chimenea solar

Resumen en castellano

Elías Páez Ortega

01/09/2011

Contenido

1	Información del proyecto	3
2	Introducción.....	4
3	Teoría.....	5
3.1	Dinámica de fluidos	5
3.2	Computational Fluid Dynammmics (CFD)	5
3.3	Chimenea solar.....	5
4	Método.....	7
4.1	Resultados experimentales.....	7
4.2	Modelo CFD.....	7
4.3	Comparación de los diferentes tipos de chimeneas solares.....	8
4.4	Modelo matemático de la chimenea solar	8
5	Comportamiento de un edificio con una chimenea solar	9
6	Trabajos Posteriores.....	10
7	Conclusiones.....	11

1 Información del proyecto

- Autor: Elías Páez Ortega, Ingeniería Industrial especialidad Tecnologías Energéticas.
- NIA
- Director: Per Olaf Tjelflaat, Universidad NTNU.
- Institución de realización: Norwegian University of Science and Technology.
- Coordinador Académico: Elisa María Ruiz Navas.
- Cotutor en la UC3M: Antonio Acosta Iborra.
- Calificación Obtenida: A-Excelente-10
- Descripción del trabajo:

En la búsqueda de instalaciones de edificios que usen menos electricidad para trabajar, y donde la generación de ruido se reduzca, la chimenea solar puede ser una buena opción para edificios con ventilación natural e híbrida.

El trabajo pretende investigar los principios básicos de chimeneas solares y experimentar y mejorar el diseño de la chimenea solar instalada en el laboratorio de la universidad NTNU de Trondheim, Noruega.

El proyecto constará de los siguientes apartados.

1. Estudio de los principios de chimeneas solares y diferencias en el diseño y aplicación.
2. Experimentación con la chimenea solar instalada en los laboratorios de la universidad.
3. Simulación CFD de una chimenea solar básica y de la chimenea instalada en la universidad.
4. Comparación y discusión de los resultados. Sugerencias para mejorar el diseño de una chimenea solar.

2 Introducción

Los equipos, materiales o la actividad humana aumentan la concentración de contaminantes dentro de los edificios, lo que afecta a la calidad interior del aire. Dicha concentración puede afectar en la salud y la productividad de las personas. Es, por tanto, necesario reemplazar el aire de mala calidad por otro de mejor, donde tradicionalmente, se ha utilizado la ventilación para obtener el aire del exterior, normalmente de mejor calidad.

Los diferentes modos de generar el intercambio de aire son: la ventilación mecánica, que permite controlar en todo momento el flujo de aire, su calidad y temperatura; y la ventilación natural, que tiene un menor mantenimiento, produce menos ruido y no utiliza energía eléctrica para mover el aire.

La chimenea solar es un sistema que utiliza la radiación solar para mover el aire, mejorando la ventilación natural y en algunos casos suministrando aire fresco al edificio. Han sido muchos trabajos, que se han venido realizando en las dos últimas décadas, los que han demostrado las ventajas de la chimenea solar frente a las chimeneas tradicionales o los beneficios que aportan en sistemas de ventilación híbrida. Otros trabajos se han enfocado más en los aspectos del diseño de la chimenea, como su altura, ancho o ángulo de inclinación, usando en muchos casos herramientas CFD para llevar a cabo simulaciones, experimentos y desarrollo de modelos físicos o matemáticos. Finalmente, otros trabajos se han centrado en el estudio de la chimenea solar acoplada al sistema de ventilación de un edificio junto con otros equipos como la pared Trombe, la cavidad de refrigeración o recuperadores de calor. Todos estos estudios muestran la viabilidad de este sistema y hoy en día se puede ver como los nuevos edificios empiezan a instalar chimeneas solares, como la escuela Tånga en Falkenberg, Suecia.

El base de este proyecto es el nuevo diseño de chimenea solar fabricada en el EPT-Lab de la Norwegian University of Science and Technology, en el que se pretende demostrar las ventajas frente a los diseños tradicionales, desarrollar un modelo físico-matemático y estudiar las propiedades de un edificio que tenga instalada esta chimenea solar.

3 Teoría

3.1 Dinámica de fluidos

Las bases de este proyecto, se basan principalmente de los conceptos de la dinámica de fluidos, partiendo de las ecuaciones de Navier-Stokes, de los números adimensionales de Reynolds (turbulencia) y Rayleigh (fuerzas de flotabilidad), la ecuación de Bernoulli, pérdidas primarias y secundarias en conductos, convección natural, así como las capas límites tanto laminar o turbulenta como térmica.

3.2 Computational Fluid Dynamics (CFD)

CFD es una herramienta computacional diseñada para resolver un amplio número de problemas de mecánica de fluidos. CFD es capaz de resolver de manera aproximada y discreta las tres ecuaciones de un fluido (continuidad, momento y energía).

La precisión de una simulación en CFD depende de muchos factores (condiciones de contorno, malla, discretización, etc...). Por tanto, no existe un método de solución estándar y es necesario un estudio profundo de las propiedades y condiciones de cada problema y en la mayoría de los casos una validación con datos experimentales.

En este proyecto se ha utilizado el software Ansys Fluent para llevar a cabo las simulaciones CFD, ya que es uno de los programas más utilizados, desarrollados y completos existente en el mercado.

Para el desarrollo del modelo CFD, se ha tenido especial cuidado en la elección del modelo turbulento, donde se han probado cinco modelos turbulentos, buscando aquel que obtuviera los resultados más precisos con el menor coste computacional. En cualquier caso, los modelos turbulentos simulados, pertenecen a la familia de las ecuaciones RANS.

Otro aspecto a tener en cuenta en el diseño del modelo CFD es la elección del modelo de radiación para lo cual se han realizado pruebas con los modelos P-1 y DO.

Finalmente y a modo de minimizar aspectos difusivos de la discretización de ecuaciones, las simulaciones se han llevado a cabo con discretizaciones de segundo orden.

3.3 Chimenea solar

La chimenea solar es un dispositivo que utiliza la radiación solar para calentar el aire interior de la chimenea disminuyendo su densidad y creando por tanto un flujo de aire por convección natural.

Aunque el uso de las chimeneas solares es amplio (secado de gases, generación de energía) este proyecto se va a centrar en el uso exclusivo como dispositivo que mejore la ventilación natural o híbrida de edificios.

Existen varios tipos de chimeneas solares, dependiendo de la latitud de su posición, altura del edificio, el colector solar o el tipo de materiales utilizados. Aunque, actualmente, los más usados son aquellos que reemplazan parte de la pared sur de la chimenea por un vidrio que permita a la radiación penetrar en el interior.

Dentro de esta clase, este proyecto va a estudiar tres tipos de chimeneas:

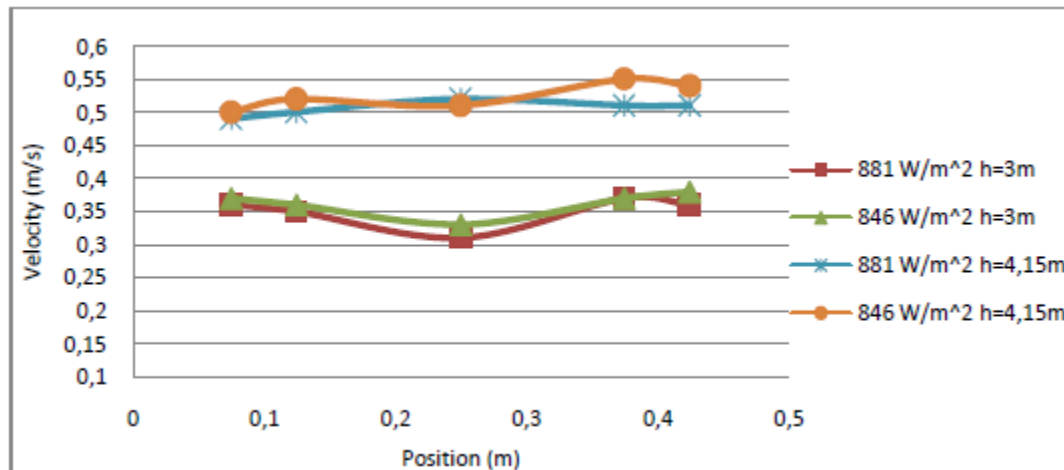
- Tipo 1: Esta chimenea está instalada en el EPT-lab de la NTNU y es la base de estudio de este proyecto.
La radiación solar entra por la pared sur de la tobera de entrada de la chimenea y es absorbida por el colector solar. Este colector está formado por un gran número de aletas metálicas en disposición paralela. Cada aleta recibe la radiación aumentando la temperatura de esta y generando un chorro térmico. La distancia entre aletas es relativamente pequeña (4,4 cm), permitiendo que cada chorro térmico se unan generando una temperatura constante en el interior de la chimenea.
- Tipo 2: Este tipo de chimenea se puede encontrar instalada en la escuela Tanga de Falkenberg en Suecia.
Al igual que la chimenea del tipo 1, esta cambia la pared sur de la tobera de entrada por un vidrio. Este tipo de chimeneas están diseñadas para climas fríos y hace uso conjunto de la radiación solar más la convección natural propia del edificio por la diferencia de temperaturas internas y externas.
En este caso, el colector solar es la pared norte interna que está pintada de negro para mejorar la absorción de radiación generando una distribución heterogénea de la temperatura interior, y en la que no se puede considerar el efecto chimenea hasta que la capa térmica llega a la pared sur.
- Tipo 3: Este tipo de chimeneas es el más usado y ampliamente estudiado.
Recomendado para climas cálidos y tropicales, su diseño es el más simple; sustituye la cara sur de la chimenea por un vidrio y el colector solar es la cara interior norte de la chimenea. Al igual que la del tipo 2, genera una distribución heterogénea de temperaturas en el interior disminuyendo la eficiencia del efecto chimenea.

Para una mejor comprensión de estos tipos de chimeneas se recomienda al lector consultar los croquis explicativos incluidos en el proyecto original en inglés.

4 Método

4.1 Resultados experimentales

La base de desarrollo del modelo de la chimenea solar son los resultados experimentales tomados del proyecto "Development of Air Solar Collector", donde se pueden encontrar los datos de velocidad, temperatura, altura y radiación de la chimenea estudiada en este proyecto.



4.2 Modelo CFD

Un estudio preliminar de los números adimensionales de Reynolds y Rayleigh más la hipótesis de Boussinesq indican que se está trabajando con un problema de transición a turbulencia, con pequeños gradientes de temperatura donde el modelo de Boussinesq es válido.

Tras un estudio profundo, donde se tuvieron en cuenta hasta seis configuraciones diferentes de condiciones de contorno, donde se buscaba aquella que obtuviera las mejores condiciones de estabilidad numérica, residuos bajos y que mejor se acondicionara a las condiciones reales del problema.

Dicho estudio dio como resultado una configuración de una condición de velocidad de entrada de 0,01m/s en la parte inferior del dominio rectangular, una condición de Pressure Outlet en la parte superior del dominio y condiciones de slip wall en las paredes laterales del dominio. Se introdujo una tobera de entrada a la chimenea, también slip wall para obtener líneas de corriente más suaves a fin de distorsionar lo menos posible el flujo de aire y de evitar pérdidas de radiación y temperatura. Se introdujeron 32 aletas de espesor nulo, donde en una cara generaba un flujo de calor de 1.776 W/m como forma simplificada de la radiación absorbida por la aleta.

La malla realizada es del tipo Cut-cell con elementos cuadrados. Tanto el modelo geométrico como la malla pueden ser consultados en el proyecto original.

El modelo DO fue el que mejor, tanto por teoría como por datos experimentales, mejor resultado obtenía, el cual fue seleccionado con 4 divisiones en theta tanto en Pi con 1 iteración por cada 10 iteraciones del flujo; junto con el modelo de turbulencia Realizable k-e con Enhanced wall function para el modelo de turbulencia de pared.

Este modelo final obtiene unos resultados prácticamente coincidentes con los datos experimentales Tanto en los perfiles de velocidad como en la temperatura del aire. Junto a estos datos, se puede concluir que en este modelo de chimenea solar se puede suponer un perfil simétrico de velocidad como de temperatura, con lo que se puede realizar un modelo simplificado de la chimenea en el que se tenga en cuenta está simetría, con el fin de reducir considerablemente el número de celdas y poder realizar fácilmente una comparación con los otros dos tipos de chimeneas solares.

4.3 Comparación de los diferentes tipos de chimeneas solares.

Como ya se ha descrito, se va a utilizar un modelo simplificado de la chimenea solar de tipo 1, que además de la condición de simetría, se ha sustituido el colector solar de aletas por una condición de contorno de radiador adecuadamente ajustada.

Todas las simulaciones CFD tienen las mismas condiciones de contorno y los mismos modelos de turbulencia y de radiación. La radiación absorbida/reflejada ha sido debidamente ajustada para cada tipo y comparada con resultados experimentales publicados en artículos de investigación.

Las simulaciones llevadas a cabo, muestran que la chimenea de tipo obtiene mayores caudales para anchos mayores a 0,25 metros y alturas por debajo de 4 metros, mientras que la chimenea de tipo 3 es recomendable para alturas superiores a los 4 metros y con anchuras estrechas, ya que se consigue una mayor área de colector solar.

4.4 Modelo matemático de la chimenea solar

Este apartado del proyecto pretende obtener una serie de ecuaciones algebraicas de la chimenea solar, partiendo de los resultados de las simulaciones, para poder calcular fácilmente aquellos aspectos del diseño de la chimenea solar (radiación, altura, anchura o caudal).

Tras una serie de balances de masa y energía, además de una serie de suposiciones que simplifican el problema, tales como temperatura y velocidad homogénea o la hipótesis de Boussinesq, la ecuación que define la chimenea solar, en función del caudal, fluido, radiación, altura, anchura o pérdidas de carga es la siguiente:

$$q = \sqrt[3]{\frac{(ACd)^2 2gH\beta Q}{\rho c_p}}$$

Esta ecuación ha sido validada tanto por los resultados de las simulaciones CFD llevadas a cabo, mostrando un excelente grado de precisión. Además de que se demuestra que la eficiencia de la chimenea solar es lineal con la altura de esta y que permanece constante cuando se varía el área del colector.

5 Comportamiento de un edificio con una chimenea solar

En esta sección se pretende conseguir una ecuación teórica para un edificio con una chimenea solar instalada y simular diferentes condiciones para estudiar su efecto en el flujo de aire.

Los equipos de ventilación que se van a tener en cuenta dentro del edificio, a parte de la chimenea solar, son las opciones de recuperador de calor, un ventilador y dispositivos para utilizar el viento con el fin de tener en cuenta tanto la ventilación natural como la híbrida.

$$q^3 - q(ACd)^2 \left[(\varepsilon - 1)(T_{ext} - T_{room})2gH\beta + \frac{\Delta P_{fan}(q)}{2\rho} + CpV_{wind}^2 \right] - 2(ACd)^2gH\beta \frac{Q}{\rho c_p} = 0$$

Esta ecuación de tercer grado puede ser resuelta analíticamente.

Se ha realizado un estudio de las diferentes condiciones para entender mejor el rango de acción de la chimenea solar y saber en qué casos su uso es recomendable y en cuales su aporte es nulo o insignificante:

- Diferencias de temperaturas externas e internas: En este caso se ve que el rango de acción de la chimenea es válido para un rango de temperaturas externas e internas de entre -5°C y 10 °C, fuera de este rango el caudal de aire no se ve afectado por la chimenea solar, por mucho que la radiación se la más alta posible.
- Altura de la chimenea: En este caso se ha comparado diversas alturas, mostrando un resultado excelente para diferencias entre la temperatura externa e interna inferiores a los 4°C, por encima de este rango de temperaturas el caudal de aire se reduce bruscamente y el uso de una chimenea se puede despreciar.
- Efecto del viento: Para este caso se observa que cuanto mayor sea la velocidad del viento, el efecto de la diferencia de temperaturas y de la chimenea se reduce, llegando el caso que para 10 m/s con un Cp de 0,25 la contribución del viento en el flujo de aire es mayor del 95%.
- Efecto del Cp: A velocidades bajas y moderadas, su efecto es más influyente que la propia velocidad del viento, además de tener una contribución mayor para una diferencia de temperaturas superiores a los 0°C. Para diferencias menores el efecto del viento no es tan influyente.
- Efecto de un recuperador de calor: El uso de intercambiadores de calor, además de mejorar la eficiencia del edificio, es recomendable para casos en que la diferencia de temperaturas sean positivas ya que mejora sustancialmente el flujo de aire, mientras que para diferencias negativas, su efecto no es propicio para el caudal de aire, ya que este se reduce. Si además se tiene en cuenta la pérdida de carga que un intercambiador tiene, su uso solo es aconsejable (siempre pensando en el flujo de aire), para diferencias de temperaturas mayores a los 8 °C.

6 Trabajos Posteriores

La chimenea solar instalada en el EPT-lab es un nuevo diseño y no mucha información se puede encontrar. Por tanto, es importante continuar el trabajo llevado a cabo en este proyecto, para conseguir y mejorar el diseño y para entender mejor el comportamiento de una chimenea solar. Por lo que se recomienda:

- Una simulación en 2D con radiación externa para saber si la suposición de temperatura uniforme y velocidad puede ser aplicada para todos los posibles ángulos de radiación solar.
- Verificar la ecuación matemática de una chimenea solar, para diferentes ángulos de la radiación solar.
- Estudiar y simular diferentes diseños de salida de la chimenea para mejorar el efecto viento de esta.
- Una simulación no estacionaria para entender mejor el comportamiento en condiciones dinámicas, como por ejemplo la capacidad de almacenamiento térmico durante el día, para permitir continuar con un flujo de calor durante parte de la noche.

7 Conclusiones

Este informe estudia los principios básicos de una chimenea solar y específicamente de la chimenea solar instalada en el EPT-lab de la universidad NTNU de Noruega, utilizando la herramienta comercial de simulación CFD Fluent.

Las siguientes conclusiones son las obtenidas:

- Un modelo simple de CFD en 2D, sin radiación externa es suficiente para simular y estudiar con un buen grado de precisión la chimenea solar instalada en el EPT-lab.
- El diseño de la chimenea solar instalada en la EPT-lab permite usar simples modelos físicos para conocer su propiedades (flujo de aire y temperatura) además el del tamaño del modelo (altura y área de colector solar), debido a la uniformidad tanto de la velocidad como de la temperatura que existen dentro de la chimenea. Además, la suma de todas estas características permite el posible uso de todo el conocimiento de chimeneas estándar para las chimeneas solares.
- La EPT-lab chimenea solar puede ser utilizado para climas tanto cálidos como fríos y para alturas razonables es el tipo de chimenea que mayores caudales de aire obtiene. Solo para climas cálidos junto con edificios altos la chimenea solar de tipo 3 obtiene mejores resultados.
- La eficiencia solar de la chimenea depende de la magnitud de radiación recibida, pero también de la diferencia de temperaturas entre el edificio y su entorno. Por tanto, solo en casos donde la diferencia de temperaturas sea cercana a cero, tiene sentido el uso de la chimenea solar.
- Normalmente la altura de la chimenea es el factor importante para el ratio de caudal de aire, salvo en casos donde la temperatura interior del edificio es menor a la externa, en el cual es más importante aumentar el área del colector solar que la altura de la chimenea.
- Una chimenea solar con un recuperador de calor mejora la eficiencia del edificio, pero reduce el caudal de aire. Por esta razón, solo sistemas de ventilación híbrida con el apoyo de un ventilador y con la flexibilidad suficiente para cambiar la cantidad de flujo de aire son recomendables para el uso conjunto de una chimenea solar y un recuperador de calor.