



**Universidad
Zaragoza**

**ESTUDIO COMPUTACIONAL DE LA
DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN
CALLES ENCAJONADAS Y CHIMENEAS.
COMPARACIÓN CON DATOS
EXPERIMENTALES.**

Realizado por: **Judith Jiménez Cano**

Dirigido por: **Antonio Pascau Benito**

Área de Mecánica de Fluidos

Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza

Zaragoza, Marzo 2013

Agradecimientos:

A mis padres, a mi hermano

y a Félix.

ESTUDIO COMPUTACIONAL DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN CALLES ENCAJONADAS Y CHIMENEAS. COMPARACIÓN CON DATOS EXPERIMENTALES

RESUMEN

El propósito del presente trabajo es revelar el impacto que causa sobre el medio ambiente urbano la emisión de contaminantes por fuentes emisoras en calles encajonadas y edificios con chimenea mediante el uso y validación de un programa o código desarrollado dentro del Área de Mecánica de Fluidos del Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos de la Universidad de Zaragoza.

El estudio se basa en dos partes. Por un lado, se comprueba el grado de exactitud en la aproximación alcanzada entre las soluciones numéricas obtenidas, para el campo de velocidad y concentración, con sus correspondientes homólogas procedentes de los ensayos experimentales en calles encajonadas realizados por R.N Meroney, M.Pavageau, S. Rafailidis y M.Schatzmann en un túnel de viento que opera bajo capa límite atmosférica estratificada del Instituto de Sistemas de Energía en la Universidad Tecnológica de Hamburgo, Alemania.

Por otro lado, se trata de discernir para todas las situaciones planteadas cuál es la mejor posición de chimenea en el edificio y que presente una mejor ventilación natural de contaminante en los alrededores de la misma y con su vecindad más próxima hallada en la corriente de flujo principal establecida a través de los tejados.

MEMORIA

ÍNDICE

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN..... | 6 |
| 2. | OBJETIVOS | 7 |
| 3. | DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO..... | 8 |
| 3.1. | ESCALAS | 8 |
| 3.2. | DOMINIO COMPUTACIONAL | 8 |
| 3.3. | EDIFICIOS Y CALLES ENCAJONADAS | 9 |
| 3.3.1. | NOMENCLATURA..... | 9 |
| 3.3.2. | GEOMETRÍAS..... | 9 |
| 3.3.3. | ESTRUCTURA DE LA DISPOSICIÓN DE EDIFICIOS | 10 |
| 3.3.4. | FUENTE EMISORA DE CONTAMINANTE..... | 12 |
| 3.4. | EDIFICIO CON CHIMENEA | 13 |
| 3.4.4. | ALTURAS DE CHIMENEAS | 13 |
| 3.4.5. | UBICACIÓN DE CHIMENEA | 13 |
| 3.4.6. | FUENTE EMISORA DE CONTAMINANTE..... | 13 |
| 3.5. | CASOS DE ESTUDIO | 16 |
| 4. | RESULTADOS..... | 17 |
| 4.3. | COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES Y COMPUTACIONALES PARA CALLE ENCAJONADA | 18 |
| 4.3.4. | Estudio comparativo para la distribución de las líneas de corriente..... | 18 |
| 4.3.5. | Estudio comparativo para la dispersión de contaminantes..... | 19 |
| 4.4. | EDIFICIO CON CHIMENEA | 24 |
| 4.4.1. | Comparación de la posición relativa de la chimenea unida al tejado del edificio EI. | 24 |
| 4.4.2. | Comparación de la posición relativa de la chimenea sin unir al tejado del edificio EI..... | 25 |
| 4.4.3. | Comparación de la chimenea unida al tejado del edificio EI con la chimenea sin unir | 26 |
| 4.4.4. | Comparación de Caso 5 con Caso Base | 27 |
| 4.5. | ESTUDIO COMPUTACIONAL DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN A LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES | 29 |
| 5. | CONCLUSIONES | 31 |
| 5.4. | CONCLUSIONES..... | 31 |
| 5.5. | TRABAJO FUTURO..... | 33 |

| | |
|-----------------------------|----|
| 5.6. EQUIPO UTILIZADO | 33 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA | 34 |

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire en las ciudades es un fenómeno bien conocido por todos ya que tiene una acción ilimitada en múltiples escalas. De gran preocupación es la pureza del aire que inhalamos proveniente del tráfico a motor y el impacto de los humos de las chimeneas emitidos en las zonas circundantes, es pues que la contaminación del aire se ha convertido en uno de los principales problemas medioambientales en la actualidad.

Es por ello que las calles en las ciudades junto con la posición relativa de las chimeneas encima de los edificios que las configuran sean uno de los elementos urbanísticos a tener más en cuenta puesto que en ellas es donde se centra, en los últimos tiempos, una creciente densidad de tráfico a motor. Es en ellas donde las personas están expuestas a sustancias contaminantes peligrosas para la salud humana.

A pesar de todos los esfuerzos que han sido llevados a cabo últimamente con el fin de reducir la concentración de dichas sustancias peligrosas en el medio ambiente urbano, muchas metrópolis todavía sufren problemas de mala ventilación y calidad medioambiental, consecuencia, entre otras, de un inapropiado planteamiento urbanístico, algo frecuente sobre todo en áreas de una rápida urbanización.

Establecer predicciones precisas en base a los principales parámetros que dominan la dispersión de contaminantes ayuda en gran medida a la elaboración de planes urbanísticos futuros con el fin de alcanzar una óptima ventilación natural y confort en las ciudades.

Entre las principales herramientas que se disponen para distinguir qué situaciones o condiciones favorecen una mejor dispersión de contaminantes están los túneles de viento, modelos numéricos y experimentos a escala completa, estos últimos no tan frecuentes debido a las dificultades técnicas y económicas que conllevan ponerlos en práctica.

2. OBJETIVOS

El propósito del presente trabajo es revelar el impacto que causa sobre el medio ambiente urbano la emisión de contaminantes por fuentes emisoras en calles encajonadas y edificios con chimenea mediante el uso y validación de un programa o código desarrollado dentro del Área de Mecánica de Fluidos del Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos de la Universidad de Zaragoza. Dicho código permite realizar simulaciones numéricas de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) usando el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ estándar y modificando el valor de las variables del mismo según los casos a estudio.

El estudio se basa en dos partes. Por un lado, se comprueba el grado de exactitud en la aproximación alcanzada entre las soluciones numéricas obtenidas, para el campo de velocidad y concentración, con sus correspondientes homólogas procedentes de los ensayos experimentales en calles encajonadas realizados por R.N Meroney, M.Pavageau, S. Rafailidis y M.Schatzmann en un túnel de viento que opera bajo capa límite atmosférica estratificada del Instituto de Sistemas de Energía en la Universidad Tecnológica de Hamburgo, Alemania.

Por otro lado, se trata de discernir cuál es la mejor posición de chimenea para edificios de todas las situaciones planteadas y que presenten una mejor ventilación natural de contaminante, en los alrededores de la misma y con su vecindad más próxima hallada en la corriente de flujo principal establecida a través de los tejados. Con este fin se analiza, de forma cualitativa y cuantitativa, aquellas variables que influyen en la dispersión de contaminantes para diferentes configuraciones de chimeneas y edificios como son:

- Edificios:
 - Influencia de su disposición (dos y ocho edificios dispuestos en serie)
 - Altura
- Chimeneas:
 - Influencia de su disposición (unida o sin unir computacionalmente al tejado del edificio)
 - Altura
 - Posición en tejado

3. DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

En los siguientes dos apartados se detalla toda la información necesaria en cuanto a escalas y valores de la geometría del dominio computacional utilizado para el estudio de los distintos casos. El conjunto detallado de los mismos se encuentra en los Anexos.

3.1. ESCALAS

La escala para la geometría introducida en el túnel de viento es $M_g = 1 : 100$. De esta forma un edificio de altura $H = 0.12 \text{ (m)}$ se correspondería con un edificio que en la realidad mediría $H = 12 \text{ (m)}$.

La escala utilizada hace que el número de Reynolds entre modelo y prototipo no se mantenga.

Como se observará posteriormente la velocidad típica para el modelo es de $1 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ lo cual

implicaría velocidades de $0.01 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ en el prototipo, que corresponderían a situaciones de

calmas. Como en muchos otros ensayos de calles encajonadas se espera que el número de Reynolds esté dentro de un rango lo suficientemente alto como para que la dependencia del flujo con éste sea muy pequeña y los resultados obtenidos en túneles de viento puedan ser extrapolados a situaciones de calle real.

La simulación computacional se realiza con las dimensiones del túnel de viento, de tal forma que la discusión anterior es relevante para la extrapolación de variables a situaciones reales, no para la comparación computacional experimental.

3.2. DOMINIO COMPUTACIONAL

Las dimensiones del dominio computacional reproducen las dimensiones del túnel de viento (sección de prueba) utilizado por R.N Meroney, M.Pavageau, S. Rafailidis y M.Schatzmann en sus ensayos experimentales.

Estas dimensiones permanecen constantes y el sistema de referencia utilizado es el mismo para todos los casos de estudio. Para el eje vertical se utiliza el eje Y y para el eje horizontal el eje X.

- $H_{\text{túnel de viento}} = 1.02 \text{ (m)}$, altura de la sección de prueba del túnel de viento, sobre el eje Y.
- $L_{\text{túnel de viento}} = 3.54 \text{ (m)}$, longitud de la sección de prueba del túnel de viento, sobre el eje X.

3.3. EDIFICIOS Y CALLES ENCAJONADAS

3.3.1. NOMENCLATURA

Los edificios se designan como:

- EI : edificio 1
- EII : edificio 2
- EIII : edificio 3
- EIV : edificio 4
- EV : edificio 5
- EVI : edificio 6
- EVII : edificio 7
- EVIII : edificio 8

3.3.2. GEOMETRÍAS

Las características geométricas de los tejados en todos los edificios se corresponde con tejados planos.

Para todos los casos excepto para el Caso 5 se cumple que:

$$H_{EI} = H_{EII} = H_{EIII} = H_{EIV} = H_{EV} = H_{EVI} = H_{EVII} = H_{EVIII} = 0.12 \text{ (m)}$$

Para el caso citado la altura del edificio EII es: $H_{EII} = 0.132 \text{ (m)}$ y se cumple que

$$H_{EI} = H_{EIII} = H_{EIV} = H_{EV} = H_{EVI} = H_{EVII} = H_{EVIII} = 0.12 \text{ (m)}$$

Los datos correspondientes a las anchuras de los edificios (B) y de las calles (W) para todos los casos de estudio son las siguientes:

$$B_{EI} = B_{EII} = B_{EIII} = B_{EIV} = B_{EV} = B_{EVI} = B_{EVII} = B_{EVIII} = 0.12 \text{ (m)}$$

$$W_I = W_{II} = W_{III} = W_{IV} = W_V = W_{VI} = W_{VII} = 0.12 \text{ (m)}$$

3.3.3. ESTRUCTURA DE LA DISPOSICIÓN DE EDIFICIOS

La ubicación de cualquiera de las dos posibles disposiciones de los edificios EI y EII dentro del dominio computacional queda establecida según L_{REF} . Ésta es la distancia, en el eje X, que hay desde la entrada al dominio computacional hasta la pared de sotavento del edificio EI y tiene un valor constante $L_{REF} = 1.86 \text{ (m)}$.

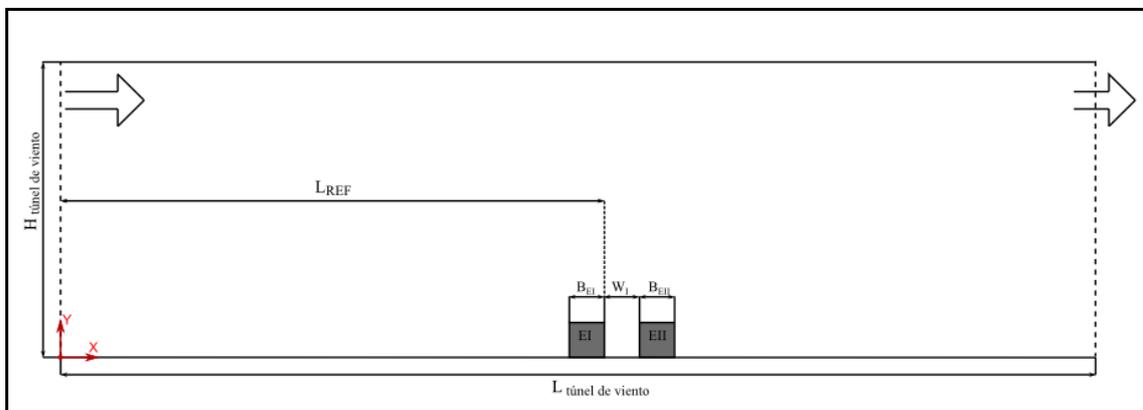


FIGURA 1. Dominio computacional de estudio. 2 edificios.

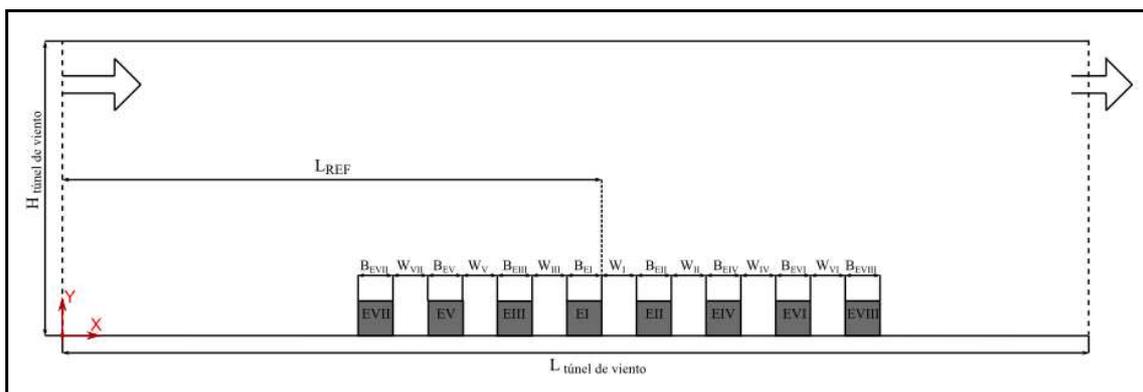


FIGURA 2. Dominio computacional de estudio. 8 edificios.

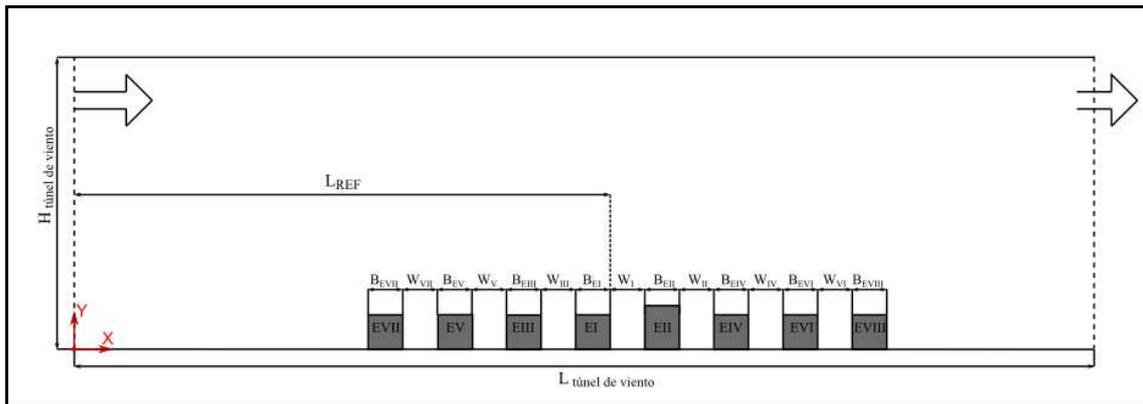


FIGURA 3. Disposición del edificio EII para el Caso 5.

3.3.4. FUENTE EMISORA DE CONTAMINANTE

El estudio cuantitativo acerca de cómo es la dispersión de contaminantes en una fuente de emisión se centra en las fachadas de los edificios que dan a la calle formada y en los tejados de los edificios EI y EII .

La fuente emisora de contaminante es un modelo que emula la contaminación producida por su prototipo real correspondiente a vehículos a motor que transitan en calles urbanas.

Para ambos casos de estudio la fuente emisora de contaminante se sitúa en el centro de la calle formada por los edificios EI y EII .

Los datos asociados a la fuente de contaminante P1 permanecen constantes en ambos casos.

Fuente P1 :

- $L_{P1_{fuente}} = 0.06 \text{ (m)}$
- $v_{0,P1} = 1 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$

Se ha considerado una fuente de emisión con dimensiones de una celda computacional y una velocidad lo suficientemente baja como para no perturbar el flujo en su entorno.

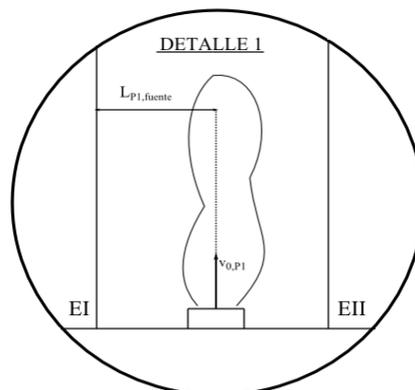


FIGURA 4. Vista en detalle de la fuente emisora P1.

3.4. EDIFICIO CON CHIMENEA

3.4.4. ALTURA DE CHIMENEA

Las alturas de las chimeneas estudiadas son:

- $h_{\text{Caso 3.1}} = 0.012 \text{ (m)}$
- $h_{\text{Caso 3.2}} = 0.042 \text{ (m)}$
- $h_{\text{Caso 4.1}} = 0.036 \text{ (m)}$
- $h_{\text{Caso 4.2}} = 0.042 \text{ (m)} = h_{\text{Caso 5}}$

Estas alturas se mantienen constantes.

3.4.5. UBICACIÓN DE CHIMENEA

Las diferentes posiciones de estudio empleadas son:

- $L_{\text{posición 1}} = 1.741 \text{ (m)}$
- $L_{\text{posición 2}} = 1.797 \text{ (m)}$
- $L_{\text{posición 3}} = 1.836 \text{ (m)}$

Estas longitudes de mantienen constantes. Ver Figura 5.

3.4.6. FUENTE EMISORA DE CONTAMINANTE

Con respecto al estudio de la dispersión del contaminante aguas abajo del punto de emisión, el estudio se centra en las fachadas de los edificios aguas abajo: EI, EII, EIV, EVI y EVIII.

Se realizaron varios estudios con la intención de comprobar si la colocación óptima de la chimenea era dependiente de la situación de la salida de contaminante, lateral o vertical. Para los primeros casos de estudio la fuente emisora de contaminante se sitúa a ambos lados en la base de la chimenea (ver Figura 6) y en los siguientes se sitúa a la salida de la misma encima del edificio EI (ver Figura 7).

Éstas son algunas de sus características:

Salidas laterales de contaminante:

- $h_{l1} = h_{l2} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$
- $u_{l1} = u_{l2} = 5 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$

Salidas verticales de contaminante:

- $l_{sv} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$
- $v_{sv1} = v_{sv2} = 5 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$

Salida vertical de contaminante para los Casos 4 y 5 (ver Figura 8):

- $l_{sv} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$
- $v_{sv} = 1 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$

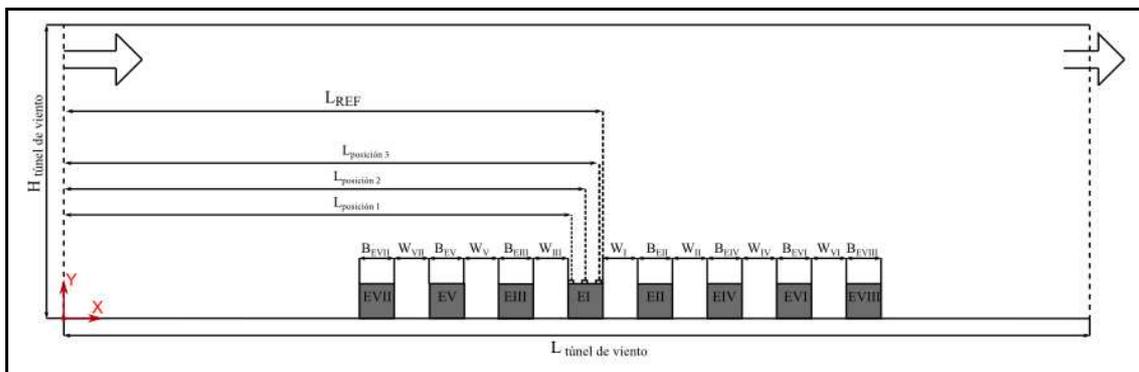


FIGURA 5. Caso 3.1. Diferentes posiciones de la chimenea.

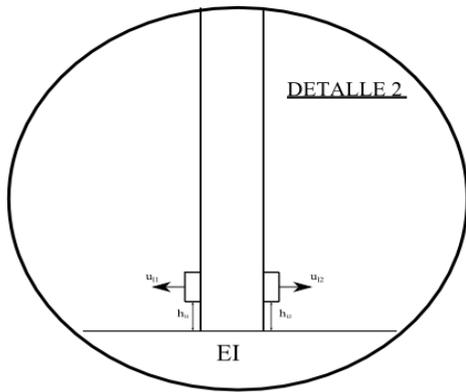


FIGURA 6. Vista en detalle de las salidas laterales de contaminante.

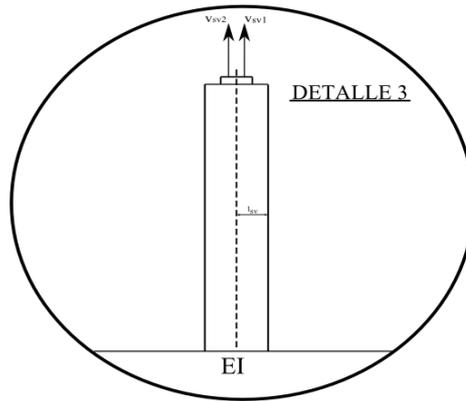


FIGURA 7. Vista en detalle de las salidas verticales de contaminante.

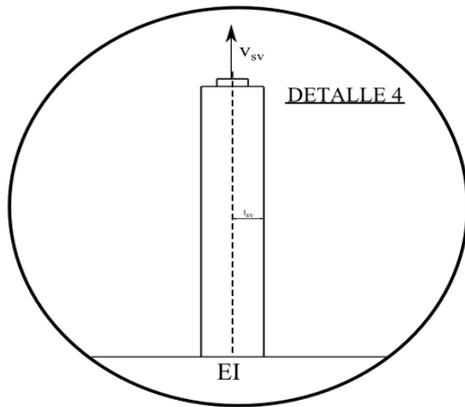


FIGURA 8. Vista en detalle de la salida vertical de contaminante para los casos 4 y 5.

3.5. CASOS DE ESTUDIO

La descripción completa de los diferentes casos de estudio se recoge en las Tablas 18-24 del Anexo 5, en ellas se especifica lo siguiente:

- Número que designa un caso concreto de estudio.
- Número de edificios.
- Numero de nodos.
- Número aproximado de iteraciones en la simulación.
- Tiempo computacional aproximado para llevar a cabo la simulación.

4. RESULTADOS

En esta Memoria se presentan aquellos resultados que se consideran más significativos. El conjunto detallado de ellos se incluye en los Anexos.

Para los distintos casos de estudio se analiza cómo es el campo de velocidad y de concentración dentro de su dominio computacional correspondiente.

Para los casos de estudio de calle encajonada se realizan las comparaciones con datos experimentales y de los datos computacionales se extraen valores de concentración a lo largo de las fachadas y tejados de los edificios que forman la calle. Mientras que para los casos de estudio del edificio con chimenea se extraen valores de concentración para cada fachada de los edificios aguas abajo del punto de emisión y posteriormente se toman promedios para cada una y para la totalidad de los promedios. Todo el postprocesado y visualización de datos se realiza con TECPLOT® mediante el empleo de polilíneas de extracción de datos en las zonas de interés.

Éstas son algunas de las características de simulación para predecir el campo de velocidad y de concentración para todos los casos:

- Tiempo de cómputo: aproximadamente 16 horas.
- Iteraciones: 30000.
- Nodos de mallado: 1180 x 170 (200600 nodos).
- Convergencia alcanzada: 10^{-7} .

4.3. COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES Y COMPUTACIONALES PARA CALLE ENCAJONADA

4.3.4. Estudio comparativo para la distribución de las líneas de corriente

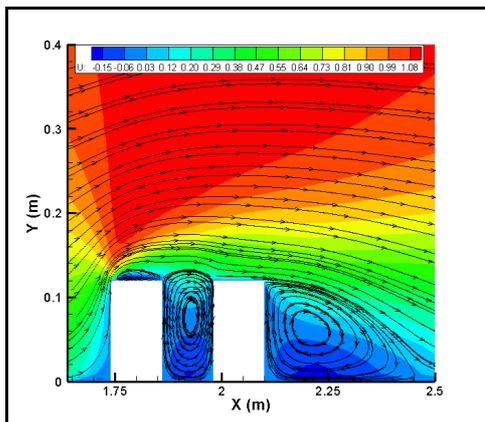


FIGURA 9. Caso 1. Líneas de corriente.

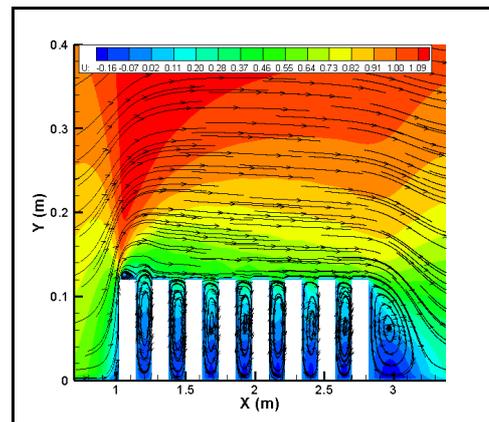


FIGURA 10. Caso 2. Líneas de corriente.

Las Figuras 1 y 2 muestran el patrón general de flujo para el campo de velocidad, con gran riqueza en el número e intensidad de vórtices. Los colores representan la magnitud de la componente de velocidad U . Para ambos casos de estudio se observan tres y nueve zonas de vórtices intensos y contrarrotantes respectivamente situados: encima del primer edificio, en cada una de las calles y tras el último edificio.

Obsérvese como debido a la intensidad del flujo ascendente de la pared de barlovento en donde impacta la corriente libre en el primer edificio de la serie, para ambos casos de estudio, se forma el primero de los vórtices. En todos los vórtices se observa como la mayor velocidad de flujo aparece cerca de la región superior de los edificios. El flujo es ascendente y hacia el exterior en la región de sotavento mientras que es descendente y hacia el interior en la región de barlovento en el caso de múltiples calles.

4.3.5. Estudio comparativo para la dispersión de contaminantes

A continuación se detalla el procedimiento utilizado para la representación de los datos computacionales con sus correspondientes experimentales obtenidos en los estudios en túnel de viento.

Estudio Normalizado

Las medidas experimentales vienen dadas en forma de concentración normalizada de esta forma:

$$K_{\text{experimental}} = C \cdot \frac{U_{\infty} \cdot H \cdot L}{Q}$$

Donde:

- $K_{\text{experimental}}$: concentración normalizada.
- C : concentración volumétrica de contaminante (C_v) $\left(\frac{\text{m}^3 \text{ contaminante}}{\text{m}^3 \text{ mezcla}} \right)$.
- U_{∞} : velocidad de la corriente libre.
- H : altura del edificio (m).
- Q : caudal de contaminante $\left(\frac{\text{m}^3 \text{ contaminante}}{\text{s}} \right)$.
- L : longitud de la línea de la fuente (m), según la dirección X.

Los resultados computacionales vienen expresados como una fracción másica, variable que se puede denominar así:

$$Y_{\text{contaminante}} \left(\frac{\text{Kg}_{\text{contaminante}}}{\text{Kg}_{\text{mezcla}}} \right)$$

Para poder comparar datos experimentales con resultados computacionales es necesario convertir esta $Y_{\text{contaminante}}$ en una $K_{\text{computacional}} \equiv C_{\text{adim}}$ y contrastarla entonces con su $K_{\text{experimental}}$ correspondiente para cada caso determinado. A continuación se desarrolla el razonamiento que se ha llevado a cabo.

Se obtienen la concentración másica:

$$C_m \left(\frac{\text{Kg}_{\text{contaminante}}}{\text{m}^3_{\text{mezcla}}} \right) = \rho_{\text{mezcla}} \left(\frac{\text{Kg}_{\text{mezcla}}}{\text{m}^3_{\text{mezcla}}} \right) \cdot Y_{\text{contaminante}} \left(\frac{\text{Kg}_{\text{contaminante}}}{\text{Kg}_{\text{mezcla}}} \right).$$

Y a continuación la concentración volumétrica:

$$C = C_v \left(\frac{\text{m}^3_{\text{contaminante}}}{\text{m}^3_{\text{mezcla}}} \right) = \frac{C_m \left(\frac{\text{Kg}_{\text{contaminante}}}{\text{m}^3_{\text{mezcla}}} \right)}{\rho_{\text{contaminante}} \left(\frac{\text{Kg}_{\text{contaminante}}}{\text{m}^3_{\text{contaminante}}} \right)}.$$

A partir de esta última C y con U_∞ , H , Q y L para las distintas simulaciones se obtiene la concentración en la forma deseada.

$$K_{\text{computacional}} \equiv C_{\text{adim}} = C \cdot \frac{U_\infty \cdot H \cdot L}{Q} = C \cdot \frac{U_\infty \cdot H}{q} = C \cdot \frac{U_\infty \cdot H}{u_0 \cdot \Delta x}.$$

Donde:

- $C_{\text{adim}} \equiv K_{\text{computacional}}$: ratio adimensional.
- C : concentración volumétrica computacional $(C_v) \left(\frac{\text{m}^3_{\text{contaminante}}}{\text{m}^3_{\text{mezcla}}} \right)$
- q : caudal de contaminante por unidad de longitud $\left(\frac{\text{m}^3_{\text{contaminante}}}{\text{s} \cdot \text{m}} \right)$.
 - u_0 : velocidad de emisión de contaminante $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$.
 - Δx : incremento en el eje x del dominio computacional ($\Delta x = 0.003 \text{ (m)}$).
- $U_\infty = 1 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$

Las densidades y fracciones másicas utilizadas en los puntos de emisión son:

- $Y_{\text{contaminante}} = 1 \left(\frac{\text{Kg}_{\text{contaminante}}}{\text{Kg}_{\text{mezcla}}} \right)$.

- $\rho_{\text{contaminante}} = \rho_{\text{etano}} = 1.282 \left(\frac{\text{Kg}_{\text{contaminante}}}{\text{m}^3_{\text{mezcla}}} \right) \approx \rho_{\text{aire}}$.
- $\frac{1}{\rho_{\text{mezcla}}} = \frac{Y_{\text{contaminante}}}{\rho_{\text{contaminante}}} + \frac{1 - Y_{\text{contaminante}}}{\rho_{\text{aire}}} \Rightarrow \rho_{\text{mezcla}} \approx \rho_{\text{contaminante}} \approx \rho_{\text{aire}}$.

Por tanto las concentraciones máscica y volumétrica iniciales de emisión de contaminante en las fuentes emisoras son:

$$C_{\text{m}_{\text{fuente}}} \left(\frac{\text{Kg}_{\text{contaminante}}}{\text{m}^3_{\text{mezcla}}} \right) = \rho_{\text{mezcla}} \cdot Y_{\text{contaminante}_{\text{fuente}}} \approx 1.243 = \frac{\rho_{\text{contaminante}} + \rho_{\text{aire}}}{2}$$

$$C_{\text{fuente}} = C_{\text{v}_{\text{fuente}}} = \frac{C_{\text{m}_{\text{fuente}}}}{\rho_{\text{contaminante}}} = \frac{\rho_{\text{mezcla}} \cdot Y_{\text{contaminante}_{\text{fuente}}}}{\rho_{\text{contaminante}}} = 1 \left(\frac{\text{m}^3_{\text{contaminante}}}{\text{m}^3_{\text{mezcla}}} \right)$$

Ver más detalles sobre las densidades en el Anexo 2.

Se procede con el análisis para los casos 1 y 2.

Tabla 1. Descripción de las condiciones de flujo.

| Casos de estudio | $U_{\infty} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ | $u_0 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ | $C_0 \left(\frac{\text{m}^3_{\text{contaminante}}}{\text{m}^3_{\text{mezcla}}} \right)$ |
|------------------|---|--|--|
| 1,2 | 1 | $1 \cdot 10^{-3}$ | 1 |

Donde U_{∞} es la velocidad de entrada al dominio computacional, u_0 es la velocidad de emisión del contaminante y C_0 es la cantidad de contaminante emitido.

Para ambos casos el contaminante se emite desde el suelo de la calle encajonada entre los edificios EI y EII.

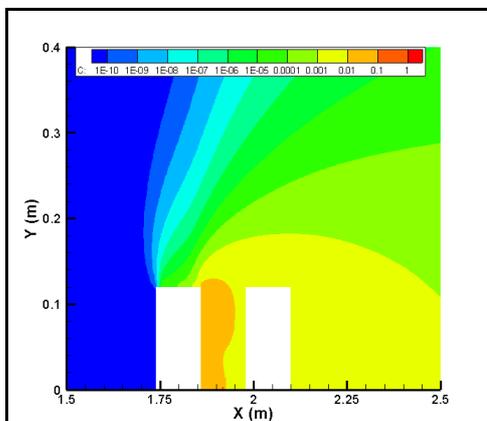


FIGURA 11. Caso 1. Contornos de concentración para fuente de emisión P1.

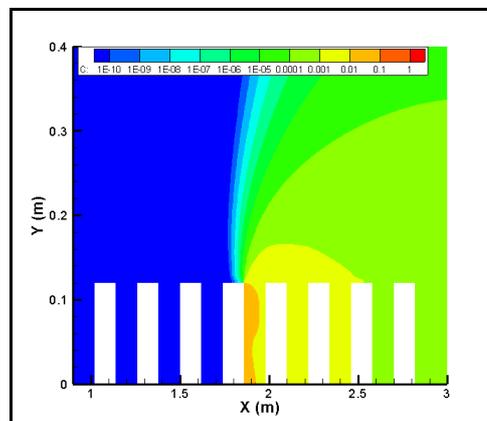
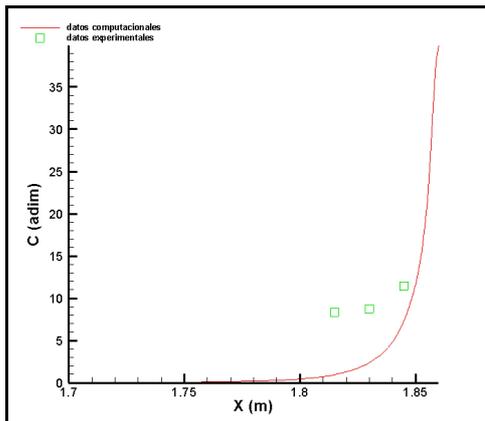


FIGURA 12. Caso 2. Contornos de concentración para fuente de emisión P1.

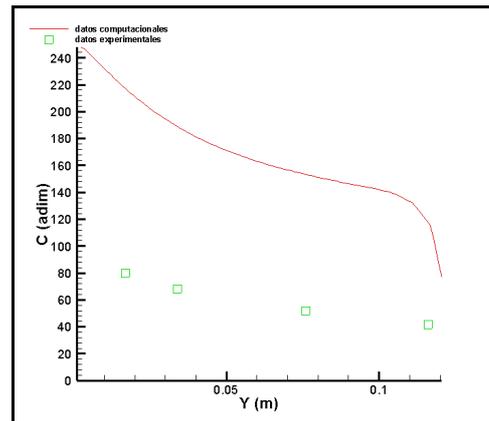
Los colores representan los contornos de la concentración C .

El vórtice generado en el interior de la calle en sentido de las agujas del reloj transporta al contaminante desde la pared de sotavento del edificio EI hacia el exterior y se dispersa más allá de la misma.

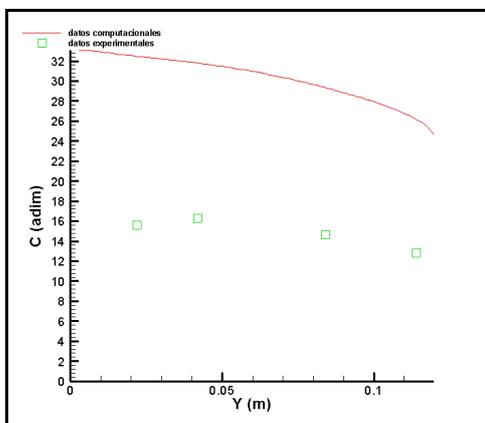
Las Gráficas 1-8 muestran la comparación entre resultados computacionales y experimentales de la concentración. Cada una muestra el comportamiento de la concentración correspondiente a un punto de valor constante en el eje X a medida que varía la altura según el eje Y.



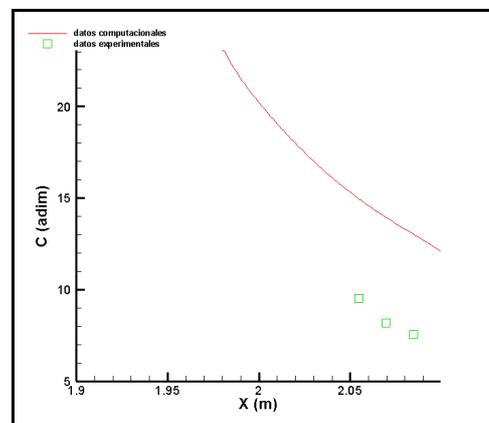
GRÁFICA 1. Caso 1. Perfiles de concentración en el tejado plano del edificio EI.



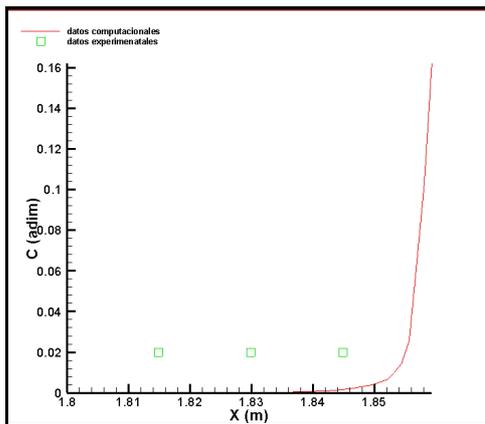
GRÁFICA 2. Caso 1. Perfiles de concentración en la fachada de sotavento del edificio EI.



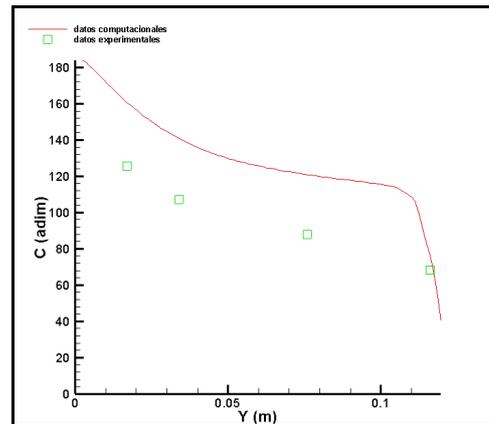
GRÁFICA 3. Caso 1. Perfiles de concentración en la fachada de barlovento del edificio EII.



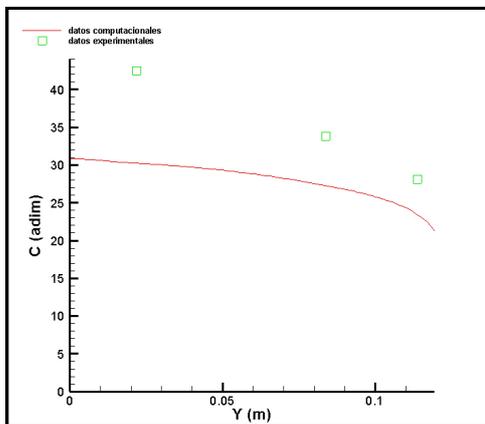
GRÁFICA 4. Caso 1. Perfiles de concentración en el tejado plano del edificio EII.



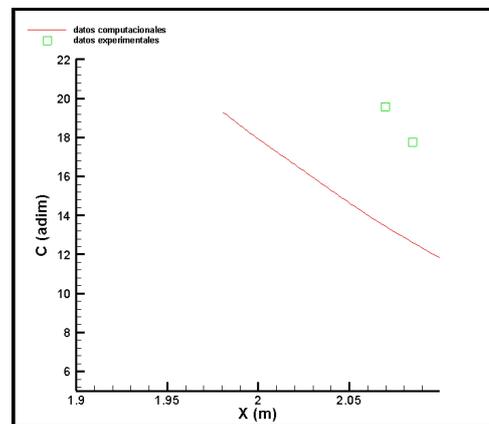
GRÁFICA 5. Caso 2. Perfiles de concentración en el tejado plano del edificio EI.



GRÁFICA 6. Caso 2. Perfiles de concentración en la fachada de sotavento del edificio EI.



GRÁFICA 7. Caso 2. Perfiles de concentración en la fachada de barlovento del edificio EII.



GRÁFICA 8. Caso 2. Perfiles de concentración en el tejado plano del edificio EII.

Sorprende la inexactitud alcanzada en la aproximación entre los resultados experimentales obtenidos por R.N Meroney, M.Pavageau, S. Rafailidis y M.Schatzmann en el túnel de viento del Instituto de Sistemas de Energía en la Universidad Tecnológica de Hamburgo, Alemania y los resultados computacionales derivados de las simulaciones así como la diferencia de un orden de magnitud entre los resultados experimentales que se muestran en la Gráfica 5 en comparación con los otros casos de estudio. Estas apreciables diferencias pueden ser debidas a las hipótesis realizadas en su origen y/o al modelo de turbulencia utilizado. Aún cuando los resultados presentados corresponden al esquema *upwind* de discretización convectiva, los resultados obtenidos con otro esquema de alto orden no han producido cambios significativos.

4.4. EDIFICIO CON CHIMENEA

Tras la comparación de los resultados obtenidos por el código con los del túnel de viento mencionado, se ha procedido a la utilización del código como herramienta de ayuda en la toma de decisiones. El objetivo buscado era la mejor colocación de una chimenea de dimensiones dadas para minimizar la concentración de contaminantes en todas las fachadas, calles y tejados aguas abajo. Paralelamente se ha realizado un estudio del efecto de la altura de las chimeneas en la dispersión de contaminantes.

Dado que el programa de trabajo es bidimensional inicialmente se simuló la chimenea como una hilera de chimeneas unidas al tejado del edificio, lo cual provocó un patrón de flujo poco realista debido a la región de recirculación adyacente. Se ha incluido en el Proyecto como muestra de situaciones en las que la altura de la chimenea fuera del mismo orden que obstáculos presentes en el tejado. Posteriormente se realizó la simulación de la chimenea como un punto de emisión de contaminante a una altura determinada sobre el tejado del edificio, permitiendo así que el flujo la rodeara.

4.4.1. Comparación de la posición relativa de la chimenea unida al tejado del edificio EI.

Se consideran los casos de estudio 3.1 y 3.2 para las distintas longitudes de chimenea unida computacionalmente al tejado del edificio EI, así como los efectos de las salidas de contaminante a ambos lados de la base de la chimenea y los efectos de las salidas verticales.

Tabla 2. Parámetros de flujo.

| Caso de estudio | Dimensiones chimenea | $U_{\infty} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ | $u_0 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ | $C_0 \left(\frac{\text{m}^3 \text{ contaminante}}{\text{m}^3 \text{ mezcla}} \right)$ |
|-----------------|---------------------------------------|---|--|--|
| 3.1 | 6mmx12mm (10% s/altura edificio) | 1 | $5 \cdot 10^{-4}$ | 1 |
| 3.2 | 6mmx42mm (33.3% s/altura edificio) | 1 | $5 \cdot 10^{-4}$ | 1 |

Donde U_{∞} es la velocidad de entrada al dominio computacional, u_0 es la velocidad de emisión del contaminante y C_0 es la cantidad de contaminante emitido.

Líneas de corriente

Para ambos casos de estudio y ambos tipos de salida de contaminante se forman vórtices intensos y contrarrotantes aguas abajo de la chimenea tanto más grandes cuanto mayor es su altura.

Contornos de concentración

Para ambos casos de estudio y a medida que la posición de la chimenea se sitúa desde la posición 1 a la 3 (ver Figura 5), las concentraciones en las paredes de sotavento y barlovento de la calle disminuyen pero se mantienen dentro del mismo intervalo de valores. Para el Caso 3.1 se obtienen menores concentraciones que para el Caso 3.2 y en ambos casos de estudio se observa que para las salidas laterales de contaminante la dispersión es más efectiva que para las salidas verticales.

Con respecto a los porcentajes de disminución o aumento en el valor de los promedios para ambos casos de estudio, son del mismo orden de magnitud pero disminuyen en menor medida para el Caso 3.1 que aumentan para el Caso 3.2 con pequeñas variaciones de valores.

4.4.2. Comparación de la posición relativa de la chimenea sin unir al tejado del edificio EI

Se consideran los casos de estudio 4.1 y 4.2 para las distintas alturas de chimenea situada computacionalmente sin unir al tejado plano del edificio EI. Se considera la emisión vertical de contaminante en ambos casos. Para el Caso 4.1 la chimenea se sitúa sobre el 25% de la altura del edificio y para el Caso 4.2 sobre el 30%.

Tabla 3. Parámetros de flujo.

| Caso de estudio | Dimensiones chimenea | $U_{\infty} \left(\frac{m}{s} \right)$ | $u_0 \left(\frac{m}{s} \right)$ | $C_0 \left(\frac{m^3 \text{ contaminante}}{m^3 \text{ mezcla}} \right)$ |
|-----------------|----------------------|---|----------------------------------|--|
| 4.1,4.2 | 3mmx6mm | 1 | $1 \cdot 10^{-3}$ | 1 |

Líneas de corriente

El obstáculo de emisión es tan pequeño que para ambos casos de estudio las líneas de corriente bordean al punto de emisión sin modificar su trayectoria ni formar vórtices tras él.

Contornos de concentración

Para ambos casos a medida que la chimenea se posiciona desde la posición 1 a la 3 (ver Figura 5), las concentraciones en las paredes de sotavento y barlovento de la calle aguas arriba y

aguas abajo del punto de emisión disminuyen de forma gradual. Para el Caso 4.2 se obtienen menores concentraciones que para el Caso 4.1.

Con respecto a los porcentajes de disminución o aumento en el valor de los promedios calculados al pasar del Caso 4.1 al Caso 4.2 éstos disminuyen.

4.4.3. Comparación de la chimenea unida al tejado del edificio E1 con la chimenea sin unir

Se consideran los casos de estudio correspondientes a las distintas posiciones de la chimenea unida computacionalmente al tejado (casos 3.1 y 3.2) y sin unir (casos 4.1 y 4.2), con salidas verticales de contaminante. Para el Caso 3.1 la chimenea se sitúa sobre el 10% de la altura del edificio, para el Caso 3.2 sobre el 33%, para el Caso 4.1 sobre el 25% y para el Caso 4.2 sobre el 30%.

Tabla 4. Parámetros de flujo.

| Casos de estudio | Dimensiones chimenea | $U_{\infty} \left(\frac{m}{s} \right)$ | $u_0 \left(\frac{m}{s} \right)$ | $C_0 \left(\frac{m^3 \text{ contaminante}}{m^3 \text{ mezcla}} \right)$ |
|--------------------|----------------------|---|----------------------------------|--|
| 3.1, 3.2, 4.1, 4.2 | 6mm | 1 | $1 \cdot 10^{-3}$ | 1 |

Casos 3.1 y 4.1

Líneas de corriente

Para el Caso 3.1 se forman vórtices contrarrotantes e intensos que desestabilizan el flujo aguas abajo del punto de emisión mientras que para el Caso 4.1 las líneas de corriente engloban al punto de emisión y lo rodean sin desestabilizarse.

Contornos de concentración

Para el Caso 3.1 el penacho del contaminante es mayor y llega a expandirse hasta la calle inmediatamente aguas abajo que para el Caso 4.1 en el que el contaminante tarda menos en dispersarse y el penacho es mucho más pequeño. Además para el Caso 4.1 en la calle aguas arriba de la chimenea, se alcanzan menores valores de concentraciones en las fachadas de sotavento y barlovento que para el Caso 3.1.

Casos 3.2 y 4.2

Líneas de corriente

Para el Caso 3.2 se forman vórtices intensos y contrarrotantes, que desestabilizan el flujo aguas abajo del punto de emisión, mayores que para el Caso 3.1, mientras que para el Caso 4.2 al igual que para el Caso 4.1 las líneas de corriente engloban al punto de emisión y lo rodean sin desestabilizarlo.

Contornos de concentración

Para el Caso 3.2 el penacho es mayor que para el Caso 3.1 y llega a expandirse hasta la calle inmediatamente aguas abajo. Para el Caso 4.2 la forma del penacho es menor que para el Caso 4.1. Para el Caso 4.2 tanto en la calle aguas arriba como aguas abajo del punto de emisión se alcanzan menores valores de concentración en las paredes de sotavento y barlovento que para el Caso 3.2.

Para ambos casos de estudio la dispersión de contaminantes es casi idéntica al pasar de las posiciones de las chimeneas unidas computacionalmente al tejado a las posiciones sin unión.

4.4.4. Comparación de Caso 5 con Caso Base

Se toma como Caso de referencia o Caso Base, el Caso 4.2 con la chimenea situada sobre el 30% de la altura del edificio EI, por ser el que menores valores presenta en relación a los diferentes parámetros calculados.

El Caso 5 engloba al conjunto de edificios puestos en serie en el que el edificio EII presenta una altura de un 10.5% superior a todos los demás.

Tabla 5. Parámetros de flujo.

| Casos de estudio | Dimensiones chimenea | $U_{\infty} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ | $u_0 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ | $C_0 \left(\frac{\text{m}^3 \text{ contaminante}}{\text{m}^3 \text{ mezcla}} \right)$ |
|------------------|----------------------|---|--|--|
| Caso Base,5 | 3mm | 1 | $1 \cdot 10^{-3}$ | 1 |

Líneas de corriente

Para ambos casos las líneas de corriente siguen la misma tendencia, engloban al punto de emisión sin modificar su trayectoria aguas abajo del campo fluido.

Contornos de concentración

Para ambos casos las concentraciones en las fachadas de sotavento y barlovento para la calle aguas arriba y aguas abajo del punto de emisión siguen la misma tendencia: disminuyen en toda su longitud desde la posición 1 a la 3. El efecto del aumento de altura en el edificio EII al punto de emisión ocasiona que para la posición 2 la dispersión del contaminante hacia valores inferiores englobe parte de la calle aguas abajo lo que no ocurre con la misma posición para el Caso Base. En las restantes posiciones su efecto no es notorio.

Se observa que la dispersión del contaminante es similar en ambos casos acorde al valor de los promedios calculados y a sus porcentajes de diferencia que no superan el 10%.

4.5. ESTUDIO COMPUTACIONAL DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN A LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

Se trata de discernir cuáles son las condiciones óptimas de funcionamiento para las variables que gobiernan la dispersión de contaminantes en calles encajonadas y edificios con chimenea con el fin de garantizar una mejor ventilación natural en el entorno de los mismos.

En orden a analizar el efecto tanto cuantitativo como cualitativo que causa cada una de las variables sobre la dispersión, se estudia de forma independiente su influencia sobre el ratio

C_{adim} .

Los resultados procedentes de las simulaciones para cada caso de estudio planteado se presentan en forma de patrones de distribución de líneas de corriente de velocidad, gráficas de concentraciones en las fachadas de los edificios, tablas numéricas para los promedios calculados y tablas resumen.

Se estudia entonces la siguiente dependencia:

$$C_{\text{adim}} \equiv K_{\text{computacional}} = \frac{C}{Q} = f(\varphi)$$

Donde:

- $C_{\text{adim}} \equiv k$: ratio adimensional.
- C : concentración volumétrica (C_v) $\left(\frac{\text{m}^3_{\text{contaminante}}}{\text{m}^3_{\text{mezcla}}} \right)$.
- Q : fuerza o caudal de contaminante $\left(\frac{\text{m}^3_{\text{contaminante}}}{\text{s}} \right)$.
- φ : representa a todas aquellas variables en base a las que se establece la dependencia.

Tipología de edificios

Se estudian dos disposiciones de los edificios EI y EII que atienden a la configuración de *step-up*, la cual se da cuando el punto más alto del edificio EI está por debajo de la esquina más aguas arriba del edificio EII o cuando el punto más alto del edificio EI está al mismo nivel que la esquina más aguas arriba del edificio EII.

Disposición de edificios aguas arriba de la calle encajonada

Disponer más edificios aguas arriba de la calle disminuye la ventilación natural de la misma porque la velocidad a la que llega el fluido al edificio que forma parte de la calle en estudio es ligeramente menor que si estuviera directamente enfrentado al flujo incidente. En consecuencia la menor ventilación aumenta el nivel de concentración del contaminante retenido en el interior de la calle.

Altura de los edificios

No existe una dependencia muy fuerte entre la variación de la altura de los edificios sobre las concentraciones. Un aumento en la altura del edificio EII provoca, normalmente un ligero aumento en el nivel de concentración en las fachadas de los edificios EI y EII que forman la calle.

Altura de la chimenea y salida de contaminante

A mayor altura de chimenea y salida vertical de contaminante mejor es su dispersión, esto es así porque la evacuación del contaminante hacia afuera de la chimenea es mayor y menor nivel de concentración cabe esperar a su alrededor ya que la ventilación del contaminante está regida exclusivamente por la turbulencia de la corriente principal de aire, sin embargo, es independiente del número de Reynolds asociada a ella, para el rango de números de Reynolds del flujo estudiado.

Posición de la chimenea

Para los casos de estudio 3.1 y 3.2, a medida que la chimenea se posiciona desde la posición 1 hasta la 3 (ver Figura 5) las concentraciones en las fachadas de los edificios EIII y EI de la calle aguas arriba del punto de emisión disminuyen pero aumentan en las fachadas de los edificios de EII y EIV que forman la calle aguas abajo. Lo opuesto ocurre para los casos de estudio 4.1, 4.2 y 5 para los que, a medida que la chimenea se posiciona desde la posición 1 a la 3, las concentraciones en las fachadas de los edificios EIII y EI, EII y EIV para ambas calles disminuyen. Esto es así porque el perfil del penacho queda determinado por la disposición de la chimenea, su forma está sujeta al flujo transversal que viene y se expande de tal forma que los contaminantes se dispersan aguas abajo de forma mucho más efectiva.

5. CONCLUSIONES

5.4. CONCLUSIONES

Éstas son algunas de las conclusiones que pueden extraerse del presente estudio acerca de las variables que gobiernan la dispersión de contaminantes para calles encajonadas y edificios con chimenea:

Calles encajonadas

Dos edificios

Para el Caso 1 se establecen tres vórtices intensos y contrarrotantes, el primero de ellos encima del tejado plano del edificio EI justo en la esquina que está más aguas arriba, el segundo en el interior de la calle y el tercero tras el último edificio EII. El primero de ellos provoca una convección de los gases que provienen del interior de la barranca sobre el tejado antes de ser transportado hacia la corriente principal, el segundo transporta al contaminante emitido por la fuente emisora a nivel de suelo mayoritariamente y hacia la fachada del edificio EI conduciendo a su vez en la parte superior de la calle el aire no contaminado de la corriente principal al interior de la misma, y por último del tercero disminuye las concentraciones de la fachada de barlovento del edificio EII y dispersa al contaminante aguas abajo.

Más de dos edificios aguas arriba

A diferencia del Caso1 para el Caso 2 no se forma ningún vórtice encima del tejado del edificio EI, esto hace que la concentración del contaminante sobre el tejado del edificio EI sea prácticamente nula como se observa gráficamente en los resultados

El vórtice de la calle entre los edificios EI y EII es más estable que en el anterior caso y suprime el intercambio vertical de contaminante con el exterior, por lo que éste queda atrapado en el interior por más tiempo. Esta estructura se hace tanto más estable cuantos más edificios aguas arriba se disponen, disminuyendo en igual medida la ventilación natural dentro de la calle y aumentando por tanto el nivel de contaminante retenido en el interior de la misma.

Edificio con chimenea

Para todos los casos de estudio el perfil del penacho queda determinado mayoritariamente por la disposición de la chimenea, su forma está sujeta al flujo transversal que viene y se expande de tal forma que los contaminantes se dispersan aguas abajo. La chimenea es más efectiva cuanto mayor es su altura y además la salida vertical de contaminante es mejor que la lateral puesto que se alcanzan menores niveles de concentración en la calle encajonada aguas arriba y los niveles de concentración en la calle aguas abajo disminuyen.

A continuación se concluyen las siguientes posiciones óptimas para los siguientes apartados:

Chimenea unida computacionalmente al tejado plano del edificio EI : la situación óptima se obtiene para el Caso 3.2 con salida lateral de contaminante y posición 2 de chimenea

Chimenea sin unir computacionalmente al tejado del edificio EI : la situación óptima se obtiene para el Caso 5 con salida vertical de contaminante y posición 3 de chimenea.

Obsérvese que lo anterior está relacionado con la posición de la rejilla de emisión, pero no lo está con la componente vertical de cantidad de movimiento que siempre es muy pequeña.

Influencia de la altura de los edificios

De acuerdo a lo obtenido para el Caso 5 se observa que a pesar de no albergar gran diferencia entre los valores de concentración de las fachadas de los edificios EI y EII que dan a la calle la fachada del edificio EII posee una concentración ligeramente menor que la de la fachada del edificio EI. Esto es así porque la componente mayoritaria del vector velocidad en la región inferior de la calle, donde el vórtice se genera en el sentido de las agujas del reloj, tiene un valor negativo. Por otro lado, la velocidad en la parte superior de la calle es positiva y tiene una gran componente rotacional, por lo que puede transportar a los contaminantes fuera de la misma, desde la región de barlovento, esto causa por tanto que la concentración de contaminante en la región de sotavento sea mayor que la concentración de contaminante en la región de barlovento en la zona más elevada de la calle. Estas circunstancias permiten que la dispersión del contaminante sea causada únicamente por el flujo vertical principal y por el flujo vertical turbulento de la velocidad desde la calle encajonada hacia la zona de superficie libre.

Para finalizar este apartado se concluye que el código utilizado basado en el método $k - \epsilon$ estándar, desarrollado por el Área de Mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingenieros y Arquitectos de la Universidad de Zaragoza, proporciona para los casos de estudio en calles encajonadas, resultados numéricos aproximados a sus experimentales correspondientes a los obtenidos en los ensayos en túnel de viento obtenidos por R.N Meroney, M.Pavageau, S. Rafailidis y M.Schatzmann en el Instituto de Sistemas de Energía en la Universidad Tecnológica de Hamburgo, Alemania, además de ser una herramienta imprescindible para la interpretación del comportamiento del contaminante emitido por una chimenea en flujo real.

En cuanto a las variables que afectan a la dispersión de contaminantes, en líneas generales y en base a los resultados computacionales obtenidos en este proyecto se puede concluir que éstos están de acuerdo con otros numerosos estudios teóricos y experimentales realizados anteriormente.

5.5. TRABAJO FUTURO

Una posible vía de investigación puede establecerse en base a las siguientes consideraciones:

- Estudio del caso para diferentes tejados.
- Estudio del caso para diferentes alturas de edificios.
- Estudio del caso en código 3D.

5.6. EQUIPO UTILIZADO

Número de unidades: 1.

CPU: AMD A6-3650 2.6 GHz 4 núcleos.

RAM: 8GB.

Disco duro: 500GB.

En total se han llevado a cabo cerca de 100 simulaciones con una media de 20000 iteraciones cada una en mallas de más de 10000 nodos. El tiempo de cómputo total ha sido de aproximadamente de 1440 horas.

Para más información: judithjica@gmail.com

6. BIBLIOGRAFÍA

Calles encajonadas

- [1] R.N. Meroney, M.Pavageau, S.Rafailidis and M.Schatzmann. *“Summary for the emissions in street canyons”*. 1996.
- [2] Yuandong Huang, Xiaonan Hu, Ningbin Zeng. *“Impact of wedge-shaped roofs on airflow and pollutant dispersion inside urban street canyons”*. Building and Environment 44 (2009) 2335-2347.
- [3] Georgios Theodoridis and Nicolas Moussiopoulos. *“Influence of building density and roof shape on the wind and dispersion characteristics in an urban area: a numerical study”*. Environmental Monitoring and Assessment 65: 407-415, 2000.
- [4] Mohamed F.Yassin. *“Impact of height and shape of building roof on air quality in urban street canyons”*. Atmospheric Environment 45 (2011) 5220-5229.
- [5] A.McNabola, B.M.Broderick, L.W.Gill. *“A numerical investigation of the impact of low boundary walls on pedestrian exposure to air pollutants in urban street canyons”*. Science of the total environment 407 (2009) 760-769.
- [6] P.Kastner-Klein, E.J. Plate. *“Wind-tunnel study of concentration fields in street canyons”*. Atmospheric Environment 33 (1999) 3973-3979.
- [7] Jae-Jin Kim, Jong-Jin Baik. *“Effects of inflow turbulence intensity on flow and pollutant dispersion in an urban street canyon”*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 (2003) 309-329.
- [8] Cheng-Hsing Chang, Robert N.Meroney. *“Concentration and flow distributions in urban street canyons: wind tunnel and computational data”*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 (2003) 1141-1154.

Edificio con chimenea

- [9] I.Bhouri Baouabe, H.Bournot, N.Mahjoub Saïd, H.Mhiri, G.Le.Palec. *“Experimental and numerical analysis of the jet dispersion from a bent chimney around an obstacle”*. Heat Mass Transfer (2011) 323-342.
- [10] K.J.Craig, D.J.De Rock and J.A.Snyman. *“Using CFD and mathematical optimization to investigate air pollution due to stacks”*. International Journal for numerical methods in engineering 44 (1999). 551-565.
- [11] K.Kushioka, T.Ito, A.Honda, K.Hirao. *“Prediction by discrete vortex method of aerodynamic forces on smokestacks of various cross sections”*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 65 (1996). 309-319.

