

2013

CONTRIBUCIÓN A LA APLICACIÓN
DE LAS REDES INALÁMBRICAS DE
SENSORES (WSN's) EN PROBLEMAS
DE MODELOS DE DISPERSIÓN DE
GASES BASADOS EN TÉCNICAS DE
DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONALES (CFD) EN
APLICACIONES AGRÍCOLAS Y
AMBIENTALES

September 23, 2013





UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**CONTRIBUCIÓN A LA APLICACIÓN DE LAS REDES
INALÁMBRICAS DE SENSORES (WSN's) EN PROBLEMAS DE
MODELOS DE DISPERSIÓN DE GASES BASADOS EN
TÉCNICAS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES
(CFD) EN APLICACIONES AGRÍCOLAS Y AMBIENTALES**

ALEJANDRO MARULANDA TOBÓN

Trabajo de investigación dirigida presentado a
la ETSI Industriales como requisito parcial para optar al título de
MASTER EN AUTOMÁTICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

Dr. GUILLERMO PALAU SALVADOR
Dr. SALVADOR CALVET SANZ
DIRECTORES

Dr. RAFAEL ORS CAROT
TUTOR

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA
VALENCIA, ESPAÑA

25 de septiembre de 2013

**CONTRIBUCIÓN A LA APLICACIÓN DE LAS REDES
INALÁMBRICAS DE SENSORES (WSN's) EN PROBLEMAS DE
MODELOS DE DISPERSIÓN DE GASES BASADOS EN
TÉCNICAS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES
(CFD) EN APLICACIONES AGRÍCOLAS Y AMBIENTALES**

Todo el trabajo descrito en este documento es de la autoría de los abajo firmantes y fue realizado bajo la dirección del tutor asignado, excepto donde se han hecho referencias al trabajo de otros

(firma)

Alejandro Marulanda Tobón

(Fecha)

Certificado de aprobación: _____

Los abajo firmantes certificamos haber leído este trabajo de investigación dirigido y que, en nuestra opinión, es totalmente adecuado, en calidad y nivel de profundidad, para optar al título especificado con anterioridad.

(firma)

Nombres y apellidos director

(firma)

Nombres y apellidos director

(firma)

Nombres y apellidos
Cargo
Área
Facultad

(firma)

Nombres y apellidos
Cargo
Área
Facultad

(firma)

Nombres y apellidos
Cargo
Área
Facultad

(firma)

Nombres y apellidos
Cargo
Área
Facultad

A Dios, a mi familia, a Adriana y amigos,
quienes son gestores y fuente
de toda mi inspiración

AGRADECIMIENTOS

Quiero empezar este trabajo agradeciendo a Dios por la vida, oportunidades y capacidades donadas para emprender el camino hasta el momento recorrido, así como el hecho de haberme dado una familia que me inculcó innumerables valores, los cuales aún sigo descubriendo y asimilando. Agradezco a todos aquellos que desde el otro lado del océano han sido apoyo constante por medio de oraciones, consejos y motivaciones, especialmente a mis padres Leonidas y Teresita, mis hermanos Juan Pablo y Leonardo, a Adriana, y demás familiares, amigos y conocidos que sin citarlos en estas frases, uno a uno he recordado.

Seguidamente agradecer a Jorge Martínez y a uno de mis directores de la presente tesina y de mi proyecto de tesis doctoral, el profesor Guillermo Palau, quienes desinteresadamente y sobre todo muy atentamente me han proporcionado un apoyo invaluable que me ha permitido superar los ya varios obstáculos que se han presentado en los últimos años. Sin lugar a dudas puedo decir que confían y creen en mí. Agradezco al profesor Salvador Calvet, de quien en tan poco tiempo he percibido una disponibilidad y agilidad ejemplar. También reconocer al profesor Rafael Ors, al profesor Juan José Serrano y a los chicos del laboratorio de RIS del instituto ITACA de la Universidad Politécnica de Valencia, el apoyo, la ayuda y particularmente la apertura del espacio físico y en el proyecto que me permitió llevar a cabo el presente trabajo.

También quiero nombrar a mi “familia” en estos lares, gracias a los cuales Valencia ha sido un hogar en estos últimos años, Zulma, Yolanda, Ana, María Ángeles, Marisa, Alba, Amalia, Lucia Emilio, David, Javier y Maska, nuevamente gracias.

Por último a mi ordenador, mi querido Toshi, compañero de batallas, el que todo lo ha podido y que en ningún momento se ha negado a cumplir su función.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
CONTENIDO	II
LISTA DE ILUSTRACIONES	IV
LISTA DE TABLAS	V
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	VI
Símbolos Romanos.....	VI
Símbolos Griegos	VI
Abreviaturas.....	VII
RESUMEN	VIII
OBJETIVOS	1
Objetivo General	1
Objetivos Específicos	1
A. MARCO TEÓRICO (va lo del estado del arte)	2
A.1. Necesidades y modelos en el estudio de la calidad del aire	2
A.2. Modelos CFD	4
A.2.1. Necesidad de metodologías para la validación	4
A.2.2. Uso de las CFD en el sector ambiental	5
A.3. Las WSN.....	6
A.3.1. Aplicaciones de las WSN	7
A.3.2. WSN para el monitoreo de la medioambiental	8
A.3.3. WSN para el monitoreo de la calidad del aire	8
A.4. Uso de las WSN para la validación de modelos CFD	9
B. MATERIALES Y CASO DE ESTUDIO	10
B.1. Especificaciones del espacio.....	10
B.2. Instrumentación para las pruebas	11
B.3. Calibración de la WSN	12
B.3.1. Montaje experimental.....	13
B.3.2. Pruebas de caracterización del sensor.....	14
B.3.3. Resultados de la calibración.....	14
B.4. Pruebas realizadas.....	16
B.5. Especificación del caso de estudio	17
B.5.1. Mallado	19
B.5.2. Ubicación de los nodos de la WSN.....	22
B.5.3. Disposición del modelo	23
C. PRUEBAS Y RESULTADOS	27
C.1. Verificación de la malla	27
C.2. Resultados del modelo CFD	29
C.3. Calibración del modelo CFD	33
C.4. Validación y análisis paramétrico.....	38

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	42
Conclusiones finales.....	42
Trabajo futuro.....	43
FUENTES Y BIBLIOGRAFÍA	45
GLOSARIO	51

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Esquema de actuación para el estudio de la contaminación ambiental	3
Figura 2: Proceso de consecución de un modelo CFD valido para ambientes interiores.....	5
Figura 3: Sala de experimentación de ventilación del Departamento de Ciencia Animal de la Universidad Politécnica de Valencia.....	10
Figura 4: Imagen de la pared Este de la sala con los seis sistemas de extracción (izq.) y componentes de cada turbina de extracción (der.).....	11
Figura 5: Imagen de la pared Oeste de la sala con las doce ventanas abatibles (izq.) y sistema para la apertura de la ventana (der.).....	11
Figura 6: Esquema de la instalación realizada para la calibración de los sensores de CO ₂	13
Figura 7: Resultados de uno de los ensayos de linealidad en la medida de concentración de CO ₂ con el sensor analizado	15
Figura 8: Chimenea y ventanas seleccionadas para la conformación del caso real de estudio	17
Figura 9: Ubicación de la manguera a nivel del suelo de la sala, donde el tramo en color amarillo posee las perforaciones para la salida del CO ₂	19
Figura 10: Vista de algunas de las paredes del modelo con la malla media no estructurada generada	20
Figura 11: Idealización de los orificios de la manguera con caras de la celdas que circundan la manguera.....	21
Figura 12: Idealización en el mallado de los rebordes de las toberas.....	21
Figura 13: Planos para la ubicación de los sensores de CO ₂ en la sala de estudio.....	22
Figura 14: Perfiles de concentración de CO ₂ de las verticales donde se encuentran ubicados los sensores	28
Figura 15: Estructura turbulenta del flujo del aire en la sala de experimentación	30
Figura 16: Plano de con los contornos de velocidad en la coordenada y 1,80m	31
Figura 17: Plano de con los contornos de presión en la coordenada y 1,80m	32
Figura 18: Plano de con los contornos de presión en la coordenada y 2,23m	33
Figura 19: Planos con la distribución de la concentración de masa del CO ₂	34
Figura 20: Proceso de congelación del manorreductor usado en las pruebas.....	35
Figura 21: Disposición de los sensores de concentración de CO ₂ para la medición de la acumulación del gas en una esquina	36
Figura 22: Medidas tomadas por los sensores de concentración [ppm] de CO ₂ tras la inyección del gas en dos pruebas [hh:mm]	36
Figura 23: Medidas de concentración [ppm] de CO ₂ por parte de los sensores ubicados en la vertical de la pared de las ventanas	37
Figura 24: Comparación de la concentración del CO ₂ [ppm] entre una de las pruebas y la simulación	37
Figura 25: Comparación de algunos casos seleccionados donde se varía la presión de salida del CO ₂ desde los orificios de la manguera.....	38
Figura 26: Curvas de medición de los sensores de concentración de CO ₂ ante la inyección de gas y con ventilación constante.....	39
Figura 27: Comparación gráfica entre los rangos con cuartiles de las mediciones y los datos simulados en la misma posición	40

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Instrumentación necesaria y usada en las pruebas experimentales	11
Tabla 2: Resultado de la lectura de CO ₂ generada por la WSN y el sensor INNOVA.....	15
Tabla 3: Parámetros de la curva de calibración para cada uno de los sensores.....	16
Tabla 4: Velocidad del aire recomendada para distintas especies así como el espacio necesario para su alojamiento	18
Tabla 5: Tamaño de las tres mallas realizadas y el parámetro de refinamiento para cada una	20
Tabla 6: Asignación de cada nodo a una posición específica dentro del volumen de estudio	22
Tabla 7: Muestras tomadas para la definición de la condición de contorno en el ventilador y las ventanas.....	24
Tabla 8: Datos tomados para la comprobación de las principales variables en la ubicación de los sensores de CO ₂	24
Tabla 9: Compendio de las condiciones de contorno del modelo CFD.....	24
Tabla 10: Índice de convergencia para las mallas planteadas en la predicción de la concentración de CO ₂	28
Tabla 11: Precisión entre la medición real y la estimada por el modelo usando las tres mallas.....	29
Tabla 12: Selección de los gradientes para el cálculo de la difusión secundaria y la derivada de la velocidad	30
Tabla 13: Propiedades del flujo dentro de la sala de experimentos modelada	30
Tabla 14: Valor de la velocidad y de sus componentes en la ubicación de los sensores de CO ₂	31
Tabla 15: Valor de la presión absoluta y de la presión relativa en la ubicación de los sensores de CO ₂	33
Tabla 16: Medida de la concentración por los sensores ubicados en los tres planos, su equivalente valor simulado y la diferencia entre ambos (parámetros en negrilla es que excede el presupuesto de validación).....	40

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

SÍMBOLOS ROMANOS

c	Concentración	[ppm]
c_{in}	Concentración de la sustancia en la entrada del sistema	[ppm]
c_{out}	Concentración de la sustancia en la salida del sistema	[ppm]
c_{co2}	[CO ₂] Concentración del CO ₂	[ppm]
cm	Concentración másica	[%]
cm_{co2}	[CO ₂] Concentración másica del CO ₂	[%]
I_t	Intensidad turbulenta	[%]
h_c	Coefficiente de transferencia de calor	[W/m ² K]
P	Presión absoluta	[Pa]
ΔP	Presión relativa	[Pa]
P_1	Presión inicial absoluta	[Pa]
P_{man}	Presión salida de orificios de la manguera	[Pa]
P_{ref}	Presión de referencia o ambiental absoluta	[Pa]
r	Ratio de refinamiento de una malla	[-]
R_c	Constante de la rugosidad	[-]
R_h	Altura de la rugosidad	[m]
Re	Número de Reynolds	[-]
u	Vector velocidad en el eje x	[m/s]
$ u $	Módulo del vector velocidad en el eje x	[m/s]
U	Módulo de la velocidad	[m/s]
v	Vector velocidad en el eje y	[m/s]
w	Vector velocidad en el eje z	[m/s]

SÍMBOLOS GRIEGOS

μ	Viscosidad dinámica	[kg/(ms)]
-------	---------------------	-------------

ν	Viscosidad cinemática	[m ² /s]
T	Temperatura	[°C]
T _i	Temperatura interior	[°C]
T _o	Temperatura exterior	[°C]
ϕ	Diámetro hidráulico	[m]

ABREVIATURAS

3D	Tres dimensiones
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinámica de fluidos computacionales)
CO ₂	Dioxido de carbono
CV	Coefficiente de Variación
DAS	<i>Data Acquisition System</i> (Sistema de adquisición de datos)
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i> (Simulación numérica directa)
EFM	<i>Environmental Fluid Mechanics</i> (Mecánica de fluidos ambientales)
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método de elementos finitos)
FDM	<i>Finite Difference Method</i> (Método de diferencias finitas)
FVM	<i>Finite Volume method</i> (Método de volúmenes finitos)
GCI	<i>Grid Convergence Index</i> (Índice de convergencia de la malla)
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MPI	<i>Message Passing Interface</i> (Interface de paso de mensajes)
NDIR	<i>Nondispersive infrared sensor</i> (Sensor de infrarrojo no dispersivo)
UPV	Universidad Politécnica de Valencia
VDC	<i>Volts Direct Current</i> (Voltios en corriente directa)
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>
RMSE	<i>Root mean squared error</i> (Error de la raíz media cuadrática)
WSN's	<i>Wireless Sensor Networks</i> (Redes Inalámbricas de Sensores)

RESUMEN

El monitoreo de la contaminación ambiental, la homogenización del clima y la dispersión de gases en aplicaciones agrícolas y ambientales plantean un constante reto para los sistemas de monitorización y de producción. Compete esta problemática a sectores económicos donde se utilice cultivos bajo invernadero, cámaras de pos-cosecha, cámaras de refrigeración de tractores, explotaciones de rumiantes, edificaciones inteligentes, estudios ambientales urbanos, entre muchos otros. En todas ellas existe una preocupación por la uniformidad en la producción, por una eficiencia energética y por el impacto ambiental que se genera. Se encuentra pues dicha homogenización, dispersión y estratificación de las variables climáticas y de los gases, íntimamente relacionada con la ventilación de los espacios exteriores y los recintos de interés. Muchos estudios por ejemplo, relatan los beneficios asociados con el flujo del aire en sistemas de producción animal y de plantación (Boulard et al., 2002; Gebremedhin and Wu, 2005). Para la comprensión de los fenómenos físicos que se generan y posterior mejora del diseño estructural y de los sistemas automáticos, es necesario un modelado y estudio energético, existiendo actualmente varios sistemas: Técnicas con gas trazador (TGC), toma intensiva de datos y modelado empírico tipo caja negra, y simulación por resolución de las leyes físicas que gobiernan el comportamiento de los espacios de estudio. Las anteriores técnicas de forma independiente resultan insuficientes para dar soluciones prácticas y resultan costosas o altamente particularizadas al caso de estudio.

Es por ello que la técnica de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) como herramienta que se emplea para resolver numéricamente las ecuaciones de continuidad y de momento que rigen los intercambios energéticos de un sistema con el fin de obtener los campos de velocidad y de dirección del flujo de aire, la distribución de la temperatura, de la humedad y de gases específicos, se hace viable para obtener los modelos que posteriormente se utilizaran con sistemas de control avanzado. Sin embargo, la técnica CFD requiere de una validación de los resultados con una toma (espacio-tiempo) intensiva de datos. La mayoría de los trabajos publicados hacen referencia en sus conclusiones a la necesidad de dicha validación de los datos arrojados y la forma en la que se hace (Reichrath et al., 2002; Roy et al., 2005).

En primera instancia, tales necesidades se hicieron evidentes en proyectos en los que se ha participado, como lo son:

“Visión integral invernaderos y territorio: sinergias para una mayor eficiencia medioambiental y energética” RTA2008-00109-C03-00, “Estudio de las influencias de factores pos-cosecha en la calidad del caqui ‘Rojo Brillante’ para consumo en fresco” del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, o “URBANSKY - Investigación y desarrollo de un modelo de difusión y distribución de contaminantes en el aire de un entorno urbano” del IMPIVA.

Para la realización del dispositivo de validación que permita discernir entre las mejores, más idóneas, o más aceptables simplificaciones, condiciones de contorno para el modelo CFD, es necesario un sistema de toma de datos que cumpla con las exigencias expuestas. Gracias a los grandes avances tecnológicos en variadas disciplinas, es posible plantear las Redes Inalámbricas de Sensores (WSN) como posible solución y aplicación a los entornos planteados.

Haciendo uso entonces de una plataforma basada en WSN, el objetivo es estudiar la interrelación de los datos obtenidos con el desarrollo de modelos CFD que permitan, tanto validar el resultado de los mismos, como obtener información relevante acerca de las características de la topología óptima que debe tener una WSN en este tipo de aplicaciones (Tarrío, 2011).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estudiar la calibración y validación de un modelo de flujo de fluidos para la dispersión de contaminantes en aplicaciones agrícolas, ganaderas y ambientales usando WSN's

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer modelos mediante técnicas CFD para el estudio del flujo y dispersión de gases en recintos agrícolas que se basen en la utilización de WSN's para la adquisición de datos
- Plantear una plataforma para el estudio del funcionamiento de las WSN's en aplicaciones agrícolas y ambientales.
- Realizar una validación de los modelos CFD propuestos mediante el sistema WSN desarrollado

A. MARCO TEÓRICO (VA LO DEL ESTADO DEL ARTE)

En los últimos años, las WSN han emergido como una de las tecnologías con más posibilidades de futuro. En 2003 - cuando las WSN solo eran un incipiente campo de investigación - la prestigiosa revista “*The MIT Technology Review*” publicó un artículo vaticinando que esta tecnología podría cambiar el mundo (MIT Technology Review, 2003). Solo unos años más tarde el crecimiento experimentado por las WSN comenzó a ser comparado con la revolución del Internet (Pinto, 2004). Muchas instituciones de investigación alrededor del mundo han focalizado sus esfuerzos en temas relacionados con tecnología WSN. El interés se debe a la gran flexibilidad, robustez y bajos costes de desarrollo (Pinto, 2004). Sin embargo es una tecnología que requiere aún más desarrollo y estudio en las aplicaciones finales (Willig, 2008).

Por otra parte, la CFD se ha convertido en una avanzada herramienta para la investigación en aplicaciones industriales relacionadas con la Mecánica de Fluidos. Es realmente atractiva debido al ahorro en costos en experimentos a escala y en túneles de viento (Bhaskaran et al., 2003). En aplicaciones industriales agrícolas, ganaderas y ambientales, la CFD se está convirtiendo en una técnica muy usada (Norton et al., 2007). Los ingenieros han recurrido las CFD para modelar los procesos de flujo de aire en espacios y recintos para evaluar dispersión de gases, evaluación del sistema integral, el control y el diseño (Yan et al., 2008).

Estudiar la interrelación que existe entre estos dos prometedores campos, de forma que las WSN puedan ser utilizadas combinando técnicas de CFD, ya sea para su validación como para la provisión de las variables de contorno, es de gran interés. También es llamativo si los modelos que utilicen las WSN como fuente de información pueden ser utilizados para realizar el estudio de la topología (y resto de características) óptimas que deben tener las WSN para estas aplicaciones.

A.1. NECESIDADES Y MODELOS EN EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AIRE

En lo que respecta a la calidad del aire, existen diversas aplicaciones, que van desde los requerimientos de un mejor diseño de los espacios exteriores e interiores para aumentar el confort humano (Causone et al., 2009), pasando por la correcta distribución climática en ambientes industriales para asegurar el bienestar animal, la conservación homogénea o la producción uniforme (Norton et al., 2007; Bustamante et al., 2011), hasta llegar a el preocupante e importante tema de estudio de la contaminación del aire en áreas urbanas (Santiago del Río, 2006). La contaminación atmosférica por ejemplo, en las ciudades es un problema que ha ido aumentando en las últimas décadas. De esta manera, tanto las autoridades como la comunidad científica han prestado una mayor atención a la calidad de aire dentro de las ciudades. Un ejemplo es el informe “Air pollution at street levels in European cities” (2006) realizado por la Agencia Europea del Medio Ambiente (European Environment Agency) donde se ha estudiado la calidad del aire en calles de 20 ciudades europeas. Una de las conclusiones principales de dicho estudio es que el tráfico es la principal fuente de emisión de contaminantes.

En los diversos campos se han utilizados técnicas variadas para el estudio de los fenómenos de la calidad del aire y la dispersión de sustancias en este medio. Estudios de profundidad resumen la forma de enfocar los temas concernientes a la evaluación de la calidad del aire en áreas urbanas (Belalcazar Ceron, 2009) por medio de un esquema que se observa en la *Figura 1*. Tal esquema es extrapolable a los ámbitos de estudio de la calidad del aire y dispersión de contaminantes, ya que plantea la realización de modelos que se sirven de datos experimentales para su validación, calibración y comparación (Santiago del Río, 2006; Cadafalch Rabas, 2002)

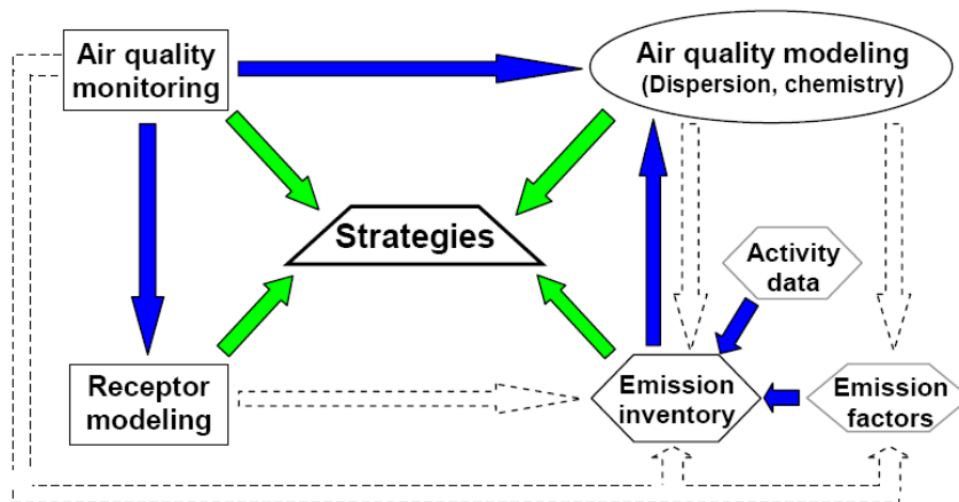


Figura 1: Esquema de actuación para el estudio de la contaminación ambiental

Los modelos de dispersión utilizan expresiones matemáticas para representar dicha dispersión y en algunas ocasiones la transformación química de los contaminantes en los ambientes urbanos. Estos modelos estiman las concentraciones de contaminantes resultantes tras haberle ingresado las emisiones y las condiciones meteorológicas. Existen diferentes modelos de dispersión con diferentes grados de complejidad y de variadas escalas, que van desde zonas urbanas o regiones enteras hasta pequeños micro ambientes urbanos (Belalcazar Ceron, 2009).

Modelos de mediana escala (como lo son CALPUFF, ADMS, TAPOM, CHIMERE, CMAQ) se utilizan para simular la física y, en algunos casos, los procesos químicos que tienen lugar en una zona urbana. Estos modelos también se han utilizado para evaluar la exactitud de los inventarios de emisiones existentes (Zárate et al., 2007).

Modelos a pequeña escala se utilizan para simular los procesos que intervienen en la dispersión y la transformación de los contaminantes sobre una parte de una ciudad (Vardoulakis et al., 2003). Son de interés porque se han detectado altos niveles de contaminación dentro de estos entornos urbanos.

Para calcular la concentración de contaminación ya a nivel de una calle, se puede hacer con dos modelos o formas diferentes. Un conjunto de modelos llamados modelos operativos que resuelven analíticamente una serie de ecuaciones paramétricas semi-empíricas simplificadas, o por medio de modelos CFD, que resuelven numéricamente un sistema de ecuaciones diferenciales que describen en detalle el flujo del viento y la dispersión de contaminantes.

Los modelos operativos (es decir STREET-SRI, CALINE4, OSPM, AEROLIUS, etc), están especialmente diseñados para producir series de tiempo de las concentraciones de contaminantes cerca de vías urbanas (Vardoulakis et al., 2003). La principal ventaja de estos modelos es que son capaces de producir resultados con un número reducido de información y con unos requisitos computacionales mínimos. La principal desventaja de tales modelos es que se basan en una serie de supuestos y parámetros empíricos que podrían no ser aplicables a todos los entornos urbanos. Por esta razón, es necesario que dichos modelos se calibren en cada aplicación o nueva ubicación de estudio con mediciones de campo.

Los modelado CFD por su parte, son una técnica poderosa que abarca una amplia gama de aplicaciones industriales y, más recientemente del medio ambiente. La principal ventaja de estos modelos es que pueden reproducir todo el flujo y los campos de concentración para cualquier configuración de calle, entorno urbano o espacio cerrado (entre los programas más conocidos se encuentra, Fluent, MISKAM, ENVI met, STAR-CCM+). La principal limitación de los modelos de CFD es la gran cantidad de datos que genera y el tiempo de cómputo necesario para las

simulaciones. Le acontece además que hasta el momento hay una falta de validación de estos modelos con resultados de modelado físicos o datos de mediciones reales (Li et al., 2006). Así mismo, muchos de estos modelos han sido validados típicamente usando los datos de mediciones en túneles de viento, pero el número de estudios de validación que utilizan mediciones en condiciones urbanas real es limitado.

A.2. MODELOS CFD

Actualmente es posible encontrar una amplia bibliografía con revisiones acerca de los avances y trabajos realizados con técnicas CFD. Moncho Esteve, 2011 por ejemplo recopila algunos de los trabajos más llamativos realizados con éstas técnicas. Existen también artículos con revisiones sobre la evaluación, los últimos avances y el punto de mira de las CFD. La matemática, las ecuaciones, los modelos, los parámetros se recopilan con bastante precisión en los manuales de usuario del software Fluent. Algunos libros de mecánica de fluidos y elementos finitos tratan con detalle la física que hay detrás de los modelos en CFD.

A.2.1. Necesidad de metodologías para la validación

Como se ha mencionado las CFD son una potente herramienta para modelar las interacciones con y entre fluidos y sólidos. Sin embargo, desarrollar un modelo acertado en CFD requiere un alto nivel de experiencia, el cual en muchos casos no existe (37)(Hajdukiewicz, 2013). Cuando se desea generar un modelo válido para el conocimiento de la mecánica de fluidos que se da en un espacio interior, el indicar la necesidad de experiencia se quiere decir que es esencial para:

- Decidir el nivel de detalle de la geometría, especialmente cuando existen habitantes
- Elegir el tipo y la resolución de la malla
- Seleccionar el modelo de turbulencia
- Configurar las condiciones de contorno
- Escoger las técnicas numéricas (es decir, el factor de relajación, el esquema de discretización, el número de iteraciones, entre otras)

Existen por lo tanto varios trabajos que proponen una metodología formal para que el tránsito de conseguir un modelo en CFD no sea una aventura a ciegas o a prueba y error. Algunos de los escritos son el de Moncho Esteve, 2011 que es un desarrollo basado en la experiencia de años de trabajo con las presentes técnicas. Un trabajo muy depurado y que ofrece 10 pasos muy concretos las buenas prácticas con el CFD es el de Blocken, 2012. Éste último ofrece tres artículos más con un caso muy complejo que se desarrolla y en el cual se dan a ver las recomendaciones dadas. Un último escrito a mencionar, con el cual se trabajará en el presente estudio por nivel explicativo y de esquematización es el de Hajdukiewicz, 2013 (*Figura 2*). La metodología explica como verificar (en color verde) y validar (en color anaranjado) los modelos CFD, y diseñar paramétrico (en color azul) para evaluar la influencia de las condiciones de contorno en los resultados finales.

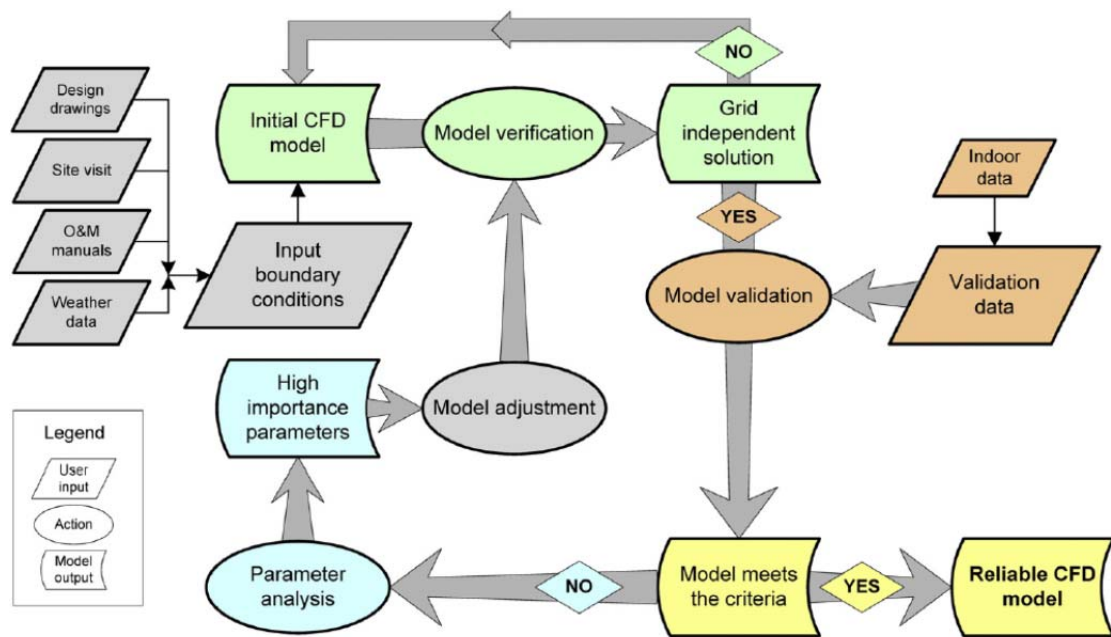


Figura 2: Proceso de consecución de un modelo CFD valido para ambientes interiores

A.2.2. Uso de las CFD en el sector ambiental

El desarrollo de técnicas numéricas para la resolución de las ecuaciones junto con el de las máquinas digitales y su incremento de capacidad de cálculo, han permitido en las últimas décadas una amplia aplicación de los métodos CFD en muchas áreas de la dinámica de fluidos, incluyendo el ámbito de la Mecánica de Fluidos Ambientales (EFM). Las EFM es el estudio científico de la naturaleza del flujo de un fluido como es el aire y el agua en nuestro planeta Tierra especialmente como afectan tales movimientos en la calidad del aire y del agua (Cushman-Roisin et al., 2008).

Dentro de las EFM, se puede incluir recientes y no tan recientes investigaciones en diferentes escenarios o con variados enfoques. Pueden encontrarse un alto número de investigaciones que estudian el flujo del aire y los procesos relacionados en el ambiente exterior que rodea un edificio, entre los que se puede incluir la influencia del viento en el confort de peatones (Stathopoulos and Baskaran, 1990; Richards et al., 2002; Blocken et al., 2004, 2012; Yoshie et al., 2007; Mochida and Lun, 2008; Tominaga et al., 2008a; Blocken and Persoon, 2009), la influencia del viento en la lluvia que cae sobre una fachada (Choi, 1993; Etyemezian et al., 2000; van Mook, 2002; Blocken and Carmeliet, 2002, 2004, 2006, 2007, 2010; Tang and Davidson, 2004; Briggen et al., 2009; Blocken et al., 2010; Huang and Li, 2010; van Hooff et al., 2011a), calidad del aire y dispersión de contaminantes alrededor de edificios (Tominaga et al., 1997; Leitl et al., 1997; Meroney et al., 1999; Canepa, 2004; Meroney, 2004; Chu et al., 2005; Hanna et al., 2006; Blocken et al., 2008a; Gromke et al., 2008; Yang and Shao, 2008; Solazzo et al., 2009; Tominaga and Stathopoulos, 2009, 2010, 2011; Balczo et al., 2009; Gousseau et al., 2011a, 2011b; Moonen et al., 2011), transferencia de calor en las superficies de un edificio (Blocken et al., 2009; Defraeye and Carmeliet, 2010; Defraeye et al., 2010, 2011a, 2011b; Karava et al., 2011a), ventilación natural de edificios (Jiang and Chen, 2002; Jiang et al., 2003; Heiselberg et al., 2004; Wright and Hargreaves, 2006; Cook et al., 2008; Chen, 2009; Norton et al., 2009, 2010; Hensen and Lamberts, 2010; van Hooff and Blocken, 2010a, 2010b; van Hooff et al., 2011b; Blocken et al., 2011; Ramponi and Blocken, 2012), erosión del viento (Tominaga and Mochida, 1999; Parsons et al., 2004; Hussein and El-Shishiny, 2009; Tominaga et al., 2011), energía del viento (Milashuk and Crane, 2011), carga del viento en edificios (Tamura et al., 1997, 2008; Stathopoulos, 1997; Selvam, 1997; Nozu et al., 2008) y otras aplicaciones (Neofytou et al., 2006; Wakes et al., 2010)

A.3. LAS WSN

Las WSN son redes espacialmente distribuidas y cuyos nodos son alimentados por medio de baterías para su comunicación, el procesamiento que cada uno requiera y las tareas de detección. Cada nodo posee la capacidad de tomar decisiones, procesar los datos y cooperar a través del canal de transmisión inalámbrica y así alcanzar objetivos comunes. Los principales beneficios ofrecidos por las WSN se basan en su bajo coste, su fácil implantación, su capacidad de auto-organización y en sus requisitos de bajo mantenimiento (Karl et al., 2005) Teniendo en cuenta el potencial que ofrece este tipo de redes, desempeñan entonces un papel crucial en el desarrollo de la próxima generación de aplicaciones industriales, sistemas de transporte, automatización de edificios, aplicaciones de cuidado de la salud, monitorización ambiental, entre otras (Willig, 2008; Willig, 2005). Adicionalmente, la tecnología de las WSN reduce fuertemente los costos de la instalación y el mantenimiento de los sistemas para la automatización y/o el monitoreo de procesos en comparación con la tecnología basadas en alimentación y comunicación por cable. Se ha estimado que el mercado WSN crecerá exponencialmente en los próximos años, lo que generará un negocio de miles de millones de dólares (Moyne et al., 2007; Sangiovanni-Vincentelli, A., 2007). Por las anteriores razones expuestas, tanto el mundo académico como la industria se encuentran investigando nuevas metodologías de diseño para el desarrollo de sistemas basados en WSN. La rapidez se percibe por ejemplo en el caso del estándar de comunicaciones IEEE 802.15.4 que ajustará tan solo 6 años de haberse publicado, pero además de haberse extendido fuertemente gracias a un protocolo como es ZigBee, se considera el patrón de referencia para los protocolos con una baja tasa de transferencia de datos y uso eficiente de la energía consumida (IEEE 802.15.4, 2007). Se puede resumir entonces que las WSN poseen ventajas en los siguientes aspectos (Tiberi, 2011):

- Bajo coste
- Flexibilidad
- Escalabilidad
- Confiabilidad
- Tiempos de espera
- Eficiencia energética

A pesar de los beneficios proporcionados por las WSN, también plantean retos interesantes. Puesto que los nodos son alimentados con batería (en la gran mayoría de aplicaciones, aunque día a día esto tiende a cambiar (Vullers et al., 2010)), en el diseño de la red, el consumo de energía se convierte en una restricción imperiosa, y la utilización de los métodos tradicionales de diseño puede ser ineficientes. Por otra parte, como en muchas aplicaciones, pero especialmente en la monitorización ambiental, existe un gran problema con los sensores a seleccionar para la detección de los gases de interés o contaminantes, ya que por lo general no cumplen con las ventajas que propone una WSN: poseen un alto consumo, es difícil encontrar comercialmente productos que alcancen bajos ratios de detección, no poseen dimensiones reducidas, son costosos o hay fuertes problemas para su calibración (Picco et al., 2012; Hasenfratz et al., 2012). En los sistemas para las detecciones tempranas de gases peligrosos o contaminantes por ejemplo, se utilizan sensores espectroscópico, catalítica, semiconductores, entre otros (Somov et al., 2012). De media dichos sensores pueden consumir corrientes alrededor de 800mA (Ho et al., 2007; Xiaoqiang et al., 2010; Nakano et al, 2005; Wobscholl et al, 2006) pero existen sensores en el mercado que consumen mucho más. Es un obstáculo y tema en el cual se trabaja actualmente.

A.3.1. Aplicaciones de las WSN

Las WSN han inspirado a muchas aplicaciones. Algunas de ellas son futuristas, mientras que otro gran número son prácticas y útiles. La diversidad de aplicaciones en la última categoría es notable - monitoreo del medio ambiente, seguimiento de objetivos, tuberías (agua, petróleo, gas), monitoreo de condiciones estructurales, agricultura de precisión, cuidados y asistencia a la salud, gestión de cadenas de suministro, supervisión de volcanes activos, transporte, vigilancia de actividad humana, y minería subterránea, por nombrar algunos. Existe una extensa literatura que individualmente expone una aplicación específica de las WSN. También es posible encontrar otros trabajos donde se realiza una recolección de dichas aplicaciones y el planteamiento de una división o agrupamiento de ellas (Escolar Díaz, 2010; Dargie et al., 2010; Martínez Casto, 2008).

Hay diversas propuestas para la división de las aplicaciones. Algunas lo realizan por los sectores de interés (Escolar Díaz, 2010; Dargie et al., 2010) los cuales se resumen en:

- En ambientes militares se encontraron los primeros escenarios de aplicación. La investigación en este sector pudo haber comenzado alrededor de 1980 con las Redes de Sensores Distribuidos (DSN) en el proyecto Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) (Chong et al., 2003). Probablemente hay muchos proyectos similares que se han centrado en este tema de investigación. Actualmente, el presente sector se encuentra centrado en las WSN para la detección de intrusión, dirigido especialmente al control de fronteras
- El sector medioambiental representa el mayor exponente de las aplicaciones de WSN. Una gran diversidad de aplicaciones se puede encontrar en este sector. Van desde el seguimiento de fauna silvestre, pasa por el monitoreo para dispersión de contaminantes o calidad del aire, hasta el control de procesos geológicos. El proyecto Great Duck Island (Mainwaring et al., 2002) desplegó una red de sensores compuesta por 32 nodos en una pequeña isla de la costa de Maine (EE.UU.) para estudiar el hábitat y cuantificar el impacto de la presencia humana en los animales y las plantas. El resultado de esta investigación permitió la creación de un equipo de monitoreo del hábitat, que puede ser utilizado por los científicos e investigadores de otros campos. El proyecto ZebraNet (Juang et al., 2002) rastrea el comportamiento de las cebras en Kenia, con collares de seguimiento personalizados. Estos tipos de aplicaciones tienen condiciones específicas, tales como el monitoreo de larga distancia y la movilidad de los nodos. La mejora de los procesos agrícolas es otra aplicación de interés. El Monitoreo Vineyard (Burrell et al., 2004) es probablemente una de las aplicaciones WSN pioneras que ha alcanzado la madurez. Detección de incendios y estudios sobre volcanes (Werner-Allen et al., 2006) y finalmente como ejemplo relacionado al interés del presente estado del arte es SensorMap (Völgyesi et al, 2008) el cual se basa en el despliegue de una red de sensores móviles en la ciudad de Dresden, Alemania, para suplir la falta de resolución que poseen los detectores medioambientales y además poder saber el estado de las variables de interés en tiempo real
- El campo de la ingeniería civil y estructural ofrece muchos escenarios de aplicación para las WSN. Las estructuras civiles tienen una duración predeterminada, sin embargo, debido a causas como son los defectos en la construcción o el ambiente interno en el edificio, generan un debilitamiento rápido y progresivo. Este tipo de aplicaciones están relacionadas entonces con el diseño, la construcción y el mantenimiento de las estructuras de ingeniería civil. Los sensores pueden tomar medidas para corroborar el nivel de deterioro del hormigón, del acero, la mampostería y los materiales compuestos. Un ejemplo relevante es el proyecto Sustainable Bridges (Sustainable Bridges, 2013), cuyo objetivo es el estudio de daños y perjuicios, e inspeccionar y diagnosticar el nivel de deterioro de los puentes ferroviarios europeos
- El campo de la salud y la medicina está adquiriendo cada día más importancia ya que los sensores permiten medir signos vitales como la presión sanguínea, el pulso y la respiración

o la temperatura corporal. Los pacientes con diferentes patologías pueden ser monitorizados desde el hogar, gracias a una WSN en tiempo real, enviado muestras a un ordenador central donde son analizadas por los expertos que pueden reaccionar con rapidez en caso de emergencia. CodeBlue (Malan et al, 2004) es un proyecto desarrollado en la Universidad de Harvard para la atención médica con esta tecnología

- La industria es otro sector con variedad de aplicaciones, que van desde el control de tráfico hasta la administración de procesos logísticos (Evers et al., 2005). Es posible encontrar proyectos relacionados con la gestión de la calidad, el diagnóstico de maquinaria o el control variable que tratan de reducir el cableado y los costes (Witrant et al., 2008)

Existe otro tipo de división de las aplicaciones con WSN, las cuales se correlacionan con el tipo de nodo requerido. Se refiere entonces más a las características de desempeño de los mismos nodos (Martínez Casto, 2008). Sin embargo, se puede encontrar un tipo de división adicional, y es sencillamente clasificar las aplicaciones dependiendo si son para uso en interiores o en exteriores (Oliveira et al., 2011; Martínez Casto, 2008)

A.3.2. WSN para el monitoreo de la medioambiental

Existen variados trabajos que abordan las WSN en el sector medioambiental. Es en este tipo de aplicaciones donde se circunscribe las WSN para el monitoreo o sensado de la calidad del aire, la dispersión de contaminantes, la homogenización climática para la producción uniforme o la mejora del confort en edificaciones, entre otras. En el anterior apartado de aplicaciones se mencionaron algunos trabajos relevantes desarrollados en el presente campo, aunque existe cada vez más literatura que abordan el tema específicamente. Algunos de tales trabajos abordan el tema en una aplicación determinada, otros hacen un compendio de las características, necesidades y soluciones planteadas (Oliveira et al., 2011; Othman et al., 2012; Ioanna, 2012; Mukhopadhyay, 2012), permitiendo una visión general del tema. Es posible entonces dentro del presente campo encontrar nuevas subdivisiones y trabajos realizados (Othman et al., 2012)

- Monitoreo en la agricultura
- Monitoreo en el hábitat
- Monitoreo en espacios de vivienda interiores
- Monitoreo en invernaderos
- Monitoreo climático
- Monitoreo forestal

A.3.3. WSN para el monitoreo de la calidad del aire

El tema del monitoreo de la calidad del aire por medio de WSN es un área en creciente desarrollo y de interés actual (Gaura, 2010). Esto se debe a que el monitoreo de la calidad del aire es extremadamente importante, sobre todo en temas de contaminación, porque genera un impacto directo en la salud humana y el medio ambiente. Los sistemas de monitoreo de la calidad del aire, controlados por los departamentos de control de la contaminación de cada gobierno de una región, son extremadamente costosos y no ofrecen la resolución espacio – temporal para una buena caracterización de los diferentes fenómenos (Völgyesi et al., 2008; Khemnar et al., 2013) y menos para el estudio o validación de un modelo (Hajdukiewicz et al., 2013).

Es posible encontrar trabajos que desarrollan un sistema WSN gracias a la integración de productos comerciales para el control por ejemplo del aire en un invernadero (Postolache et al., 2002). Con el paso del tiempo, en cuanto la técnica y la tecnología madura, van apareciendo

productos comerciales, como es el caso de PPM Technology (PPM Technology, 2013; Gaura, 2010) que proporciona equipos para el monitoreo interior de la calidad del aire tanto para entornos del hogar como industriales. Sin embargo, la tecnología sigue en desarrollo y diferentes trabajos, estudios, proyectos y prototipos se pueden encontrar en la literatura. Es posible hallar por ejemplo un sistema para monitoreo de la contaminación del aire que mide CO, NO₂ y SO₂ (Jung et al., 2008). También usando una cámara web de alta resolución para el monitoreo de la calidad del aire interior a través de Internet (Khedo et al., 2010). Otro sistema de red de sensores inalámbricos se desarrolló para controlar la calidad del aire interior (Al-Ali et al., 2010) Existe un sistema de monitoreo que se usa ampliamente, basado en módulos de interface para transductores inteligentes (STIM) con sensores de gas de tipo semiconductor, y que utiliza el estándar 1451.2 (Gao et al., 2008). Y para finalizar por ejemplo un sistema WSN diseñado con un consumo de energía eficiente para el control de gases (Ma et al., 2008)

A.4. USO DE LAS WSN PARA LA VALIDACIÓN DE MODELOS CFD

La validación de los modelos en CFD ha sido un tema de estudio desde la aparición de esta técnica. Sin embargo, dada la rigurosidad y la aparición de nuevas tecnología hace que en el mundo científico se exijan dichas calibraciones y validaciones. La calibración es en efecto el ajuste numérico y la modificación de los parámetros físicos de entrada (variables de contorno) con el objetivo de obtener una concordancia entre los resultados arrojados en la simulación del modelo y sus correspondientes datos experimentales (AIAA G-077, 1998). La motivación entonces para la validación y calibración de los modelos CFD se puede resumir en dos aspectos fundamentales (Hajdukiewicz, 2013):

- La predicción fiable de que los escenarios de estudio simulados cumplen con las mediciones reales en el lugar
- La posibilidad de una simulación acertada del escenario de estudio con diversos parámetros de entrada

Existen trabajos variados donde se hace uso de un sistema WSN para la validación de modelos CFD. Se han propuesto metodologías formales para su calibración (Hajdukiewicz, 2013), es decir, se desarrolla un modelo CFD que es calibrado mediante datos reales tomados de una WSN y una serie de estaciones climática por ejemplo. Lo anterior en el requerimiento de la homogenización y mejora del ambiente interior de un edificio por medio de la ventilación natural para la optimización energética y el confort de los usuarios de la edificación. Se puede cambiar de escenario de estudio a la de recintos que contienen gabinetes de cómputo y que deben ser refrigerados mecánicamente (Scherer et al., 2012) en donde teniendo un flujo turbulento, se valida el modelo de CFD con las medidas tomadas por una WSN para la distribución de temperaturas. En temas de validación de modelos CFD para el estudio de la dispersión de gases o contaminantes por medio de WSN, la literatura es más restringida. Se han realizado tomas de datos gracias a WSN y análisis de la distribución.

B. MATERIALES Y CASO DE ESTUDIO

B.1. ESPECIFICACIONES DEL ESPACIO

La sala de experimentación se encuentra ubicada en el edificio 7H del Campus Vera de la Universidad Politécnica de Valencia ($39^{\circ} 28' 58,6''$ N - $0^{\circ} 20' 22,5''$ O) (Figura 3). Es un laboratorio creado para el estudio de la ventilación natural y forzada en granjas y posee una dimensiones de 11,14 m de largo * 4,465 m de ancho * 2,905 m de alto. Contigua a ésta se halla otra sala aislada para mando de equipos y la visualización de los fenómenos de interés a través de un cristal.

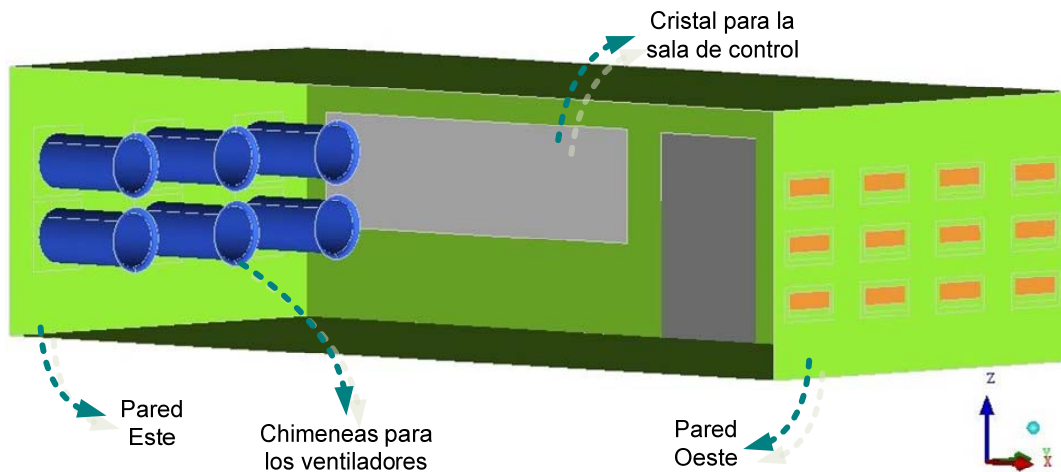


Figura 3: Sala de experimentación de ventilación del Departamento de Ciencia Animal de la Universidad Politécnica de Valencia

En la pared del lado Este de la sala de experimentación, se han instalado seis turbinas extractoras de la compañía EXAFAN (Figura 4). A cada una se acopla una chimenea para evitar las altas turbulencias en la extracción de los gases. A mitad de la chimenea se encuentra un sistema de aspas controladas automáticamente, las cuales evitan la circulación de gases desde el exterior por las bajas velocidades en los ventiladores en la etapa de aceleración inicial. Adicionalmente se provee un anemómetro de aspas y devanado para la medición de la velocidad del fluido y posteriormente el cálculo del caudal de paso por cada chimenea. El diámetro de la circunferencia más grande que conforma el reborde para la reducción de fenómenos turbulentos de la chimenea es de 67,5 cm. El de la circunferencia interior que conforma el área efectiva de extracción es de 57 cm. El largo total de la chimenea es de 109,5 cm.

En la pared del lado Oeste se encuentran doce ventanas para la ventilación en granjas de la compañía Tuffigo (Figura 5). Sus dimensiones externas son de 72 cm de largo * 34,5 cm de alto, sin embargo las dimensiones aproximadas de entrada útil de aire son de 60,7 cm de largo * 18 cm de alto.

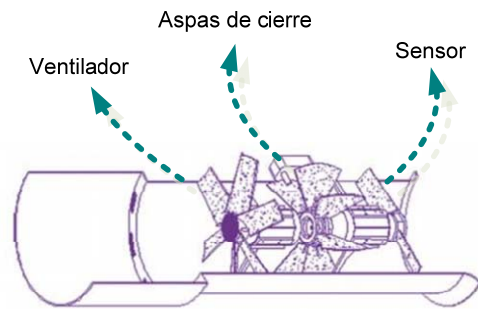


Figura 4: Imagen de la pared Este de la sala con los seis sistemas de extracción (izq.) y componentes de cada turbina de extracción (der.)

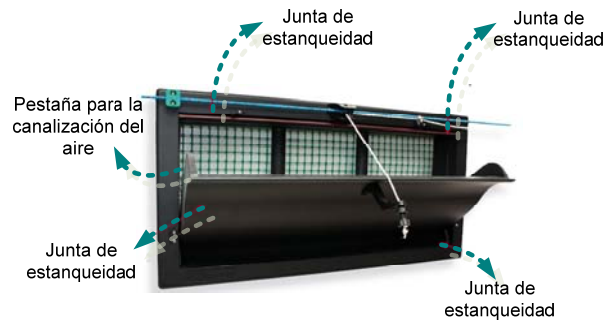








Figura 5: Imagen de la pared Oeste de la sala con las doce ventanas abatibles (izq.) y sistema para la apertura de la ventana (der.)

B.2. INSTRUMENTACIÓN PARA LAS PRUEBAS

En el presente apartado solo se hace un compendio de los dispositivos de medición necesarios y usados (*Tabla 1*). Se intenta con ellos captar la mayor parte de los fenómenos físicos que afectan la dispersión y estratificación del CO₂ como gas trazador en recinto de estudio y en particular al caso seleccionado de experimentación.

Tabla 1: Instrumentación necesaria y usada en las pruebas experimentales

<i>Sensor</i>	<i>Características principales</i>	<i>Imagen</i>
Anemómetro de hilo caliente	<p><u>Fabricante:</u> BSRIA Instrument Solutions</p> <p><u>Modelo:</u> 8384 VelociCalc Plus</p> <p><u>Rango:</u> 0 - 50 m/s</p> <p><u>Precisión:</u> $\pm 0,15$ m/s</p> <p><u>Resolución:</u> 0,01 m/s</p>	

Estación meteorológica		<p><u>Fabricante:</u> PCE Ibérica S.L. <u>Modelo:</u> PCE-FWS 20 Interior: <u>Rango temp. amb.:</u> 0 - +60°C (±0,1°C) <u>Humedad aire:</u> 1 - 99% (±1%) <u>Presión atm.:</u> 919 - 1080 hPa (1,5 hPa) Exterior: <u>Rango temp. amb.:</u> -40 - +65°C (±0,1°C) <u>Humedad aire:</u> 1 - 99% (±1%) <u>Presión atm.:</u> 919 - 1080 hPa (±1,5 hPa) <u>Pluviometría:</u> 0 - 9999 mm (±0,1 mm) <u>Vel. viento:</u> 0 - 180 km/h <u>Dir. Del viento:</u></p>	
Caudalímetro		<p><u>Fabricante:</u> AALBORG <u>Modelo:</u> TMR1-010255 <u>Serial:</u> 237117-2 <u>Rango:</u> 0 - 150 mL/min <u>Resolución:</u> 1 mL/min</p>	
Sensor de presión relativa	Sensor	<p><u>Fabricante:</u> SETRA <u>Modelo:</u> 267105OLD2E62CN <u>Alimentación:</u> 13 - 40 VDC/11 - 30 VAC <u>Salida:</u> 0,05 - 10,05 VDC <u>Rango:</u> 0 - 50 Pa</p>	
	Pantalla	<p><u>Fabricante:</u> STEP <u>Modelo:</u> CPR - 2500 <u>Serial:</u> CPR - 2500V1 - 3 <u>Canales ent.:</u> 2 <u>Rango:</u> 2mV/V</p>	
	Registrador	<p><u>Fabricante:</u> HOBO <u>Modelo:</u> HOBO U12 Temp/RH/2 <u>Canales:</u> 2 externos <u>Rango:</u> 0 - 2,5 VDC</p>	
CO ₂ (WSN)		<p><u>Fabricante:</u> SST Sensing Ltd <u>Modelo:</u> CO₂S - PPM <u>Rango:</u> 0 - 10.000 ppm <u>Precisión:</u> ± 50 ppm</p>	

B.3. CALIBRACIÓN DE LA WSN

La WSN diseñada posee un sensor CO₂S-PPM que utiliza un transductor tipo NDIR. Aplica un método simple de detección de CO₂ mediante radiación infrarroja generada por un LED (SST, 2010). Por lo tanto este sensor de CO₂ consigue una medición bastante precisa llegando a tener un error aproximado de ±50 ppm según especificaciones del fabricante. El rango de trabajo

recomendado oscila entre temperaturas de 0 °C y 50 °C y humedad relativa (HR) de 0 a 95%, aunque puede trabajar en condiciones más desfavorables, entre -25 °C y 55 °C.

El sensor CO2S-PPM puede ser operado en tres modos diferentes (Modo Comando, Modo Transmisión y Modo Sondeo). Para la presente calibración se usó el Modo Comando, que permite la extracción de gran información desde el sensor. El sensor CO2S-PPM tiene la posibilidad de ser configurado para emitir hasta 5 campos de información (SST, 2011). Para esta aplicación se utilizaron los valores de concentración de CO₂, la temperatura y la humedad relativa. Un estudio más detallado de la caracterización del sensor y la WSN diseñada se puede encontrar en Prieto Sancho, 2013.

B.3.1. Montaje experimental

La calibración de los sensores se ha realizado en una cámara de flujo controlado mediante la inyección de cantidades conocidas de CO₂, y comparando las lecturas del sensor de CO₂ a ensayar con un medidor de referencia.

Para la realización de este estudio ha sido necesaria la utilización de diferentes materiales (*Figura 6*). En primer lugar se utilizó una cámara de (30 x 30 x 50 cm) de metacrilato transparente donde se realizaron las pruebas a determinadas concentraciones de CO₂. La cámara se cerró mediante una tapa en la parte superior, sellada en sus extremos para evitar la salida del CO₂. En el interior de la cámara se ubicó un ventilador eléctrico para la homogenización del CO₂ en este espacio. Igualmente, se colocó el sensor CO2S-PPM conectado al ordenador mediante el sistema inalámbrico antes mencionado y un registrador de temperatura y humedad (HOBO U12-013, OnsetComp, USA), que almacena los datos mediante una memoria interna.

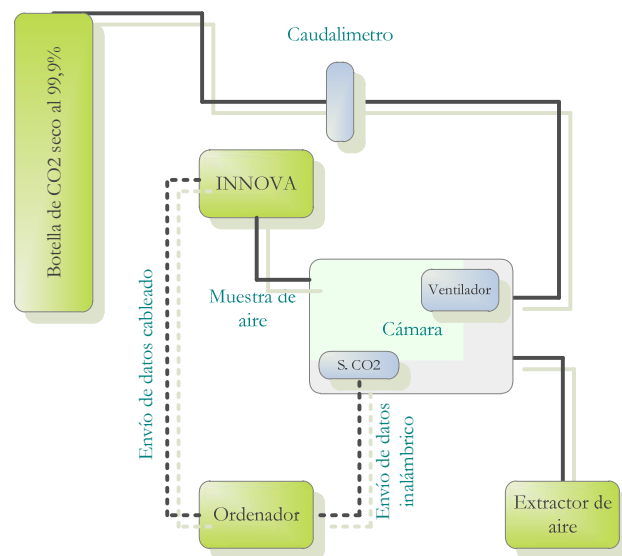


Figura 6: Esquema de la instalación realizada para la calibración de los sensores de CO₂

En el exterior de la cámara se ubicó una botella de CO₂ seco al 99,9% de pureza, con la cual se crearon concentraciones prefijadas de CO₂ dentro de la cámara. Desde el manómetro de la botella, se instaló un tubo de poliamida de 4 mm de diámetro interior hasta un caudalímetro para conocer en cada momento el caudal de CO₂ que entra en la cámara. De forma orientativa, haciendo pasar 1 L/min de CO₂ puro al interior de la cámara durante unos 90 segundos se conseguía una concentración en el interior de la misma de unas 5000 ppm.

La cámara se equipó también con un sistema de extracción de aire de la misma, mediante una bomba de aspiración con un caudal de 2,5 L/min. Esta extracción de aire permitía extraer el aire del interior de la cámara para reducir la concentración de CO₂.

Por último, se utilizó un analizador de gases fotoacústico (INNOVA 1412, LumaSense Technologies, Dinamarca) como analizador de referencia. Se trata de un sensor de mayor precisión (1,5 ppm CO₂), convenientemente calibrado, con el que se procedió a contrastar los resultados y en consecuencia poder realizar la calibración. Estudios previos con el sensor CO₂S-PPM indicaron que su rango de medida real oscilaba las 0-5000 ppm, y por tanto las pruebas realizadas se llevaron a cabo dentro de este rango. En todas las pruebas, el sensor CO₂S-PPM realizó mediciones cada 15 segundos, mientras que el medidor fotoacústico las realizó cada minuto aproximadamente. Ambos medidores estuvieron sincronizados en el tiempo para posteriormente hacer la correspondencia entre las mediciones de uno y de otro.

B.3.2. Pruebas de caracterización del sensor

La caracterización del sensor CO₂S-PPM se realizó mediante las pruebas indicadas a continuación. En primer lugar, se realizaron algunas pruebas (de la prueba 1 a la 8) en un solo sensor, con el objetivo de caracterizar su funcionamiento general. Las pruebas se realizaron en este orden con el fin de ir identificando las distintas características del sensor. En las condiciones en las que se encuentran las explotaciones ganaderas, se dan factores que pueden afectar las lecturas de los sensores de CO₂. Se trata por ejemplo de cambios en la temperatura, la humedad relativa o concentraciones elevadas de CH₄. Posteriormente se realizó una prueba comparativa (Prueba 9) entre los distintos sensores. En resumen, las siguientes fueron las experiencias realizadas:

- Prueba 1: Medición a 4 niveles de concentración
- Prueba 2: Elevada concentración de CO₂ por un largo periodo de tiempo
- Prueba 3: Medición a 3 niveles de concentración
- Prueba 4: Estudio del posible efecto cruzado del metano
- Prueba 5: Sometimiento del sensor a cambios de frío y calor
- Prueba 6: Sometimiento del sensor a cambios de humedad
- Prueba 7: Pruebas de afectación de la medida por cambio en el voltaje de alimentación
- Prueba 8: Estimación del tiempo de respuesta del sensor
- Prueba 9: Comparación entre los 12 sensores

B.3.3. Resultados de la calibración

Se realiza un resumen de los resultados de las pruebas realizadas. La respuesta del sensor en el rango de concentraciones comprendidas entre 500 y 5000 ppm es altamente lineal (*Figura 7*). Se detectaron algunas interferencias cruzadas con la temperatura y con elevadas concentraciones de CH₄ (aproximadamente a 100 ppm). Para una caída de concentración del 95% se estimó un tiempo de respuesta de 5 minutos y 8 segundos. El uso en ganadería es adecuado siempre y cuando se calibre en el momento de realizar la medida y teniendo muy presente el tiempo de respuesta del sensor.

Cabe rescatar con más detalle los resultados de la última prueba realizada, ya que compete considerablemente a los objetivos propuestos para el presente trabajo. Puesta en marcha la WSN, se pueden ver en la *Tabla 2* los valores medios de CO₂ obtenidos por cada sensor y en cada nivel de concentración. Se observa que existieron diferencias significativas entre las lecturas de los diferentes sensores utilizados en los distintos niveles de concentración ensayados ($p < 0,05$). En la *Tabla 2*,

además se observa que en todos los casos, las lecturas de los sensores ensayados fueron muy superiores a los niveles indicados por el medidor de referencia INNOVA..

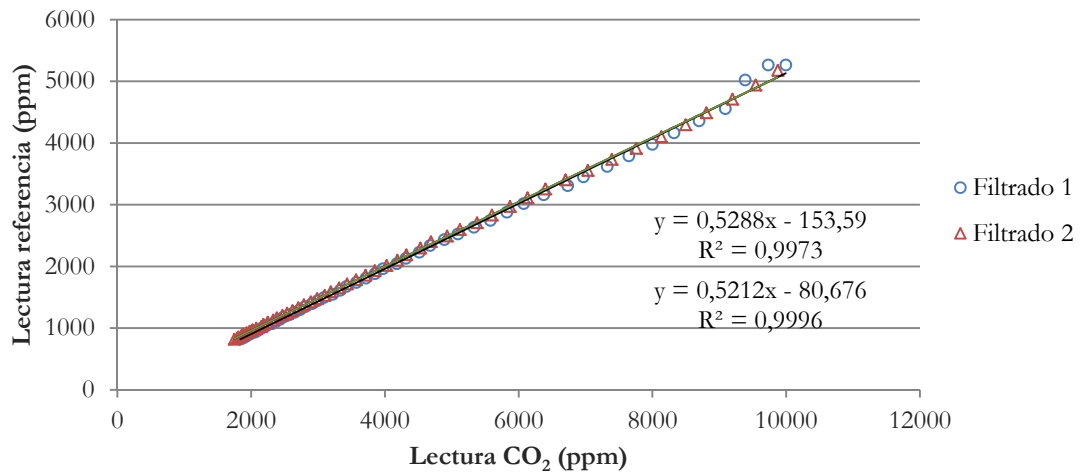


Figura 7: Resultados de uno de los ensayos de linealidad en la medida de concentración de CO₂ con el sensor analizado

Tabla 2: Resultado de la lectura de CO₂ generada por la WSN y el sensor INNOVA

Id Sensor	Concentración		
	500 ± se	2500 ± se	5000 ± se
1	2328,0l ±2,1	5823,5l ±4,0	9153,7k ±6,9
2	841,6e ±2,1	3013,3f ±4,0	5073,8d ±6,3
3	774,1b ±2,1	2843,2b ±4,0	4885,5b ±6,3
4	1976,8k ±2,1	5133,0k ±4,0	8280,0j ±6,3
5	943,2g ±2,1	3150,3g ±4,0	5339,7g ±6,3
6	743,1a ±2,1	2751,7a ±4,0	4762,0a ±6,3
7	866,6f ±2,1	2992,8e ±4,0	5111,2e ±6,3
8	828,0d ±2,1	2951,6d ±4,0	5079,9d ±6,3
9	978,7h ±2,1	3164,2h ±4,0	5274,7f ±6,3
10	1219,9i ±2,1	3547,7i ±4,0	5759,0h ±6,3
11	1333,6j ±2,1	3779,1j ±4,0	6132,3i ±6,3
12	822,0c ±2,1	2921,5c ±4,0	4993,7c ±6,3
INNOVA	607,9 ±2,6	2386,5 ±2,6	4039,4 ±2,6
Id Sensor	500 ± se	2500 ± se	5000 ± se

Adicionalmente, se obtuvo un efecto significativo de la interacción entre el sensor utilizado y el nivel de CO₂ ensayado. Esto indica la posibilidad de que las pendientes de las rectas de calibración de cada sensor sean distintas. Esto indica, por ejemplo, que a niveles bajos de concentración de CO₂ la lectura de un sensor “A” sea mayor que la de otro sensor “B”, pero que a niveles altos de concentración de CO₂ suceda lo contrario.

La *Tabla 3* muestra los coeficientes de regresión de la recta de calibración donde se confirmaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en las rectas de calibración, tal como sugieren los resultados indicados anteriormente.

A pesar de las diferencias entre las rectas de calibración, la R^2 de cada sensor está muy próxima a 1 permitiendo la repetibilidad de los datos. Sin embargo, el error estimado es alto en todos los sensores. La curva de calibración responde a la siguiente expresión:

$$CO_2 \text{ sensor} = \beta_0 + \beta_1 \times CO_2 \text{ ref} + \varepsilon$$

Tabla 3: *Parámetros de la curva de calibración para cada uno de los sensores*

<i>Id Sensor</i>	β_0	β_1	R^2	<i>Error estándar de estimación</i>
1	1086a	2,00a	0,998	116,3
2	83b	1,23b	0,997	92,4
3	20c	1,20c	0,996	110,1
4	821d	1,83d	0,997	147,7
5	132e	1,28e	0,994	140,4
6	3c	1,17f	0,996	106,9
7	82b	1,24bg	0,996	108,7
8	41f	1,24g	0,997	103,6
9	198g	1,25h	0,995	128,6
10	398h	1,33i	0,994	147,1
11	459i	1,40j	0,993	164,8
12	56f	1,21k	0,996	105,7

B.4. PRUEBAS REALIZADAS

Se pretende entonces usar el CO₂ como gas trazador, lo que significa la aplicación de un método directo de análisis de distribución de contaminantes, midiendo entonces su concentración en algunos puntos de la sala para determinar los fenómenos de transporte y estratificación ocurridos.

Debido a que el máximo inconveniente de usar CO₂ como gas trazador es el ser un componente habitual del aire, se deben alcanzar concentraciones altas en el espacio de estudio para evitar perturbaciones o medidas incoherentes. Por estudios previos se sabe que el rango de concentraciones en el aire exterior oscila entre 300-500 ppm, siendo aconsejable alcanzar y trabajar en las pruebas entre 1000-3000 ppm. El valor límite de exposición profesional (LEP-VLA) del INSHT para exposiciones diarias de 8 horas es de 5000 ppm con un valor límite para exposiciones cortas de 15 minutos de 15000 ppm. No implican por lo tanto las concentraciones a alcanzar en las pruebas un riesgo para la salud humana, siendo innecesario el uso de implementos como mascarillas o filtros respiratorios.

En los estudios que hacen uso de gases trazadores, se utilizan básicamente tres métodos diferentes para el análisis del flujo del fluido:

- Método de la caída de concentración
- Método de la emisión constante
- Método de la concentración constante

En el presente caso se utilizará el segundo método citado en el cual se hace una renovación continua de aire durante periodos largos de tiempo. Este método se utiliza principalmente para medir velocidades de ventilación, caudales de aire en los conductos o efectuar un seguimiento de la contaminación existente. Consiste en liberar el gas trazador en el recinto a una velocidad constante a lo largo de todo el periodo de medida. Cualquier cambio que se presente en la concentración de gas trazador estará relacionado con la velocidad de renovación.

B.5. ESPECIFICACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Debido al considerable número de variables a controlar en el presente estudio, se ha optado por un único escenario real. Sin embargo en el proceso de modelado y simulación se propondrán casos que se diferencian entre sí en las ecuaciones, las constantes o las variables de contorno.

En la *Figura 8* es posible observar en color rojo las entidades seleccionadas para la conformación del caso real (Errata en la *Figura 8* las ventanas seleccionadas son las inferiores y el ventilador escogido es justo el del medio de abajo):

- Ventilador y chimenea del centro de la primera fila
- Los demás ventiladores no entrarán en servicio
- Se abrirá solo las ventanas ubicadas en la segunda fila al máximo posible de apertura
- Las demás ventanas permanecerán cerradas

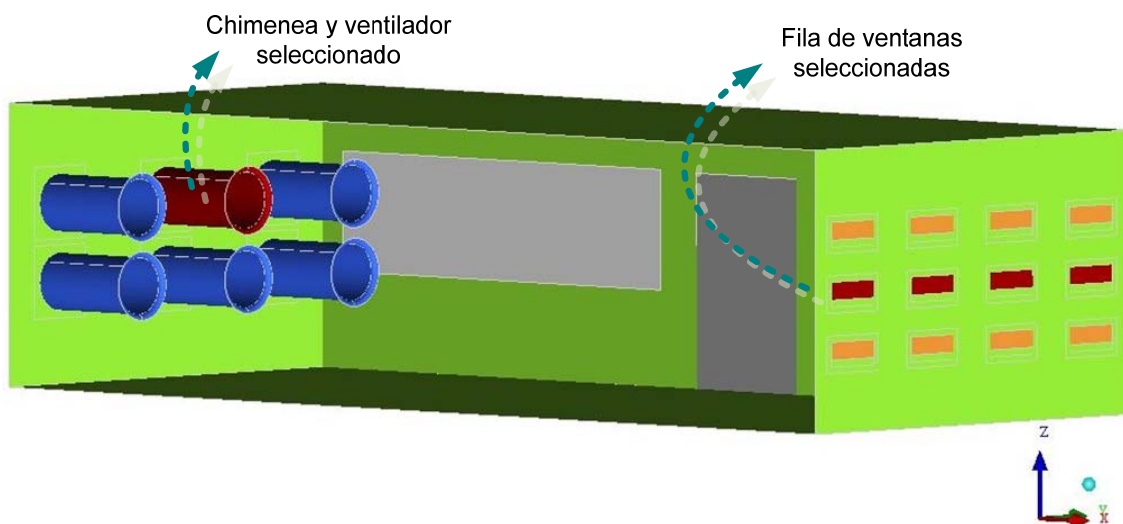


Figura 8: Chimenea y ventanas seleccionadas para la conformación del caso real de estudio

En el caso de los ventiladores, la selección de solo uno de ellos es debida a la alta potencia que posee cada uno, lo que propiciaría grandes depresiones en la sala y por lo tanto impediría la dispersión y estratificación del gas trazador. De igual forma, en instalaciones agrícolas o de uso

humano, la depresión que se puede generar por efecto de la ventilación en el recinto, deben ser bajas por razones de confort, siendo por lo tanto un aspecto que se encuentra estipulado en la normativa de edificación (de la Edificación, 2006). Así mismo, el uso de varios extractores aumenta la posibilidad de generar estructuras turbulentas complejas, lo que implicaría usar modelos proporcionalmente más complejos y por ende computacionalmente más exigentes. Estudiar entonces las estructuras turbulentas generadas con alto detalle es un objetivo por fuera del presente trabajo.

Las velocidades deseadas a alcanzar en los ventiladores oscilarían entre los 5 m/s y los 10 m/s. El anterior rango se debe a que en estudios previos y documentos técnicos (ESCODA, 2009) se demuestra que la velocidad del aire para ventilar una granja, está directamente relacionada con la temperatura del recinto; así, para temperaturas bajas, una velocidad de más de 0,5 m/s causa una sensación de frío. La *Tabla 4* recopila la velocidades recomendadas en granjas de acuerdo al espacio y la especie (ESCODA, 2009).

En lo que respecta a las ventanas, por motivos semejantes a los planteados para los ventiladores como son la reducción de las estructuras turbulentas complejas en el flujo del fluido o las altas velocidades que se pudiese presentar en la ventilación del recinto, sólo se manipularán las ventanas de la fila del medio. La velocidad esperada del viento que ingresa por las ventanas tomarían un valor entre 0,5 m/s y 1,5 m/s, lo que correspondería que el viento exterior estaría en “Calma” o sería un “Aire Ligero” según la Escala de Beaufort (Jebson, 2007). Como en la sala el estudio se realizará eligiendo como gas trazador CO₂, se tendrá en cuenta en el momento de realizar las simulaciones que normalmente el aire posee una concentración de ésta sustancia de aproximadamente 500 ppm (INSHT, 2009)

Tabla 4: Velocidad del aire recomendada para distintas especies así como el espacio necesario para su alojamiento

Especie		Espacio		Velocidad del aire [m/s]	
		m ²	Nº Animales	Invierno	Verano
Avícola	Ponedoras	9	100	0,15	0,3
	Pollos de carne	6	100	0,1	0,2
Cunícola	Gazapos	5 ÷ 7	100	0,15	0,25
	Gazapos en recría	20 ÷ 25	100		
	Hembra con sus crías	40 ÷ 50	100		
Porcino	Maternidad	7 ÷ 7,5	1	0,05	0,1
	Lechones	0,3 ÷ 0,55	1	0,15	0,2
	Engorde 25 kg	0,3 ÷ 0,55	1	<0,2	<1,5
	Engorde 110 kg	0,3 ÷ 0,55	1	<0,5	<4,5
Bovino	Jóvenes	2,5 ÷ 6,5	1	(T < 5°C) 0,1 (T < 10°C) 0,2	
	Adultos			(T < 5°C) 0,2	
Ovino	Ganado ovino	-	-	Máx. < 0,2	

La inyección del CO₂ en la sala se realizará por medio del acople de una manguera a una botella con el gas que posee una concentración del 99,9%. Debido a que la botella suministradora del gas se ubicará en la sala de control, la longitud de la manguera debe alcanzar para transportar el CO₂ hasta la sala de estudio y luego ser distribuida uniformemente en la sala. El largo total de la manguera es de 21 m, y la ubicación en la sala es la que se observa en la *Figura 9*. La línea en color

amarillo corresponde a la zona de la manguera que será perforada cada 10cm con un orificio de aproximadamente 1 mm de diámetro. La línea de color rojo no se perforará para obtener una aportación del gas lo más centrada posible y por lo tanto evitando posibles efectos de la pared.

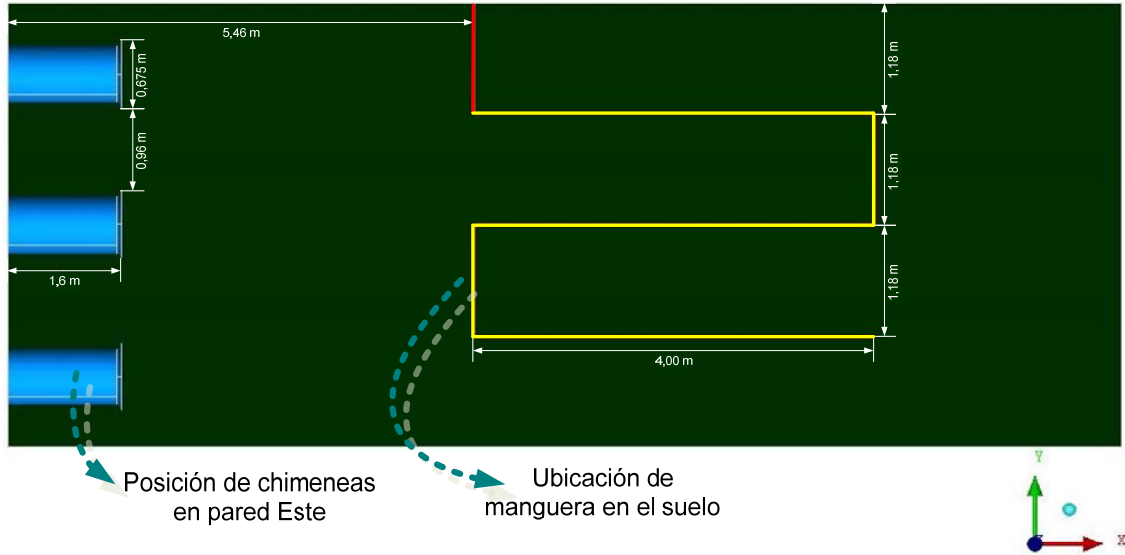


Figura 9: Ubicación de la manguera a nivel del suelo de la sala, donde el tramo en color amarillo posee las perforaciones para la salida del CO₂

B.5.1. Mallado

Una vez se tenía clara y parametrizada la geometría, se procedió a realizar las mallas a usar con los modelos en la simulación. Se seleccionó para tal proceso el programa comercial Ansys Icem v. 12.1 (Ansys, 2009). Aunque con técnicas avanzadas de mallado, más trabajo y tiempo es posible obtener para la geometría planteada mallas con elementos estructurados, se desistió de intentar conseguir las por la asimetría presentada. El hecho que sean 6 elementos geométricos en una de las paredes (6 chimeneas de extracción) y justo en la pared opuesta sean 9 elementos geométricos (9 ventanas que luego fueron reducidas a 3 por selección del caso a estudiar), dificulta el proceso de mallado estructurado en lo que respecta a la asociación de los bloques. Nuevamente aspirando obtener en la mayoría del volumen a mallar elementos estructurados, se realizaron pruebas con mallas híbridas: mallas estructuradas con zonas transicionales no estructuradas. Sin embargo tras algunas simulaciones de prueba se llegó a la conclusión que los resultados son desfavorables mas que nada por el cambio tan brusco de volúmenes y formas geométricas que se pueden llegar a dar. Finalmente se decantó la decisión por lograr un mallado con elementos no estructurados.

Para verificar la solución del modelo en CFD, se realiza un estudio de la convergencia o la influencia de la malla en los resultados simulados de concentración de CO₂ (Roache, 1994). En el apartado de “Verificación de la malla” que se encuentra más adelante, se discuten y enseñan dichos resultados. Se crearon tres mallas diferentes usando entonces elementos no estructurados o lo que es igual a tres mallas no estructuradas. La densidad de cada malla fue definida por el ratio de refinamiento (r), el cual se precisa para mallas en 3D como el ratio entre el número de elementos de la malla más densa (Δ_{fina}) y la menos densa (Δ_{gruesa}):

$$r = \left(\frac{\Delta_{fina}}{\Delta_{gruesa}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Es recomendado entonces que el ratio de refinamiento de la malla sea mayor a 1,3 (Celik, 2004) para poder que la discretización del error sea independiente de otras fuentes de error. En la *Tabla 5* se observa el valor del ratio de refinamiento, los cuales quedan por encima del valor recomendado. Se exponen también los valores máximos de la celda más grande y los de las celdas más pequeñas. Los anteriores son parámetros introducidos en el mallado con los cuales se cuida que la divergencia entre el volumen de la celda más grande de toda la malla y la celda con volumen mas pequeño exista una diferencia máxima del 25% del valor mayor:

$$\text{máx.valor} * \frac{25}{100} = \text{mín.valor}$$

También se recogen la *Tabla 5* los principales valores de calidad de la malla. Se observa que el parámetro de “skewness” es inferior a 0,6, lo que asegura que la malla se encuentre en una zona en la cual Fluent asegura ser buena para la simulación. Valores superiores catalogan una malla como inaceptable para la simulación, y valores inferiores califican la malla como muy buena o excelente. Un ejemplo del mallado realizado se plasma en la *Figura 10* donde se visualiza el aspecto de algunas de las paredes con la malla de densidad o tamaño medio.

Tabla 5: Tamaño de las tres mallas realizadas y el parámetro de refinamiento para cada una

	<i>Malla gruesa</i>	<i>Malla media</i>	<i>Malla fina</i>	<i>r₃₂</i>	<i>r₂₁</i>
Número de celdas	$\Delta_3 = 473.696$	$\Delta_2 = 1.013.044$	$\Delta_1 = 3.628.502$	1,38	1,53
Máx. valor de celda más grande	0,17	0,11	0,076	-	-
Máx. valor de celda más pequeña	0,1275	0,0805	0,057	-	-
“Squish” máx. presente en celda	$4,93360e^{-1}$	$4,92278e^{-1}$	$5,28513e^{-1}$	-	-
“Skewness” máx. presente en celda	$5,83938e^{-1}$	$5,58844e^{-1}$	$5,84925e^{-1}$	-	-
Máx. ratio de aspecto	$9,43407e^{+0}$	$8,51936e^{+0}$	$9,48281e^{+0}$	-	-

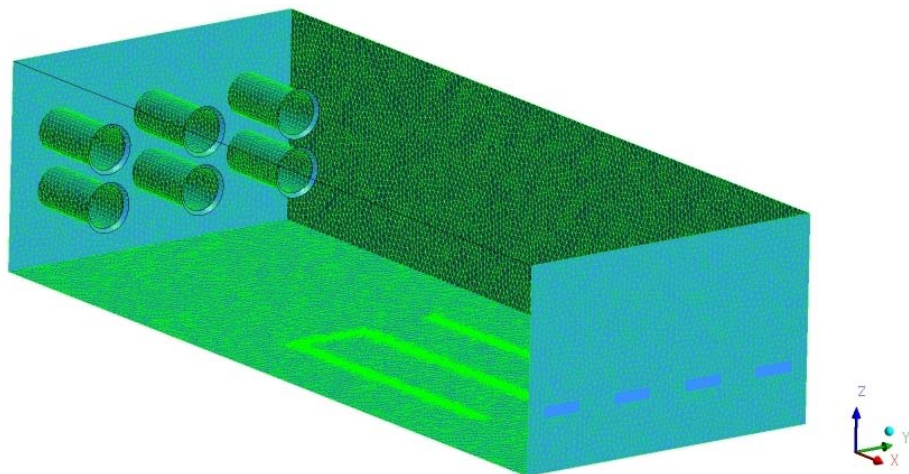


Figura 10: Vista de algunas de las paredes del modelo con la malla media no estructurada generada

Un aspecto importante en la realización de las mallas del caso se presentó en la definición de las salidas del CO₂ desde la manguera. Dado que los orificios son del orden de 1 a 2mm de diámetro, si

se modelaran como círculos se tendría que generar una densidad de la malla tan alta para que las celdas alcanzaran a aproximarse perimetralmente al orificio. Lo anterior, conlleva entonces que la capacidad de cálculo se tendría que aumentar o en su defecto el tiempo de cálculo cuando se tienen recursos de hardware limitados. Una posible solución es hacer zonas de alta densidad de la malla alrededor de los círculos nuevamente hasta alcanzar tamaños idóneos para la aproximación perimetral de las celdas a las curvas que describen los orificios. Sin embargo, la última opción en el momento de la simulación genera inconvenientes, ya que el salto dimensional entre las celdas más pequeñas a las normales para rellenar el volumen del recinto es muy alto. Se debe cuidar por lo tanto que no existan tales saltos en los volúmenes de las celdas.

La estrategia para dar salida al obstáculo del mallado de los orificios de la manguera, es plantear efectivamente zonas alrededor de la posición de la manguera de alta densidad, de tal forma que se obtengan celdas pequeñas, pero cuyo volumen no sea tan bajo que el salto en las dimensiones con las demás celdas sea un inconveniente. Con lo anterior en vez de tener circunferencias como modelo de los orificios, se seleccionan las caras de celdas que se encuentran en la ubicación de las perforaciones (*Figura 11*).

Un último tema que se tuvo presente y para el cual se realizó varias pruebas de mallas con sus respectivas simulaciones, fueron las chimeneas o toberas que conducen el aire que extrae el ventilador. Éstas poseen un reborde redondeado que en el diseño evitan las altas turbulencias en la entrada del fluido. Éste reborde es irregular desde fábrica y por lo tanto cada tobera tiene pequeñas variaciones en la zona (*Figura 12*). En la geometría de plantarse tales rebordes como curvas, generan al final celdas altamente irregulares y por lo tanto muchos de los parámetros de calidad se reducen sustancialmente gracias a los volúmenes que circundarían el reborde. Como solución se idealiza entonces la curva a una pendiente, generando así mejores resultados de calidad de la malla y por supuesto en el cálculo.

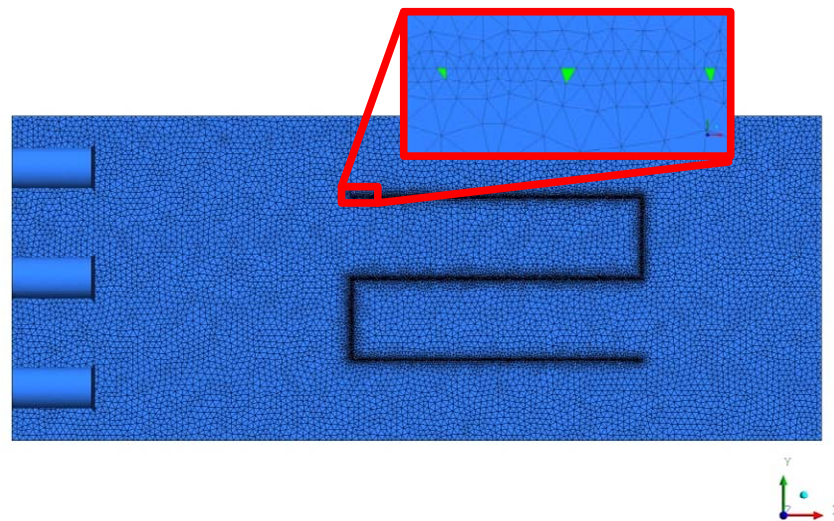


Figura 11: Idealización de los orificios de la manguera con caras de la celdas que circundan la manguera



Figura 12: Idealización en el mallado de los rebordes de las toberas

B.5.2. Ubicación de los nodos de la WSN

Los sensores de CO₂ se ubicarán en puntos predefinidos para poder así comparar las medidas con los datos simulados. Hay un total de doce sensores disponibles, diez de los cuales se dispondrán en tres planos de corte del eje x (Figura 13). Los dos restantes se ubicarán uno en la entrada de la tobera del ventilador y otro en la ventana. Para facilitar el fácil reconocimiento de su posición, se les asignará un número con dos unidades. La primera corresponde al plano en el que se encuentra ubicado, y el segundo al orden de numeración del sensor en el plano. En la Tabla 6 se observa la asignación de las posiciones a cada nodo. Para su suspensión y sujeción se recurrirá a los rieles instalados por defecto en la sala ayudado de una cuerda con las medidas exactas de la posición del sensor.

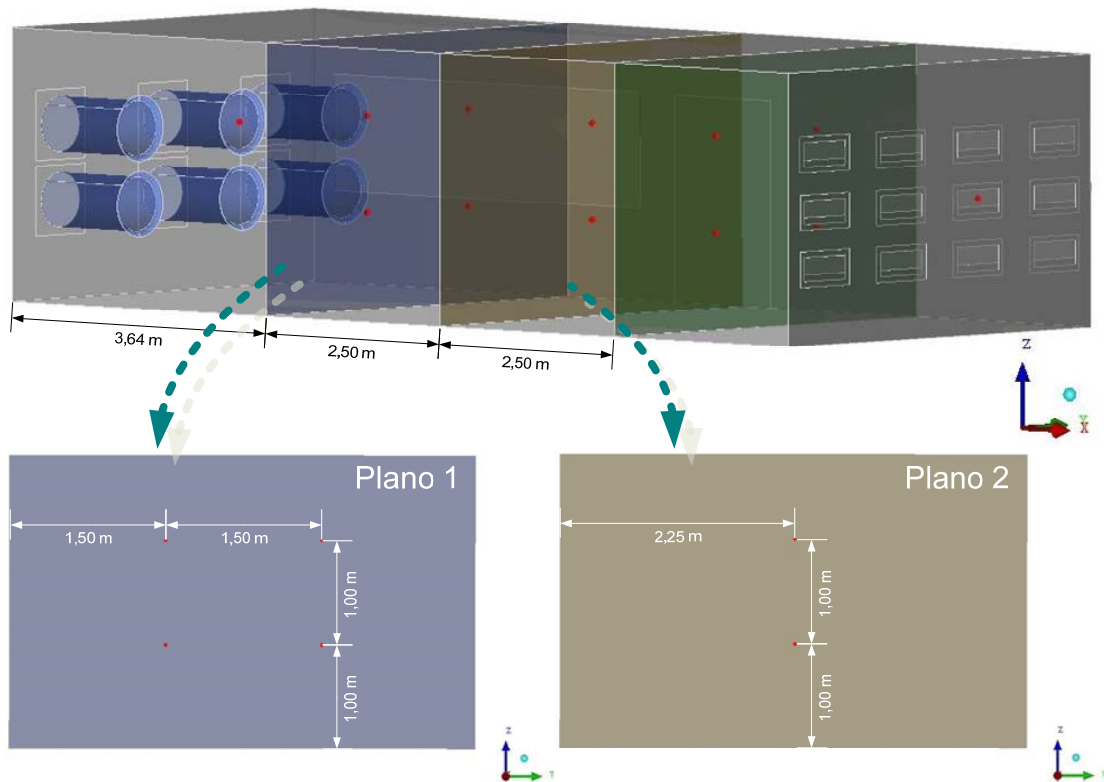


Figura 13: Planos para la ubicación de los sensores de CO₂ en la sala de estudio

Tabla 6: Asignación de cada nodo a una posición específica dentro del volumen de estudio

Sensor	Número de nodo
S. Venti	1
S. 1 1	2
S. 1 2	3
S. 1 3	4
S. 1 4	5
S. 2 1	6
S. 2 2	7
S. 3 1	8

S. 3 2	9
S. 3 3	10
S. 3 4	11
S. Venta	12

B.5.3. Disposición del modelo

Para la simulación de los casos en CFD se seleccionó el paquete comercial Fluent el cual fue adquirido por la compañía Ansys y actualmente se encuentra integrado dentro de la versión Ansys v. 12.1 (Ansys, 2009). De igual manera, para el proceso de análisis y verificación de los resultados se utiliza CFD-Post igualmente integrado en el conjunto de programas que posee Ansys v. 12.1. Se desea simular entonces el flujo del aire y la dispersión y estratificación del CO₂ en la sala de experimentación. El gas es inyectado por medio de una manguera desde una sala de control y su movimiento en el ambiente se genera por viento proveniente de las ventanas ubicadas en una de las paredes del recinto y extraído por un ventilador al cual se le acopla unas toberas. La configuración del modelo en CFD busca replicar las condiciones dentro del recinto durante el experimento. Los resultados del presente apartado son analizados, discutidos y concluidos en la sección de “PRUEBAS Y RESULTADOS”. Sin embargo varios de los parámetros que son expuestos en ésta sección son resultado del modelo ya calibrado usando la metodología para la validación de modelos CFD ambientales.

Dentro de las primeras configuraciones seleccionadas en Fluent para las simulaciones se encuentra que se utilizarán modelos y algoritmos basados en la presión, con una formulación de la velocidad de tipo absoluto y se usaran condiciones de estado estacionario. La última característica genera que dentro de las pruebas a realizar experimentalmente, se busquen zonas de homogenización o equilibrio tras la aplicación de unas condiciones iniciales y constantes a lo largo de la prueba (en las ecuaciones resolutivas se omite por lo tanto la componente del tiempo).

Dado que el interés del presente trabajo no es estudiar al detalle las estructuras turbulentas que se generan con el flujo del fluido en la sala, se hace aceptable usar un modelo RANS. Se escoge entonces como modelo de la viscosidad un modelo $k - \epsilon$ (k – épsilon) realizable basado en dos ecuaciones (todas las constantes del modelo se dejaron por defecto). Para la anterior selección se realizaron pruebas para observar cual era la mejor opción. Un modelo $k - \epsilon$ standard o RNG genera inestabilidad en los residuos y por lo tanto impide la convergencia de la simulación. Para el tratamiento de los fenómenos que ocurren cerca de las paredes se escogió las funciones de pared estándares (así denominadas en el programa). Aunque no se analizaría algún tema relacionado con la temperatura o la transferencia de calor, también se activó el modelo de energía.

El aire es modelado como un gas ideal. Así mismo se escogió un modelo de transporte para simular la mezcla entre el aire y el CO₂. En el modelo se activó que el aporte de CO₂ en el recinto se generaría por medio de una entrada de difusión y por ende que existiría una fuente de difusión de la energía. Dado que se utilizaría el modelo de transporte comentado con CO₂ (siendo el CO₂ un gas próximo a un gas ideal y más denso que el aire, 1,529 con respecto al aire) se activó la gravedad.

Para las condiciones de contorno se realizaron algunas campañas de mediciones. Tras la instalación de la estación meteorológica, se analizó la influencia de la velocidad y dirección del aire externo con el medido a la entrada de las ventanas (usando el anemómetro de hilo caliente). Se llegó a la conclusión que para las velocidades del ventilador manejadas y en particular, la velocidad seleccionada para el caso (valor de referencia en el control de velocidad del ventilador de un 20%) el aporte del viento exterior no es significativo frente al conseguido con la extracción generada por la turbina. Para saber los valores que genera el ventilador a diferentes velocidades se toman varios puntos de velocidad de referencia y se mide la presión diferencial (ΔP) y la velocidad en la coordenada x (*Tabla 7*). Se asume para el cálculo de la presión absoluta desde la ΔP que la presión en el ambiente (P_{ref}) es de exactamente 101325 Pa. Se observa en la *Tabla 7* que las medidas se

introducen como rangos. Esto se debe a que el control de velocidad del ventilador posee unas aspas automáticas para el control del caudal. Dado que el control no se encuentra muy afinado, éstas aspas oscilan y en consecuencia generan variaciones en las variables analizadas. En todos los casos se intenta entonces seleccionar como valor de la variable de contorno un valor que se encuentre en el rango. Los valores de la *Tabla 8*, aunque cobrarán más sentido en la sección de resultados, muestran para la velocidad de ventilación seleccionada en el caso del 20%, que en los diferentes puntos de ubicación de los sensores se genera un rango de presión relativa similar. El recinto posee entonces una depresión casi constante. En el caso de la velocidad solo se midió en la posición de los sensores más cercanos al suelo. Se observa una variación entre los resultados lo cual se explicará más adelante con los fenómenos ocurridos en el flujo del fluido. En la *Tabla 9* se hace un compendio de los diferentes parámetros ingresados como variables de contorno para las zonas de componen la geometría del modelo.

Tabla 7: Muestras tomadas para la definición de la condición de contorno en el ventilador y las ventanas

% Ventilación en el control	Ventilador		Ventana		Plano 2	
	ΔP [Pa]	$ u $ [m/s]	ΔP [Pa]	$ u $ [m/s]	ΔP [Pa]	$ u $ [m/s]
5	1,0 – 5,0	0,6 – 0,8	0,6 – 2,0	0,58 – 1,23	0,2 – 0,5	0,00 – 0,05
10	2,0 – 7,0	0,9 – 1,5	1,4 – 5,4	0,96 – 1,39	0,3 – 1,1	0,05 – 0,10
20	4,0 – 11,0	1,8 – 2,8	4,5 – 6,1	1,80 – 1,92	1,5 – 2,3	0,09 – 0,21
30	9,0 – 17,0	2,4 – 3	7,5 – 10,3	2,50 – 2,88	3,8 – 4,4	0,18 – 0,26
40	15,0 – 30,0	3,1 – 3,3	12,2 – 19,0	2,87 – 3,12	6,6 – 7,4	0,25 – 0,39
50	25,0 – 32,0	3,9 – 4,5	20,5 – 30,8	3,64 – 4,00	7,8 – 10	0,30 – 0,55
60	45,0 – 50,0	4,5 – 4,9	35,5 – 47,2	4,16 – 4,56	12 – 14,2	0,39 – 0,66
70	50,0 – 55,0	5,2 – 5,4	45,1 – 51,8	4,66 – 5,29	14,4 – 16,5	0,40 – 0,71
80	55,0 – 63,0	5,5 – 5,7	51,0 – 58,7	5,10 – 5,61	18,4 – 21,4	0,57 – 1,13

Tabla 8: Datos tomados para la comprobación de las principales variables en la ubicación de los sensores de CO₂

Ubicación	ΔP [Pa]	$ u $ [m/s]
S. 1 1	1,6 – 2,2	–
S. 1 2	1,7 – 2,2	0,03 – 0,17
S. 1 3	1,6 – 2,2	–
S. 1 4	1,7 – 2,2	0,02 – 0,16
S. 2 1	1,8 – 2,3	–
S. 2 2	1,8 – 2,5	0,14 – 0,24
S. 3 1	2,0 – 2,3	–
S. 3 2	1,8 – 2,3	0,20 – 0,44
S. 3 3	1,8 – 2,5	–
S. 3 4	1,8 – 2,3	0,16 – 0,25

Tabla 9: Compendio de las condiciones de contorno del modelo CFD

Zona	Tipo	Energía	Masa y momento	Especie
------	------	---------	----------------	---------

Ventilador 1 1	Wall	$T_i = 26,85$ [°C] $b_c = 0$ [W/m ² K]	$R_h = 0,001$ [m] $R_c = 0,5$ [-] No slip wall	Zero diffusive flux
Ventilador 1 2	Wall	$T_i = 26,85$ [°C] $b_c = 0$ [W/m ² K]	$R_h = 0,001$ [m] $R_c = 0,5$ [-] No slip wall	Zero diffusive flux
Ventilador 1 3	Wall	$T_i = 26,85$ [°C] $b_c = 0$ [W/m ² K]	$R_h = 0,001$ [m] $R_c = 0,5$ [-] No slip wall	Zero diffusive flux
Ventilador 2 1	Wall	$T_i = 26,85$ [°C] $b_c = 0$ [W/m ² K]	$R_h = 0,001$ [m] $R_c = 0,5$ [-] No slip wall	Zero diffusive flux
Ventilador 2 2	Exhaust-fan	$T_o = 26,85$ [°C]	$P = 101315$ [Pa] $P_i = 101329$ [Pa] $I_t = 10$ [%] $\phi = 0,567$ [m]	$m_{o2} = 0$ [%]
Ventilador 2 3	Wall	$T_i = 26,85$ [°C] $b_c = 0$ [W/m ² K]	$R_h = 0,001$ [m] $R_c = 0,5$ [-] No slip wall	Zero diffusive flux
Suelo	Wall	$T_i = 26,85$ [°C] $b_c = 0$ [W/m ² K]	$R_h = 0,001$ [m] $R_c = 0,5$ [-] No slip wall	Zero diffusive flux
Orificios manguera	Pressure-inlet	$T_o = 26,85$ [°C]	$P = 101329$ [Pa] $P_i = 101325$ [Pa] $I_t = 5$ [%] $\phi = 0,002$ [m]	$m_{o2} = 1$ [%]
Chimeneas	Wall	$T_i = 26,85$ [°C] $b_c = 0$ [W/m ² K]	$R_h = 0,001$ [m] $R_c = 0,5$ [-] No slip wall	Zero diffusive flux
Techo	Wall	$T_i = 26,85$ [°C] $b_c = 0$ [W/m ² K]	$R_h = 0,001$ [m] $R_c = 0,5$ [-] No slip wall	Zero diffusive flux
Paredes	Wall	$T_i = 26,85$ [°C] $b_c = 0$ [W/m ² K]	$R_h = 0,001$ [m] $R_c = 0,5$ [-] No slip wall	Zero diffusive flux
Ventana fila 1	Wall	$T_i = 26,85$ [°C] $b_c = 0$ [W/m ² K]	$R_h = 0,001$ [m] $R_c = 0,5$ [-] No slip wall	Zero diffusive flux
Ventanas fila 2	Wall	$T_i = 26,85$ [°C] $b_c = 0$ [W/m ² K]	$R_h = 0,001$ [m] $R_c = 0,5$ [-] No slip wall	Zero diffusive flux
Ventanas fila 3	Inlet-vent	$T_o = 26,85$ [°C]	$P = 101330$ [Pa] $P_i = 101325$ [Pa] $I_t = 5$ [%] $\phi = 0,4$ [m]	$m_{o2} = 0,05$ [%]

Se seleccionó como método de acoplamiento entre la presión y la velocidad el algoritmo SIMPLE (Ansys, 2009). Sin embargo, en las simulaciones se comparó el resultado entre usar al algoritmo SIMPLE o SIMPLEC, ya que es depende considerablemente del número de Reynolds que se presente o lo que es igual a la complejidad de las estructuras turbulentas generadas. En el caso en que dichas estructuras fuesen sencillas, posiblemente el algoritmo SIMPLEC puede generar una convergencia más rápida, ya que ofrece unos factores de relajación más altos que el algoritmo SIMPLE.

Para todo tipo de flujos, Fluent utiliza internamente presión manométrica (relativa a la atmosférica). De todos modos, este modo de proceder exige que en algún momento se fije el valor

absoluto de la presión a la cual quedan referidos todos los cálculos a partir de ese momento. Es por tal razón que se introduce como presión de operación el valor de 1 atm (101325 Pa).

C. PRUEBAS Y RESULTADOS

C.1. VERIFICACIÓN DE LA MALLA

Para verificar la solución del modelo en CFD se realizó un estudio de la convergencia o la influencia de la malla en los resultados de concentración de CO₂ en el modelo geométrico planteado. Como se comentó en el apartado de “Mallado” se crearon tres mallas diferentes usando elementos no estructurados.

En la *Figura 14* se observan los perfiles de concentración del CO₂ en las verticales donde se encuentran ubicados los sensores para las tres mallas propuestas. Permite así comparara y realizar una verificación cualitativa entre los cálculos obtenidos en la simulación haciendo uso de las tres mallas.

Una verificación cuantitativa también se llevó a cabo, gracias al cálculo del Índice de Convergencia de la Malla (GCI). El índice mencionado se basa en la extrapolación de Richardson el cual permite estimar el error de convergencia para una malla fina. El GCI es descrito por medio de la siguiente expresión:

$$GCI^{fina} = F_s \left(\frac{e}{r^p - 1} \right)$$

donde F_s es el factor de seguridad que es igual a 1,25 cuando se están comparando tres o más mallas (Celik, 2004) y p es el orden de convergencia que se calcula con la siguiente expresión:

$$p = \frac{\ln \left| \frac{f_{gruesa} - f_{media}}{f_{media} - f_{fina}} \right|}{\ln r}$$

En el presente análisis, el orden de convergencia para el cálculo del GCI se toma como la media del valor sobre los puntos tomados o la posición de los sensores ($p_{32} = 5,10$ y $p_{21} = 3,86$). En el caso de e que es el error entre la malla más gruesa y la más fina, se obtuvo por medio de la siguiente expresión:

$$e = \frac{f_{gruesa} - f_{fina}}{f_{fina}}$$

El índice GCI podría se aplicado a cualquier variable en una simulación con técnicas CFD. Para el presente caso y en el apartado que ahora compete, la GCI fue calculada para los diferentes valores de concentración de masa de CO₂ que se obtienen de las posiciones donde fueron ubicados los sensores de CO₂. (*Tabla 10*). La comparación cualitativa de la *Figura 14* muestra un comportamiento similar entre los perfiles arrojados por la malla media (Δ_2) y la malla fina (Δ_1). En la comparación cuantitativa plasmada en la *Tabla 10* los reducidos valores de índice GCI confirman la independencia de la solución y definen la malla media (Δ_2) como la malla a usar para el resto de simulaciones y análisis. En la *Tabla 11* se recoge la precisión que alcanzan los valores obtenidos tras simular cada caso con una malla en comparación con los valores medidos experimentalmente, donde cantidades cercanos a uno significan un mayor acercamiento entre los datos analizados. Los valores calculados por el índice $GCI^{gruesa_{32}}$ (que puede se visto como el error de estimación asociado con la resolución de la malla) están más cercanos a la precisión de la medida tomadas por los sensores mientras que los valores que los valores $GCI^{fina_{32}}$ son innecesariamente bajos. Aunque la

mallas gruesa puede llegar a generar buenos resultados, se selecciona la malla Δ_2 como el mejor compromiso entre el nivel de incertidumbre y el costo computacional.

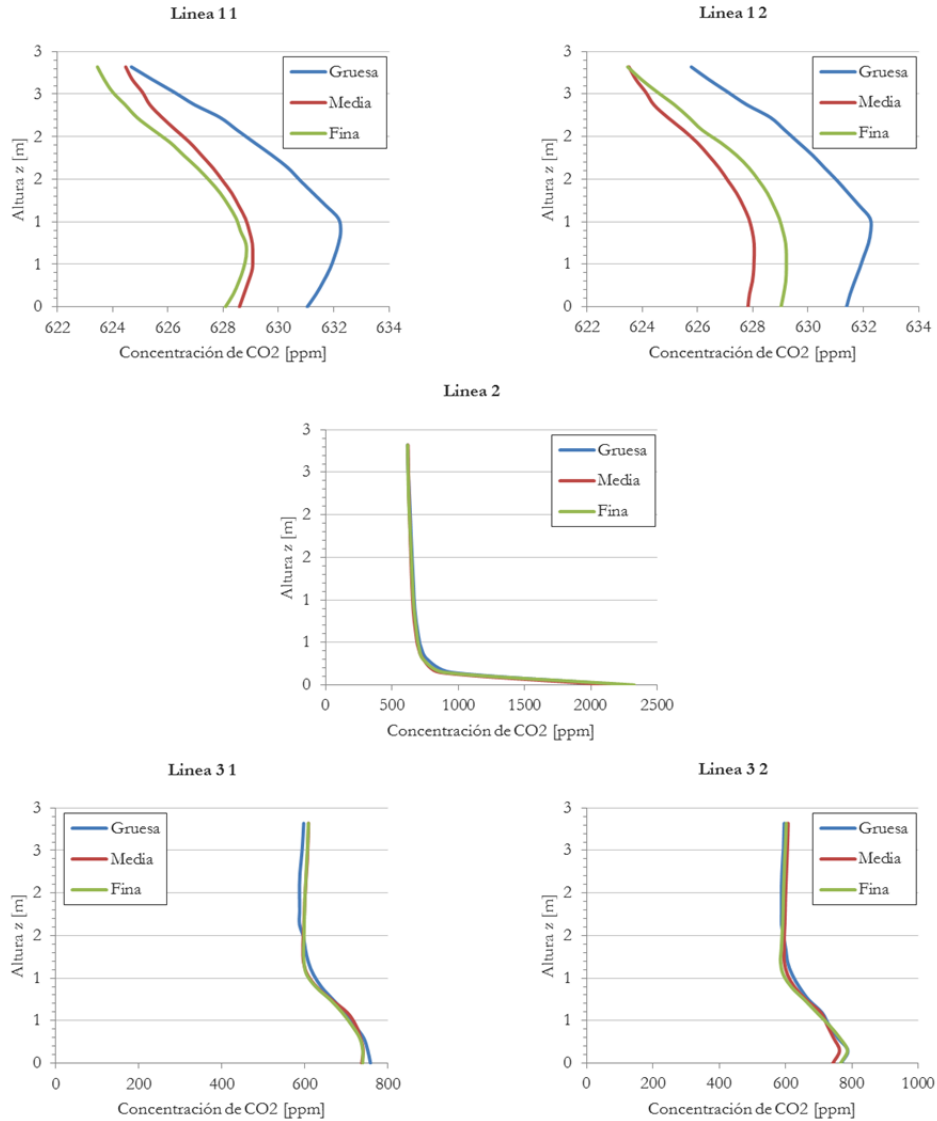


Figura 14: Perfiles de concentración de CO₂ de las verticales donde se encuentran ubicados los sensores

Tabla 10: Índice de convergencia para las mallas planteadas en la predicción de la concentración de CO₂

Sensor	Gruesa	Media	Fina	$e_{32} [10^{-2}]$	$e_{21} [10^{-2}]$	p_{32}	p_{31}	$GCI_{32}^{gruesa} [\%]$	$GCI_{21}^{fina} [\%]$
S. Venti	628,8	625,7	626,3	0,50	-0,10	5,10	3,86	0,15	-0,03
S. 1 1	629,2	626,9	626,2	0,37	0,11	3,69	2,80	0,11	0,03
S. 1 2	632,2	628,9	628,6	0,52	0,05	7,44	5,64	0,16	0,01
S. 1 3	629,7	626,1	626,9	0,57	-0,13	4,67	3,54	0,17	-0,04
S. 1 4	632,3	628,0	629,1	0,68	-0,17	4,23	3,21	0,21	-0,05
S. 2 1	638,4	632,7	632,5	0,90	0,03	10,40	7,88	0,27	0,01
S. 2 2	669,6	657,2	663,4	1,89	-0,93	2,15	1,63	0,57	-0,28

S. 3 1	588,1	600,7	600,6	-2,10	0,02	15,02	11,37	-0,63	0,00
S. 3 2	639,9	627,6	625,7	1,96	0,30	5,80	4,39	0,59	0,09
S. 3 3	587,2	598,5	592,2	-1,89	1,06	1,81	1,37	-0,57	0,32
S. 3 4	639,2	624,7	613,8	2,32	1,78	0,89	0,67	0,70	0,53
S. Venta	500,0	500,0	500,0	-0,20	0,20	0,00	0,00	-0,06	0,06

Tabla 11: Precisión entre la medición real y la estimada por el modelo usando las tres mallas

Sensor	Precisión de la medida gruesa [%]	Precisión de la medida media [%]	Precisión de la medida fina [%]
S. Venti	0,99	0,99	0,99
S. 1 1	1,04	1,03	1,03
S. 1 2	1,03	1,03	1,03
S. 1 3	1,00	1,00	1,00
S. 1 4	1,01	1,00	1,01
S. 2 1	1,06	1,05	1,05
S. 2 2	1,12	1,10	1,11
S. 3 1	0,98	1,00	1,00
S. 3 2	1,08	1,06	1,05
S. 3 3	0,98	0,99	0,98
S. 3 4	1,07	1,04	1,03
S. Venta	0,87	0,87	0,87

C.2. RESULTADOS DEL MODELO CFD

Para las simulaciones del caso en Fluent, tal y como se comenta en el apartado de “Disposición del modelo”, la convergencia satisfactoria se alcanzaría usando el criterio del 0,01% en la media cuadrática de los residuos para las ecuaciones de conservación de la masa, del momento y de la energía. Adicionalmente se tomaría otro criterio de convergencia cualitativo, el cual correspondía a verificar que en un plano predefinido, exactamente en la dirección principal del viento las variables de interés se estabilizarían en un rango. En otras palabras, éste último criterio buscaba observar la homogenización de la velocidad, la presión y la concentración másica del CO₂ debido a que se estaba simulando en estado estacionario. Todos los criterios de convergencia se alcanzaron menos un número bajo en los residuos de la ecuación de conservación de la masa. Esto se debe a que las simulaciones se iniciaron con valores muy cercanos a los finales y por lo tanto no existió una gran variación en los cálculos.

Se realizaron varias simulaciones para comprobar el algoritmo que serviría como método de acoplamiento entre la presión y la velocidad. Se trataba específicamente entre el método SIMPLE y SIMPLEC. Como resultado se observó que usando SIMPLE los residuos se hacen inestables y por lo tanto la simulación no converge. Esto se debe a que la corrección de la presión bajo los factores de relajación del algoritmo SIMPLE, el uso de condiciones de contorno de presiones de entrada y salida, y el valor de “skewness” de aproximadamente 0,55 para las mallas planteadas, generan

incoherencias. Acogiendo entonces SIMPLEC como el método de acoplamiento, se pudo entonces completar la disposición del modelo en lo que respecta al método de resolución (*Tabla 12* **Tabla 13**)

Tabla 12: Selección de los gradientes para el cálculo de la difusión secundaria y la derivada de la velocidad

<i>Discretización espacial</i>	<i>Valor calculado</i>
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Body Force Weighted
Density	Second Order Upwind
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
co2	Second Order Upwind
Energy	Second Order Upwind

Tras las simulaciones haciendo uso de la malla de tamaño medio, se verificó las propiedades del flujo del fluido simulado dentro de la sala (*Tabla 13*). El número de Reynolds confirma que el flujo dentro de la sala era de naturaleza turbulento. Lo anterior se refuerza en la *Figura 15*, en donde se observa la turbulencia principal que se genera a lo largo de la sala.

Tabla 13: Propiedades del flujo dentro de la sala de experimentos modelada

<i>Parámetro</i>	<i>Valor calculado</i>
Número de Reynolds	44162 [-]
Número Prandtl	0,70463 [-]
Viscosidad dinámica	1,832e-5 [kg/(ms)]
Conductividad térmica	2,62e-2 [W/(mK)]
Coefficiente de expansión térmico por el aire	3,399e-3 [1/K]

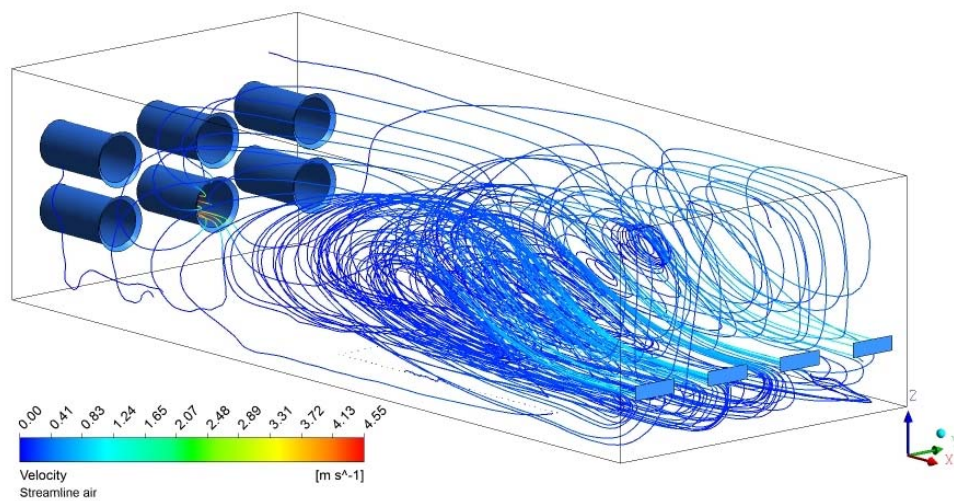


Figura 15: Estructura turbulenta del flujo del aire en la sala de experimentación

Además de la estructura principal mencionada que se presenta en la dinámica del fluido, también se observan dos estructuras secundarias. Una de ellas en el vértice superior de la pared de las

ventanas, y la otra justo en el vértice diagonal opuesto, es decir en el vértice inferior de la pared de los ventiladores. Es posible observar los fenómenos citados en la

Figura 16 donde además se puede concluir la preponderancia de componente u de la velocidad sobre las demás componentes, así como la dirección negativa de la misma (el flujo se mueve como cabe de esperar desde las ventanas hacia el extractor). Numéricamente, tomando como referencia la posición de los sensores de CO₂ mencionada en el apartado “Ubicación”, se corrobora el valor de los componentes de la velocidad y el valor de su módulo (*Tabla 14*). El módulo de la velocidad responde a la siguiente expresión:

$$U = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$$

Gracias también a la *Tabla 14* se constata que los valores de velocidad introducidos como variables de contorno en la simulación, son cercanos a los valores medidos experimentalmente. Como se comentó, el porcentaje de referencia del control para el ventilador es del 20% (ver *Tabla 7*). Así, en el caso de la posición del ventilador, el valor arrojado en la simulación es de 3,08 m/s el cual es superior al rango de trabajo medido, es decir entre 1,8 y 2,8 m/s. Esto se debe fundamentalmente a pérdidas de carga que no se tiene en cuenta en la simulación y errores de alineación del sensor de hilo caliente con el eje x. Para las ventanas el valor en la simulación es de 2,23 m/s el cual se encuentra un poco por encima del rango experimental, 1,80 a 1,92 m/s. La razón es la misma que en el caso del ventilador, pérdidas de carga y otros condicionantes que no son tenidos en cuenta en el momento de simular. La misma particularidad se presenta en punto de prueba interior que corresponde en la *Tabla 14* a la ubicación del “sensor 2 2” y que en la *Tabla 7* se denomina como plano 2

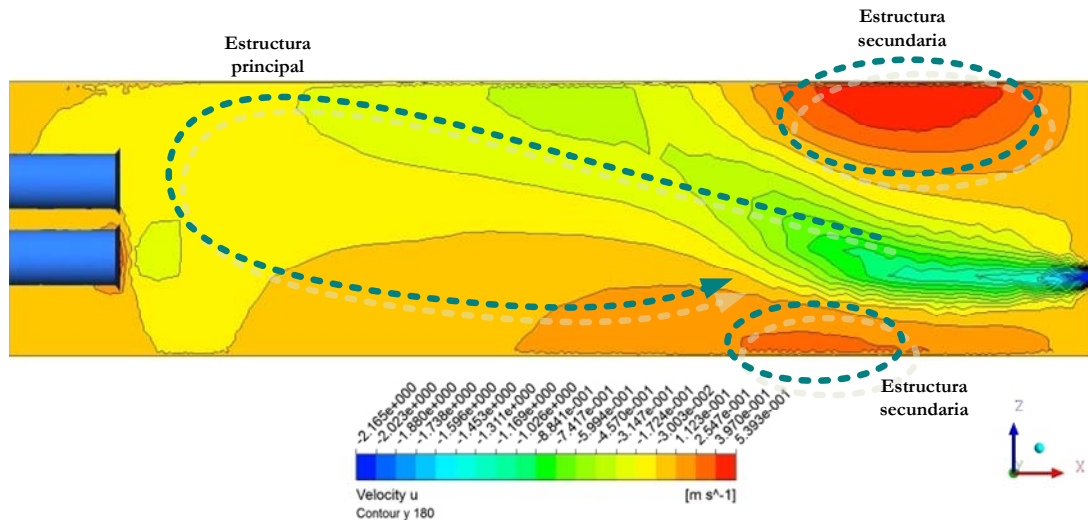


Figura 16: Plano de los contornos de velocidad en la coordenada y 1,80m

Tabla 14: Valor de la velocidad y de sus componentes en la ubicación de los sensores de CO₂

Sensor	Vel. U [m/s]	Vel. u [m/s]	Vel. v [m/s]	Vel. w [m/s]
S. Ventilador	3,08	-3,08	-0,01	0,04
S. 1 1	0,15	-0,14	0,00	-0,04
S. 1 2	0,04	0,00	0,01	-0,04
S. 1 3	0,14	-0,13	0,01	-0,04
S. 1 4	0,04	0,00	0,01	-0,04
S. 2 1	0,27	-0,27	-0,01	0,02

S. 2 2	0,08	0,07	0,00	-0,04
S. 3 1	0,19	-0,04	0,05	0,18
S. 3 2	0,74	-0,70	0,00	0,25
S. 3 3	0,18	-0,03	-0,04	0,18
S. 3 4	0,74	-0,69	-0,01	0,25
S. Ventana	2,15	-2,15	0,00	0,00

Los valores de la velocidad son importantes porque generarán la distribución y la estratificación final del gas. Lo anterior se analizará en el siguiente apartado. Sin embargo, la velocidad es un valor calculado en la simulación gracias a las ecuaciones de Navier-Stokes ya que las variables de contorno tanto en el ventilador como en las ventanas son presiones absolutas. En las *Figura 17* y *Figura 18* que son planos de corte en la coordenada y a 1,80m y 2,236m respectivamente (alineadas con la ubicación del sensor de la ventana y los sensores del plano 2), se visualiza el comportamiento de la presión a lo largo de la sala. Aunque en la *Figura 17* se observa mucha variación, realmente es del orden de decimas, siendo el valor entero de 101327 Pa. Numéricamente se puede corroborar en la *Tabla 15* la poca variación de los datos. Llevando a cabo una comparación con las muestras experimentales (ver *Tabla 7*), se comprueba que tanto para el ventilador como para el punto intermedio el valor que arroja la simulación se encuentra dentro del rango medido. Para el ventilador el rango de la presión relativa es de 4,0 a 11,0 Pa y el valor simulado es de 5 Pa. En el punto intermedio el rango experimental es de 1,5 a 2,3 Pa y el valor simulado es de 2 Pa. La variación se encuentra en las ventanas ya que el rango real es de 4,5 a 6,1 Pa, frente a un valor simulado de 2 Pa. Nuevamente, las diferencia presentada se deben a las pérdidas de carga ignorada, así como a una homogenización exhaustiva de la simulación.

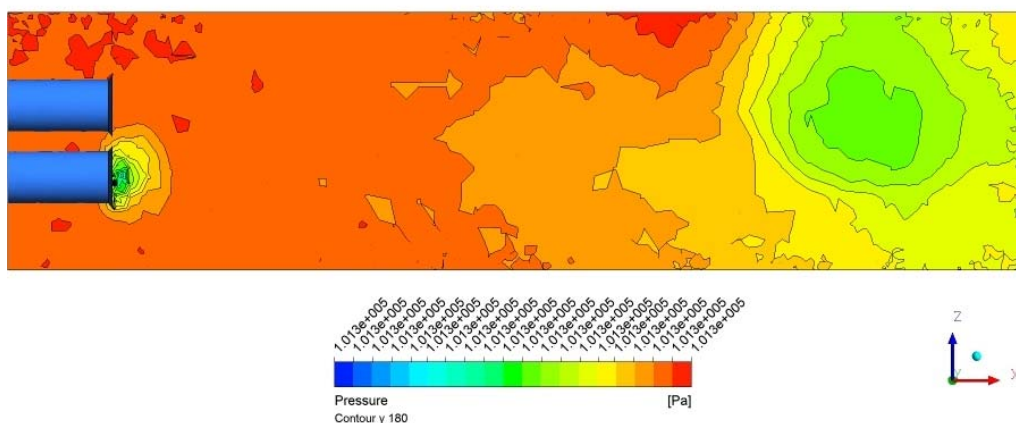


Figura 17: Plano de con los contornos de presión en la coordenada y 1,80m

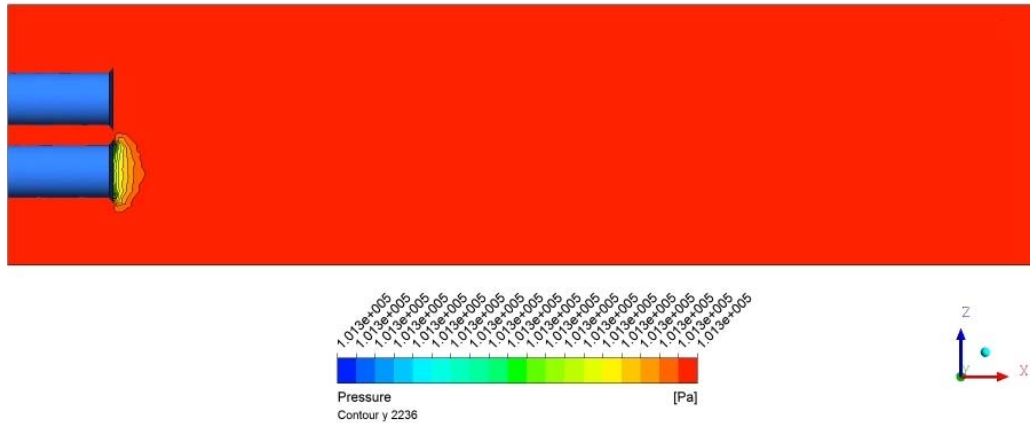


Figura 18: Plano de con los contornos de presión en la coordenada y 2,23m

Tabla 15: Valor de la presión absoluta y de la presión relativa en la ubicación de los sensores de CO₂

Sensor	P [Pa]	ΔP [Pa]
S. Ventilador	101320	-5
S. 1 1	101327	2
S. 1 2	101327	2
S. 1 3	101327	2
S. 1 4	101327	2
S. 2 1	101327	2
S. 2 2	101327	2
S. 3 1	101327	2
S. 3 2	101327	2
S. 3 3	101327	2
S. 3 4	101327	2
S. Ventana	101327	2

C.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO CFD

Como se mencionó en el anterior apartado, las estructuras turbulentas generadas por la ventilación a lo largo de la sala, generan una dispersión irregular del gas y una estratificación del mismo. Esto se corrobora en la *Figura 19*, donde se observa para una de las simulaciones como la concentración del CO₂ difiere a lo largo, alto y ancho de la sala. Es notorio que la inyección del gas y la ventilación seleccionada para el recinto generan una acumulación en el vértice inferior de la pared donde se ubican las ventanas. Tal acumulación del gas varía en función del caudal con que se inyecte éste en la sala por medio de la manguera. Se traduce entonces para el modelo simulado en el valor de la presión que tienen los orificios de la manguera como condición de contorno.

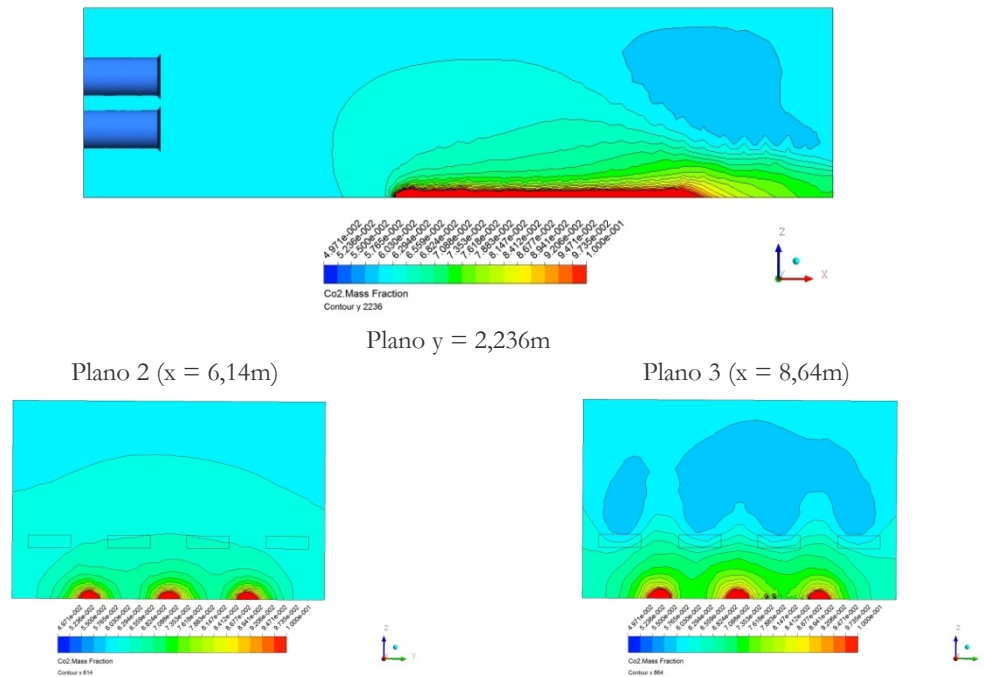


Figura 19: Planos con la distribución de la concentración de masa del CO2

La calibración se refiere así a la obtención del valor adecuado para la presión de entrada del CO₂ desde los orificios de la manguera. Aunque por medio de los cálculos realizados en la sección “**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**”, el manómetro y el caudalímetro es posible tener una idea de la cantidad de gas que puede llegar a salir por cada orificio, existen dos razones fuertes que generan alta incertidumbre a la hora de saber el valor de la presión a introducir como variable de contorno. La primera razón se debe al escollo del mallado de los orificios de la manguera y que fue expuesta en el apartado de “Mallado”. Se resume en los perjuicios de generar una malla demasiado densa en una zona del volumen de la sala y en lo que respecta al presente apartado, la irregularidad de las celdas a la hora de proponer una solución en la cual los orificios se idealizan a una cara de algunas celdas seleccionadas (ver *Figura 11*). Dicha irregularidad genera que el caudal de salida en cada orificio sea diferente y por lo tanto la concentración final se vea afectada.

La segunda razón que genera incertidumbre en los cálculos se presentó en el momento de las pruebas. La manguera con un largo total de 21,1m fue perforada cada 10cm en los últimos 15m para generar orificios de 1 a 2mm de diámetro. Es necesario por lo tanto generar una alta presión a la entrada de la manguera para que todos los orificios posean la misma presión salida. Con una botella cuyo contenido es CO₂ y el manorreductor facilitado para las pruebas, era imposible alcanzar altas presiones a la salida del gas. Esto se debe a que las características físicas del CO₂ y la forma como se comercializa que es en versión de gas licuado embotellado a alta presión, para poder obtener altas presiones es necesario mantener la ecuación de los gases ideales estable, es decir, que el cambio de presiones (entre la de la botella y la de salida) sea bajo o en su defecto que existan altas temperaturas. Si expresión de los gases ideales se desequilibra significa que el cambio de estado del CO₂ se altera, y por lo tanto se condensa o lo que coloquialmente se denomina como incapacidad de sacar el gas de la botella. Dado que la manguera que esta conectada al manorreductor no genera algún tipo de presión adicional a la atmosférica, el salto de presiones entre la botella y el exterior es alto (de una presión de 7.000.000 Pa del gas en la botella a 101.325 Pa que se encuentran en el ambiente), desequilibrando así el cambio de estado. Esto es posible solucionar como se comentó aumentando la temperatura con la que sale el CO₂ haciendo uso de un manorreductor con calefactor, el cual no poseía el usado. El procedimiento ante los obstáculos presentados era mantener la salida del gas a un caudal bajo. Tras varias pruebas se encontró que manteniendo la salida del gas a 5,4mL/min (40 en la escala del caudalímetro y 0 bar en el manómetro de baja del

manorreductor) se evitaba por un largo espacio de tiempo que se congelara el manorreductor (*Figura 20*).



Figura 20: Proceso de congelación del manorreductor usado en las pruebas

Como se corrobora entonces en el párrafo anterior, el caudal de salida es bastante bajo, por lo que lo que una presión homogénea en todos los orificios de la manguera es improbable. Así mismo, aunque se mantuviese un caudal por un tiempo para evitar el congelamiento, tras un periodo se generaban cristales de hielo en el conducto del manorreductor, lo repercutía en el caudal final.

Planteadas las razones para una calibración de la presión de salida del gas por los orificios de la manguera, se presenta la disposición de los sensores de concentración de CO₂ para tal objetivo. En la *Figura 21* se observa como se agrupan en el plano 2 y el plano 3 la mayoría de los dispositivos, y se ubican dos de ellos en la coordenada de la pared donde se encuentran las ventanas (los correspondientes al Sensor Suelo que es el Nodo 1 y Sensor Ventana que es el Nodo 12). Tal disposición es con el fin de intentar captar el nivel de acumulación del CO₂ en la esquina, como se comentó en el comienzo del presente apartado. Así mismo se mantienen las ventanas abiertas, el porcentaje de ventilación al 20% y por supuesto el caudal máximo descrito para la inyección del gas, 5,4 mL/min o 40 en la escala del caudalímetro.

Tras la inyección del CO₂ en dos pruebas diferenciadas (*Figura 22*), una entre las 17 y las 19 horas y la siguiente entre las 19 y las 21 horas, se observa una zona estable anterior a las pruebas donde se capta el valor del CO₂ en el ambiente o del aire limpio, seguida de una rampa ascendente de incremento de la concentración, luego una estabilización u homogenización en la sala de la concentración con las condiciones planteadas, y posteriormente tras detener la inyección del CO₂ pero manteniendo las ventanas y el ventilador encendido se observa una rampa descendente hasta que alcanza nuevamente el valor de concentración en el ambiente. Es notorio en la primera prueba un transitorio tras la rampa ascendente de concentración. Esto se debió a las fluctuaciones del caudal por razones de congelamiento que se explicaron en anteriores párrafos.

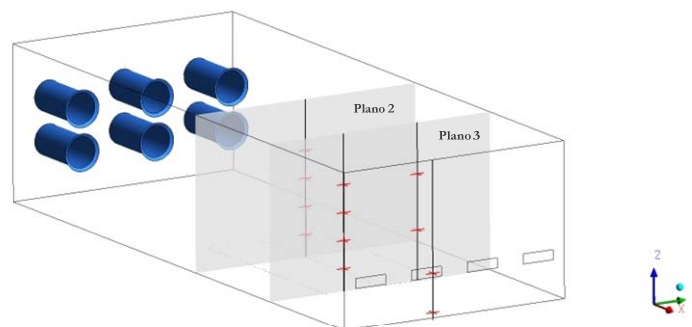


Figura 21: Disposición de los sensores de concentración de CO₂ para la medición de la acumulación del gas en una esquina

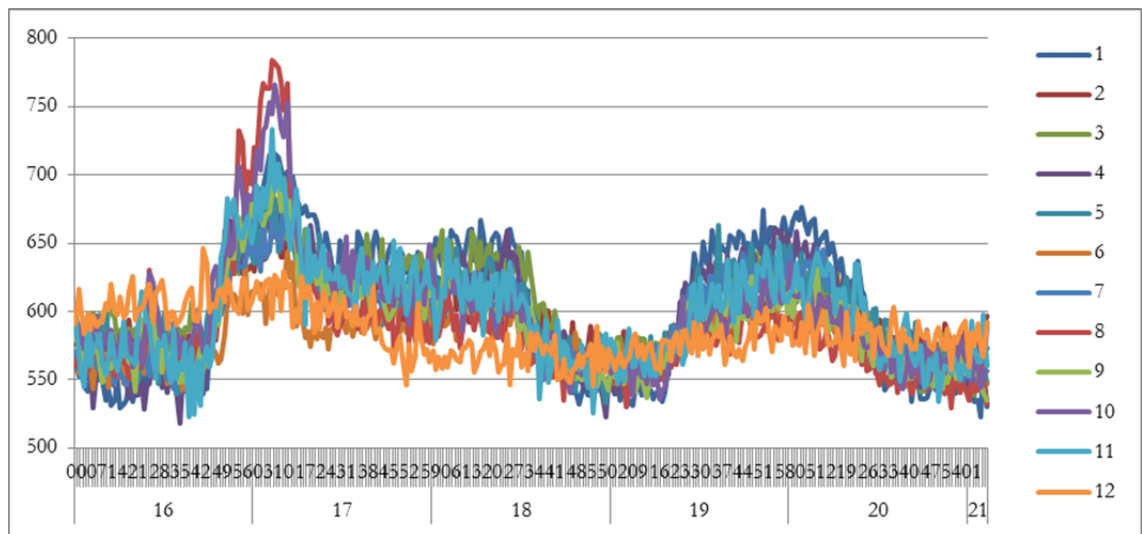


Figura 22: Medidas tomadas por los sensores de concentración [ppm] de CO₂ tras la inyección del gas en dos pruebas [hh:mm]

En la *Figura 23* se evidencia con los datos adquiridos por el Nodo 1 (Sensor Suelo) y el Nodo 12 (Sensor Ventana), que efectivamente existe una mayor concentración del gas en la esquina inferior de la pared de las ventanas. De igual forma la *Figura 24* recoge los fenómenos de estratificación para los sensores ubicados en el Plano 2 en la parte superior de la figura, y los del Plano 3 en la parte inferior de la figura en la primera de las pruebas (entre las 17 y las 19 horas) en la zona de donde la concentración se estabiliza u homogeniza en la sala. Se observa como existe tanto para el S24 como para S34 una valores más altos de concentración que el resto de sensores ubicados en sus mismas verticales.

Teniendo entonces un análisis cualitativo de los fenómenos que corroboran la concordancia entre los sucesos recogidos en las pruebas y los resultados simulados, se procede a realizar una comparación igualmente cualitativa entre diferentes casos simulados en los cuales se varia la presión de entrada en los orificios de la manguera. Se pretende entonces seleccionar la variable de contorno que genere los fenómenos más próximos a los sucesos reales. Como se expuso en anteriores párrafos dicha presión es muy baja, por lo tanto es muy cercana a la presión atmosférica ($P_{ref} = 101325 \text{ Pa}$).

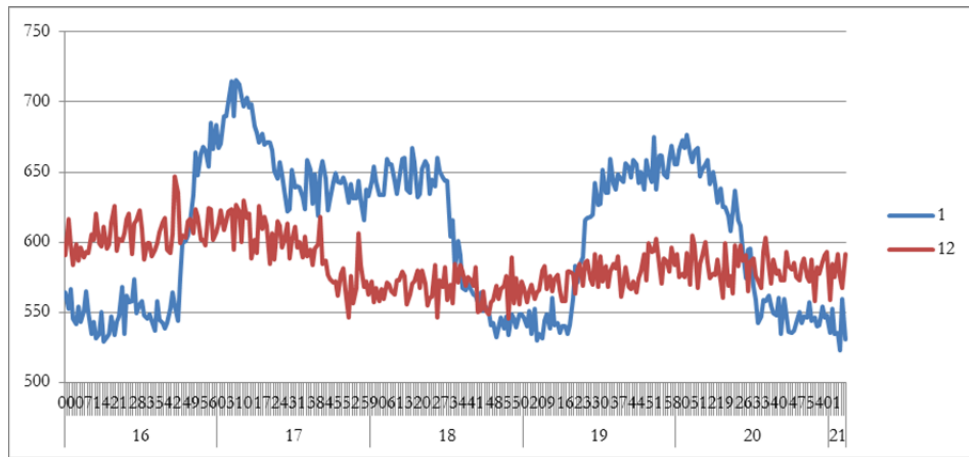


Figura 23: Medidas de concentración [ppm] de CO₂ por parte de los sensores ubicados en la vertical de la pared de las ventanas

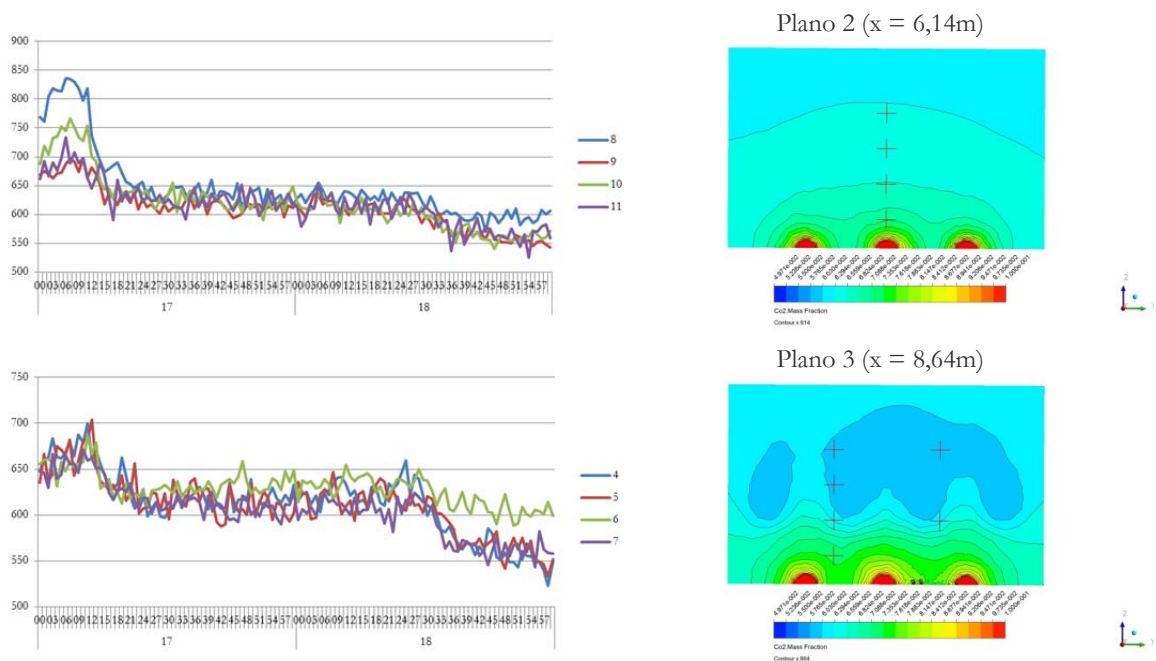


Figura 24: Comparación de la concentración del CO₂ [ppm] entre una de las pruebas y la simulación

Se simularon un total de 13 casos, en los cuales se varió la presión de entrada de los orificios de la manguera entre 101326 Pa y 101338 Pa. En los resultados se evidenció que efectivamente introducir una presión alta como variable de contorno hacía divergir el caso planteado en la realidad con el caso simulado. Se exponen y comparan entonces 4 casos que corresponden a las presiones de entrada de 101326 Pa, 101328 Pa, 101329 Pa y 101331 Pa.

En la *Figura 25* se observa el resultado en dos planos seleccionados de las simulaciones realizadas con las cuatro presiones escogidas como condiciones de contorno. Con la presión más baja $P_{man} = 101326$ Pa, se evidencia que la concentración existente en la sala es la ambiental o inicial. En las propias simulaciones se advierte que las celdas que representan los orificios de la manguera sufren un flujo inverso, es decir, la presión existente en la sala es superior a la presión de salida del gas desde la manguera. Con una $P_{man} = 101328$ Pa la presión no es la adecuada ya que se generan estratificaciones que corresponden a los fenómenos captados en las mediciones. Es entonces la anterior presión aún baja para un modelo equivalente. Subiendo el valor de P_{man} una unidad a 101329 Pa, se percibe un acercamiento del modelo a los sucesos reales. Se capta pues que

entre las posiciones del Sensor Suelo y del Sensor Ventana , hay una diferencia de concentración, tal y como se observa en las muestras experimentales. El ascenso del valor de la Pman tan solo incrementa las diferencias verticales de estratificación entre los sensores. Como se ve en la *Figura 24* tales diferencias son bajas y por lo tanto se resuelve que el valor más adecuado para la condición de contorno es de 101329 Pa.

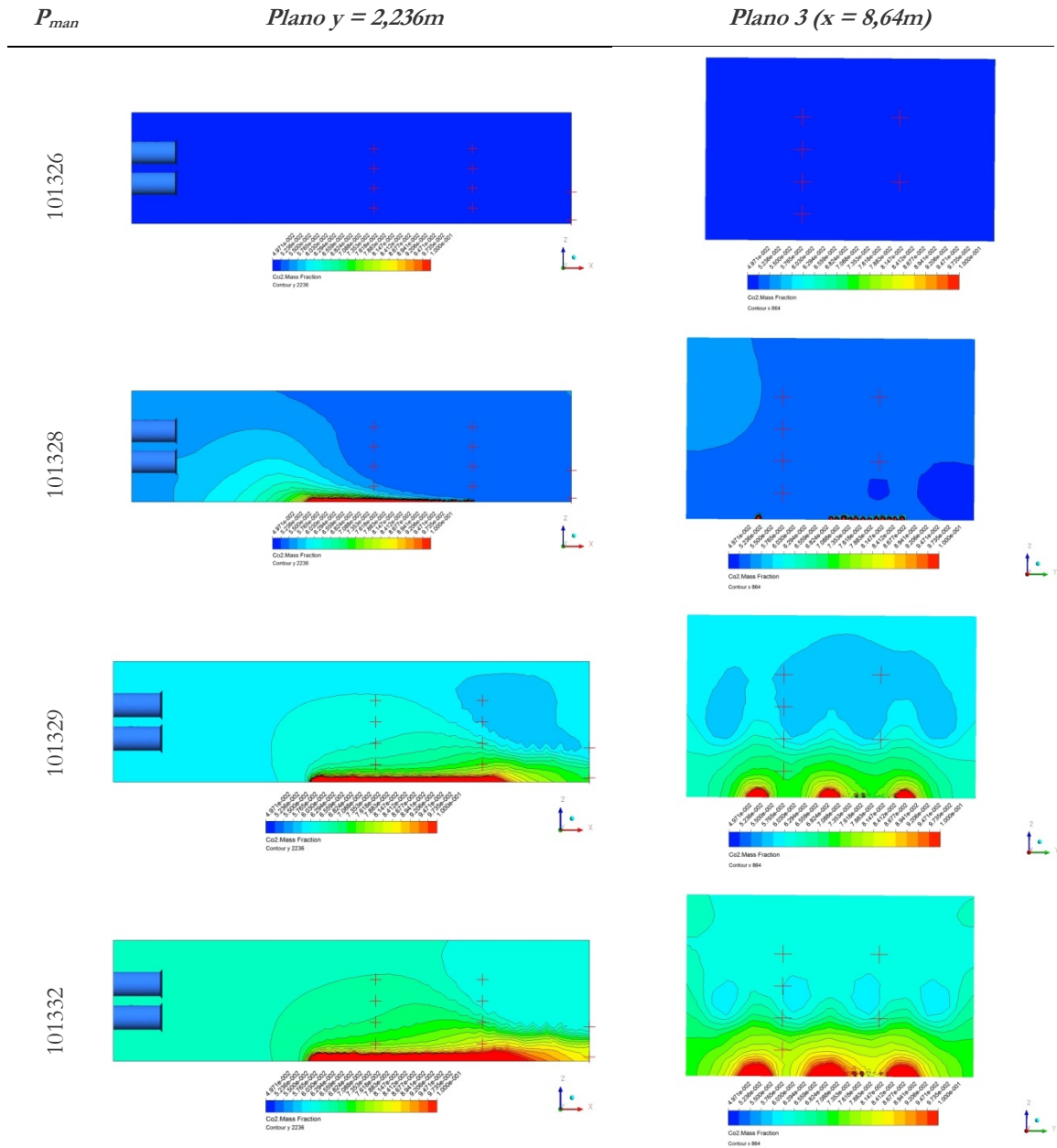


Figura 25: Comparación de algunos casos seleccionados donde se varía la presión de salida del CO2 desde los orificios de la manguera

C.4. VALIDACIÓN Y ANÁLISIS PARAMÉTRICO

Para la validación se toma la posición y configuración de los sensores propuesta en el apartado “Ubicación de los nodos de la WSN”. En la *Figura 26* se plasma el resultado de las mediciones de una de las pruebas realizadas. Se percibe al igual que en el anterior apartado varias zonas en la

concentración del CO₂ en la sala. El tramo de interés y por lo tanto que se usará para la validación de los resultados es el que corresponde a la homogenización o estabilización de la concentración tras la rampa de inyección. Se da pues entre las 13:25 y las 15:16 horas de la prueba. A primera vista se visualiza como el Sensor Ventana (el Nodo 12) por su ubicación capta un valor inferior de cantidad de gas en el ambiente que los demás.

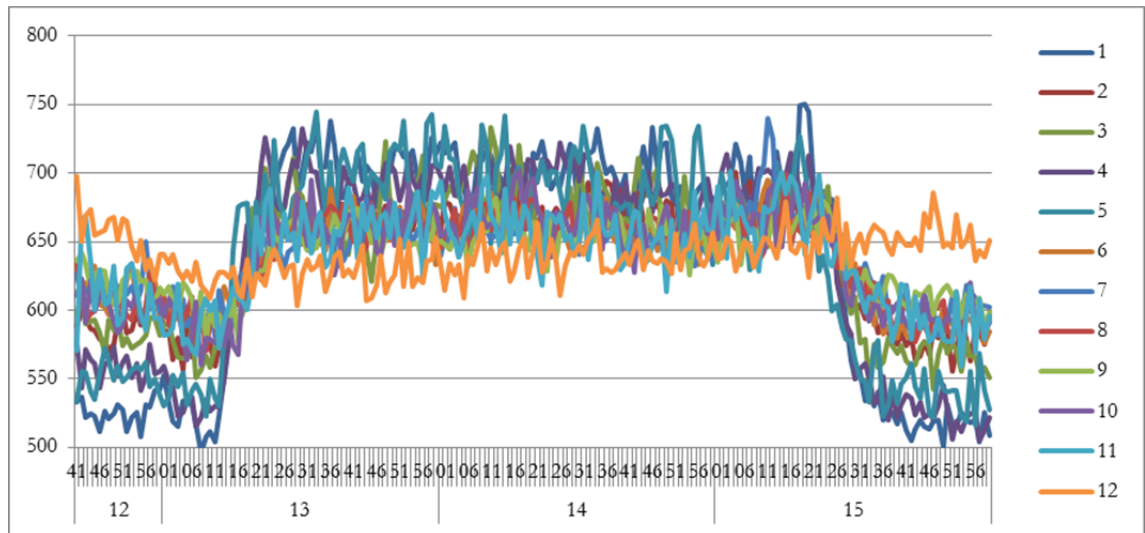


Figura 26: Curvas de medición de los sensores de concentración de CO₂ ante la inyección de gas y con ventilación constante

En la *Figura 27* se ilustra la comparación entre los valores simulados y los medidos para la concentración de CO₂ en las diferentes posiciones de los sensores. El símbolo en color azul representa el valor del promedio de las mediciones en el lapso de tiempo seleccionado, las cajas representan los límites de los cuartiles y las barras los valores máximo y mínimo para cada sensor. Las mismas barras representan además la incertidumbre en la medida (el valor promedio \pm la desviación estándar) en la cual se incluye la precisión de los sensores como la casuística o transitorios en el momento de la medición (en la que cabe recordar las variaciones de caudal en la inyección del gas). Con un asterisco en color rojo se representa el valor de la concentración obtenida tras la simulación del caso.

En el momento de realización del presente estudio no se encontró alguna referencia que indicase las variaciones de CO₂ aceptables en un recinto, ya fuera por temas de confort o de impacto ambiental. Solo se relata en la normativa los valores máximos recomendados a alcanzar y el tiempo de exposición (5000 ppm es el valor límite de exposición profesional durante un máximo de 8 horas) (INSHT, 2009). Para la validación del presente estudio se toma que la discordancia entre el valor medido y el simulado debe encontrarse dentro de la incertidumbre de ± 40 ppm. Como se observa en la *Tabla 16* son tres posiciones las que más se distancian de los datos reales. Ellos son el S21, S22 y S32, los mismos que en la *Figura 27* se representan como los asteriscos que más se alejan de las cajas que representan los cuartiles. Quiere decir entonces que los valores simulados no se encuentran dentro del 50% de probabilidad de las mediciones realizadas. Sin embargo, tales cantidades no llegan a ser atípicas, pues se conservan en el espacio que compete a los “bigotes” como sucede muy desfavorablemente en el caso del S. Ventana. Las demás posiciones presentan un comportamiento muy cercano entre lo medido y lo simulado. Se comprenden por lo tanto en los casos restantes unas cantidades simuladas que se encuentran muy cerca o en el interior de las cajas de los cuartiles.

Se puede concluir entonces, que en una medida significativa el modelo reúne el criterio de validación propuesto y esto provee una buena predicción de la concentración de CO₂ dentro de la sala y su estratificación. Hace entonces que el modelo en CFD realizado sea aceptable para la representación de la distribución del gas seleccionado en el ambiente. Con excepción del caso del S. Ventana, los valores simulados más alejados de la mediana fueron ligeramente sobre estimados por

el modelo. Esto puede ser causado por la necesidad de un ajuste aún más fino de las variables de contorno y los parámetros de simulación. También puede ser causa un amplio rango de parámetros computacionales, algunos numéricos o no-numéricos (es decir, asumir que las el tipo de rugosidad de las paredes, el modelo de turbulencia, entre otras) que pudieron haber influenciado en las discrepancias en las predicciones del modelo en CFD. Adicionalmente, las diferencias presentadas en el Plano 2 podrían haber sido causadas porque la localización de los sensores se encuentra justo encima de la zona de mayor salida de CO₂. Lo anterior podría causar tanto en los fenómenos reales como en los simulados que exista igualmente una zona de cambios drásticos, ya que las altas concentraciones del gas son rápidamente diluidas en el aire por las bajas concentraciones existentes en este último. Una comparación con otros modelos y casos (los cuales no son tenidos en cuenta en el presente trabajo) podrían generar una comprensión más detallada y particularizada de los hechos ocurridos, sobre todo en lo que respecta a las mediciones en la ubicación del S21 y el S22. Una prueba realizada, y que muestra las ventajas de usar una WSN como instrumentación de medición es el cambio de posición de los sensores. Sin embargo, este análisis se realizará en trabajos futuros.

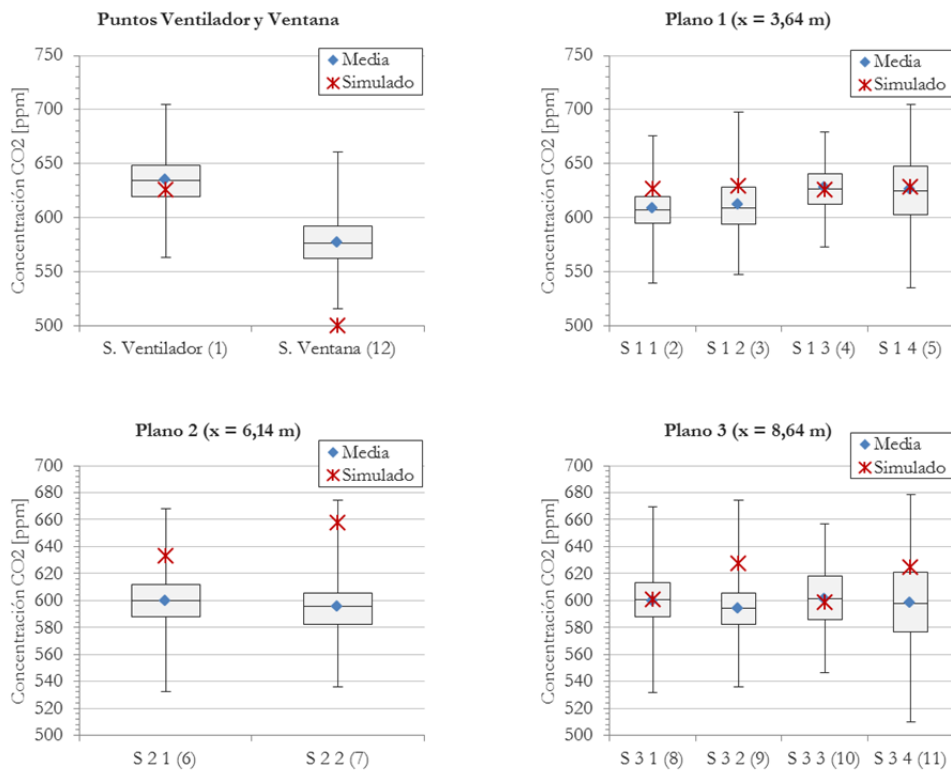


Figura 27: Comparación gráfica entre los rangos con cuartiles de las mediciones y los datos simulados en la misma posición

Tabla 16: Medida de la concentración por los sensores ubicados en los tres planos, su equivalente valor simulado y la diferencia entre ambos (parámetros en negrilla es que excede el presupuesto de validación)

Sensor	<i>C. Medida [ppm]</i>	<i>C. Simulado [ppm]</i>	<i>Diferencia absoluta de C.</i>
S. 1 1	607,77	626,90	19,13
S. 1 2	611,25	628,90	17,65
S. 1 3	627,13	626,10	1,03
S. 1 4	625,93	628,00	2,07
S. 2 1	599,92	632,70	32,78
S. 2 2	595,84	657,20	61,36

S. 3 1	600,19	600,70	0,51
S. 3 2	593,89	627,60	33,71
S. 3 3	601,59	598,50	3,09
S. 3 4	598,41	624,70	26,29

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

CONCLUSIONES FINALES

En el presente trabajo han sido presentados y analizados los resultados de las simulaciones usando RANS como modelo de turbulencia para el análisis de la distribución y estratificación de CO₂ en un recinto experimental usado en estudios ambientales, enfocados a la explotación agrícola y ganadera. Se seleccionó como modelo de viscosidad el $k - \varepsilon$ realizable. El estudio se enmarca dentro de un proyecto de investigación del Programa de Apoyo a la Investigación y Desarrollo de la U.P.V. (PAID-05-11) “Desarrollo de un sistema para la determinación de flujos de ventilación en explotaciones de rumiantes mediante balances de dióxido de carbono basado en Redes Inalámbricas de Sensores”.

Se sabe que una buena planeación de la ventilación en recintos agrícolas y ambientales, como también de uso humano pueden proveer condiciones más saludables para sus habitantes, de mayor confort o sencillamente con mejores condiciones para saber el impacto de algunas de las variables ambientales en el volumen que ocupa una edificación. Se puede llegar entonces a analizar temas distribución y estratificación de gases, zonas con variaciones térmicas y propuestas de mejora de la ventilación natural o el ahorro energético cuando existe ventilación forzada. Por lo tanto, modelos precisos y fiables de la ventilación y el flujo de un fluido gracias a la ventilación con técnicas en CFD pueden ser de gran interés para entender y posteriormente corregir los problemas de diseño. Sin embargo, crear un modelo que realmente se acerque a los fenómenos que ocurren en la realidad requiere un alto nivel de experiencia y tiempo por parte de las personas que modelan. Esto es ampliamente reportado en la comunidad investigadora y usuaria de las técnicas CFD, ya que los resultados arrojados son altamente dependientes de los parámetros introducidos en el modelo por parte del usuario. Así se demuestra en el presente trabajo y por lo tanto se concluye como una aceptación cierta.

Se hace necesario entonces tener una metodología que permita la validación y calibración del modelo propuesto en CFD. Se concluye que entre las propuestas metodológicas encontradas en la bibliografía, por afinidad al caso realizado y por su nivel de esquematización, es la presentada en Hajdukiewicz et al, 2013 la que más se acomoda al caso estudiado. En dicha metodología se explica como cualitativa y cuantitativamente se verifica y valida un modelo en CFD. Aunque exige unos pasos de análisis paramétrico que permiten saber la robustez de la calibración y que se encuentran por fuera del alcance del presente trabajo, facilita que se tenga unos resultados fiables y explicativos como los obtenidos. En la misma metodología, analizar una independencia de la malla y la calibración son disposiciones necesarias para la posterior validación. Lo anterior son pasos que se llevaron a cabo pero que solo son posibles con unas medidas reales en condiciones. Debido a la complejidad de los fenómenos y estructuradas desarrolladas, así como al volumen a cubrir, tener una plataforma móvil, relativamente económica y flexible es requerida. Las WSN's desarrolladas se presentaron pues como una opción muy viable ya que cumple con los parámetros de cubrimiento del espacio, flexibilidad, obtención de las variables en tiempo real, facilidad de emplazamiento, economía y lo que es muy importante en los estudios del flujo fluidos, poca intervención con estructuras de soporte o comunicación que puedan afectar y generar fenómenos que alteren las medidas.

Pero las WSN's no dejan de ser sensores que han de ser calibrados, y mucho más necesario para la presente aplicación donde es indispensable una medida lo más cercana a los fenómenos físicos reales y con predicción de su afectación por variables adicionales en el ambiente. Es por ello que llevó a cabo una caracterización del sistema de WSN que contiene sensores de CO₂ y la evaluación de su aplicabilidad en medidas de ventilación y bienestar animal en explotaciones ganaderas (Prieto Sancho, 2013). Cabe hacer la observación que la experiencia de calibración es necesaria realizarla *in-*

situ, ya que las curvas proporcionadas por el fabricante son insuficientes (SST, 2010; SST, 2011). Se concluye tras las pruebas que los sensores poseen una alta linealidad con lo que es posible seguir las medidas tomadas por un sensor de referencia calibrado en un rango de 500 a 5000 ppm. Sin embargo se detectaron interferencias cruzadas con la temperatura y cuando existen elevadas concentraciones de metano (CH₄), aproximadamente de 100 ppm. Además el tiempo de respuesta al dato real puede llegar a ser de aproximadamente 5 minutos. Así mismo, con una calibración de fábrica la repetibilidad fue muy baja entre los 12 nodos disponibles y estudiados, donde en ningún caso fueron homogéneos. Esta baja repetibilidad implica entonces la necesidad de calibrar los sensores antes de cada periodo de trabajo, lo cual fue llevado a cabo cada día de la prueba, ajustando para ello el parámetro de error. Con las ventajas y desventajas del sistema de las WSN con las que se trabajó, su uso en ganadería es adecuado siempre que se calibre y considerando el tiempo de respuesta del sensor.

En lo que respecta al proceso de independencia de la malla, tras realizar tres mallas no estructuradas con diferente densidad de volúmenes, se concluye que es la de tamaño medio con 1.013.044 de celdas (estando así el volumen total del recinto de 144 m³ dividido en sub-volúmenes de aproximadamente 142,15 cc) y un valor de “skewness” de 0,56, la que proporciona un equilibrio entre el tiempo de cálculo e invariabilidad de los datos calculados debido a temas concernientes a la geometría y disposición de la malla.

Dada la cantidad de parámetros que pueden intervenir en un estudio de esta índole, se selecciona un caso real y se procura tener las condiciones más óptimas para su representación en el modelo. Se puede concluir que de no disponer de tales precauciones puede hacer divergir el caso computacional con el caso real.

Un análisis estadístico comparativo entre las medidas experimentales tomadas gracias a la plataforma WSN usada y las arrojadas por la simulación del modelo en CFD, demuestran una predicción aceptable del modelo computacional de los sucesos reales. La gran mayoría de los valores simulados en los puntos donde se encuentran ubicados los sensores se encuentran dentro del 50% del rango de medición de los sensores, es decir hay una alta probabilidad que el valor computacional se acerque a la muestra real. Existe una zona que puede generar las mayores diferencias entre lo real y lo virtual. Corresponde al intermedio de la sala, lo cual puede deberse a su posición transicional por encontrarse también en la mitad de la estructura turbulenta principal, lo que sugiere un mayor caos y por lo tanto una alta fluctuación de los datos. Cualitativamente el modelo recoge y explica los principales fenómenos ocurridos dentro del caso tratado, como son la estructura predominante, las turbulencias secundarias, la acumulación del CO₂ en el vértice inferior de la pared donde se encuentran las ventanas y la estratificación del gas. Se puede concluir entonces que el modelo acierta en gran proporción los fenómenos físicos del flujo del fluido que se presentan en los casos experimentales.

TRABAJO FUTURO

Como punto particular al presente estudio, simular en estado no estacionario para ver las curvas de descarga proporcionaría un aporte y mayor solidez al modelo planteado. Del mismo modo, contribuiría considerablemente al trabajo tener la posibilidad de realizar experiencias en recintos con ocupación y uso normal. Con lo anterior se extrapolaría las conclusiones y metodologías generadas (Bartzanas et al, 2007).

Con miras a una validación más exhaustiva del modelo en CFD, es necesario realizar un estudio de la sensibilidad o la variación de las variables simuladas frente a las medidas cuando se cambian las condiciones de contorno (Hajdukiewicz et al, 2013). Posiblemente algunas diferencias encontradas se deben a la necesidad de continuar con este tipo de estudio, donde lo que se busca es la mejora y puesta a punto del modelo (Blocken et al, 2012). Se requeriría entonces de más casos experimentales, lo que implica más tiempo de cálculo y probablemente más recursos de hardware y otras mallas. Respecto al punto final, una comparación en la medida de lo posible con algunas mallas estructuradas sería ciertamente interesante (Moncho Esteve, 2011).

Como tema transversal al estudio de más casos y propuesta de nuevas mallas, actualmente existe un creciente interés por la optimización de las simulaciones con modelos en CFD (Thévenin et al, 2008; Tahara et al, 2006). Es más que cierto que un mallado más denso y algoritmos que resuelvan las ecuaciones físicas sin aproximaciones arrojarán resultados más cercanos a los fenómenos reales. Es lo que sucede cuando se escoge como modelo de turbulencia DNS, el cual requiere un esfuerzo computacional extremadamente alto. Sin embargo, puede darse el caso que no se requiera demasiado recurso o complejidad en la simulación y sean más un tema de encontrar las condiciones idóneas y la malla adecuada para simular, estudiar y resolver. Es un asunto entonces que puede llegar a profundizarse en el tema de la optimización multi-objetivo.

Se puede también expandir el presente estudio al análisis de las ventajas y desventajas de los recintos de explotación agrícola o ganadera al tener configuraciones de ventilación con características del local en sobrepresión y en las variantes del local en depresión (ESCODA, 2009)

FUENTES Y BIBLIOGRAFÍA

- AIAA G-077, 1998. Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Al-Ali, A. R., Zualkernan, I. and Aloul, F., 2010. A mobile GPRS-sensors array for air pollution monitoring. *IEEE sensors journal*, 10(10)
- Ansys 12.1. Ansys Inc; 2009.
- Bartzanas, T., Kittas, C., Sapounas, A. A., and Nikita-Martzopoulou, C., 2007. Analysis of airflow through experimental rural buildings: Sensitivity to turbulence models. *Biosystems Engineering*, 97(2), 229-239.
- Belcazar Ceron, L. C., 2009. Alternative Techniques to Assess Road Traffic Emissions. Tesis doctoral, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Bhaskaran, R. and Collins, L., 2003. Introduction to CFD basis. 2 Drexel University <http://enve.coe.drexel.edu/outbreaks/walkerton.htm> (Acceso el 1 de mayo de 2013)
- Blocken, B., Roels, S., Carmeliet, J., 2004. Modification of pedestrian wind comfort in the silvertop tower passages by an automatic control system. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 92 (10), 849e873.
- Blocken, B., Janssen, W.D., van Hooff, T., 2012. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: general decision framework and case study for the Eindhoven University campus. *Environ. Modell. Softw.* 30, 15e34.
- Blocken, B., and Gualtieri, C., 2012. Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics. *Environmental Modelling & Software*, 33, 1-22.
- Boulard, T., Kittas, C., Roy, J.C., Wang, S., 2002. Convective and ventilation transfers in greenhouses, part 2: determination of the distributed greenhouse climate. *Biosystems Engineering* 83, 129–147
- Burrell, J., Brooke, T. and Beckwith, R., 2004. Vineyard computing: sensor networks in agricultural production. *Pervasive Computing* 3(1) 38 – 45
- Bustamante, E., García-Diego, F.J., Calvet, S., Estellés, F., Hospitaler, A., and Torres, A., 2011. Influencia de las condiciones geométricas de la entrada y la salida de aire sobre los parámetros ambientales en granjas avícolas de pollos. VI Congreso Ibérico de Agro-Engenharia.
- Cadafalch Rabasa, J., 2002. Numerical Simulation of Turbulent Flows. Multiblock Techniques. Verification and Experimental Validation. Tesis doctoral, Universidad Politècnica de Catalunya.
- Causone, F., Corngnata, S. P., Filippia, M., and Olesen, S. P., 2009. Experimental evaluation of heat transfer coefficients between radiant ceiling and room. *Energy and buildings* 41, 622-628
- Celik, I.B., 2004. Procedure for estimation and reporting of discretization error in CFD applications. In: Statement on the control of numerical accuracy of the journal of fluids engineering (editorial policy). ASME Fluids Engineering Division

- Chong, C. Y. and Kumar, S.P., 2003. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges. *Proceedings of the IEEE*, 91(8), 1247 – 1256
- Cushman-Roisin, B., Gualtieri, C., and Mihailovi_c, D.T., 2008. Environ. fluid mech.: current issues and future outlook. In: Gualtieri, C., Mihailovi_c, D.T. (Eds.), *Fluid Mechanics of Environmental Interfaces*. Taylor & Francis Ltd., London, 1 - 13
- Dargie, W. and Poellabauer, C., 2010. *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*. Wiley, 311 pag.
- de la Edificación, C. T. (2006). DB-HS: Salubridad. Real Decreto, 314
- ESCODA, C. T. S. (2009). *Manual práctico de Ventilación*.
- Escobar Díaz, M. S., 2010. A generic software architecture for portable applications in heterogeneous wireless sensor networks. Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid
- Evers, L., Bijl, M. J. J., Marin-Perianu, M., Marin-Perianu, R. S. and Havinga, P. J. M., 2005. *Wireless sensor networks and beyond: A case study on transport and logistics*. Technical Report TR-CTIT-05-26, University of Twente
- Gao, M., Zhang, F. and Tian, J., 2008. Environmental monitoring System With wireless mesh network based on embedded system. 5th IEEE Int. Symp. Embedded Computing, 174 – 179.
- Gaura, E., 2010. *Wireless sensor networks: deployments and design frameworks*. Springer Verlag, 1ra ed, 290 pag.
- Gebremedhin, K.G., Wu, B., 2005. Simulation of flow field of a ventilated and occupied animal space with different inlet and outlet conditions. *Journal of Thermal Biology* 30, 343–353
- Hajdukiewicz, M., Geron, M., and Keane, M. M., 2013. Formal calibration methodology for CFD models of naturally ventilated indoor environments. *Building and Environment*, 59, 290 – 302
- Hasenfratz, D., Saukh, O. and Thiele, L., 2012. On-the-Fly Calibration of Low-Cost Gas Sensors. *Wireless Sensor Networks: 9th European Conference, EWSN 2012, Trento, Italy*, 228 – 244
- Ho, S., Koushanfar, F., Kosterev, A., and Tittel, F., 2007. *LaserSPECKs: Laser Spectroscopic Trace-Gas Sensor Networks – Sensor Integration and Application*. 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, Cambridge, Massachusetts, USA, 226 – 235
- IEEE 802.15.4, 2007. *Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low rate wireless personal area networks (lr-wpans)*
- Subils, M. J. B., and Domínguez, F. B. NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior.
- Ioanna, M., 2012. *Wireless Sensor Networks in environmental monitoring: existing applications and basic guidelines*. Tesis de master, University of Macedonia
- Jebson, S. (2007). *Fact sheet number 6: The Beaufort Scale*
- Juang, P., Oki, H., Wang, Y., Martonosi, M., Peh, L.S. and Rubenstein, D., 2002. Energy-efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with zebranet. *ASPLOS*, 96–107

- Jung, Y. J., Lee, Y. K., Lee, D. G., Ryu, K. H. and Nittel, S., 2008. Air pollution monitoring system based on geosensor network. *IEEE Int. Geoscience Remote Sensing Symp.*, 3, 1370 – 1373
- Karl, H., and Willig, A., 2005. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley, 497 pag.
- Khedo, K. K., Perseedoss, R. and Mungur, A., 2010. Wireless sensor network air pollution monitoring system. *International journal of wireless and mobile networks*, 2(2)
- Khemnar, D., Kasar, A. R. and Tembhurnikar, N. P., 2013. *WSN Based Air Pollution Monitoring System*. GRIN Verlag, 6 pag.
- Li, X., Liu, C., Leung, D., and Lam, K., 2006. Recent progress in CFD modelling of wind field and pollutant transport in street canyons. *Atmospheric Environment* 40, 5640–5658
- Ma, Y., Richards, M., Ghanem, M., Guo, Y. and Hassard, J., 2008. Air pollution monitoring and mining based on sensor grid in London, *Sensors*, 8(6), 3601 – 3623
- Mainwaring, A. M., Culler, D., Polastre, J., Szewczyk, R. and Anderson, J., 2002. Wireless sensor networks for habitat monitoring. *WSNA*, 88–97
- Malan, D., Fulford-Jones, T., Welsh, M. and Moulton, S., 2004. Codeblue: An ad hoc sensor network infrastructure for emergency medical care. *International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*
- Martínez Castro, D., 2008. Aplicaciones de redes de sensores y actuadores inalámbricas en los sectores médico, medioambiental, agrícola e industrial. Tesis de máster, Universidad Politécnica de Valencia
- MIT Technology Review, 2003. 10 Emerging Technologies that Will Change the World
- Mochida, A., Lun, I.Y.F., 2008. Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 96 (10 - 11), 1498 - 1527
- Moncho Esteve, I. J., 2011. Caracterización hidrodinámica y procesos de mezcla en un depósito de agua potable mediante técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Tesis de master, Universidad Politécnica de Valencia
- Moyne, J. R. and Tilbury, D. M., 2007. The emergence of industrial control networks for manufacturing control, diagnostics, and safety data. *Proceedings of the IEEE*
- Mukhopadhyay, S. C., 2012. *Smart Sensing Technology for Agriculture and Environmental Monitoring*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
- Nakano, S., Yokosawa, K., Goto, Y. and Tsukada, K., 2005. Hydrogen Gas Detection System Prototype with Wireless Sensor Networks. *4th Conference on Sensors*, Irvine, CA, USA, 159 – 162
- Norton, T., Sun, D.-W., Grant, J., Fallon, R., Dodd, V., 2007. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review. *Bioresource Technology*, 98 (12), 2386–2414
- Oliveira, L. M. and Rodrigues, J. J., 2011. Wireless Sensor Networks: a Survey on Environmental Monitoring. *Journal of Communications*, 6(2), 143 – 151

- Othman, M. F. and Shazali, K., 2012. Wireless Sensor Network Applications: A Study in Environment Monitoring System. *Procedia Engineering*, 41, 1204 – 1210
- Picco, G. and Heinzelman, W., 2012. Wireless Sensor Networks: 9th European Conference, EWSN 2012, Trento, Italy, February 15-17, 2012. *Proceedings*
- Pinto, J., 2004. Intelligent Sensor Networks. *AutomationWorld*, 62 pag.
- Postolache, O., Pereira, J. M., Silva, P. and Almeida, A., 2002. Greenhouse environment: Air and water monitoring. *Smart Sensing Technology for Agriculture and Environmental Monitoring*, Springer Berlin, Heidelberg, 81 – 102
- PPM Technology. <http://www.ppm-technology.com/>. (Acceso el 21 de mayo de 2013)
- Prieto Sancho, R. 2013. Caracterización de un sistema de medida de CO₂ y evaluación de su aplicabilidad en medidas de ventilación y bienestar animal en explotaciones ganaderas. Tesis de Máster, Universidad Politécnica de Valencia
- Reichrath, S., Davies, T.W., 2002. Using CFD to model the internal climate of greenhouses: past, present and future. *Agronomie* 22, 3–19
- Richards, P.J., Mallison, G.D., McMillan, D., Li, Y.F., 2002. Pedestrian level wind speeds in downtown Auckland. *Wind Struct.* 5 (2e4), 151e164
- Roache, P. J., 1994. Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies. *J Fluids Eng* 116(3): 405 - 13
- Roy, J.C., Boulard, T., 2005. CFD predictions of the natural ventilation in a tunnel type greenhouse: influence of wind direction and sensitivity to turbulence models. *Acta Horticulturae* 691, 457–464
- Sangiovanni-Vincentelli, A., 2007. Quo vadis SLD? reasoning about the trends and challenging of system level design. *Proceedings of the IEEE*, 95(3).
- Santiago del Rio, J. L., 2006. Numerical and experimental study of atmospheric flows and pollutant dispersion in urban. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid
- Scherer, T., Lombriser, C., Schott, W., Truong, H. L., and Weiss, B., 2012. Wireless Sensor Network for Continuous Temperature Monitoring in Air-Cooled Data Centers: Applications and Measurement Results. *ADHOC-NOW 2012*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 235 – 248
- Somov, A., Baranov, A., Savkin, A., Ivanov, M., Calliari, L., Passerone, R., Karpov, E. and Suchkov, A., 2012. Energy-Aware Gas Sensing Using Wireless Sensor Networks. *Wireless Sensor Networks: 9th European Conference, EWSN 2012, Trento, Italy*, 245 – 260
- Stathopoulos, T., Baskaran, A., 1990. Boundary treatment for the computation of 3D turbulent conditions around buildings. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 35, 177e200.
- Sustainable Bridges. <http://www.sustainablebridges.net> (Acceso el 15 de mayo de 2013)
- SST, 2010. Ultra low power carbon dioxide sensor. SST sensing Ltd.
- SST, 2011. CO₂S-PPM software user's guide. SST sensing Ltd.
- Tahara, Y., Tohyama, S., and Katsui, T., 2006. CFD-based multi-objective optimization method for ship design. *International journal for numerical methods in fluids*, 52(5), 499-527.

- Tarrío, P., 2011. Efficient localization methods for wireless sensor networks based on received signal strength measurements. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid
- Thévenin, D., and Janiga, G., 2008. Optimization and computational fluid dynamics. Springer.
- Tiberi, U., 2011. Analysis and design of IEEE 802.15.4 networked control systems. Tesis doctoral, University of L'Aquila
- Tominaga, Y., Murakami, S., Mochida, A., 1997. CFD prediction of gaseous diffusion around a cubic model using a dynamic mixed SGS model based on composite grid technique. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 67 - 68, 827 - 841
- Tominaga, Y., Mochida, A., 1999. CFD prediction of flowfield and snowdrift around a building complex in a snowy region. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 81 (1e3), 273 – 282
- Tominaga, Y., Mochida, A., Murakami, S., Sawaki, S., 2008a. Comparison of various revised kee models and LES applied to flow around a high-rise building model with 1:1:2 shape placed within the surface boundary layer. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 96 (4), 389 – 411
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., Shirasawa, T., 2008b. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 96 (10 - 11), 1749 - 1761.
- Tominaga, Y., Stathopoulos, T., 2009. Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: comparison of various types of k- ϵ models. *Atmos. Environ.* 43 (20), 3200 - 3210
- Tominaga, Y., Stathopoulos, T., 2010. Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: model evaluation of RANS and LES. *Build. Environ.* 45 (10), 2231 – 2239
- Tominaga, Y., Stathopoulos, T., 2011. CFD modeling of pollution dispersion in a street canyon: comparison between LES and RANS. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 99 (4), 340 – 348
- Tominaga, Y., Okaze, T., Mochida, A., 2011. CFD modeling of snowdrift around a building: an overview of models and evaluation of a new approach. *Build. Environ.* 46, 899 - 910.
- Vardoulakis, S., Fisher, B.E.A., Pericleous, K., and Gonzalez-Flesca, N., 2003. Modelling air quality in street canyons: A review. *Atmospheric Environment* 37, 155–182
- Völgyesi, P., Nádas, A., Koutsoukos, X. and Lédeczi, Á., 2008. Air quality monitoring with SensorMap. 7th international Conference on information: Processing in Sensor Networks. Information Processing In Sensor Networks. IEEE Computer Society, Washington, DC, 529 – 530
- Vullers, R., Schaijk, R., Visser, H., Penders, J. and Hoof, C., 2010. Energy Harvesting for Autonomous Wireless Sensor Networks. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 2(2) 29-38
- Werner-Allen, G., Lorincz, K., Johnson, J., Lees, J. and Welsh, M., 2006. Fidelity and yield in a volcano monitoring sensor network. 7th symposium on Operating systems design and implementation. Berkeley, CA, USA 381–396.
- Willig, A., Matheus, K. and Wosliz, A., 2005. Wireless technology in industrial networks. *Proceedings of the IEEE*.
- Willig, A., 2008. Recent and emerging topics in wireless industrial communication. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 4(2).102–124

- Witrant, E., D'Innocenzo, A., Isaksson, A. J., Di Benedetto, M. D., Johansson, K.H., Santucci, F. and Strand, M., 2008. Mining ventilation control: a new industrial case for wireless automation. IEEE Conference on Automation Science and Engineering, Washington DC, USA
- Wobscholl, D., 2006. A Wireless Gas Monitor with IEEE 1451 Protocol. The IEEE Sensors Application Symposium, Houston, Texas, USA, 162 – 164
- Xiaoqiang, Z., and Zuhou, Z., 2010. Development of Remote Waste Gas Monitor System. International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Changsha, China, 1105 – 1108
- Yan, W., Zhang, Y., Sun, Y., Li, D., 2008. Experimental and CFD study of unsteady airborne pollutant transport within an aircraft cabin mock-up. Building and Environment, 44, 34–43
- Yoshie, R., Mochida, A., Tominaga, Y., Kataoka, H., Harimoto, K., Nozu, T., Shirasawa, T., 2007. Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 95 (9e11), 1551e1578.
- Zarate, E., Belalcazar, L., Clappier, A., Manzi, V., and Van den Bergh, H., 2007. Air quality modelling over Bogota, Colombia: Combined techniques to estimate and evaluate emission inventories. Atmospheric Environment 41, 6302–6318

GLOSARIO

CFD (*Computational Fluid Dynamics* – Dinámica de fluidos computacionales). Rama de la mecánica de fluidos que usa métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que involucran flujo de fluidos.

DAS (*Data Acquisition System* – Sistema de adquisición de datos). Conjunto de equipos y programas por medio de los cuales se realiza el proceso de muestreo de las condiciones del mundo físico real y la conversión de las muestras resultantes en los valores numéricos digitales que pueden ser manipulados en un ordenador.

DDE (*Dynamic Data Exchange* – Intercambiador dinámico de datos). Es una tecnología de comunicación entre varias aplicaciones bajo Microsoft Windows y en sistemas operativos. Aunque es apto para las últimas versiones de Windows, ha sido reemplazado por su sucesor Object Linking and Embedding, COM y OLE Automation. Sin embargo, todavía se usa en varios sitios dentro de Windows, por ejemplo en la asociación de archivos. En particular, DDE permite que una aplicación abra una sesión con otra, enviar comandos al servidor de aplicaciones y recibir respuestas.

DNS (*Direct Numerical Simulation* - Simulación numérica directa) Método de resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes que resuelve el movimiento de un fluido y sus turbulencias en todas las escalas. No se modelan por lo tanto las pequeñas estructuras como sí sucede con otros algoritmos.

NDIR (*Nondispersive infrared sensor* - Sensor de infrarrojo no dispersivo) Es un dispositivo espectroscópico simple que se usa a menudo como detector de gas. Se llamado no dispersivo porque la longitud de onda que pasa a través de la cámara de muestreo no es pre-filtrada en lugar de un filtro se utiliza antes de que el detector.

RTU (*Remote Terminal Unit* – Unidad terminal remota). Dispositivo electrónico basado en microprocesador que realiza el trabajo de interfaz o de puente de los objetos que se encuentran instalados en la planta del proceso, remotos al sistema central de control, y que transmite los datos adquiridos a través de telemetría o por un sistema cableado con envío y recepción de mensajes de forma controlada.

Skewness: Uno de los parámetro que permite evaluar la calidad de las celdas de la mallas. Está definida como la diferencia entre la forma de una celda de la malla y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente. Altos valores de skewness o lo que es igual a altas deformaciones en las celdas pueden disminuir la precisión e inestabilizar la solución.

Telemetría: Tecnología que facilita la medición de forma remota y el reporte de información. Comúnmente asociado a los mecanismos de transmisión de datos vía inalámbrica (con tecnología basada en radio o infrarrojo por ejemplo), pero también abarca la transmisión de datos sobre otros medios, tales como la telefonía, las redes de ordenadores, los enlaces ópticos o entre otros.