

## VALIDACIÓN DE MODELOS DE VENTILACIÓN EN METROS Y TÚNELES FERROVIARIOS

Ana Belén Amado García  
ZITRON

**Resumen:** La precisión en los cálculos teóricos para obras subterráneas se vuelve más y más importante para el diseño eficaz de los sistemas de emergencia como es el caso de la ventilación. Es por eso que cuando algunos circuitos de ventilación requieren un análisis especial se utiliza una de las tecnologías actuales más avanzadas, la simulación tridimensional basada en la Mecánica de Fluidos Computacional, cuya denominación más extendida es CFD.

La estación de metro Uskudar West en Estambul (Turquía) y el túnel ferroviario del aeropuerto de Málaga (España) son dos de los muchos casos que ZITRON ha diseñado, evaluado y validado por medio de este tipo de herramienta.

**Palabras clave:** Seguridad, incendios, túneles, prevención, ventilación.

**Abstract:** The accuracy is the theoretical calculations for underground works turns more and more important for the effective design of emergency systems, like ventilation. That is why when some ventilation circuits need a special analysis one of the most advanced current technologies is used- the three dimensional simulation based on the Computational Mechanics of Fluids. Its more widespread name is CFD.

The Uskudar metro station in Istanbul, Turkey, and the railway tunnel in Málaga airport, Spain, are two of the many cases that ZITRON has designed, evaluated and validated by means of this type of tool.

**Keywords:** Safety, fires, tunnels, prevention, ventilation.

## 1. ZITRON

Situada en Gijón (Asturias) y con presencia en los cinco continentes, ZITRON ha logrado situarse como una de las primeras compañías europeas de diseño de equipos de ventilación para minería subterránea y obras públicas.

Una experiencia de más de cuarenta años y un alto nivel de competencia tecnológica unido a un profundo conocimiento del sector en el que actuamos, es la base sobre la que hemos construimos nuestro negocio.

ZITRON ha desarrollado importantes proyectos de sistemas de ventilación para túneles, carreteros y ferroviarios, metros, minas y centrales hidroeléctricas en todo el mundo



## 2. CFD (Computational Fluid Dynamics)

Estas siglas provienen de la lengua inglesa y su significado es “Computational Fluid Dynamics”. Se trata de una rama de la Mecánica de Fluidos que mediante métodos numéricos y algoritmos analiza y soluciona problemas en los que están involucrados fluidos.

La mecánica de fluidos computacional como se conoce hoy en día nació en la década de los 60, aunque sus primeros éxitos empezaron a publicarse en los 70. La industria de servicios asociada a esta ciencia apareció a principios de los 80 alcanzando su máxima expansión en los 90 gracias al avance de la industria de los ordenadores.

Los paquetes de CFD existentes en el mercado son lo suficientemente potentes y relativamente fáciles de utilizar como para que resulte rentable su utilización a nivel industrial.

ZITRON utiliza este software en todos aquellos circuitos de ventilación en los que las soluciones teóricas son impredecibles, o bien cuando las condiciones son difíciles de simular experimentalmente o en situaciones peligrosas (incendios).

Con este tipo de software se puede simular el modelo o sistema de ventilación que se pretende estudiar y aplicando las ecuaciones de la Dinámica de Fluidos a este prototipo virtual se obtiene una predicción del comportamiento del fluido y sus fenómenos físicos.

Hay tres razones de peso para el empleo de este tipo de programas:

**Visualización:** En el caso de que se trate de un sistema de ventilación de difícil acceso, la simulación permite evaluar el comportamiento del fluido dentro del diseño. El CFD permite obtener una visión más profunda de los modelos simulados.

**Previsión:** El CFD es una herramienta para predecir que va a pasar bajo un determinado conjunto de circunstancias. En relativamente poco tiempo, se pueden realizar muchas variaciones de estas circunstancias hasta llegar a un resultado óptimo.

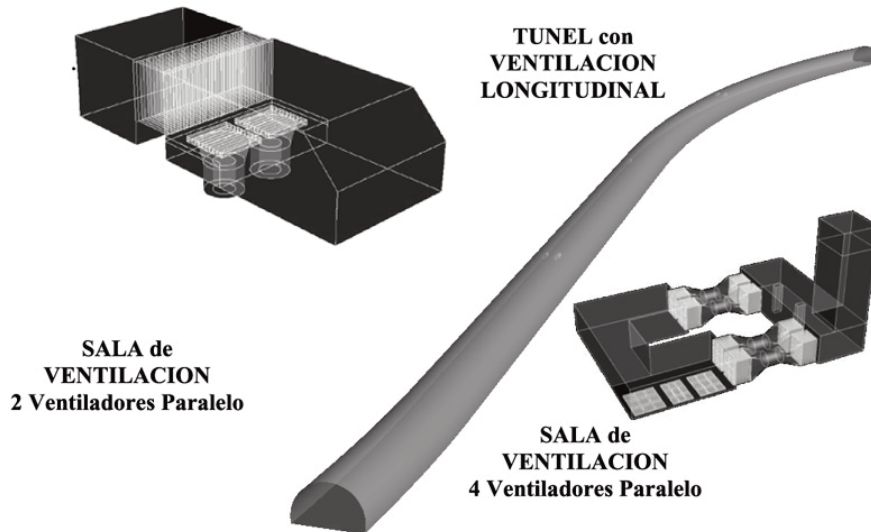
**Eficiencia:** La previsión que se gana con el CFD ayuda a diseñar mejor y más rápido, ahorrar dinero y garantizar el cumplimiento de determinadas condiciones. El análisis por medio de CFD permite ciclos de diseño más cortos y mayor rapidez a la hora de realizar estudios de ventilación que puedan tener muchas variantes.

Hay tres etapas esenciales para cada proceso de simulación por CFD, estas son las siguientes:

**Preproceso:** Es el primer paso de la construcción y análisis de un modelo numérico, a su vez se subdivide en los siguientes pasos:

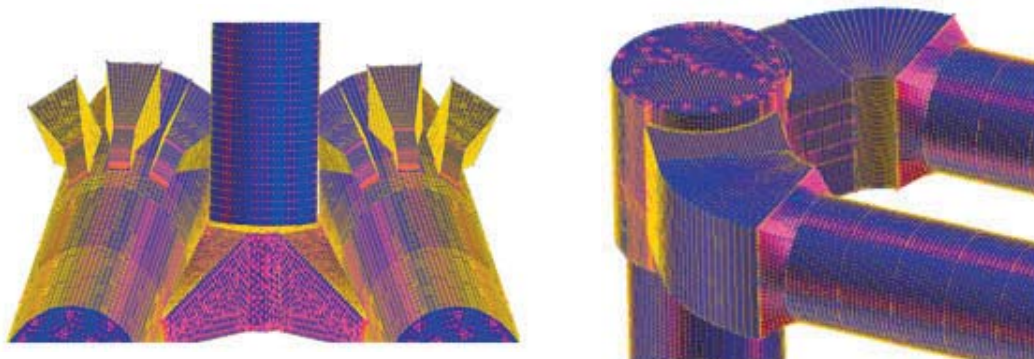
**1. Diseño:** se logra con una herramienta de dibujo integrada en el software CFD. Básicamente, se trata de definir a través de un grupo de superficies los confines del espacio, es decir, todos los elementos de la arquitectura del sistema según se muestra en Figura 1. Cuanto más se aumente el ámbito y la complejidad de esta

representación, mayor es el coste de la modelización CFD, tanto en un mayor esfuerzo durante el establecimiento del problema en el entorno del ordenador, como en la cantidad de recurso de ordenador (potencia y tiempo de procesador) necesario para producir una respuesta



**Figura 1.** Diferentes diseños para distintos sistemas de ventilación

**2. Mallado:** el volumen del dominio computacional se divide en pequeños dominios llamados celdas del mallado como se observa en la Figura 2 donde se resolverán las ecuaciones diferenciales. El mallado tiene que representar la forma geométrica del recinto y construirse para permitir la resolución adecuada de los rasgos principales del flujo. El proceso de creación de un mallado puede exigir realizar diversos intentos hasta llegar a crear un mallado aceptable.

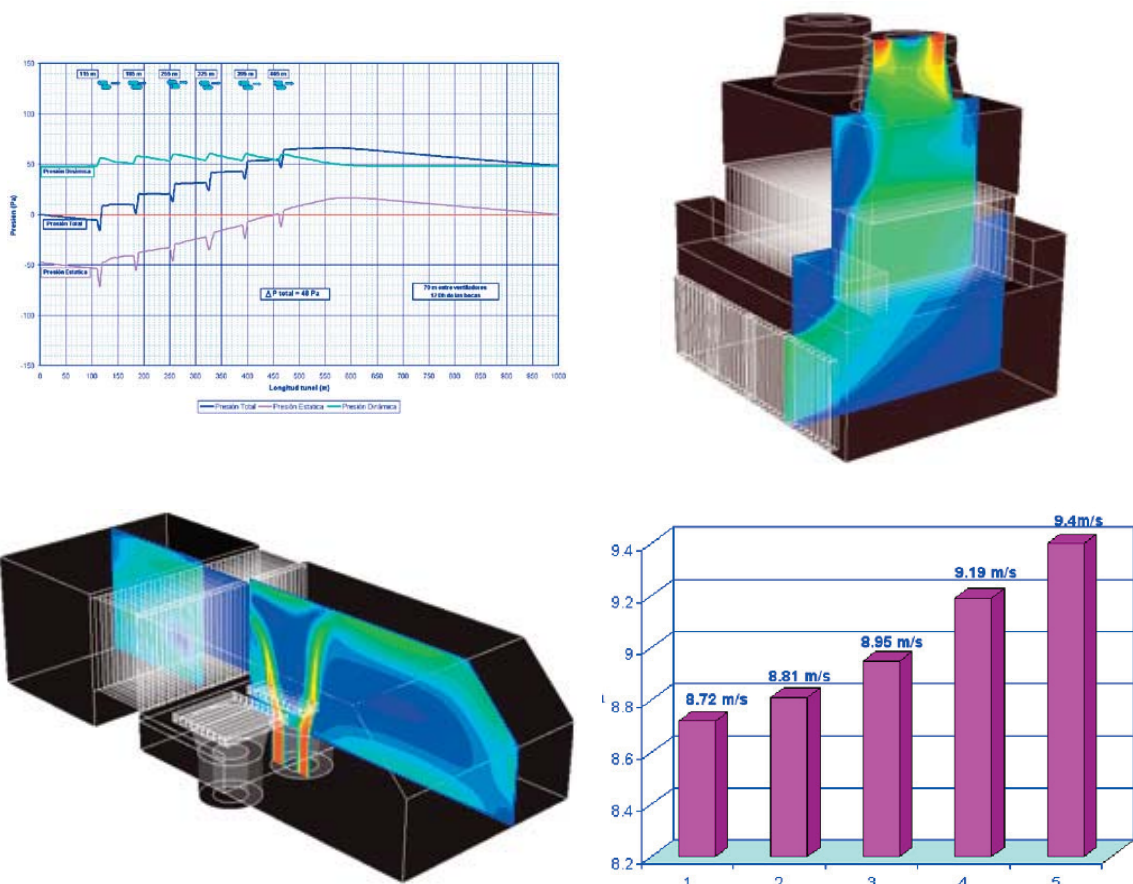


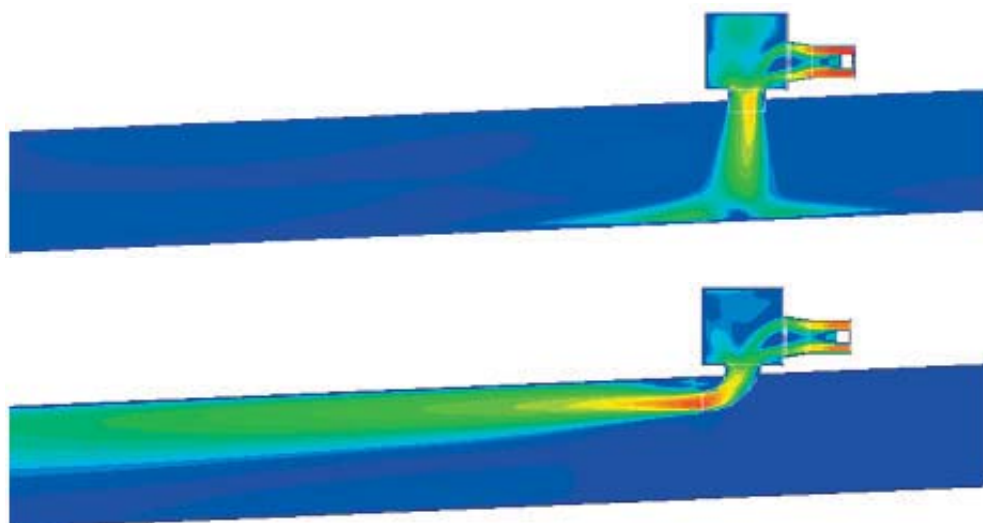
**Figura 2.** Diferentes mallados para distintos sistemas de ventilación

**3. Condiciones de contorno:** se imponen los valores de ciertas variables en los límites del dominio: paredes, entradas, salidas...etc. De igual forma hay que imponer condiciones para las variables de turbulencia existentes, según el modelo que se este utilizando. Así mismo se debe incluir cualquier mecanismo que influya en la conducta del flujo aunque sea externo (puertas, ventanas, huecos...etc.)

**Resolución:** Consiste en la transformación de un grupo de ecuaciones diferenciales continuas que describen la física del problema en un sistema de ecuaciones aproximadas para el cual se puede obtener una solución mediante algoritmos iterativos.

**Postproceso:** Para el análisis de la gran cantidad de resultados obtenidos es necesario el uso de un post-procesador. Se trata de un software capaz de leer el fichero que contenga los resultados de una simulación y convertirlos en imágenes, gráficos y animaciones, como se muestra en la Figura 3.





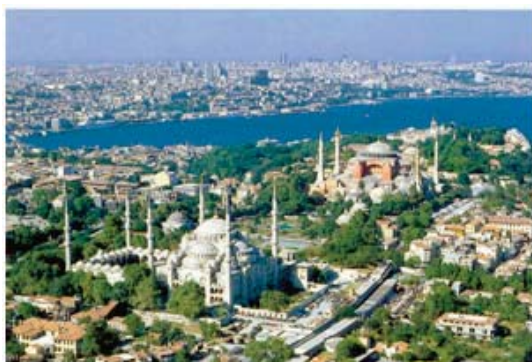
**Figura 3.** Imágenes y gráficos obtenidos del postproceso para distintos sistemas de ventilación

### 3. Aplicaciones CFD en metros y túneles ferroviarios

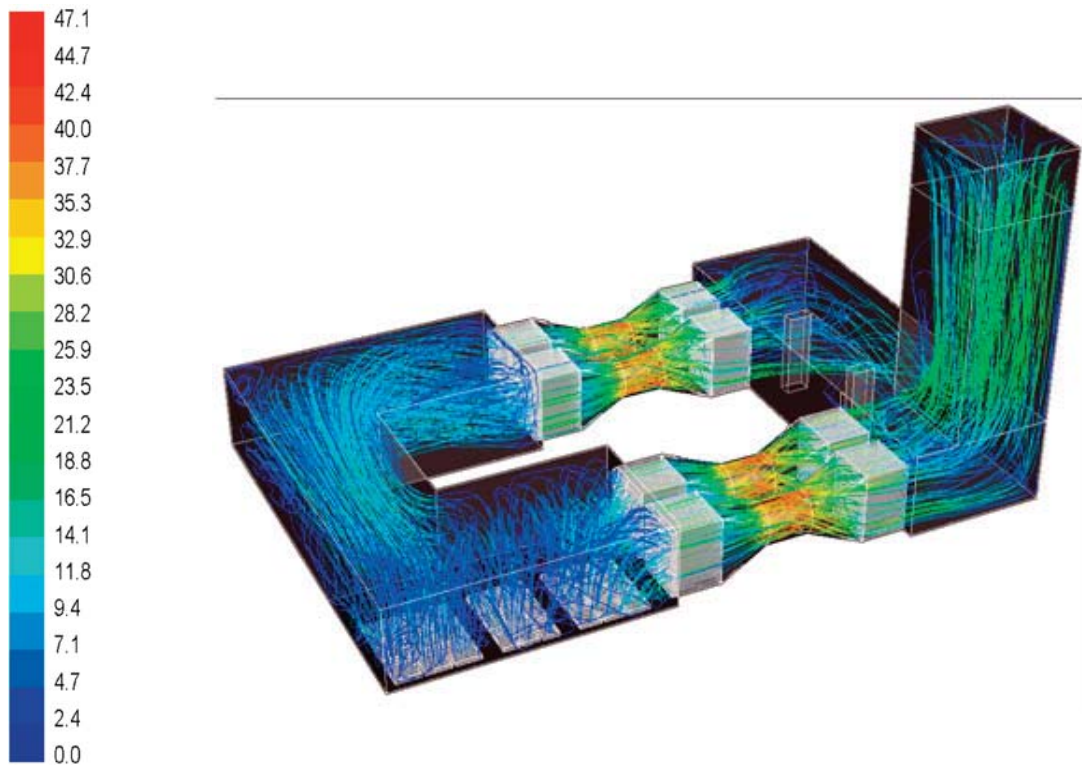
En toda simulación CFD de fenómenos físicos y químicos, la validación de los resultados es un aspecto clave para determinar la validez de la misma. Para poder realizar dicha validación es necesario disponer de medidas experimentales obtenidas en el lugar objeto de la simulación. A continuación vamos a exponer dos casos reales en los que se ha utilizado esta herramienta y su posterior validación.

#### *CASO 1 - ESTACION de METRO USKUDAR*

Esta estación de metro se encuentra en Estambul (Turquía). En este caso se trataba de evaluar a través de CFD las pérdidas generadas por el circuito para poder diseñar de forma correcta los ventiladores necesarios en la estación.



El circuito de ventilación esta compuesto de cuatro ventiladores en paralelo, además de múltiples accesorios como dampers, difusores, silenciadores de baffles, también bifurcaciones y varios codos según se observa en la Figura 4 .Debido a esta complejidad y a que generalmente los cálculos teóricos no predicen las zonas de recirculaciones se recurrió al uso de CFD para realizar el calculo de las perdidas de carga generadas en el circuito y elegir el perfecto diseño de los ventiladores para esta estación.



**Figura 4.** Trayectorias de velocidad en la simulación para la estación Uskudar

Posteriormente se realizo la puesta en marcha y medición de los caudales circulantes y presiones generadas por el circuito verificando la validación de los resultados alcanzados en la simulación.



## CASO 2 - TUNEL LA LINEA GUADALHORCE-AEROPUERTO

Este túnel se encuentra localizado en Málaga comunicando la estación bajo el Aeropuerto con la estación de Guadalhorce. Se trata de un túnel de 2900 m en curvatura y en el que se pueden distinguir varias zonas, como se muestra en la Figura 5.

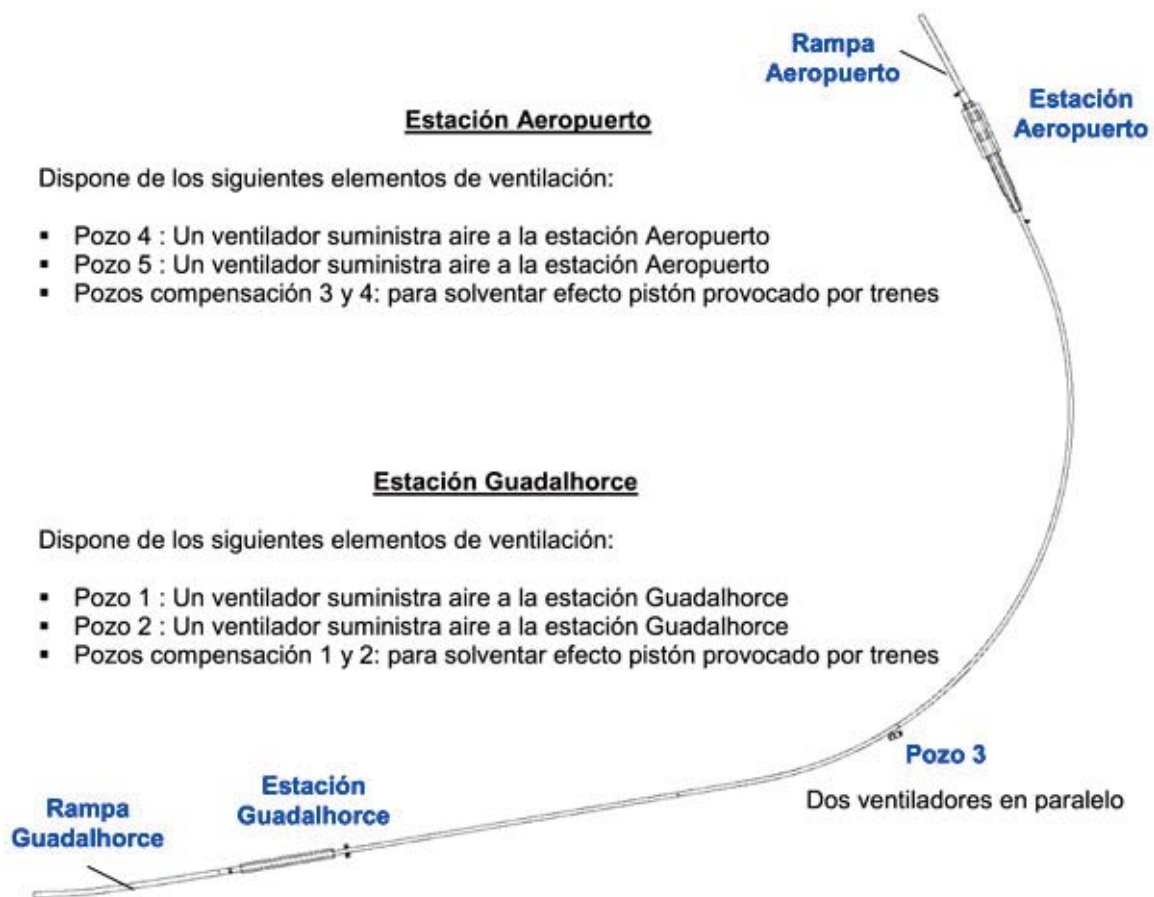


Figura 5. Vista en planta del túnel completo

En los cálculos de ventilación realizados para este túnel se barajaron varios escenarios de incendio

**Escenario 1** - Incendio en túnel entre estación Guadalhorce y Pozo 3

**Escenario 2** - Incendio en túnel entre Pozo 3 y Estación Aeropuerto

**Escenario 3** - Incendio en Rampa Guadalhorce

**Escenario 4** - Incendio en Rampa Aeropuerto



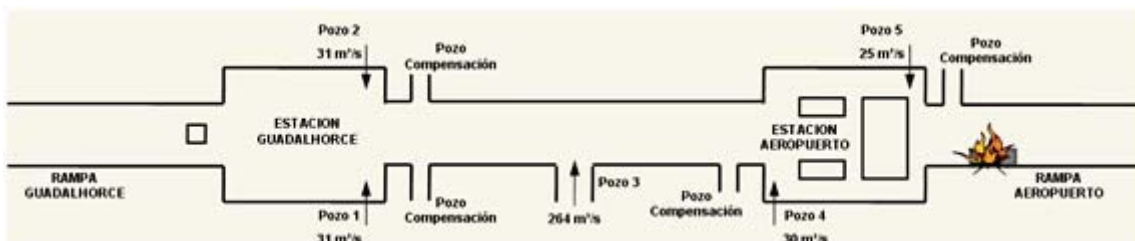
El objetivo al utilizar la herramienta CFD era verificar que los cálculos teóricos realizados y la ventilación diseñada eran los adecuados para este túnel, asegurando la velocidad crítica en la zona de incendio.

La velocidad crítica es la mínima velocidad longitudinal necesaria para evitar que los humos se vayan aguas arriba del incendio (lado de ventilación), esta se calcula a través de una fórmula matemática que depende de las características del túnel (sección, pendiente, altura túnel, potencia incendio...etc.). Se muestra la expresión más utilizada para el cálculo de la velocidad crítica.

$$v_c = K_1 K_2 \left[ \frac{gHQ}{\rho_\infty C_p A \left( \frac{Q}{\rho_\infty C_p A v_c} + T_\infty \right)} \right]^{1/3}$$

En caso de que el incendio se localizase en el túnel se debería conseguir una velocidad crítica de 2.6 m/s en el túnel, mientras que para el caso de que el incendio se localice en una rampa se debería tener en esa rampa una velocidad de 2.3 m/s

Tras realizar las simulaciones del túnel completo correspondiente a los diferentes escenarios, el único problema lo planteo el Escenario 4 que no cumplía con la velocidad crítica en rampa con las condiciones establecidas en el diseño inicial.



La Figura 6 muestra el reparto de caudales tras la simulación, pudiendo observarse como la velocidad crítica en la zona de la rampa de Aeropuerto no se cumple.



Figura 6. Esquema de resultados de simulación Escenario Incendio en Rampa Aeropuerto

Esto era debido a que pese a todo el caudal suministrado por los ventiladores del Pozo 3 y los ventiladores de las estaciones no se conseguía hacer circular el aire necesario por la rampa ya que la mayor parte de este se desviaba hacia la zona superior de la Estación Aeropuerto como se muestra con las trayectorias de flujo de la simulación.

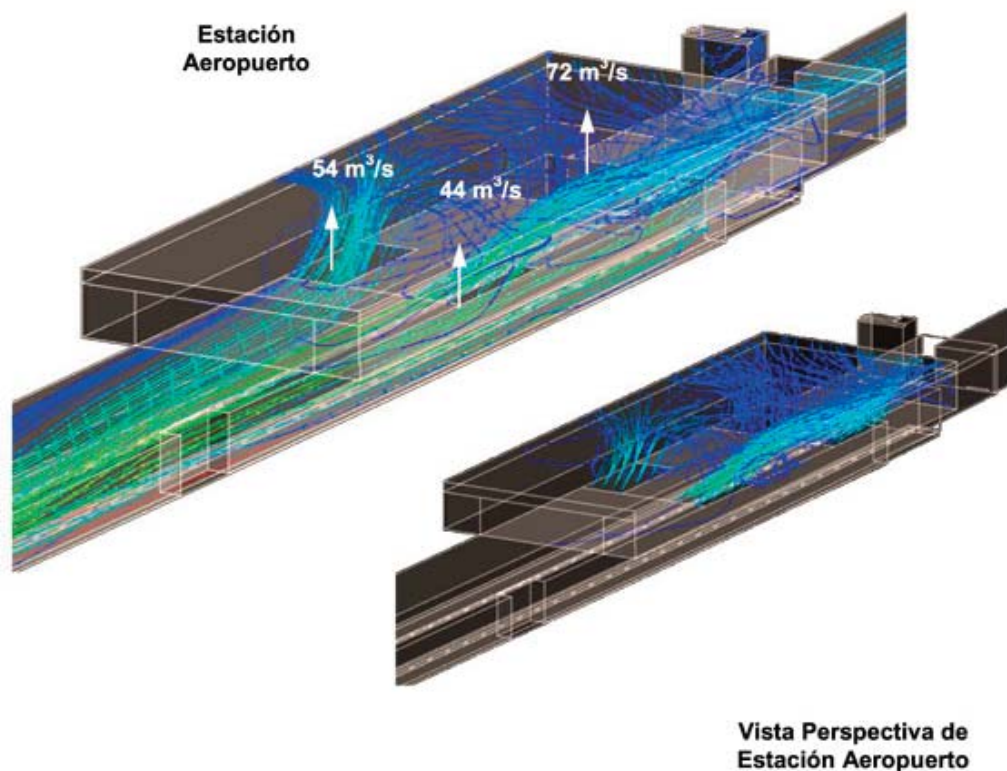


Figura 7. Trayectorias de flujo de salida por los huecos de la estación

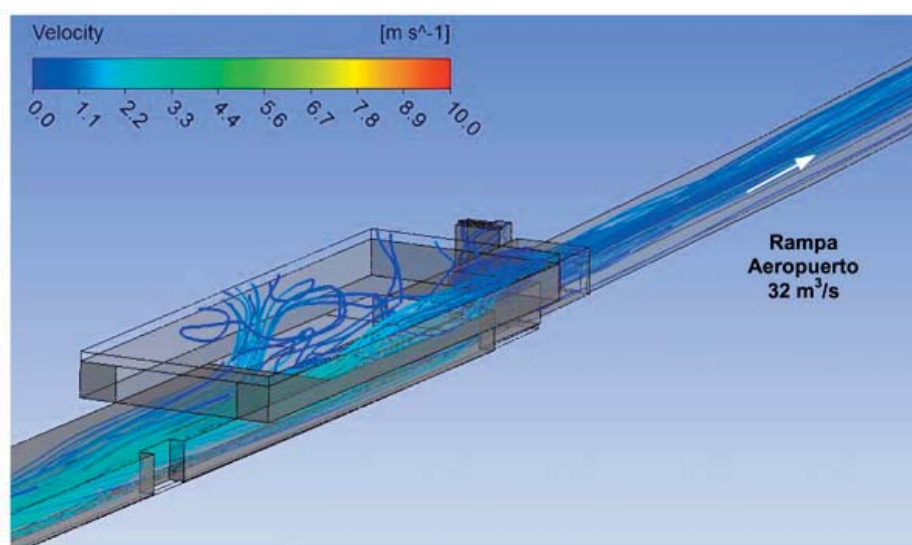
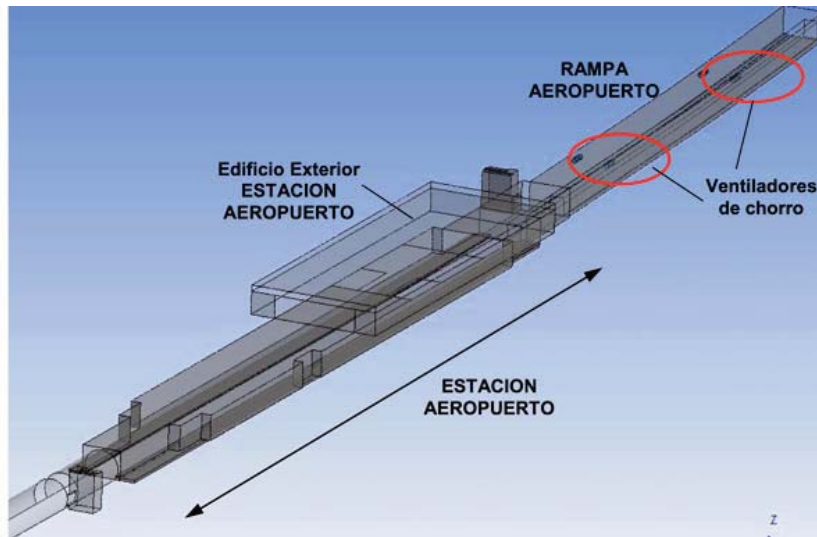


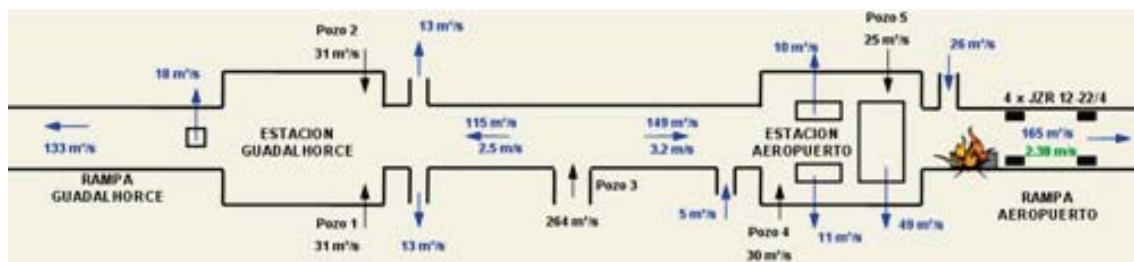
Figura 8. Trayectorias de flujo en Edificio Estación y Rampa Aeropuerto

Para solventar este problema se recurrió al uso de ventiladores de chorro, colocados en las rampas según se observa en la Figura 9. Estos debido a su disposición logran mover el aire necesario por la rampa Aeropuerto y evitan que se fugue parte del caudal que antes se filtraba por los huecos de la estación, desplazando este a la rampa y aumentando la velocidad conseguida en esa zona.



**Figura 9.** Localización de ventiladores de chorro en Rampa Aeropuerto

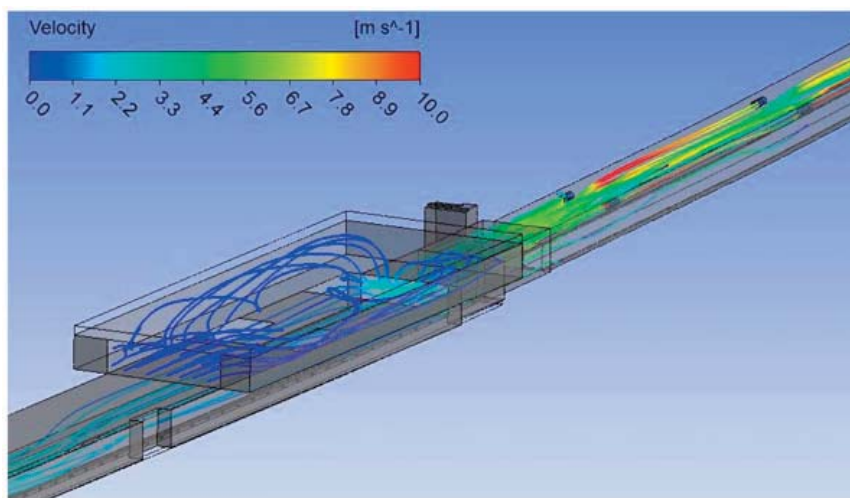
El esquema siguiente Figura 10 muestra el reparto de caudales tras la simulación, pudiendo observarse como la velocidad crítica en la zona de la rampa de Aeropuerto si se cumple con la ayuda de los ventiladores de chorro.



**Figura 10.** Esquema de resultados de simulación con ventiladores de chorro en Rampa Aeropuerto

El funcionamiento de los ventiladores de chorro se basa en el principio de la transmisión de la cantidad de movimiento, donde una parte de la totalidad del aire que circula por la sección del túnel es aspirada por los ventiladores de chorro e impulsada a continuación con una energía cinética elevada. Esta porción comunica un impulso al resto del aire, que se desplaza también en dirección longitudinal hacia la boca de salida del túnel.

En la Figura 11 se muestra el aumento de velocidad en la rampa de Aeropuerto cuando los ventiladores de chorro están operativos.



**Figura 11.** La velocidad se incrementa en la Rampa Aeropuerto con el uso de ventiladores de chorro.

#### 4. Conclusiones

En este informe se aprecia la importancia del cálculo con programas CFD así como su validación posterior in situ, ya que resultan muy útiles para la buena definición de los sistemas de ventilación.

En el caso de la Estación de Metro de Estambul para el mejor dimensionamiento de los ventiladores del sistema y en el caso del Túnel entre la Estación Guadalhorce y la Estación Aeropuerto de Málaga para evitar que un diseño de ventilación insuficiente en un escenario de incendio provoque un fallo posterior en el sistema.