



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**MODELOS EN DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL
PARA APLICACIONES AMBIENTALES Y SU VALIDACIÓN CON
SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS BASADOS EN REDES
DE SENSORES INALÁMBRICAS**

ALEJANDRO MARULANDA TOBÓN

Trabajo de investigación dirigida presentado a
la ETSIAMN como requisito parcial para optar al título de
DOCTOR EN AGROINGENIERÍA

Dr. GUILLERMO PALAU SALVADOR
DIRECTOR

Dr. SALVADOR CALVET SANZ
CO-DIRECTOR

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA RURAL Y AGROALIMENTARIA
VALENCIA, ESPAÑA

5 de febrero de 2016

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

RESUMEN

El estudio, monitoreo y control de fenómenos ambientales como lo es la contaminación atmosférica, el control del clima o la homogenización de la temperatura y la humedad en recintos cerrados, o el entendimiento y extinción de incendios forestales, plantean un reto constante a el personal responsable y especialmente a los investigadores. 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. 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 varias metodologías: Técnicas con gas trazador, toma intensiva de datos acompañada con 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.

El presente documento, por medio de unos casos de estudio, busca abordar la complejidad de algunos fenómenos ambientales haciendo uso de modelos con dicha técnica de CFD, cuya validación exige además de un protocolo sistemáticamente ejecutado, un Sistema de Adquisición de Datos (DAS) espacialmente distribuido y temporalmente controlado, lo cual se alcanza con el diseño e instalación de una Red Inalámbrica de Sensores (WSN).

Se encuentra entonces un primer caso justificativo, donde teniendo la necesidad del estudio de la homogenización del microclima de un invernadero, se genera un DAS gracias a la integración de diferentes tecnologías cableadas. Demuestra además de un extenso desarrollo técnico, una imperiosa necesidad de pasar a una tecnología no cableada para lograr la cobertura espacial requerida en recintos o espacios con mayor volumen. Le sigue un caso de estudio a nivel de laboratorio, donde se busca entender la distribución y estratificación de un gas en un recinto con ventilación controlada. Se hace uso de un modelo con CFD, que a su vez se alimenta y valida con un banco de datos generado gracias a una WSN con sensores de gases. Luego, un caso de estudio donde el espacio de análisis se traslada a un ambiente real y con alta complejidad, como lo es una calle de la ciudad de Valencia, España.

Palabras clave: Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), Redes de Sensores Inalámbricos (WSN), Sistema de Adquisición de Datos (DAS), Sistemas Embebidos, Buses de Campo, Sensor de Gas, Monitorización Ambiental, Modelos Ambientales, Validación de Modelos Ambientales

ABSTRACT

The study, monitoring and control of environmental phenomena such as the air pollution, climate control or homogenization temperature and humidity indoors, or understanding and extinguishing forest fires pose a constant challenge to the personnel responsible and especially to the researchers. Compete this problematic economic sectors where greenhouse crops, post-harvest cameras, chillers tractor ruminant farms, smart buildings, urban environmental studies, among many others used. In all of them there is a concern for consistency in production, for energy efficiency and environmental impact generated. It is for this homogenization, dispersion and stratification of climate variables and gases, closely related to the ventilation of outdoor spaces and venues of interest. For the understanding of physical phenomena that are generated and subsequent improvement in the structural design and automatic systems, we need a modeling and energy analysis, there are currently several methods: tracer gas techniques, intensive data collection accompanied with box-empirical modeling Black and resolution simulation of physical laws that govern the behavior of study spaces. Previous techniques independently are insufficient to provide practical solutions and are costly or highly particularized to the case study.

That is why the technique Fluid Dynamics Computer (CFD), as a tool that is used to numerically solve the equations of continuity and momentum that govern energy exchange system in order to obtain the fields of speed and direction airflow, the distribution of temperature, humidity and specific gases, becomes viable for later models were used with advanced control systems. However, the CFD technique requires a validation of the results with intensive shooting (space-time) data. Most published studies refer in their conclusions to the need for such validation of the data produced and how it is done.

This document, by means of case studies, seeks to address the complexity of some environmental phenomena using models with the technique of CFD, whose validation also requires a protocol systematically executed a System Data Acquisition (DAS) spatially distributed and temporally controlled, which is achieved with the design and installation of a Wireless Sensor Network (WSN).

Then it finds a first justification case where having the need to study the homogenization of the microclimate of a greenhouse, a DAS is created through the integration of different technologies wired. It shows in addition to extensive technical development, an urgent need to move to a non-wired technology to achieve the spatial coverage required in rooms or spaces with greater volume. It is followed by a case study in the laboratory, which seeks to understand the distribution and stratification of a gas in a chamber with controlled ventilation. Using a CFD model, which in turn feeds and validated with a database generated from a gas sensor WSN becomes. Then, a case study where space analysis moves to a real environment and highly complex, as it is a street in the city of Valencia, Spain.

Keywords: Computational Fluid Dynamics (CFD), Wireless Sensor Networks (WSN), Data Acquisition System (DAS), Embedded Systems, Fieldbus, Gas Sensor, environmental monitoring, environmental modeling, environmental modeling Validation

RESUM

L'estudi, monitoratge i control de fenòmens ambientals com és la contaminació atmosfèrica, el control del clima o l'homogeneïtzació de la temperatura i la humitat en recintes tancats, o l'enteniment i extinció d'incendis forestals, plantegen un repte constant al personal responsable i especialment als investigadors. Competeix aquesta problemàtica a sectors econòmics on s'utilitza cultius sota hivernacle, càmeres de pos-collita, cambres de refrigeració de tractors, explotacions de remugants, edificacions intel·ligents, estudis ambientals urbans, entre molts altres. En totes elles hi ha una preocupació per la uniformitat en la producció, per una eficiència energètica i per l'impacte ambiental que es genera. Es troba doncs aquesta homogeneïtzació, dispersió i estratificació de les variables climàtiques i dels gasos, íntimament relacionada amb la ventilació dels espais exteriors i els recintes d'interès. Per a la comprensió dels fenòmens físics que es generen i posterior millora del disseny estructural i dels sistemes automàtics, cal un modelatge i estudi energètic, existint actualment diverses metodologies: Tècniques amb gas traçador, presa intensiva de dades acompanyada amb modelatge empíric tipus caixa negra, i simulació per resolució de les lleis físiques que governen el comportament dels espais d'estudi. Les anteriors tècniques de forma independent resulten insuficients per donar solucions pràctiques, i resulten costoses o altament particularitzades al cas d'estudi.

És per això que la tècnica de dinàmica de fluids Computacionals (CFD), com a eina que s'utilitza per resoldre numèricament les equacions de continuïtat i de moment que regeixen els intercanvis energètics d'un sistema per tal d'obtenir els camps de velocitat i de direcció del flux d'aire, la distribució de la temperatura, de la humitat i de gasos específics, es fa viable per obtenir els models que posteriorment s'utilitzaran amb sistemes de control avançat. No obstant això, la tècnica CFD requereix d'una validació dels resultats amb una presa (espai-temps) intensiva de dades. La majoria dels treballs publicats fan referència en les seves conclusions a la necessitat d'aquesta validació de les dades llançats i la forma en què es fa.

El present document, per mitjà d'uns casos d'estudi, busca abordar la complexitat d'alguns fenòmens ambientals fent ús de models amb aquesta tècnica de CFD, la validació exigeix a més d'un protocol sistemàticament executat, un Sistema d'Adquisició de Dades (DAS) espacialment distribuït i temporalment controlat, la qual cosa s'aconsegueix amb el disseny i instal·lació d'una Xarxa Sense fil de Sensors (WSN).

Es troba llavors un primer cas justificatiu, on tenint la necessitat de l'estudi de l'homogeneïtzació del microclima d'un hivernacle, es genera un DAS gràcies a la integració de diferents tecnologies cablejades. Demuestra a més d'un extens desenvolupament tècnic, una imperiosa necessitat de passar a una tecnologia no cablejada per aconseguir la cobertura espacial requerida en recintes o espais amb més volum. El segueix un cas d'estudi a nivell de laboratori, on es busca entendre la distribució i estratificació d'un gas en un recinte amb ventilació controlada. Es fa ús d'un model amb CFD, que al seu torn s'alimenta i valida amb un banc de dades generat gràcies a una WSN amb sensors de gasos. Després, un cas d'estudi on l'espai d'anàlisi es trasllada a un ambient real i amb alta complexitat, com ho és un carrer de la ciutat de València, Espanya.

Paraules clau: Dinàmica de Fluids Computacional (CFD), Xarxes de Sensors Sense fil (WSN), Sistema d'Adquisició de Dades (DAS), Sistemes Encastats, Busos de Camp, Sensor de Gas, Monitorització Ambiental, Models Ambientals, Validació de Models Ambientals

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar 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 quiero nombrar a mi “familia” en estos lares, gracias a los cuales Valencia fue un hogar, Zulma, Yolanda, Ana, Alba, Amalia, Lucia, Irene, 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

RESUMEN	I
AGRADECIMIENTOS	IV
CONTENIDO	V
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE TABLAS.....	XV
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	XVIII
Símbolos Romanos.....	XVIII
Símbolos Griegos.....	XIX
Abreviaturas.....	XIX
INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN	XXII
OBJETIVOS.....	1
Objetivo General	1
Objetivos Específicos	1
A. MARCO TEÓRICO	2
A.1. Conceptos y técnicas para el desarrollo del estudio	3
A.1.1. Definición y conceptos de la contaminación atmosférica.....	4
A.1.1.1. Contaminantes primarios y secundarios	8
A.1.1.2. La influencia de la meteorología	8
A.1.1.3. La red de control de la contaminación atmosférica en Valencia	9
A.1.2. Marco legal y regulación.....	10
A.1.2.1. Normativa vigente.....	10
A.1.2.2. Necesidad y objetivos de un Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire	11
A.1.2.3. Otra legislación de aplicación	12
A.1.3. Situación actual de la contaminación del aire en España.....	15
A.1.3.1. Dióxido de nitrógeno (NO ₂).....	16
A.2. Necesidades y modelos en el estudio de la calidad del aire.....	17
A.3. Modelos CFD.....	18
A.3.1. Simulación y modelado de flujos turbulentos	18
A.3.2. Métodos computacionales en la CFD.....	19
A.3.3. Ecuaciones fundamentales	20
A.3.4. Características de los flujos turbulentos	22
A.3.5. Necesidad de metodologías para la validación	23
A.3.6. Uso de las CFD en el sector ambiental	24
A.3.7. Extracción de perfiles del doble promediado.....	26
A.4. Sistemas de adquisición de datos.....	26
A.4.1. Estructura de un DAS cableado	28
A.5. Comunicaciones en campo.....	29
A.5.1. Jerarquización en las comunicaciones en campo	30
A.5.2. Topologías de red.....	31
A.5.2.1. Topología física.....	31
A.5.2.1.1. Punto a punto.....	31
A.5.2.1.2. Bus.....	32
A.5.2.1.3. Estrella.....	32

A.5.2.1.4.	Anillo.....	33
A.5.2.1.5.	Malla.....	33
A.5.2.2.	Topología lógica	34
A.5.3.	Buses de campo estandarizados.....	34
A.5.4.	Ethernet Industrial.....	38
A.5.4.1.	Propiedades del sistema de bus.....	38
A.5.4.2.	Protocolos de Ethernet Industrial	39
A.5.5.	Bus de campo PROFIBUS.....	39
A.5.5.1.	Protocolo en PROFIBUS para acceso al medio	41
A.5.6.	Protocolos serie.....	42
A.5.6.1.	Protocolo FreeASCII.....	43
A.5.6.1.1.	Servicios del Protocolo	43
A.5.6.1.2.	Ventajas y desventajas del protocolo FreeASCII.....	44
A.6.	Las WSN	44
A.6.1.	Aplicaciones de las WSN	45
A.6.2.	WSN para el monitoreo de la medioambiental	47
A.6.3.	WSN para el monitoreo de la calidad del aire	47
A.6.4.	Uso de las WSN para la validación de modelos CFD.....	48
A.6.5.	Marco técnico de WSN para los casos de estudio	48
A.6.5.1.	Red de sensores inalámbricos.....	49
A.6.5.2.	WSN prototipo y comerciales	52
A.6.5.3.	Estándares en la comunicación de las WSN	56
A.6.5.4.	Sistemas de alimentación.....	58
Baterías tradicionales	59	
A.6.5.5.	Punto(s) de acceso de comunicación	61
A.6.5.6.	Punto de recepción central	62
A.7.	Programación avanzada con Redes de Petri.....	63
A.7.1.	Redes de Petri.....	64
A.7.1.1.	Principales propiedades dinámicas de las PN	65
A.7.1.2.	Métodos de análisis de propiedades dinámicas de las PN	66
A.7.1.3.	Principales propiedades estáticas de las PN	67
A.7.2.	Lenguajes de programación para PLC's.....	67
A.7.3.	Uso de las PN en la programación de PLC's.....	70
B.	CASOS DE ESTUDIO	72
B.1.	Caso justificativo: Medición de variables ambientales mediante instrumentación distribuida.....	72
B.1.1.	Estructura y jerarquía del sistema.....	74
B.1.1.1.	Selección de PROFIBUS DP como bus estándar.....	75
B.1.1.2.	Implementación de PROFIBUS DP.....	77
B.1.1.3.	Pasarela entre buses de campo	78
B.1.1.4.	Red RS485 inicial.....	80
B.1.2.	Reconocimiento de tramas de comunicación.....	81
B.1.2.1.	Adaptación del protocolo PROFIBUS a la capa 2	84
B.1.2.2.	Reconocimiento del formato de salida de la información	85
B.1.3.	Redes de Petri para la programación	86
B.1.3.1.	Encapsulado de protocolo ASCII en protocolo PROFIBUS DP.....	86
B.1.3.2.	Realización de la Red de Petri	89
B.1.3.2.1.	Especificación informal y formalización	89
B.1.3.2.2.	Especificación formal.....	91
B.1.4.	Funciones superiores del sistema	93
B.1.5.	Pruebas y resultados	94
B.1.5.1.	Verificación y Validación (V&V) de la Red de Petri.....	94
B.1.5.1.1.	Simulación de la Red de Petri.....	95
B.1.5.1.2.	Alcanzabilidad y T-Invariantes de la Red de Petri.....	95
B.1.6.	Implementación.....	98

B.1.6.1.	Modos de operación.....	98
B.1.6.2.	Manipulación de modos de operación.....	98
B.1.6.3.	Organización del programa.....	99
B.1.7.	Datos obtenidos y tiempos.....	100
B.1.8.	Acoplamiento de otra redes serie de anemómetros.....	102
B.1.9.	Conclusiones del caso.....	104
B.2.	Dispersión de gases contaminantes en una cámara con ventilación controlada	106
B.2.1.	Especificaciones del espacio.....	106
B.2.2.	Instrumentación para las pruebas.....	107
B.2.3.	Calibración de la WSN	108
B.2.3.1.	Montaje experimental	109
B.2.3.2.	Pruebas de caracterización del sensor	110
B.2.3.3.	Resultados de la calibración.....	110
B.2.4.	Pruebas realizadas	112
B.2.5.	Especificación del caso de estudio	113
B.2.5.1.	Mallado.....	115
B.2.5.2.	Ubicación de los nodos de la WSN	117
B.2.5.3.	Disposición del modelo.....	119
B.2.6.	Pruebas y resultados del caso	121
B.2.6.1.	Verificación de la malla.....	121
B.2.6.2.	Resultados del modelo CFD.....	124
B.2.6.3.	Calibración del modelo CFD.....	128
B.2.6.4.	Validación y análisis paramétrico	133
B.2.7.	Conclusiones del caso.....	136
B.3.	Estudio de la contaminación del tráfico en un ambiente urbano de España.....	138
B.3.1.	Especificaciones del espacio de estudio	138
B.3.1.1.	Selección de la zona para el caso piloto.....	139
B.3.1.2.	Selección de ubicación de sensores	144
B.3.2.	Análisis descriptivo de la contaminación en la ciudad de Valencia.....	146
B.3.2.1.	Caracterización de las estaciones de medida de la contaminación atmosférica del Ayuntamiento de Valencia.....	146
B.3.2.2.	Análisis por estaciones del Ayuntamiento de Valencia	147
B.3.2.3.	Análisis por contaminantes de las estaciones del Ayuntamiento de Valencia	149
B.3.2.3.1.	Ozono	149
B.3.2.3.2.	Dióxido de Azufre	150
B.3.2.3.3.	Dióxido de Nitrógeno	150
B.3.2.3.4.	Monóxido de Nitrógeno	151
B.3.2.3.5.	Partículas PM10.....	151
B.3.2.3.6.	Monóxido de Carbono	152
B.3.2.4.	Estimación de los valores de contaminantes atmosféricos en la zona de estudio	152
B.3.2.4.1.	Método AHP de comparación por pares	153
B.3.2.4.2.	Aplicación del método.....	153
B.3.2.5.	Análisis estadístico de los datos.....	155
B.3.3.	Uso de la WSN para la obtención de las variables de interés	156
B.3.4.	Análisis estadístico de los valores adquiridos y obtención de modelo previo.....	159
B.3.5.	Desarrollo del modelo por medio de CFD.....	171
B.3.5.1.	Software para la simulación y el pos-procesado	171
B.3.5.2.	Técnicas de modelado	172
B.3.5.3.	Experiencias de campo y casos hipotéticos.....	173
B.3.5.4.	Desarrollo del modelo	179
B.3.6.	Validación de resultados	182
B.3.6.1.	Punto de control.....	182
B.3.6.2.	Análisis de casos experimentales.....	183
B.3.6.3.	Análisis de casos ideales (hipotéticos).....	189
B.3.6.4.	Parámetros estadísticos.....	197

B.3.6.5. Perfil VCO doble-promediado.....	198
B.3.6.6. Evolución de VCO para diferentes niveles de emisión.....	199
B.3.7. Conclusiones del caso.....	200
CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO FUTURO	203
Conclusiones generales	203
Trabajo futuro	204
FUENTES Y BIBLIOGRAFÍA	205
GLOSARIO	222
ANEXO I.....	225
ANEXO II.....	232
ANEXO III	250

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Diagrama de flujo del ciclo de la contaminación atmosférica.....	5
Figura 2: Principales sustancias contaminantes producidas regularmente por los fenómenos naturales	6
Figura 3: Red de vigilancia y prevención de la contaminación atmosférica de la ciudad de Valencia	10
Figura 4: Estaciones con superación de NO ₂ por tipo de estación (izq.) y estaciones con superación de NO ₂ por tipo de área (der.)	16
Figura 5: Promedio de la información entre 2001 y 2009 suministrada a través del cuestionario oficial de la calidad del aire.....	16
Figura 6: Esquema de actuación para el estudio de la contaminación ambiental (Santiago del Rio, 2006)	17
Figura 7: Proceso de consecución de un modelo CFD valido para ambientes interiores (Hajdukiewicz et al, 2013)	24
Figura 8: Aplicaciones de DAS's y características para su diseño	27
Figura 9: Exigencias técnicas de los DAS's con el paso del tiempo	27
Figura 10: Arquitectura tradicional de un DAS.....	28
Figura 11: Arquitectura DAS de integración centralizada basada en PC.....	29
Figura 12: Arquitectura distribuida de un DAS.....	29
Figura 13: Esquema representativo de las diferentes capas del modelo OSI.....	31
Figura 14: Principales protocolos soportados por los dispositivos de los principales fabricantes en el sector de la control y la automatización.....	39
Figura 15: Protocolo PROFIBUS en el modelo OSI.....	40
Figura 16: Bloques de los que se compone una trama de comunicación.....	42
Figura 17: Estructura funcional de una WSN con topología compleja y desagregada	49
Figura 18: Estructura funcional de una WSN con topología compleja y desagregada	50
Figura 19: Diagrama de bloques de las partes del dispositivo.....	52
Figura 20: Diagrama de bloques de las partes del dispositivo	57
Figura 21: Opciones de conexión con el receptor base	62
Figura 22: Opciones de almacenamiento con el receptor base	63
Figura 23: PN de ejemplo con cuatro lugares, cuatro transiciones y 2 marcas de inicio.....	64
Figura 24: Proceso de programación de PLC con PN para lenguaje LLD	70
Figura 25: Esquema general del método de diseño para algoritmos de control de PLC	71
Figura 26: Parte de la estructura del sistema donde se observa la pasarela I-7550. Verde (Red Ethernet), Morado (Red Profibus), Amarillo (Red As-Interface) y Rosado(Red en RS485)	75
Figura 27: Estándar de la conexión PROFIBUS.....	77
Figura 28: Conector estándar para un bus de campo PROFIBUS.....	78
Figura 29: Terminales externas de la pasarela ICP DAS I-7550	78
Figura 30: Micro-interruptores para la asignación del número de esclavo del I-7550.....	79
Figura 31: Forma de conexión a bus RS-485 en equipos Gantner	80
Figura 32: Plano para habilitar resistencia terminal en registradores Gantner.....	80
Figura 33: Disposición de equipos para la intercepción de la comunicación por el puerto RS232..	81
Figura 34: Estructura de tramas para protocolo ASCII de los registradores Gantner	82
Figura 35: Estructura de la trama para la comunicación con PROFIBUS capa2 o FDL	83
Figura 36: Servicios SAP en el protocolo PROFIBUS para los dispositivos Gantner	84
Figura 37: Establecimiento de conexión entre el maestro la pasarela i-7550.....	86
Figura 38: Funcionamiento en diagrama de bloques del conversor I-7550	87
Figura 39: Encapsulado y posicionamiento de los bytes de información para la transmisión de datos desde el PLC hasta las RTU's.....	88

Figura 40: Vista del programa Step 7 de SIEMENS para la configuración de las redes y los equipos de red.....	89
Figura 41: Diagrama de flujo de la secuencia principal del algoritmo para la comunicación de las RTU's.....	90
Figura 42: Características de configuración para la Red de Petri desarrollada.....	91
Figura 43: Red de Petri de secuencia principal sin módulos independientes ni anidado.....	92
Figura 44: Despliegue de la subrutina reutilizable de comunicación de la red principal.....	93
Figura 45: Aspecto de una de las ventanas de la interfaz del sistema de adquisición.....	94
Figura 46: Pantalla principal en la simulación de la PN en el programa Netlab v.1(2K).....	95
Figura 47: Resultado del grafo de alcanzabilidad para una rutina de la red y para rutinas desplegadas.....	96
Figura 48: Resultado de análisis de la subrutina principal de la PN.....	96
Figura 49: Análisis de uno de los conflictos presentados por bifurcación de la red en un lugar.....	97
Figura 50: Red de Petri para graficar los diferentes estados de los modos de funcionamiento.....	99
Figura 51: Fragmento de la organización del programa implementado en el PLC S7300.....	100
Figura 52: Aspecto de la estructura del programa en la aplicación Step 7 para el PLC S7300.....	100
Figura 53: Reporte generado en texto plano desde la aplicación de supervisión de algunos de los valores almacenados en la base de datos.....	101
Figura 54: Prueba de comunicación habiendo implementado el programa y la infraestructura....	102
Figura 55: Trama de respuesta del anemómetro sónico GILL Wind Master.....	102
Figura 56: Reporte de valores almacenados en la DB de uno de los anemómetros acoplados a una red serie.....	103
Figura 57: Sala de experimentación de ventilación del Departamento de Ciencia Animal de la Universidad Politécnica de Valencia.....	106
Figura 58: Imagen de la pared Este de la sala con los seis sistemas de extracción (izq.) y componentes de cada turbina de extracción (der.).....	107
Figura 59: Imagen de la pared Oeste de la sala con las doce ventanas abatibles (izq.) y sistema para la apertura de la ventana (der.).....	107
Figura 60: Esquema de la instalación realizada para la calibración de los sensores de CO ₂	109
Figura 61: Resultados de uno de los ensayos de linealidad en la medida de concentración de CO ₂ con el sensor analizado.....	111
Figura 62: Chimenea y ventanas seleccionadas para la conformación del caso real de estudio.....	113
Figura 63: 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	115
Figura 64: Vista de algunas de las paredes del modelo con la malla media no estructurada generada.....	116
Figura 65: Idealización de los orificios de la manguera con caras de la celdas que circundan la manguera.....	117
Figura 66: Idealización en el mallado de los rebordes de las toberas.....	117
Figura 67: Planos para la ubicación de los sensores de CO ₂ en la sala de estudio.....	118
Figura 68: Perfiles de concentración de CO ₂ de las verticales donde se encuentran ubicados los sensores.....	123
Figura 69: Estructura turbulenta del flujo del aire en la sala de experimentación.....	125
Figura 70: Plano con los contornos de velocidad en la coordenada y 1,80m.....	126
Figura 71: Plano de los contornos de presión en la coordenada y 1,80m.....	127
Figura 72: Plano de con los contornos de presión en la coordenada y 2,23m.....	128
Figura 73: Planos con la distribución de la concentración de masa del CO ₂	129
Figura 74: Proceso de congelación del manorreductor usado en las pruebas.....	130
Figura 75: Disposición de los sensores de concentración de CO ₂ para la medición de la acumulación del gas en una esquina.....	130
Figura 76: Medidas tomadas por los sensores de concentración [ppm] de CO ₂ tras la inyección del gas en dos pruebas [hh:mm].....	131
Figura 77: Medidas de concentración [ppm] de CO ₂ por parte de los sensores ubicados en la vertical de la pared de las ventanas.....	131
Figura 78: Comparación de la concentración del CO ₂ [ppm] entre una de las pruebas y la simulación.....	132

Figura 79: Comparación de algunos casos seleccionados donde se varía la presión de salida del CO ₂ desde los orificios de la manguera.....	133
Figura 80: Curvas de medición de los sensores de concentración de CO ₂ ante la inyección de gas y con ventilación constante.....	134
Figura 81: Comparación gráfica entre los rangos con cuartiles de las mediciones y los datos simulados en la misma posición.....	135
Figura 82: Ubicación del barrio Ruzafa dentro de la Ciudad de Valencia (Google Maps)	139
Figura 83: Vías de interés para el estudio dentro de la zona de Ruzafa.....	140
Figura 84: Evolución anual de la intensidad media diaria del tráfico en la zona de Ruzafa	141
Figura 85: Ubicación de la C/ Colón y alrededores dentro de la Ciudad de Valencia (Google Maps)	142
Figura 86: Vías de interés para el estudio dentro de la zona de Colón y alrededores.....	142
Figura 87: Evolución anual de la intensidad media diaria del tráfico en la zona de Colón y alrededores.....	142
Figura 88: Ubicación la C/ Clariano dentro de la Ciudad de Valencia (Google Maps)	143
Figura 89: Vías de interés para el estudio dentro de la zona de Clariano	144
Figura 90: Evolución anual de la intensidad media diaria del tráfico en la zona de Clariano.....	144
Figura 91: Zona de estudio en la C/ Colón con los 6 cruces señalados	145
Figura 92: Imágenes aéreas obtenidas con Google Maps con la ubicación de la estación de Viveros	146
Figura 93: Plano de la intensidad del tráfico en inmediaciones a la estación de Viveros.....	147
Figura 94: Intensidad media del tráfico alrededor de la estación de Viveros (Elaboración propia a partir de los datos de la estación del Ayuntamiento de Valencia).....	147
Figura 95: Evolución anual de la concentraciones medias mensuales de los contaminantes medidos por la estación ambiental de Viveros (Elaboración propia a partir de los datos de la estación del Ayuntamiento de Valencia)	148
Figura 96: Evolución anual de la concentración media mensual del CO medido por la estación ambiental de Viveros (Elaboración propia a partir de los datos de la estación del Ayuntamiento de Valencia).....	149
Figura 97: Valores medios mensuales de las concentraciones de Ozono troposférico [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] por estaciones	150
Figura 98: Valores medios mensuales de las concentraciones de Dióxido de Azufre [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] por estaciones	150
Figura 99: Valores medios mensuales de las concentraciones de Dióxido de Nitrógeno [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] por estaciones.....	151
Figura 100: Valores medios mensuales de las concentraciones de Monóxido de Nitrógeno [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] por estaciones	151
Figura 101: Valores medios mensuales de las concentraciones de PM ₁₀ [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] por estaciones	152
Figura 102: Valores medios mensuales de las concentraciones de Monóxido de Carbono [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] por estaciones.....	152
Figura 103: Disposición de uno de los sensores de la WSN en uno de los semáforos de la zona de estudio	157
Figura 104: Encapsulado de los nodos que componen la WSN	158
Figura 105: Diagrama del comportamiento del VCO [ppm] y la temperatura [°C] en el periodo seleccionado.....	160
Figura 106: Comportamiento de la temperatura ambiental [°C] en la estación climática de Viveros	161
Figura 107: Intensidad de flujo de vehículos reportada por la estación de aforo de la C/ Colón N ^o 9	162
Figura 108: Homogenización del banco de datos en su periodo de muestreo (Temp. [°C], VCO [ppm] y HR [%])	162
Figura 109: Datos de tráfico [veh/min] con interpolación lineal para alcanzar un periodo de muestreo de 1 min.....	163
Figura 110: Resumen de estadísticos para las medidas de VCO con una media de cada 50 datos	163
Figura 111: Resumen de estadísticos para las medidas de VCO usando la función logarítmica	164

Figura 112: Salida del tercer ajuste del modelo multivariante para el análisis estadístico	165
Figura 113: Comparación entre los datos ajustados y las medidas realizadas.....	165
Figura 114: Dispersión de VCO medido frente al VCO arrojado por la ecuación del modelo	166
Figura 115: Relación temporal entre los datos medidos de VCO [ppm] y los datos entregados por el modelo.....	166
Figura 116: Medidas obtenidas de la estación climática de Viveros por la Agencia Estatal de Meteorología.....	167
Figura 117: Resultado del modelo al introducir nuevos valores en la variable Med50_Temp y Med50_HR	167
Figura 118: Curvas de datos a usar para el modelo que dependa solo de las variables climáticas de la estación.....	168
Figura 119: Resumen de estadísticos para las medidas de VCO (izq.) y diagrama de caja o Box-Whisker para las medidas del VCO (der.).....	168
Figura 120: Obtención de la ecuación del nuevo modelo desde el programa estadístico	169
Figura 121: Análisis gráfico de los residuos del modelo	170
Figura 122: Análisis de dispersión entre los valores modelados del VCO y los factores del ajuste.....	170
Figura 123: Comparación temporal entre los datos medidos y los calculados mediante el modelo	170
Figura 124: Resultado del modelo con un banco de datos para su validación.....	171
Figura 125: Plano del área de estudio, correspondiente con la C/ Colón en el cruce con la C/ Pizarro (Valencia, España)	174
Figura 126: Vista en perspectiva del dominio computacional empleado en las simulaciones	179
Figura 127: Vista superior del dominio computacional del modelo en la que se puede apreciar la inyección en carriles como solución a la emisión del escalor (VCO).	179
Figura 128: Sección horizontal del mallado en su zona central.....	180
Figura 129: Sección vertical del mallado en su zona central	181
Figura 130: Vista en perspectiva del mallado en la zona central del cruce de C/ Colón con C/ Pizarro	181
Figura 131: Vista en perspectiva del mallado del dominio computacional.....	181
Figura 132: Vista en planta de la ubicación del punto de control (marcado con una aspa redondeada) empleado para la validación del modelo. Sensor colocado en semáforo con coordenadas (X; Y; Z)=(403,8272; 238,9944; 3,0000).....	182
Figura 133: Simulación caso cv1: sección z=1,50m	184
Figura 134: Simulación caso cv2: sección z=1,50m	187
Figura 135: Simulación caso cv3: sección z=1,50m	187
Figura 136: Simulación caso cv4: sección z=1,50m	188
Figura 137: Simulación caso cv5: sección z=1,50m	188
Figura 138: Simulación caso cv6: sección z=1,50m	189
Figura 139: Simulación caso hv11: sección z=1,50m.....	191
Figura 140: Simulación caso hv21: sección z=1,50m.....	191
Figura 141: Simulación caso hv31: sección z=1,50m	192
Figura 142: Simulación caso hv41: sección z=1,50m.....	192
Figura 143: Simulación caso hv12: sección z=1,50m.....	193
Figura 144: Simulación caso hv22: sección z=1,50m.....	193
Figura 145: Simulación caso hv32: sección z=1,50m.....	194
Figura 146: Simulación caso hv42: sección z=1,50m.....	194
Figura 147: Simulación caso hv13: sección z=1,50m.....	195
Figura 148: Simulación caso hv23: sección z=1,50m.....	195
Figura 149: Simulación caso hv33: sección z=1,50m.....	196
Figura 150: Simulación caso hv43: sección z=1,50m.....	196
Figura 151: Perfil doble-promediado (en tiempo y en altura) de VCO [ppm] para las simulaciones de los casos de campo.....	198
Figura 152: Perfil doble-promediado (en tiempo y en altura) de VCO [ppm] para las simulaciones de los casos hipotéticos. Dirección de viento: 46° N	199
Figura 153: Perfil doble-promediado (en tiempo y en altura) de VCO [ppm] para las simulaciones de los casos hipotéticos. Dirección de viento: 149° N	199

Figura 154: Perfil doble-promediado (en tiempo y en altura) de VCO [ppm] para las simulaciones de los casos hipotéticos. Dirección de viento: 226° N	199
Figura 155: Perfil Simulación del caso hipotético hv41 (dirección del viento de 46°N y velocidad de 0,5 m/s) con una inyección estimada de 100 y 500 (fila superior), 1000 y 1500 (fila intermedia), 2000 y 2500 (fila inferior) vehículos/hora (respectivamente 3,46E-2, 1,73E-1, 3,46E-1, 5,19E-1, 6,91E-1 y 8,64E-1 gr/s emitidos en el dominio): vista en perspectiva de isosuperficies de concentración de VCO [ppm]: azul: 0,35 ppm; verde: 0,7 ppm.	200
Figura 156: Imágenes aéreas obtenidas con Google Maps con la ubicación de la estación de UPV	225
Figura 157: Plano de la intensidad del tráfico en inmediaciones a la estación de UPV	225
Figura 158: Intensidad media del tráfico alrededor de la estación de UPV (Elaboración propia a partir de los datos de la estación del Ayuntamiento de Valencia).....	226
Figura 159: Imágenes aéreas obtenidas con Google Maps con la ubicación de la estación de Molí de Sol	226
Figura 160: Plano de la intensidad del tráfico en inmediaciones a la estación de Molí de Sol	226
Figura 161: Intensidad media del tráfico alrededor de la estación de Molí de Sol (Elaboración propia a partir de los datos de la estación del Ayuntamiento de Valencia).....	227
Figura 162: Imágenes aéreas obtenidas con Google Maps con la ubicación de la estación de Boulevard Sud	227
Figura 163: Plano de la intensidad del tráfico en inmediaciones a la estación de Boulevard Sud	228
Figura 164: Intensidad media del tráfico alrededor de la estación de Bukevard Sud (Elaboración propia a partir de los datos de la estación del Ayuntamiento de Valencia)	228
Figura 165: Imágenes aéreas obtenidas con Google Maps con la ubicación de la estación de Pista de Silla.....	229
Figura 166: Plano de la intensidad del tráfico en inmediaciones a la estación de Pista de Silla.....	229
Figura 167: Intensidad media del tráfico alrededor de la estación de Pista de Silla (Elaboración propia a partir de los datos de la estación del Ayuntamiento de Valencia)	229
Figura 168: Imágenes aéreas obtenidas con Google Maps con la ubicación de la estación de Francia	230
Figura 169: Plano de la intensidad del tráfico en inmediaciones a la estación de Francia.....	230
Figura 170: Intensidad media del tráfico alrededor de la estación de Francia (Elaboración propia a partir de los datos de la estación del Ayuntamiento de Valencia).....	231
Figura 171: Simulación caso cv1: sección z=0,25m.....	250
Figura 172: Simulación caso cv1: sección z=1,00m.....	251
Figura 173: Simulación caso cv1: sección z=3,00m	251
Figura 174: Simulación caso cv2: sección z=0,25m	252
Figura 175: Simulación caso cv2: sección z=1,00m	252
Figura 176: Simulación caso cv2: sección z=3,00m	253
Figura 177: Simulación caso cv3: sección z=0,25m	253
Figura 178: Simulación caso cv3: sección z=1,00m	254
Figura 179: Simulación caso cv3: sección z=3,00m	254
Figura 180: Simulación caso cv4: sección z=0,25m	255
Figura 181: Simulación caso cv4: sección z=1,00m.....	255
Figura 182: Simulación caso cv4: sección z=3,00m	256
Figura 183: Simulación caso cv5: sección z=0,25m	256
Figura 184: Simulación caso cv5: sección z=1,00m	257
Figura 185: Simulación caso cv5: sección z=3,00m	257
Figura 186: Simulación caso cv6: sección z=0,25m	258
Figura 187: Simulación caso cv6: sección z=1,00m	258
Figura 188: Simulación caso cv6: sección z=3,00m	259
Figura 189: Simulación caso hv11: sección z=0,25m.....	259
Figura 190: Simulación caso hv11: sección z=1,00m.....	260
Figura 191: Simulación caso hv11: sección z=3,00m	260
Figura 192: Simulación caso hv21: sección z=0,25m.....	261
Figura 193: Simulación caso hv21: sección z=1,00m.....	261
Figura 194: Simulación caso hv21: sección z=3,00m.....	262

Figura 195: Simulación caso hv31: sección z=0,25m.....	262
Figura 196: Simulación caso hv31: sección z=1,00m.....	263
Figura 197: Simulación caso hv31: sección z=3,00m.....	263
Figura 198: Simulación caso hv41: sección z=0,25m.....	264
Figura 199: Simulación caso hv41: sección z=1,00m.....	264
Figura 200: Simulación caso hv41: sección z=3,00m.....	265
Figura 201: Simulación caso hv12: sección z=0,25m.....	265
Figura 202: Simulación caso hv12: sección z=1,00m.....	266
Figura 203: Simulación caso hv12: sección z=3,00m.....	266
Figura 204: Simulación caso hv22: sección z=0,25m.....	267
Figura 205: Simulación caso hv22: sección z=1,00m.....	267
Figura 206: Simulación caso hv22: sección z=3,00m.....	268
Figura 207: Simulación caso hv32: sección z=0,25m.....	268
Figura 208: Simulación caso hv32: sección z=1,00m.....	269
Figura 209: Simulación caso hv32: sección z=3,00m.....	269
Figura 210: Simulación caso hv42: sección z=0,25m.....	270
Figura 211: Simulación caso hv42: sección z=1,00m.....	270
Figura 212: Simulación caso hv42: sección z=3,00m.....	271
Figura 213: Simulación caso hv13: sección z=0,25m.....	271
Figura 214: Simulación caso hv13: sección z=1,00m.....	272
Figura 215: Simulación caso hv13: sección z=3,00m.....	272
Figura 216: Simulación caso hv23: sección z=0,25m.....	273
Figura 217: Simulación caso hv23: sección z=1,00m.....	273
Figura 218: Simulación caso hv23: sección z=3,00m.....	274
Figura 219: Simulación caso hv33: sección z=0,25m.....	274
Figura 220: Simulación caso hv33: sección z=1,00m.....	275
Figura 221: Simulación caso hv33: sección z=3,00m.....	275
Figura 222: Simulación caso hv43: sección z=0,25m.....	276
Figura 223: Simulación caso hv43: sección z=1,00m.....	276
Figura 224: Simulación caso hv43: sección z=3,00m.....	277

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Componentes principales que conforman el aire	5
Tabla 2: Principales contaminantes físicos en la atmósfera.....	7
Tabla 3: Principales contaminantes químicos en la atmósfera.....	7
Tabla 4: Niveles permitidos de contaminación atmosférica según la Directiva Europea respecto a las partículas PM ₁₀	11
Tabla 5: Niveles permitidos de contaminación atmosférica según la Directiva Europea respecto a las partículas PM _{2,5}	11
Tabla 6: Niveles permitidos de contaminación atmosférica según la Directiva Europea respecto a las partículas PM ₁₀	11
Tabla 7: Valores límite que presenta la directiva para algunos de los contaminantes atmosféricos.....	15
Tabla 8: Investigaciones y trabajos realizados alrededor del tema de EFM	24
Tabla 9: Relación de estándares de buses IEC y CENELEC.....	35
Tabla 10: Comparativa de los principales buses de campo	35
Tabla 11: Relación de dispositivos adicionales del DAS	40
Tabla 12: Servicios de nivel de enlace de PROFIBUS	42
Tabla 13: Requerimientos de las tres interfaces más comunes para protocolos serie no estandarizados	43
Tabla 14: Características ventajosas y desventajosas del uso del protocolo FreeASCII	44
Tabla 15: Principales características de los módulos XBee con protocolo de comunicación inalámbrica IEEE 802.15.4.....	51
Tabla 16: Resumen de prototipos realizados en diferentes aplicaciones.....	52
Tabla 17: Muestra de algunos fabricantes de dispositivos multipropósito para WSN (Yick et al (2008)).....	54
Tabla 18: Resumen de alternativas comerciales (Watteyne et al, (2012))	54
Tabla 19: Sistemas operativos soportados (Watteyne et al, (2012))	55
Tabla 20: Valor promedio de las plataformas más conocidas en el momento.....	55
Tabla 21: Principales características de los estándares para la comunicación inalámbrica en las WSNs.....	57
Tabla 22: Comparación de los estándares de comunicación inalámbrica más extendidos.....	58
Tabla 23: Ejemplo de opciones de alimentación comerciales.....	59
Tabla 24: Densidades de energía para varias baterías primarias y secundarias (Roundy et al, 2004).....	60
Tabla 25: Comparación de fuentes de energía.....	61
Tabla 26: Tipos de programación normalizada por la IEC 61131-3.....	69
Tabla 27: Relación de variables seleccionadas para la medición en el invernadero.....	72
Tabla 28: Relación de variables seleccionadas para la medición en el invernadero.....	73
Tabla 29: Relación de dispositivos adicionales del DAS	74
Tabla 30: Combinación de micro-interruptores para asignación de esclavo	79
Tabla 31: Prueba de la trama de petición para un registrador Gantner.....	82
Tabla 32: Prueba de la trama de respuesta de un registrador Gantner.....	82
Tabla 33: Delimitador inicial SD para el protocolo ASCII de los dispositivos Gantner.....	83
Tabla 34: Delimitador inicial SD para el protocolo PROFIBUS capa 2 o PROFIBUS FDL.....	83
Tabla 35: Formatos posibles interceptados en las tramas de comunicación para los equipos Gantner	85
Tabla 36: Visualización de valores de las variables dependiendo del formato de salida.....	85
Tabla 37: Área de entrada de datos de la pasarela i-7550	87
Tabla 38: Área de salida de datos de la pasarela i-7550.....	88
Tabla 39: Instrumentación necesaria y usada en las pruebas experimentales.....	107
Tabla 40: Resultado de la lectura de CO ₂ generada por la WSN y el sensor INNOVA	111
Tabla 41: Parámetros de la curva de calibración para cada uno de los sensores.....	112

Tabla 42: Velocidad del aire recomendada para distintas especies así como el espacio necesario para su alojamiento.....	114
Tabla 43: Tamaño de las tres mallas realizadas y el parámetro de refinamiento para cada una	116
Tabla 44: Asignación de cada nodo a una posición específica dentro del volumen de estudio	118
Tabla 45: Muestras tomadas para la definición de la condición de contorno en el ventilador y las ventanas.....	120
Tabla 46: Datos tomados para la comprobación de las principales variables en la ubicación de los sensores de CO ₂	120
Tabla 47: Compendio de las condiciones de contorno del modelo CFD.....	121
Tabla 48: Índice de convergencia para las mallas planteadas en la predicción de la concentración de CO ₂	123
Tabla 49: Precisión entre la medición real y la estimada por el modelo usando las tres mallas	124
Tabla 50: Selección de los gradientes para el cálculo de la difusión secundaria y la derivada de la velocidad	125
Tabla 51: Propiedades del flujo dentro de la sala de experimentos modelada	125
Tabla 52: Valor de la velocidad y de sus componentes en la ubicación de los sensores de CO ₂ ..	127
Tabla 53: Valor de la presión absoluta y de la presión relativa en la ubicación de los sensores de CO ₂	128
Tabla 54: 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).....	135
Tabla 55: Escala de medidas de Saaty (Saaty, 1988)	153
Tabla 56: Tabla con la ponderación de los pares de acuerdo a la escala de medida de Saaty.....	154
Tabla 57: Tabla con los valores ponderados finales tras continuar desarrollando el método de Saaty	155
Tabla 58: Valores de los diferentes contaminantes medidos por las estaciones ambientales obtenidos a través de la ecuación polinómica resultante del método AHP.....	155
Tabla 59: Resultados del ajuste de la regresión de las diferentes concentraciones de los contaminantes analizados.....	156
Tabla 60: Resumen de los elementos y características técnicas que conforman la WSN seleccionada	158
Tabla 61: Condiciones aerodinámicas y registro de concentración de VCO en el punto de control para el caso de campo cv1.....	175
Tabla 62: Condiciones aerodinámicas y registro de concentración de VCO en el punto de control para el caso de campo cv2.....	175
Tabla 63: Condiciones aerodinámicas y registro de concentración de VCO en el punto de control para el caso de campo cv3.....	175
Tabla 64: Condiciones aerodinámicas y registro de concentración de VCO en el punto de control para el caso de campo cv4.....	176
Tabla 65: Condiciones aerodinámicas y registro de concentración de VCO en el punto de control para el caso de campo cv5.....	176
Tabla 66: Condiciones aerodinámicas y registro de concentración de VCO en el punto de control para el caso de campo cv6.....	176
Tabla 67: Funciones para la determinación de los factores de emisión de VCO [gr VCO/km] ...	177
Tabla 68: Condiciones de emisión de VCO en el periodo considerado para los casos de campo cv	178
Tabla 69: Condiciones aerodinámicas y de emisión de VCO en el periodo considerado para los casos hipotéticos hv	178
Tabla 70: Modelo computacional empleado para las simulaciones.....	180
Tabla 71: Concentración de VCO en el punto de control empleado para la validación del modelo del caso cv1 al cv6	182
Tabla 72: Guía para las figuras presentadas en la presente sección	183
Tabla 73: Resumen de las figuras presentadas para cada caso hipotético estudiado.....	189
Tabla 74: Parámetros estadísticos para la variable VCO [ppm] en los tres primeros metros de las simulaciones de los casos de campo.....	197

Tabla 75: Parámetros estadísticos para la variable VCO [ppm] en los tres primeros metros de las simulaciones de los casos hipotéticos.....	197
Tabla 76: Análisis visual y extracción de características de la zona de la C/ Colón y alrededores	232
Tabla 77: Tabla con la descripción de las señales luminosas en el cruce C/ Colón con C/ Jorge Juan (Plaza de los Pinazo)	239
Tabla 78: Tabla con la descripción de las señales luminosas en el cruce C/ Colón con C/ Isabel la Católica y C/ Pérez Bayer	241
Tabla 79: Tabla con la descripción de las señales luminosas en el cruce C/ Colón con C/ Hernán Cortés y C/ Roger de Lauria.....	243
Tabla 80: Tabla con la descripción de las señales luminosas en el cruce C/ Colón con C/Pizarro	245
Tabla 81: Tabla con la descripción de las señales luminosas en el cruce C/ Colón con C/Felix Pizcueta y C/ Pascual y Genís.....	246
Tabla 82: Tabla con la descripción de las señales luminosas en el cruce C/ Colón con C/Ruzafa	248

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	Intensidad de la corriente eléctrica	[A]
I_t	Intensidad turbulenta	[%]
h_c	Coefficiente de transferencia de calor	[W/m ² K]
P	Presión absoluta	[Pa]
ΔP	Presión relativa	[Pa]
P_i	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
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> (Proceso analítico jerárquico)
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> (Código estadounidense estándar para intercambio de información)
AS-i	<i>Actuator Sensor Interface</i> (Interface para actuadores y sensores)
CENELEC	<i>Comité Européen de Normalisation Électrotechnique</i> (Comité europeo de normalización eletrotécnica)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinámica de fluidos computacional)
CO ₂	Dioxido de carbono
CP	<i>Communication Processor</i> (Procesador de comunicación)
CRC	<i>Cycling Redundancy Check</i> (Comprobación de redundancia cíclica)
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i> (Acceso múltiple por detección de portadora con detección de colisiones)
CSV	<i>Comma Separated Values</i> (Valores separados por comas)
CV	Coficiente de Variación
DAM	<i>Double Averaged Methodology</i> (Metodología del doble promediado)
DAS	<i>Data Acquisition System</i> (Sistema de adquisición de datos)
DDE	<i>Dynamic Data Exchange</i> (Intercambiador dinámico de datos)
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i> (Simulación numérica directa)
DP	<i>Decentralized Peripherals</i> (Periferia descentralizada)
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> (Espectro ensanchado por secuencia directa)

ECFD	<i>Environmental Computational Fluid Dynamics</i> (Dinámica de fluidos computacional ambiental)
EFM	<i>Environmental Fluid Mechanics</i> (Mecánica de fluidos ambientales)
EH	<i>Energy harvesting</i> (Recolección de energía o captación de energía)
EN	<i>Européen de Normalisation</i> (Normas de estándares europeos)
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método de elementos finitos)
FDL	<i>Fieldbus Data Link</i> (Enlace de datos para bus de campo)
FDM	<i>Finite Difference Method</i> (Método de diferencias finitas)
FMS	<i>Fieldbus Message Specification</i> (Especificación de mensajes para bus de campo)
FVM	<i>Finite Volume method</i> (Método de volúmenes finitos)
GCI	<i>Grid Convergence Index</i> (Índice de convergencia de la malla)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comisión Internacional de Electrotecnia)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de ingeniería eléctrica y electrónica)
IP	<i>Internet Protocol</i> (Protocolo de internet)
LAN	<i>Local Area Network</i> (Redes de área local)
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
LLD	<i>Ladder Logic Diagram</i> (Diagrama lógico de escalera o de contactos)
LR-WPAN	<i>Low-Rate Wireless Personal Area Networks</i> (Redes inalámbricas de bajo consumo de área personal)
MAC	<i>Media Access Control</i> (Control de acceso al medio)
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i> (Redes de área metropolitana)
MEMS	<i>Microelectromechanical System</i> (Sistemas microelectromecánicos)
MPI	<i>Message Passing Interface</i> (Interface de paso de mensajes)
NCAP	<i>Network Capable Application Processor</i> (Procesador de aplicaciones con funciones de red)
NDIR	<i>Nondispersive Infrared Sensor</i> (Sensor de infrarrojo no dispersivo)
OSI	<i>Open System Interconnection</i> (Modelo de interconexión de sistemas abiertos)
PAN	<i>Personal Area Network</i> (Redes de área personal)
PC	<i>Personal Computer</i> (Ordenador personal)
PCMCIA	<i>Personal Computer Memory Card International Association</i> (Asociación internacional centrada en el desarrollo de tarjetas de memoria para ordenadores personales)

PLC	<i>Programmable Logic Control</i> (Control lógico programable)
PN	<i>Petri Net</i> (Redes de Petri)
PNMCA	Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire
UPV	Universitat Politècnica de València
VDC	<i>Volts Direct Current</i> (Voltios en corriente directa)
VCO	<i>Volatile Organic Compound</i> (Compuestos orgánicos volátiles)
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>
RMSE	<i>Root mean squared error</i> (Error de la raíz media cuadrática)
RSAP	<i>Remote Service Access Point</i> (Punto de acceso al servicio remoto)
SAP	<i>Service Access Point</i> (Punto de acceso al servicio)
SCADA	<i>Supervisory, Control and Data Acquisition</i> (Sistema de supervisión, control y adquisición de datos)
SMS	<i>Short Message Service</i> (Servicio de mensajes cortos)
SPL	<i>Sound Pressure Level</i> (Nivel de presión sonora)
SSAP	<i>Source Service Access Point</i> (Punto de acceso al servicio fuente)
RAM	<i>Random-Access Memory</i> (Memoria de acceso aleatorio)
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i> (Unidad terminal remota)
TCP	<i>Transmisión Control Protocol</i> (Protocolo de control de transmisión)
TEDS	<i>Transducer Electronic Data Sheet</i> (Hoja electrónica de datos de transductores)
WAN	<i>Wide Area Network</i> (Redes de area amplia)
WSN's	<i>Wireless Sensor Networks</i> (Redes inalámbricas de sensores)

INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Temas como el estudio, la monitorización y el control ambiental abarcan independientemente amplios trabajos de investigación, los cuales tienen a su vez variados motivantes. En un campo como es la contaminación del aire en las urbes, se suscitan diversos enfoques de análisis que en su gran mayoría son animados por el rápido incremento de la población en las ciudades. En 1950 se cuenta que había 83 ciudades con más de un millón de habitantes, comparado con los tiempos actuales que superan las 350. De acuerdo con las Naciones Unidas, hoy en día cerca del 50% de la población mundial vive en áreas urbanas, porcentaje que tiende a ascender al 70% en el 2050. Genera entonces que dicha población requiera una gran cantidad de recursos, los cuales producen contaminación y por ende consecuencias ambientales a escala global. Entre los diferentes impactos se encuentra la contaminación del aire, que de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, representa un riesgo serio para la salud humana en muchas ciudades del mundo. Para generar un programa apropiado de gestión de la calidad del aire, se requiere además de una correcta identificación de las fuentes de emisión, una comprensión de la distribución de los contaminantes alrededor de las ciudades.

Dentro de los recursos requeridos por el mismo hombre de la urbe, se encuentra efectivamente la alimentación, el cual indirectamente motiva otros campos de estudio en el sector ambiental. Se trata pues del cultivo en ambientes protegidos o controlados, buscando la optimización de las materias primas y recursos naturales, la reducción de tiempos en el proceso y la homogenización de la producción. En España por ejemplo, el área cultivada bajo invernadero asciende a 47000 hectáreas, la mayor superficie de la Unión Europea. Por consiguiente la mejora y modernización de los invernaderos y granjas es una necesidad. Los esfuerzos desde un punto de vista se enfocan en lograr un correcto balance energético que favorezca el ambiente adecuando bajo el cobertizo, por medio del rediseño de los espacios para que favorezcan por ejemplo una mejor ventilación natural (Roy & Boulard, 2005; Norton *et al.*, 2007; Damasceno *et al.*, 2014; Tominaga & Blocken, 2015), apoyado en la instalación de infraestructuras de monitoreo y control automatizado (Plaksina & Rausch, 2005; Van Tuijl *et al.*, 2008; Díaz *et al.*, 2011; Abbasi, *et al.*, 2014). Desde otro punto de vista tales esfuerzos se decantan en entender, estimar y predecir el impacto que tiene en el aire este tipo de ambientes, u otros de explotación propiamente agrícola como lo son las granjas.

Cualquiera de los motivantes expuestos sugiere estudiar la dinámica de los fluidos al interior de un recinto o fuera de él. Ambas perspectivas con requerimientos particulares, pero con un grado de dificultad diferente, ya que en el flujo de fluidos al aire libre es improbable pensar en controlar alguna de las diversas variables que intervienen. Existe para dichos estudios diferentes técnicas, pero implican el uso de herramientas generalmente costosas y no siempre muy precisas. Además, el costo variable de un experimento en términos del alquiler instalaciones y pago de horas de personal, es proporcional al número de puntos de muestra y el número de configuraciones probadas. Obstaculiza de esta manera el esfuerzo de compañías, instituciones o ayuntamientos de producir estrategias adecuadas, para la mejora del microambiente de interés o del medio ambiente en general.

La técnica CFD como sistema de análisis por medio de simulaciones en ordenador del flujo de un fluido, transferencia de calor y fenómenos asociados como lo son las reacciones químicas (Versteeg & Malalasekera, 2007), es idónea para los diversos estudios en áreas ambientales. La relevancia de los códigos CFD frente a otras técnicas se debe a que pueden producir altos volúmenes de resultados con bajos costos, permitiendo la generación de innumerables casos de análisis o de estudios paramétricos. Sin embargo, los modelos obtenidos con CFD, como sucede con otros tipos de modelos, deben ser validados, y así lo relatan y enfatizan múltiples publicaciones (Vassberg *et al.*, 2008; Gousseau *et al.*, 2011; Toparlar *et al.*, 2015). La validación se realiza con una porción de un banco de datos, ya que los datos restantes son usados para hayar las variables

contorno, la calibración del modelo u otra tarea antes o durante el proceso de simulación. La particularidad en los modelos con Dinámica de Fluidos Computacional Ambiental (ECFD), es que los puntos de muestreo o de adquisición de los valores de las variables ambientales para generar el banco de datos que permita la validación, deben estar espacialmente distribuidos. La razón de lo anterior se explica al percatarse que las estructuras turbulentas que se presentan en el flujo de un fluido son complejas, y por lo tanto exigen ser debidamente capturadas (Toparlar *et al*, 2015). Sin embargo, la resolución y espacialidad en el muestreo no es sólo un tema que se exige con el uso de ECFD, sino los estudios ambientales en general. El sólo intento de comprender la estratificación de temperatura, humedad o de un gas dentro de un recinto, lleva a la concepción de una infraestructura para la adquisición de datos (Carrara *et al*, 2008; Abbasi, *et al*, 2014). Si dicha infraestructura se diseña acogiendo los recientes avances en electrónica y telecomunicaciones, se daría pie a optar por una WSN.

El presente trabajo entonces busca abordar la temática de la distribución de ciertas variables ambientales, teniendo como volumen de análisis desde un espacio cerrado como lo sería un invernadero, hasta uno al aire libre como sería una calle de la ciudad de Valencia, España. Para el análisis se llega al uso de modelos con CFD y al desarrollo de una WSN para el muestreo, cuyos valores permiten saber por un lado las cantidades idóneas a ingresar en las variables de contorno, y por otro validar el modelo. En el escrito se realiza inicialmente un estado del arte de las técnicas y tecnologías aplicadas, y posteriormente se presentan tres casos con un hilo conductor evolutivo. En el primer caso, ante la necesidad de comprender la estratificación de la temperatura y la humedad presente en un cultivo bajo invernadero, se requiere crear un DAS con los sensores y dispositivos de almacenamiento existentes. El objetivo tal y como se ha relatado, es conseguir una buena resolución espacial del muestreo. Exige así el uso de sistemas distribuidos, buses de campo, dispositivos programables intermedios y una programación estructurada o máquina de estados para los mismos; todo con una lógica cableada. Una vez comprendidas las implicaciones técnicas del primer caso, se busca en el segundo caso un DAS con características más favorables para el espacio a analizar. Además de iniciar el proceso de modelado en dicho caso, se concibe el uso de una WSN con sensores de gases junto con sensores de variables meteorológicas. Se elige un recinto con dimensiones y ventilación controlada para desarrollar el estudio de dispersión y estratificación de Dióxido de Carbono (CO₂). Validado el modelo en el recinto de laboratorio, en el tercer caso se aborda la dispersión de gases contaminantes en una zona al aire libre, específicamente en una calle seleccionada de la ciudad de Valencia, España. Se plantea un modelo con CFD, y se diseña para el caso una WSN con características más acordes a la problemática a enfrentar.

Finalmente se comenta que la actual sección es una introducción general. Cada caso tendrá a su vez una introducción en la cual se amplíe un poco más el trabajo y procedimientos a encontrar en el desarrollo.

OBJETIVOS

Objetivo General

Estudiar la validación de los modelos de flujo obtenidos con CFD para la dispersión y estratificación de variables ambientales y contaminantes, en aplicaciones agrícolas, ganaderas y ambientales usando WSN's.

Objetivos Específicos

- Componer un estado del arte alrededor de la CFD, la ECFD, las WSN, los buses de campo y una metodología de programación para los diferentes dispositivos electrónicos a usar.
- Generar una plataforma DAS con lógica cableada para la monitorización de la estratificación de variables ambientales y evaluar su pertinencia.
- Diseñar plataformas con WSN's dirigidas a las aplicaciones de modelado, monitorización y control de la variables ambientales o calidad del aire.
- 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.
- Realizar una validación de los modelos CFD propuestos mediante el sistema WSN desarrollado.

A. MARCO TEÓRICO

Hoy en día la complejidad de la producción de los alimentos, la necesidad de reducir los costos de producción para poder competir en un mercado globalizado, la obligación del uso eficiente de los recursos naturales y el cuidado del medio ambiente, conduce imperioso requisito de no solo mejorar, sino de aumentar el volumen del monitoreo y control automatizado (Plaksina & Rausch., 2005; Van Tuijl *et al*, 2008). Lo anterior sin mencionar que existen un sin número de fenómenos físicos alrededor de los diferentes campos de estudio.

En el caso por ejemplo de la producción vegetal bajo invernadero, ha generado estructuras de protección o cobertizos con grandes dimensiones, o simplemente con requerimientos ambientales específicos. En algunas investigaciones se dice que los gradientes climáticos a lo largo del invernadero influyen en la plantación (Bucklin *et al*, 1993). Años más tarde se afirma que la distribución de la temperatura en los invernaderos, es uno de los factores que más intervienen en la uniformidad del crecimiento del cultivo (Zhao *et al*, 2001). Se menciona además en otros trabajos que la heterogeneidad espacial del flujo, la temperatura y la humedad del aire varía fuertemente en el interior de estas estructuras y se observan por lo tanto marcadas diferencias en la transpiración entre los diferentes ejemplares que conforman el cultivo (Boulard *et al*, 2002; Roy *et al*, 2002; Boulard & Wang, 2002).

Sin embargo es en la última década donde se ha prestado una mayor atención al tema de la heterogeneidad del clima en un invernadero, y donde sus detalles siguen reportándose en diversos trabajos alrededor del mundo (Majdoubi *et al*, 2009; Teitel *et al*, 2010). Esto se debe a que entender cuantitativamente dicha heterogeneidad ayudaría a optimizar los sistemas de fertilización e irrigación, y a solucionar los problemas ambientales, tales como el consumo desmedido de agua en la irrigación y la pérdida de nitrógeno en el ambiente (Boulard *et al*, 2002). Pero se encuentra gran dificultad para predecir estos gradientes por su naturaleza, complejidad y cambios repentinos (Fatnassi *et al*, 2013), y una mayor complejidad cuando se trata de un invernadero ventilado naturalmente dada la naturaleza inherentemente estocástica que posee el flujo de aire en estas estructuras (Teitel *et al*, 2010).

Pero lo anterior corresponde sólo a invernaderos con cultivos vegetales. Se presentan las mismas condiciones y conclusiones en temas de producción ganadera en granjas (Norton *et al*, 2007; Norton *et al*, 2009), o sencillamente en la eficiencia energética de edificios y su confort para la habitabilidad humana (Blocken & Gualtieri, 2012; Toparlar *et al*, 2015)

Las dificultades plasmadas, la necesidad de obtener los valores con la mayor resolución espacial para capturar los gradientes de las diferentes variables, y el deseo de comprender y modelar los fenómenos que ocurren en flujos interiores o exteriores, es lo que justifica el aumento del volumen de monitoreo o de puntos de muestra. Es por esta razón que en las aplicaciones mencionadas el número de parámetros y de sensores se ha incrementado constantemente (Gieling, 1995; Neto, *et al*, 2014).

Sin embargo la incorporación de una mayor cantidad de sensores al DAS, requiere de dispositivos con gran flexibilidad desde el punto de vista de la comunicación y no solo en su instalación. La gran mayoría de investigaciones que se lleva a cabo actualmente, sobre todo en occidente, se enfocan en el desarrollo de redes inalámbricas como respuesta al problema de rigidez de los sistemas instalados en diferentes aplicaciones que conciernen al monitoreo del ambiente (Gonda, *et al*, 2006; Yiming *et al*, 2007; Van Tuijl *et al*, 2008; Lea Cox, *et al*, 2008; Carrara *et al*, 2008; Abbasi *et al*, 2014; Taheriazad *et al*, 2014). Esto contrastado con las investigaciones que se llevan sobre todo en oriente, donde además de un desarrollo de tecnología inalámbrica, se continúa ahondando en los buses de campo para aplicaciones especialmente en invernaderos (Rui *et al*, 2005;

Yu-feng *et al*, 2006; Du & Han, 2007; Zhen-ming *et al*, 2007; Hong-wu *et al*, 2007). Plantear una infraestructura híbrida entre tecnología inalámbrica y buses de campo aprovecharía las cualidades que cada tecnología posee y se perfilaría como la solución más compensada (Rauchhaupt, 2002; Gaderer *et al*, 2008; Mirabella & Brischetto, 2010). Pero existen Unidades Terminales Remotas (RTU's) dentro de la gran gama de dispositivos para el monitoreo o el control automático del invernadero con poca versatilidad en la comunicación, obstaculizando la integración en los DAS's. Es por ello que el acoplamiento de diferentes tecnologías exige herramientas de telecomunicaciones y programación lo suficientemente robustas para que pueda crearse un sistema funcional.

Ante las restricciones técnicas que plantea la lógica cableada, sumado a la casi inviable instalación de sistemas con tal tecnología en volúmenes de análisis con grandes dimensiones, se plantea como una opción más factible la creación de una WSN.

En los últimos años, las WSN han emergido como una de las tecnologías con más posibilidades de desarrollo. 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; Dishongh, 2014).

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 & Collins, 2003; Versteeg & Malalasekera, 2007). En aplicaciones industriales agrícolas, ganaderas y ambientales, la CFD se está convirtiendo en una técnica muy usada (Norton *et al.*, 2007; Chen *et al*, 2014). 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*, 2009; Li *et al*, 2014).

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. CONCEPTOS Y TÉCNICAS PARA EL DESARROLLO DEL ESTUDIO

El presente apartado tiene como objetivo realizar una contextualización de los trabajos incluidos dentro del caso, las teorías existentes y las técnicas en referencia a la contaminación atmosférica, los contaminantes medibles, los dispositivos de medida utilizados y las soluciones para el control preventivo y correctivo del fenómeno de dispersión y concentración de gases en zonas urbanas.

En primera instancia se realizará una breve descripción de los fundamentos de la contaminación atmosférica, así como la contextualización de la creciente preocupación en este ámbito. Se detallan y analizan los principales contaminantes, así como las fuentes de emisión más relevantes.

Se dedica otra sección a describir los mecanismos de producción de los principales problemas ambientales de la época, especialmente relacionados con la contaminación atmosférica, como son la lluvia ácida, el efecto invernadero, el smog fotoquímico en entornos urbanos y la destrucción de la capa de ozono.

A continuación se plasma un diagnóstico de los niveles de contaminación que se tiene hoy por hoy en España y se repasa brevemente el marco legislativo que regula esta materia. Desde las primeras Directivas Europeas que abordaron el tema hasta el aprobado Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire.

La sección posterior se dedica a la explicación de las diferentes técnicas y procedimientos de medida de contaminantes existentes, así como sus ventajas e inconvenientes. Se realiza una revisión bibliográfica de proyectos desarrollados a nivel internacional, presentando en el documento un resumen de aquellos trabajos que se han considerado que guardan mayor similitud con el presente caso.

La última parte del documento se dedica a la presentación de las líneas de actuación principales que fundamentan la realización del caso y el posible interés del sector privado por su realización, así como las líneas básicas a seguir a lo largo del desarrollo del caso.

A.1.1. Definición y conceptos de la contaminación atmosférica

El proceso de *contaminación atmosférica* se inició de una forma inapreciable pero constante, al aparecer el hombre sobre la tierra. Algunos hechos históricos como las señales de humo que aparecen en las grutas habitadas por los hombres prehistóricos (Altamira, Santander), o la orden de colocar un tubo en la parte superior de los antiguos hornos de Soleiman Ben Asuad (Juez de Córdoba, año 852) ponen de manifiesto que las actividades antrópicas han tenido desde la antigüedad un efecto sobre la composición y calidad del aire atmosférico.

Es a partir de la Revolución Industrial en el siglo XVIII, cuando el uso del carbón como combustible y el incremento del consumo de energía se hizo evidente, que se comienza a afectar la composición del aire, aunque sólo sea hasta las últimas décadas del siglo XX cuando empieza a generarse una preocupación social por la problemática de la contaminación del aire.

Se puede definir entonces la contaminación atmosférica como “la presencia en el aire de sustancias o formas de energía que puedan alterar la calidad del aire, de modo que implique riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza” (Ataz et al., 2004). Hay que tener en cuenta que son contaminantes todas aquellas sustancias susceptibles de producir “molestias” entendidas como reducción de visibilidad a causa de la formación de neblinas, malos olores, sentimientos de irritación, etc.

La composición del aire se constituye por dos grupos de compuestos. Por un lado están los componentes fijos, que son prácticamente constantes, y por otro lado los accidentales que son los contaminantes (*Tabla 1*).

Para el análisis y selección de los parámetros a monitorear en el presente caso de estudio, y con los cuales se desea obtener el modelo matemático, se requiere la observación del “ciclo de contaminación del aire” (*Figura 1*).

El ciclo se inicia con la producción de contaminantes a partir de procesos industriales, gases de escape de automóviles, actividades domésticas, calefacción, etc. Los parámetros que van a tenerse que controlar en esta fase son cuáles son los contaminantes que se emiten (cualitativo) y en que concentración (nivel de emisión, cuantitativo). Posteriormente a la fuente y antes de su emisión a la atmósfera pueden existir mecanismos de captación y depuración de contaminantes de manera que éstos, o una fracción de los mismos, quede retenida evitando su emisión.

Tras esta etapa se produce la *emisión* a la atmósfera por medio de tubos de escape, chimeneas, etc. Se define emisión como la totalidad de sustancias que pasan a la atmósfera después de dejar las fuentes de las que proceden. Se puede medir como concentración por unidad de tiempo o volumen.

Tabla 1: Componentes principales que conforman el aire

<i>Elemento</i>	<i>Volumen [%]</i>	<i>Peso [%]</i>
Nitrógeno	78,10	75,6
Oxígeno	20,91	23,1
Argón	0,93	0,30
Subtotal	99,94	99,0
CO2	0,03	0,05
Neón	1,5x10 ⁻³	10 ⁻³
Helio	5,0x10 ⁻⁴	0,7x10 ⁻⁴
Metano	2,0x10 ⁻⁴	10 ⁻⁴
Kriptón	10 ⁻⁴	3,0x10 ⁻⁴
Hidrógeno	5,0x10 ⁻⁴	0,35x10 ⁻⁵
Xenón	10 ⁻⁵	4x10 ⁻⁵
Total	99,973	99,051



Figura 1: Diagrama de flujo del ciclo de la contaminación atmosférica

El siguiente paso dentro del ciclo, tras la emisión, es el transporte y dispersión de los contaminantes en la atmósfera. Una vez que los contaminantes han llegado a la atmósfera son arrastrados por el viento y por otros factores meteorológicos, a la vez que van sufriendo cambios físico-químicos.

La dispersión está condicionada por dos factores esencialmente:

- *Características del contaminante y de la fuente emisora:* Temperatura y velocidad de salida de los gases, forma y tamaño de partícula, peso, densidad, reactividad química...
- *Condiciones meteorológicas:* Velocidad y dirección del viento, estabilidad atmosférica, temperatura ambiental, gradiente atmosférico de temperaturas, etc.

Tras esta etapa procede definir el concepto de *inmisión*, como la concentración de contaminantes en la atmósfera, en puntos suficientemente alejados de las fuentes como para no poder diferenciar cuál de esas fuentes es la causante de los niveles de concentración de contaminantes alcanzados.

Gran parte de la regulación y limitaciones de los textos legales en esta materia, hacen referencia a los niveles máximos de inmisión permitidos.

En las etapas finales del ciclo de la contaminación se produce la recepción de los contaminantes a nivel de suelo y finalmente su eliminación. La naturaleza es capaz de eliminar una parte de los contaminantes por medio de reacciones químicas, absorción por los océanos, plantas, nubes y lluvia, aunque con los niveles de emisión actuales el sistema natural está fuertemente desequilibrado.

Una primera clasificación de los contaminantes atmosféricos atiende al origen de la fuente contaminante: origen natural o antropogénica.

Existen emisiones a la atmósfera de compuestos contaminantes que tienen un origen de tipo natural (*Figura 2*), tales como erupciones volcánicas, incendios, meteoritos, etc. La importancia de éstos es secundaria en términos globales, aunque puedan suponer una amenaza para ciertas poblaciones localizadas en las proximidades de las zonas donde se producen.

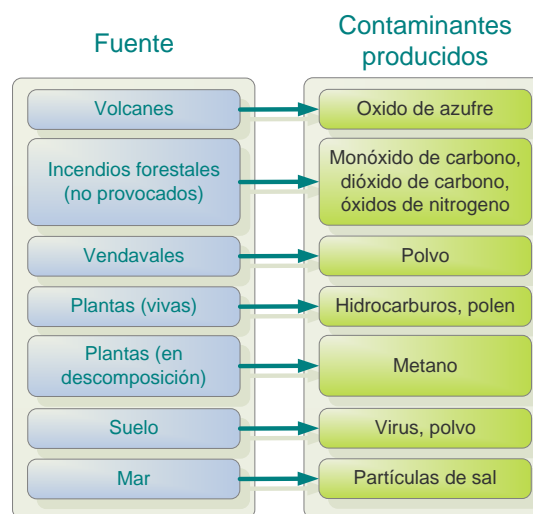


Figura 2: Principales sustancias contaminantes producidas regularmente por los fenómenos naturales

No obstante, las fuentes de emisión artificiales son, en el momento actual, las que producen la mayor parte de los contaminantes atmosféricos. La contaminación fija originada por la combustión de combustibles fósiles, tanto para fines industriales como para producción de energía calorífica, produce diversos contaminantes y en muy diferente proporción: cenizas ligeras, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, óxidos de carbono, humo e hidrocarburos. Otra fuente de contaminación artificial considerable son las producidas por fuentes móviles, como el transporte terrestre.

El número de sustancias contaminantes identificadas hasta el momento es muy elevado, pudiendo clasificarse en tres grupos, atendiendo a su naturaleza:

- *Contaminantes químicos*: Sustancias naturales o artificiales, carentes de vida propia.
- *Contaminantes físicos*: Manifestaciones energéticas en el ambiente.
- *Biológicos*: Agentes vivos, tales como virus, bacterias, etc.

En la *Tabla 2* y *Tabla 3* se presentan los principales contaminantes físicos y químicos que se presentan en atmósfera.

Tabla 2: Principales contaminantes físicos en la atmósfera

<i>Grupo</i>	<i>Principales contaminantes</i>
Ruidos y vibraciones	
Tensión térmica	Temperaturas bajas Temperaturas altas
Radiaciones ionizantes	Radiaciones Rayos X Rayos cósmicos
Radiaciones no ionizantes	Radiaciones ultravioletas Radiaciones infrarrojas Microondas Radiofrecuencias Láser

Tabla 3: Principales contaminantes químicos en la atmósfera

<i>Estado</i>	<i>Designación</i>	<i>Principales contaminantes</i>
Gaseoso	Gases	Óxidos de azufre Dióxido de carbono Monóxido de carbono Óxido de nitrógeno Ozono
	Vapores	Alcoholes Aldehídos, cetonas Derivados halogenados Éteres Hidrocarburos alifáticos Hidrocarburos aromáticos
Líquido	Nieblas	Aceite mineral Ácidos clorhídrico, crómico, sulfúrico. Hidróxido sódico
Sólido	Polvos	Asbestos, carbón, caolín Madera, óxidos metálicos, sílice
	Humos	Asfalto Hidrocarburos policíclicos
	Humos metálicos	Aluminio, cadmio, cobre, cromo. Estaño, hierro, manganeso. Níquel, plomo, silicio, berilio.

La importancia de la calidad del aire está justificada por ser un factor de primera importancia para la salud de los seres humanos. Los efectos que la contaminación atmosférica es capaz de producir en la salud humana pueden clasificarse como agudos y crónicos. Los primeros se manifiestan de una manera rápida, generalmente por concentraciones de contaminantes muy elevadas y, en algunos casos extremos, puede llegar a producir la muerte de la persona afectada. La contaminación también perturba la vegetación de diferentes maneras, con afecciones en los tejidos de las hojas, clorosis y otros cambios de color o alteraciones en el crecimiento. Por último, cabe citar también los efectos de la contaminación sobre los bienes y objetos como edificios, metales, textiles, obras de arte, etc.

A.1.1.1. Contaminantes primarios y secundarios

Una clasificación de estas sustancias, atendiendo a cómo se forman, es la que distingue entre contaminantes primarios y contaminantes secundarios.

Los contaminantes primarios son aquellas sustancias contaminantes que son vertidas directamente a la atmósfera. Proviene de muy diversas fuentes dando lugar a la llamada contaminación convencional.

Entre los contaminantes atmosféricos primarios más frecuentes se encuentran:

- Los óxidos de azufre, (SO_x).
- El monóxido de carbono, (CO).
- El dióxido de carbono, (CO₂).
- Los óxidos de nitrógeno, (NO_x).
- Los compuestos orgánicos volátiles, fundamentalmente los hidrocarburos.
- Aerosoles (en los que se incluyen las partículas sedimentables y en suspensión y los humos).

Además de estas sustancias, en la atmósfera se encuentran una serie de contaminantes que se presentan más raramente, pero que pueden producir efectos negativos sobre determinadas zonas por ser su emisión a la atmósfera muy localizada. Básicamente son otros compuestos derivados del azufre, los halógenos y sus derivados, el arsénico y sus derivados, componentes orgánicos, partículas de metales pesados y ligeros, como el plomo, mercurio, cobre, zinc, partículas de sustancias minerales, como el amianto y los asbestos y sustancias radiactivas.

Los contaminantes atmosféricos secundarios no se vierten directamente a la atmósfera desde los focos emisores, sino que se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y fotoquímicas que sufren los contaminantes primarios en el seno de la misma. Las principales alteraciones atmosféricas producidas por los contaminantes secundarios son:

- La contaminación fotoquímica (“smog fotoquímico”).
- La acidificación del medio (la lluvia ácida).
- La disminución de la capa de ozono.

A.1.1.2. La influencia de la meteorología

La influencia de los parámetros meteorológicos en la concentración de los contaminantes en la atmósfera es de gran importancia. Esta concentración atmosférica se rige por dos factores: Los emisivos y los meteorológicos; los primeros condicionan la presencia o ausencia de productos en el aire de un modo cualitativo, mientras que los segundos influyen poderosamente en la magnitud total de su concentración.

Para que se produzcan situaciones de gravedad con una elevada presencia de contaminantes es necesaria la reunión de condiciones desfavorables para ambos tipos de factores o que, al menos, un grupo de ellos alcance características extremas. Esta influencia puede representarse por la ecuación:

$$C = f(E * M)$$

donde C representa el nivel de contaminación, E las emisiones y M los parámetros meteorológicos reinantes, todo ello referido a una zona concreta. El valor de E vendría dado por la magnitud de las emisiones y variaría igual que ellas, siendo posible expresarlo en unidades tales como masa por unidad de tiempo o volumen, M sería un coeficiente empírico que representaría las condiciones meteorológicas, de manera que cuando éstas fueran muy favorables a la difusión de los contaminantes alcanzaría valores muy pequeños, mientras que en caso contrario llegaría a valores muy elevados. Este coeficiente se haría mínimo para condiciones óptimas de dispersión, según las cuales cualquier producto emitido sería rápidamente difundido a un volumen infinito. C se anularía cuando uno de los dos factores se anulara. No obstante, la aplicabilidad de esta ecuación se limita a estudios aproximados mientras los componentes presentan valores alejados de sus extremos.

Los factores climatológicos a considerar de forma especial en un estudio de contaminación atmosférica son los siguientes:

- Dirección predominante de los vientos.
- Velocidad del viento.
- Presión atmosférica.
- Régimen de precipitaciones.
- Humedad relativa
- Inversiones térmicas.
- Estabilidad.

A.1.1.3. La red de control de la contaminación atmosférica en Valencia

La década de los 90 ha visto nacer en el mundo occidental un interés creciente respecto a los temas medioambientales, siendo el control de la contaminación ambiental uno de los objetivos más importantes. Este interés está íntimamente ligado a la comprensión de la necesidad de control de la calidad medioambiental puesto que se trata de un problema que, en mayor o menor medida, afecta a todos los grandes núcleos urbanos. Las graves consecuencias que ocasiona tanto a la salud de las personas como al medio ambiente, hace que en la mayoría de las grandes ciudades exista una preocupación por disponer de datos fiables que permitan a la administración estudiar y controlar el comportamiento de los contaminantes.

El Ayuntamiento de Valencia posee un servicio específico para el control de la contaminación (Servicio del Laboratorio Municipal y del Medio Ambiente del Ayuntamiento de Valencia) que cuenta con una red de seis estaciones de medida automática. El objetivo fundamental de esta Red es vigilar la calidad del aire de la ciudad para proteger la salud de las personas y dar cumplimiento al precepto legislativo de vigilancia de la calidad sanitaria del aire que se respira.

Las distintas estaciones que componen la Red, distribuidas por toda la Ciudad, proporcionan datos que permiten analizar la evolución en el tiempo de los contaminantes y sus tendencias, detectando posibles episodios de contaminación atmosférica, permitiendo informar a los ciudadanos de la calidad del aire ambiente en todo momento (*Figura 3*).



Figura 3: Red de vigilancia y prevención de la contaminación atmosférica de la ciudad de Valencia

A.1.2. Marco legal y regulación

A.1.2.1. Normativa vigente

La normativa vigente en materia de calidad del aire establece unos niveles (concentraciones o depósitos) de contaminantes en la atmósfera que no deben sobrepasarse. Las comunidades autónomas son las encargadas de dividir su territorio en zonas de calidad del aire homogénea para evaluar dichos niveles, mediante mediciones, modelización, u otras técnicas.

El resultado de la evaluación anual se presenta en un cuestionario para su envío a la Comisión Europea y en otros formatos de más fácil comprensión para el público (Informe de la evaluación de la calidad del aire anual).

En función del resultado de la evaluación hay que tomar una serie de medidas para gestionar la calidad del aire, siempre con el fin de mejorarla, o mantenerla donde sea óptima. En las zonas en las que se producen superaciones de los valores límite u objetivo, se han de elaborar planes de mejora de la calidad del aire. En ellos se adoptan una serie de medidas encaminadas a lograr unos niveles de contaminantes por debajo de los objetivos legislados.

La Comisión Europea inició un proceso de revisión de la política de calidad del aire (concluyó el pasado 15 de octubre de 2011). Dentro de este proceso, se puso en marcha una consulta para recabar el punto de vista de ciudadanía y agentes implicados.

El Consejo de Ministros, en su reunión del 4 de noviembre de 2011, acordó la aprobación del Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire (PNMCA).

La Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa y la Directiva 2004/107/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de diciembre de 2004 relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente, traspuestas al derecho español mediante el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, dentro del amparo de la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera, sirven de marco regulador para la elaboración de los planes y programas nacionales, autonómicos y locales para la mejora de la calidad del aire.

Estas normas fijan una serie de objetivos de calidad del aire para cada uno de los contaminantes regulados, de manera que si se superan las administraciones competentes tienen que adoptar planes de actuación para reducir los niveles de dichos contaminantes y cumplir así con sus objetivos.

A.1.2.2. Necesidad y objetivos de un Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire

Por lo dispuesto en la normativa, se llega a la exigencia de la elaboración de un Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire, que se basa fundamentalmente en dos líneas que pasan por el cumplimiento de los valores límite de PM₁₀ y NO₂ y la reducción simultánea de precursores de ozono:

Objetivo general para PM₁₀ y NO₂

Se plantea el objetivo general de lograr el cumplimiento de los valores límite para todas las zonas en las que existan superaciones lo antes posible y en todo caso no más tarde de 2015. Se plantea asimismo el objetivo de mantener o mejorar los niveles en el resto del territorio nacional.

Tabla 4: Niveles permitidos de contaminación atmosférica según la Directiva Europea respecto a las partículas PM₁₀

<i>Contaminante</i>	<i>Periodo de promedio</i>	<i>Valor límite</i>
NO ₂	Horario	200 µg/m ³ (18 superaciones al año como máximo)
	Anual	40 µg/m ³
PM ₁₀	Diario	50 µg/m ³ (35 superaciones al año como máximo)
	Anual	40 µg/m ³

En relación a las partículas PM_{2,5}, se deberá asegurar el cumplimiento de los valores obligatorios no más tarde de 2015:

Tabla 5: Niveles permitidos de contaminación atmosférica según la Directiva Europea respecto a las partículas PM_{2,5}

<i>Contaminante</i>	<i>Periodo de promedio</i>	<i>Valor límite</i>
PM _{2,5}	Anual	28 µg/m ³ (2011) 27 µg/m ³ (2012) 26 µg/m ³ (2013 y 2014) y 25 µg/m ³ (2015-2019) y 20 µg/m ³ (a partir de 2020)

Objetivo general para ozono

Se plantea el objetivo general de reducir las emisiones de los precursores de ozono, en concreto óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, mediante la aplicación de las medidas arbitradas para NO₂ y de los grandes planes sectoriales actualmente en vigor (Plan Nacional de Techos, Plan Nacional de Grandes Instalaciones de Combustión, etc.), de manera que se mejoren sus niveles de calidad.

Tabla 6: Niveles permitidos de contaminación atmosférica según la Directiva Europea respecto a las partículas PM₁₀

<i>Contaminante</i>	<i>Periodo de promedio</i>	<i>Valor límite</i>
Ozono	Máx. diario de las medias móviles octohorarias	120 µg/m ³ (25 superaciones como máx., en un promedio de 3 años)

Estos objetivos generales se lograrán a través de las actuaciones recogidas en uno de los anexos del Plan (anexo II de dicho Plan), que abarcan diversas áreas en las que se plantean una serie de objetivos particulares con sus correspondientes medidas para alcanzarlos, debidamente cuantificadas. Estas actuaciones se esbozan de manera coordinada e integrada con los Planes Sectoriales (GIC, Techos, ruido, cambio climático) y los planes autonómicos y locales.

La necesidad de este plan puede deducirse del análisis del estado actual de la calidad del aire en España, según la evaluación oficial realizada en el año 2010, que puede resumirse de la siguiente manera:

- A lo largo de los años se han reducido las zonas con problemas para dióxido de azufre (SO₂), de manera que en la actualidad se cumplen en todas las zonas los valores límite diario y horario de SO₂.
- Para dióxido de nitrógeno (NO₂) se presentan superaciones de los límites legislados en las principales aglomeraciones metropolitanas.
- Persisten las superaciones de los valores límite, si bien se viene produciendo una mejoría significativa en los niveles de concentración de material particulado (PM₁₀).
- El ozono troposférico sigue mostrando niveles elevados en zonas suburbanas o rurales, debido a la alta insolación y a que se mantienen los niveles de emisión de sus precursores (NO_x y compuestos orgánicos volátiles).
- Se mantiene en general la situación de buena calidad del aire en el resto de contaminantes

De ello se deduce que los problemas más extendidos y que, por lo tanto, justificarían la elaboración de un plan nacional por observarse comportamientos similares en cuanto a fuentes, dispersión y niveles de contaminantes en varias zonas o aglomeraciones se dan asociados al material particulado (y, en concreto, PM₁₀), a dióxido de nitrógeno y a ozono. Por lo tanto, y como se ha indicado en los objetivos, este Plan contemplará las medidas necesarias para reducir las emisiones de partículas, óxidos de nitrógeno y otras sustancias precursoras de ozono.

El PNMCA recoge una serie de medidas agrupadas en bloques, en los que habría que actuar para una reducción de las emisiones y una mejora de la calidad del aire. Estos bloques de medidas son los siguientes:

- Medidas destinadas a reducir las emisiones de tráfico rodado.
- Medidas destinadas a reducir las emisiones de otras fuentes (construcción, puertos y aeropuertos; y agricultura y ganadería).
- Medidas destinadas a reducir las emisiones en la industria.
- Medidas destinadas a reducir las emisiones en los sectores residencial-comercial-institucional.
- Actuaciones en los precursores de ozono.

A.1.2.3. Otra legislación de aplicación

La legislación vigente en España de mayor trascendencia es la Ley 34/2007 de calidad del aire y protección de la atmósfera, así como la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa, que ha dado lugar a los Planes Nacionales.

La Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera supone la renovación del marco legislativo de referencia sobre la prevención de la contaminación atmosférica. Deroga a la anterior Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de Protección del Ambiente Atmosférico, y los anexos II y III del Decreto 833/1975, de 6 de febrero, así como también el Reglamento de

actividades molestas, insalubres, nocivas y peligrosas, aprobado por Decreto 2414/1961, de 30 de noviembre.

El objeto de la ley es establecer las bases en materia de prevención, vigilancia y reducción de la contaminación atmosférica con el fin de evitar y cuando esto no sea posible, aminorar los daños que de esta puedan derivarse para las personas, el medio ambiente y demás bienes de cualquier naturaleza. La ley aplica a todas las fuentes de los contaminantes relacionados en su anexo I correspondientes a las actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera enumeradas en su anexo IV ya sean de titularidad pública o privada. Quedan excluidos del ámbito de aplicación de la Ley los ruidos y vibraciones, las radiaciones ionizantes y no ionizantes así como los contaminantes biológicos que rigen por su normativa específica en su caso.

Uno de los aspectos más importantes de la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, es el perfeccionamiento del instrumento de prevención ya previsto en la normativa española y Europa y mediante la renovación del Catálogo de Actividades Potencialmente Contaminadoras de la Atmósfera, que se incluye en su anexo IV.

La importancia de esta renovación consiste en un nuevo enfoque integral, al incluir en su ámbito de aplicación, no solo el determinadas actividades sujetas a un régimen de intervención administrativa, sino todas aquellas fuentes cuyas emisiones antropogénicas son estimadas para elaborar el inventario español de emisiones a la atmósfera, tratando con ello de lograr una universalidad en la aplicación de las prescripciones generales de la misma.

La Ley 34/2007, de 15 de noviembre, se estructura en siete capítulos y cuatro anexos, más disposiciones adicionales, transitoria y derogatoria, y se convierte en el marco de referencia nacional de los aspectos relacionados con la protección de la atmósfera, la calidad del aire, así como la prevención y control de las emisiones atmosféricas.

A modo de resumen las principales novedades que estableció la Ley 34/2007 son:

- Reestructuración del catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera en un único listado orientado a la actividad (no a la instalación), y basado en la sistematización SNAP-07, empleada internacionalmente y usada en el inventario español de emisiones.
- Mayor precisión en la definición de actividades y empleo de umbrales con el objeto de permitir una modulación de los requisitos de control de emisiones en función del potencial real contaminante de cada actividad que se desarrolle en la instalación.
- Se refuerza el papel clave de los planes de mejora de la calidad del aire al posibilitar, en su ámbito territorial de aplicación, cambios de actividades a grupos más restrictivos y establecimiento de disposiciones relativas al control y dispersión de las emisiones. De esta forma se concentran las medidas en aquellos lugares donde son necesarias, de manera directamente ligada al estado y problemática del medio desde el punto de vista local.
- Desarrollo de los criterios de determinación de los valores límite de emisión en la autorización y eliminación de las periodicidades mínimas de controles internos y externos de las emisiones, permitiendo adecuarlos a las condiciones de la actividad en el contenido de la autorización, o con posterioridad al registro, de manera específica si fuera necesario una vez se tenga conocimiento del potencial contaminador real de la instalación.
- Reducción de cargas administrativas mediante la posibilidad de coordinar los trámites de autorización y notificación con trámites similares existentes en otros ámbitos, tendiéndose a que todas las tramitaciones se realicen de manera electrónica.

- Actualización de las obligaciones de los titulares en relación a las emisiones y su control, de los requisitos relativos a los procedimientos de control y a los procedimientos de registro e información de las emisiones.
- Obligación de las comunidades autónomas de facilitar al Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, la información disponible relevante relativa a las instalaciones para su integración en el Sistema español de información, vigilancia y prevención de la contaminación atmosférica.

Con el fin de actualizar el Catálogo de Actividades Potencialmente Contaminadoras de la Atmósfera (CAPCA), se ha publicado recientemente el Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación. Esta actualización supone una reestructuración del catálogo y revisa en profundidad todas las actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera.

La publicación y entrada en vigor del Real Decreto 1073/2002, de 18 de octubre, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente en relación con el dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, óxidos de nitrógeno, partículas, plomo, benceno y monóxido de carbono, por el que se trasponen las Directivas 96/62/CE y 1999/30/CE, marca el inicio de la aplicación en España de criterios actualizados en la vigilancia de la calidad del aire atmosférico, y establece unos valores límite de partida para los contaminantes citados con la intención de conseguir unos objetivos de calidad para el año 2010.

La Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa establece la necesidad de elaborar planes nacionales y sus mecanismos de seguimiento y presenta una serie de valores límite para los principales contaminantes (*Tabla 7*).

Otra legislación de aplicación es la siguiente:

Europea

DIRECTIVA 96/62/CE DEL CONSEJO de 27 de septiembre de 1996 sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente.

DIRECTIVA 1999/30/CE DEL CONSEJO de 22 de abril de 1999 relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente.

DIRECTIVA 2000/69/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 16 de noviembre de 2000 sobre los valores límite para el benceno y el monóxido de carbono en el aire ambiente.

DIRECTIVA 2004/107/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 15 de diciembre de 2004 relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente.

Estatal

LEY 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.

REAL DECRETO 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación.

REAL DECRETO 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire (que deroga los tres reales decretos anteriores, actualizándolos y englobándolos en uno solo).

REAL DECRETO 812/2007, de 22 de junio, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente en relación con el arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos.

REAL DECRETO 1073/2002, de 18 de octubre, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente en relación con el dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, óxidos de nitrógeno, partículas, plomo, benceno y monóxido de carbono.

REAL DECRETO 1796/2003, de 26 de diciembre, relativo al ozono en el aire ambiente.

Tabla 7: Valores límite que presenta la directiva para algunos de los contaminantes atmosféricos

Salud humana	Meta (*) o valor límite				Tiempo de prórroga	Objetivo a largo plazo		Umbral de información y alerta		
	Contaminante	Periodo de media	Valor	Máx. núm. de ocurrencias permitidas	Fecha aplicable	Nueva fecha aplicable	Valor	Fecha	Periodo	Valor umbral
SO ₂	Hora	350 µg/m ³	24	2005					3 horas	500 µg/m ³
	Día	125 µg/m ³	3	2005						
NO ₂	Hora	200 µg/m ³	18	2010	2015				3 horas	400 µg/m ³
	Año	40 µg/m ³	0	2010						
Benceno (C ₆ H ₆)	Año	5 µg/m ³	0	2010	2015					
CO	Máx. diario, 8 horas de media	10 µg/m ³	0	2005						
PM ₁₀	Día	50 µg/m ³	35	2005	2011					
	Año	40 µg/m ³	0	2005	2011					
PM _{2,5}	Año	25 µg/m ³ (*)	0	2010		8,5 a 18 µg/m ³	2020			
		20 µg/m ³ (ECO)		2015						
Pb	Año	0,5 µg/m ³ (*)	0	2005						
As	Año	6 ng/m ³ (*)	0	2013						
Cd	Año	5 ng/m ³ (*)	0	2013						
Ni	Año	20 ng/m ³ (*)	0	2013						
BaP	Año	1 ng/m ³ (*)	0	2013						
O ₃	Máx. diario, 8 horas de media sobre 3 años	120 µg/m ³ (*)	25	2010		120 µg/m ³	No definido	1 hora	180 µg/m ³	
								3 horas		240 µg/m ³

A.1.3. Situación actual de la contaminación del aire en España

Dentro del Plan Nacional (MAGRAMA, 2014) se presenta un diagnóstico de la situación de contaminación atmosférica en España, cuyos datos más relevantes se recogen en el presente apartado, en función del tipo de contaminante.

A.1.3.1. Dióxido de nitrógeno (NO₂)

En el territorio español se han venido produciendo superaciones de los objetivos de calidad del NO₂ en una serie de zonas mayoritariamente urbanas o metropolitanas. Dichas superaciones han sido causadas principalmente por las emisiones del tráfico terrestre. Por otra parte, a partir de los datos proporcionados por el inventario nacional de emisiones contaminantes a la atmósfera, las fuentes principales de emisión de NO_x a nivel nacional son debidas a los medios de transporte por carretera, seguidas de la combustión en el sector de producción y transformación de energía, los procesos industriales con combustión y otros medios de transporte y maquinaria móvil.

Por lo tanto, existen varios sectores (energético, transporte, industrial, etc.) que contribuyen a las emisiones directas de NO_x (Figura 4), y que son abordados en el Plan, pero sin perder de vista que la observación es principalmente a un problema urbano y local y a una fuente importante constituida por el tráfico rodado, a la que en grandes urbes se pueden sumar las contribuciones de puertos y/o aeropuertos. Al analizar el tipo de área y el tipo de estación de las estaciones con superación de NO₂, se observa que la mayoría de las estaciones se sitúan en áreas urbanas (85%) y son de tráfico (79%). En menor medida también tienen lugar superaciones en áreas suburbanas (11%) y en estaciones industriales (16%). A partir de ello se puede concluir que las medidas del Plan encaminadas a disminuir el NO₂ deben actuar principalmente en las ciudades y sobre el tráfico por carretera.

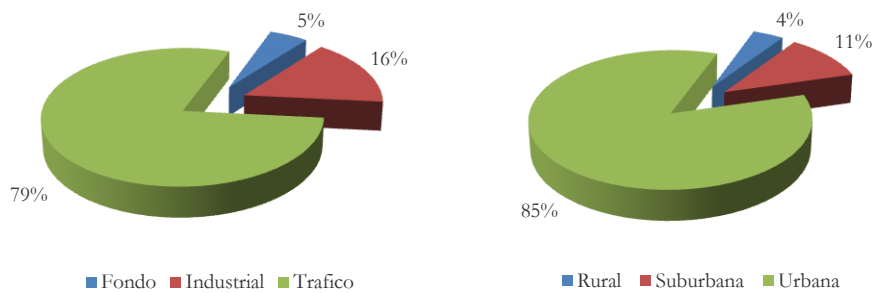


Figura 4: Estaciones con superación de NO₂ por tipo de estación (izq.) y estaciones con superación de NO₂ por tipo de área (der.)

Para confirmar lo anterior, si se analiza la información suministrada a través del cuestionario oficial de la calidad del aire, promediando los datos entre 2001 y 2009 (Figura 5) se tiene que la principal causa de superación es el tráfico intenso (63%) y en segundo lugar la proximidad a una carretera (29%), lo que supone que un total de 92% de las superaciones se adjudican al tráfico intenso. Otras causas, que son importantes, pero en mucho menor medida que las dos anteriores son: industria local, minería, calefacción residencial y aparcamiento público.

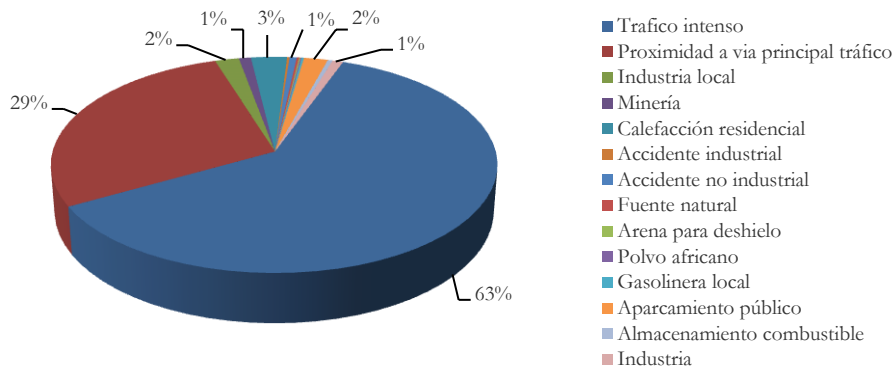


Figura 5: Promedio de la información entre 2001 y 2009 suministrada a través del cuestionario oficial de la calidad del aire

A.2. 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; Stavrakakis *et al*, 2012), 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; Norton *et al*, 2009; Bustamante *et al*, 2011), hasta llegar a el importante tema de estudio de la contaminación del aire en áreas urbanas (Santiago del Rio, 2006; Ng & Chau, 2014; Torminaga & Blocken, 2015). La contaminación atmosférica por ejemplo, en las ciudades es un problema que ha ido en aumento en las últimas décadas. De esta forma, 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 utilizado 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 6*. 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 (Cadafalch Rabas, 2002; Santiago del Rio, 2006)

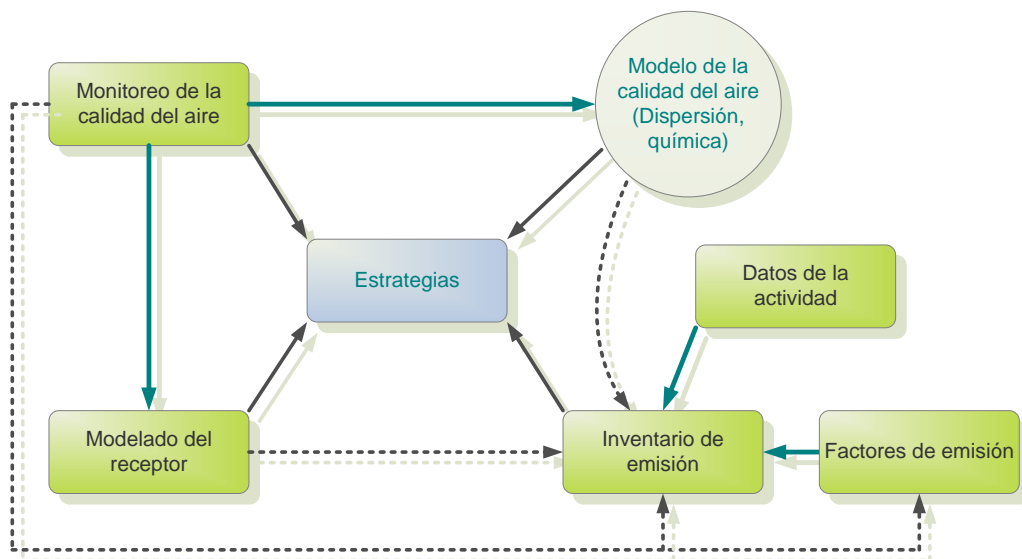


Figura 6: Esquema de actuación para el estudio de la contaminación ambiental (Santiago del Rio, 2006)

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 modelos 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, MISCAM, ENVImet, 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; Li *et al*, 2014). 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.3. 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 (Fluent, 2009). Algunos libros de mecánica de fluidos y elementos finitos tratan con detalle la física que hay detrás de los modelos en CFD (Anderson & Wendt, 1995; Pope, 2000; Versteeg & Malalasekera, 2007; Potter *et al*, 2011)

A.3.1. Simulación y modelado de flujos turbulentos

La CFDs constituye el tercer enfoque en el estudio y desarrollo de la dinámica de fluidos. Fue en Francia e Inglaterra, en el siglo XVII, donde se asentaron las bases de la dinámica de fluidos experimental. En los siguientes siglos, en la misma Europa, se dio gradualmente un desarrollo de los estudios teóricos que trataban de abordar los problemas planteados desde esta doctrina. Como resultado, a lo largo del siglo XX el estudio y práctica de la dinámica de fluidos, tanto en la ciencia

de la física como en ingeniería, estuvo basado en herramientas teóricas por un lado y experimentales por otro lado (Anderson, 1995).

A partir de la década de 1960, la aparición y desarrollo de las computadoras digitales de alta velocidad junto con el desarrollo de precisos algoritmos numéricos revolucionó la forma en la que hasta ese momento se había tratado la dinámica de fluidos. Es así como, gracias al creciente avance de la capacidad computacional y sus costes asociados, la CFD (entendida como “un conjunto de métodos numéricos computacionales basados en la ecuación de la conservación de la masa y las ecuaciones de Navier-Stokes) se presenta hoy en día como una poderosa herramienta en investigaciones y en ingeniería que ofrece grandes ventajas y completa el estudio de la dinámica de fluidos. Así pues, la CFD es hoy un campo de aplicación igual, junto con la teoría pura y la experimentación pura, en el análisis y estudio de los problemas de la dinámica de fluidos.

Sin embargo, se debe aclarar y remarcar que la CFD no pretende sustituir ni invalidar los estudios teóricos ni experimentales. Estos modelos numéricos son capaces de reproducir en un esquema computacional eficiente muchas de las aproximaciones clásicas, en consecuencia, no se están enfrentando técnicas. Esta técnica facilita y arroja luz en las investigaciones, pero siempre deberá estar respaldada en experimentos y teoría pura, de manera que nunca remplazará a estos métodos, pese a que en ocasiones se ha llegado a sugerir o entender lo contrario. Así, el futuro de la dinámica de fluidos se apoyará en un mejor equilibrio entre estas tres técnicas, con la CFD ayudando a entender e interpretar los resultados de experimentos y teoría, y viceversa.

Los grandes y crecientes avances computacionales ya comentados han permitido que, cada vez más, la CFD esté al alcance de la mano en numerosos campos. Es innegable la capacidad de esta técnica numérica de generar una grandísima cantidad de resultados de grandes y complejos dominios de estudio. A su vez, la aparición de paquetes comerciales que implementan algoritmos y modelos relativamente fáciles de utilizar ha generalizado su utilización en empresas y universidades. Sin embargo existe el riesgo de obtener resultados sin el suficiente rigor científico, debido al escaso análisis crítico de los resultados obtenidos y las técnicas utilizadas.

En el estudio de flujos turbulentos, el objetivo es obtener modelos capaces de ser usados para calcular propiedades de interés o relevancia práctica. Un siglo de experiencia ha demostrado que el ‘problema de la turbulencia’ es notablemente difícil, no existiendo posibilidad de plantear una teoría analítica simple. No obstante, junto a la creciente capacidad de cálculo de las computadoras y las nuevas técnicas experimentales, ha sido posible avanzar en el conocimiento de las propiedades más relevantes de los flujos turbulentos.

Es así como, en los últimos años, la CFD ha vivido una gran evolución, habiendo estado limitada anteriormente por restricciones computacionales. La simplicidad de los modelos, las limitaciones en el tamaño de mallas y los tiempos de cálculo son algunas de las barreras que han impedido su uso generalizado. No obstante, la CFD es hoy en día, una herramienta muy importante en el diseño y desarrollo de elementos de ingeniería, demostrando su gran poder en el estudio de fenómenos de turbulencia.

A.3.2. Métodos computacionales en la CFD

En general, los diferentes métodos empleados en CFD para el tratamiento de la turbulencia pueden ser divididos fundamentalmente en tres técnicas:

- Direct Numerical Simulation (DNS)
- Reynolds-Averaged Navier-Stokes Model (RANS)
- Large-Eddy Simulations (LES)

La diferencia de una técnica a otra en las simulaciones estriba, principalmente, en cómo tratan la turbulencia. Mientras que la DNS resuelve todo el flujo, sus escalas temporales y espaciales, en RANS se modela todo el efecto de la turbulencia. Sin embargo, LES puede entenderse como una composición entre estas dos primeras técnicas, haciendo uso de modelos de turbulencia únicamente para las escalas pequeñas y resolviendo el resto de la cascada de energía. La utilización de cada técnica depende en exclusiva del caso a simular y de los objetivos del proyecto. La técnica DNS tiene un coste computacional extremadamente alto. Por otro lado, el modelo RANS es computacionalmente mucho más barato, aunque se requieren modelos para simular el flujo turbulento, lo que implica la introducción de simplificaciones con el riesgo de inexactitudes. Entre estas dos técnicas, aparece el LES, que es menos costoso de implementar que DNS pero más que RANS y, como hemos dicho, también utiliza modelos de turbulencia para las estructuras turbulentas isotrópicas más pequeñas.

A.3.3. Ecuaciones fundamentales

En el estudio de la mecánica de fluidos conviene suponer los fluidos como medios continuos, esto es, que tanto gases como líquidos están continuamente distribuidos por toda una región de interés, incluso para flujos turbulentos, en los que se asume la ausencia de especies iónicas y se producen separaciones del flujo. Así pues, en el caso de fluidos viscosos y Newtonianos el comportamiento del flujo se describe asumiendo un medio continuo, haciendo uso del conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales para la conservación de la masa y la variación de la cantidad de movimiento, estas últimas conocidas para nuestro ámbito de aplicación como ecuaciones de Navier-Stokes (Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes) (Temam, 2001):

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

Estas ecuaciones están referidas a un sistema de coordenadas cartesiano con ejes normales x_i , siendo $i=1,2,3$ expresadas con el convenio de Einstein. U_i es el vector velocidad, p es la presión y ν es la viscosidad cinemática. Se asume el fluido como incompresible y con propiedades constantes. Además, se acepta una relación lineal entre las componentes del esfuerzo cortante y los gradientes de velocidad, considerando así un fluido Newtoniano:

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + \nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

Donde τ_{ij} es el tensor cinemático de esfuerzos cortantes y δ_{ij} la función delta de Kronecker. El gradiente de velocidad $\partial U_i / \partial x_j$ para un flujo de densidad constante puede descomponerse:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = S_{ij} + \Omega_{ij}$$

Donde S_{ij} es el tensor de velocidad de deformación

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

y Ω_{ij} es el tensor de velocidad angular

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

En aplicaciones numéricas, a menudo son empleadas formas adimensionales de las ecuaciones de Navier-Stokes. Esta técnica se justifica por la facilidad de similitud que implica, pudiendo escalar los resultados obtenidos a partir de modelos con condiciones de flujo reales, evitando redondeos e imprecisiones debido a la manipulación de números grandes o muy pequeños, y teniendo en cuenta la importancia relativa de los términos de las ecuaciones del modelado. De este modo, las ecuaciones de Navier-Stokes son escaladas con objeto de conseguir sus formas sin dimensiones en su aplicación, en cuyo caso, es posible introducir una longitud característica, L_c , y una velocidad característica, U_c :

$$x^* = \frac{x}{L_c}, \quad U^* = \frac{U}{U_c}, \quad t^* = \frac{t}{L_c/U_c}, \quad p^* = \frac{p}{\rho U_c^2}$$

Con los parámetros anteriores se puede entonces obtener las formas adimensionales de las ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial U_i^*}{\partial x_i^*} = 0$$

$$\frac{\partial U_i^*}{\partial t^*} + \frac{\partial U_j^* U_i^*}{\partial x_j^*} = - \frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 S_{ij}^*}{\partial x_j^{*2}}$$

Donde el número de Reynolds estaría dado por:

$$Re = \frac{L_c U_c}{\nu}$$

El número de Reynolds es el único parámetro que aparece en la forma adimensional de las ecuaciones de Navier-Stokes. Este concepto se conoce como Similitud de Reynolds, a partir del cual es posible comparar experimentos dentro de un amplio rango de escalas espaciales y temporales.

Al centrarse en la técnica RANS, se denota que esta se basa en las medias temporales de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos turbulentos. La idea básica consiste en separar las variables del fluido en valores medios independientes del tiempo $\langle \Phi \rangle$ y en un componente de la fluctuación dependiente del tiempo Φ' , conocido este último como "Descomposición de Reynolds",

$$\Phi(x, t) = \langle \Phi(x_i) \rangle + \Phi(x_i, t)'$$

dónde

$$\langle \Phi(x_i) \rangle = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t \Phi(x_i, t) dt$$

o en caso de flujo estadísticamente inestable

$$\langle \Phi(x_i) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Phi(x, t)$$

Al contrario de cómo ocurre en DNS, la turbulencia es en este caso compuesta mediante modelos de turbulencia, por lo tanto, la precisión de los datos obtenidos con esta técnica es menor. Además, aquellos problemas que dependen del tiempo no pueden ser estudiados correctamente con RANS, obteniendo datos del flujo medio de tal modo que, aunque tengamos una idea muy aproximada del comportamiento del flujo, la media estaría enmascarando la dinámica real de las estructuras turbulentas. A pesar de lo comentado anteriormente, esta técnica de modelado es muy usada hoy en día en problemas de ingeniería y medioambientales, habiendo demostrado su gran utilidad debido al bajo coste computacional comparado con las ventajas que ofrece. Las ecuaciones empleadas quedarían:

$$\langle U_j \rangle \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} = - \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu \bar{S}_{ij})$$

$$\frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_i} = 0$$

A su vez, estas técnicas emplean modelos para emular la turbulencia, existiendo diversos de ellos (isotrópicos, anisotrópicos) como $k - \varepsilon$, $k - \omega$, RSM, etc. En este trabajo se emplea como modelo de turbulencia el modelo $k - \varepsilon$, habiendo demostrado su buen funcionamiento en estudios anteriores.

El modelo $k - \varepsilon$ es un modelo semiempírico basado en las ecuaciones del modelo de transporte para la energía cinética turbulenta (k) y su rango de disipación (ε). En dicho modelo se emplean dos ecuaciones, una para la energía cinética turbulenta y otra para el rango de disipación de la energía. A partir de dichos términos se resuelve la expresión:

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Siendo μ_t la viscosidad dinámica turbulenta, que interviene directamente en las ecuaciones de Navier-Stokes adaptadas para RANS. Finalmente, en este modelo, el flujo se asume como un flujo turbulento completamente desarrollado e isotrópico, lo cual puede resultar en ocasiones una aproximación demasiado simplista.

A.3.4. Características de los flujos turbulentos

La mayoría de los flujos de interés ambiental o medioambiental son flujos turbulentos. Sin embargo, los flujos turbulentos son tridimensionales y se caracterizan por fluctuaciones irregulares de propiedades, tales como velocidad y presión, de modo que sus cantidades muestran una variación aleatoria. Las cantidades físicas, con frecuencia, se describen mediante promedios estadísticos, y en este sentido un flujo turbulento “continuo” puede ser definido como un flujo en el que las cantidades físicas promedio dependen del tiempo.

Como se comentó en secciones anteriores, hace más de un siglo, Reynolds (1883) demostró que un flujo cambia desde un flujo laminar, en el que no existe mezclado significativo de las partículas, a un estado turbulento cuando cierto parámetro, hoy conocido como número de Reynolds, supera un valor crítico.

$$Re = \frac{LU}{\nu}$$

El número de Reynolds representa el ratio entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de la viscosidad, y puede ser visto también como el ratio entre el movimiento advectivo y el difusivo. La importancia de esta constante adimensional fue determinada en 1883 por vez primera por el físico e ingeniero británico Osborne Reynolds (1842-1912). Para bajos números de Reynolds, cuando el comportamiento del fluido depende principalmente de su viscosidad y el flujo es estable, el flujo se conoce como laminar. Sin embargo, para números de Reynolds altos va aumentando la turbulencia y la velocidad del fluido determina su comportamiento más que la viscosidad, siendo ahora inestable y caótico. Para números de Reynolds intermedios el flujo es transitorio, entre turbulento y laminar.

Para poder entender la turbulencia es básico y de gran importancia conocer profundamente sus mecanismos, teniendo en cuenta que, como se ha mencionado anteriormente, se caracteriza por su comportamiento tridimensional e inestable. Así, los fenómenos de transporte de masa, cantidad de movimiento y energía, se ven notablemente amplificados por el efecto de la turbulencia. En realidad, la turbulencia conlleva una mezcla continua de las partículas del flujo, con lo que los mecanismos de transporte por difusión se ven reforzados por el transporte advectivo por turbulencia. El campo del flujo instantáneo muestra rápidas fluctuaciones en todas direcciones dentro de un amplio rango de escalas temporales y espaciales. Además, aparece una vorticidad de carácter tridimensional, generándose remolinos de diferentes características y tamaños. Dentro de la dinámica de estos remolinos existe una jerarquía u orden, desde escalas mayores a menores, donde la energía es transmitida desde los remolinos grandes a los más pequeños hasta que la energía se disipa por los efectos viscosos de las escalas más pequeñas, conocidas como longitud de escalas de Kolmogorov (Kolmogorov, 1941). El mecanismo que gobierna este comportamiento se conoce como cascada de energía, jugando un importante papel en los flujos turbulentos.

A.3.5. Necesidad de metodologías para la validación

Como se ha mencionado las CFD son una potente herramienta para modelar las iteraciones con y entre fluidos. Sin embargo, desarrollar un modelo acertado en CFD requiere un alto nivel de experiencia, el cual en muchos casos no existe (Hajdukiewicz *et al*, 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 *et al* (2012). Éste último ofrece tres artículos más con un caso muy complejo que se desarrolló 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 su nivel explicativo y de esquematización es el de Hajdukiewicz *et al* (2013) (

Figura 7). La metodología explica como verificar (en color verde) y validar (en color anaranjado) los modelos CFD, así como la forma de realizar el diseño paramétrico (en color azul) para evaluar la influencia de las condiciones de contorno en los resultados finales. El resultado del proceso de validación es un modelo en CFD fiable que represente con precisión los fenómenos ambientales de la realidad (en color amarillo).

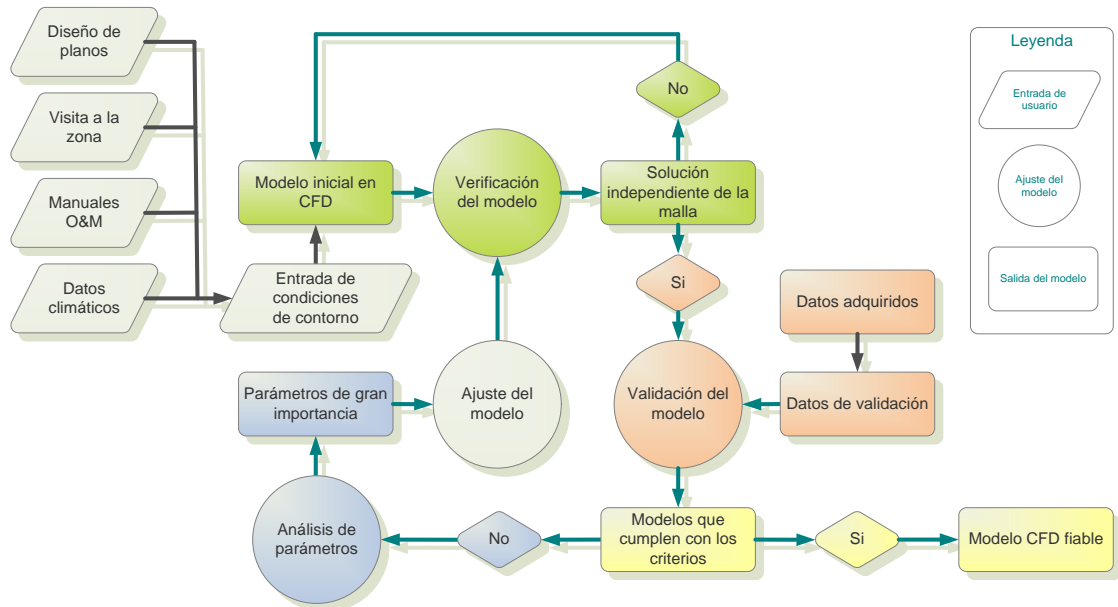


Figura 7: Proceso de consecución de un modelo CFD valido para ambientes interiores (Hajdukiewicz et al, 2013)

A.3.6. 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. Éstas se plasman en la Tabla 8.

Tabla 8: Investigaciones y trabajos realizados alrededor del tema de EFM

Tema	Publicación
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 & Baskaran, 1990.
	— Richards et al, 2002.
	— Blocken et al, 2004.
	— Yoshie et al, 2007.
	— Mochida & Lun, 2008.
	— Blocken et al, 2012.
	— Blocken & Gualtieri, 2012.
	— Tominaga et al, 2008a
	— Blocken & Persoon, 2009
	— Tominaga & Blocken, 2015
— Gilani et al, 2016	

Tabla 8: Investigaciones y trabajos realizados alrededor del tema de EFM (Continuación)

Influencia del viento en la lluvia que cae sobre una fachada	<ul style="list-style-type: none"> — Choi, 1993. — Etyemezian <i>et al</i>, 2000. — van Mook, 2002. — Blocken & Carmeliet, 2002. — Blocken <i>et al</i>, 2004. — Tang & Davidson, 2004. — Blocken & Carmeliet, 2006. — Briggen <i>et al</i>, 2009. — Blocken <i>et al</i>, 2010. — Li, 2010. — van Hooff <i>et al</i>, 2011.
Calidad del aire y dispersión de contaminantes alrededor de edificios	<ul style="list-style-type: none"> — Tominaga <i>et al</i>, 1997. — Leidl <i>et al</i>, 1997. — Meroney <i>et al</i>, 1999. — Canepa, 2004. — Meroney, 2004. — Hanna <i>et al</i>, 2006. — Neofytou <i>et al</i>, 2006a. — Blocken <i>et al</i>, 2008. — Gromke <i>et al</i>, 2008. — Yang and Shao, 2008. — Solazzo <i>et al</i>, 2009. — Balczó <i>et al</i>, 2009. — Tominaga & Stathopoulos, 2011. — Gousseau <i>et al</i>, 2011. — Moonen <i>et al</i>, 2011 — Gromke & Blocken, 2015
Transferencia de calor en las superficies de un edificio	<ul style="list-style-type: none"> — Blocken <i>et al</i>, 2009. — Defraeye & Carmeliet, 2010 — Defraeye <i>et al</i>, 2010. — Defraeye <i>et al</i>, 2011. — Karava <i>et al</i>, 2011 — Tominaga & Blocken, 2015
Ventilación natural de edificios	<ul style="list-style-type: none"> — Jiang and Chen, 2002. — Jiang <i>et al</i>, 2003. — Heiselberg <i>et al</i>, 2004. — Wright & Hargreaves, 2006. — Chen, 2009. — Norton <i>et al</i>, 2009. — van Hooff & Blocken, 2010a. — van Hooff & Blocken, 2010b. — van Hooff <i>et al</i>, 2011. — Blocken <i>et al</i>, 2011. — Ramponi & Blocken, 2012.
Erosión del viento	<ul style="list-style-type: none"> — Tominaga & Mochida, 1999. — Parsons <i>et al</i>, 2004. — Hussein & El-Shishiny, 2009. — Tominaga <i>et al</i>, 2011.
Energía del viento	<ul style="list-style-type: none"> — Milashuk & Crane, 2011.
Carga del viento en edificios	<ul style="list-style-type: none"> — Tamura <i>et al</i>, 1997. — Stathopoulos, 1997. — Selvam, 1997. — Tamura <i>et al</i>, 2008. — Nozu <i>et al</i>, 2008. — Tamura <i>et al</i>, 2015.
Otras aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> — Neofytou <i>et al</i>, 2006b. — Wakes <i>et al</i>, 2010.

A.3.7. Extracción de perfiles del doble promediado

En el análisis de resultados de las simulaciones en CFD, es posible hacer uso de metodologías que extraigan mayor información de los resultados arrojados. La metodología del doble promediado (DAM) es de gran interés y creciente uso en trabajos relacionados con el estudio de fluidos en superficies irregulares. Anta Álvarez (2009) describe con gran detalle dicha metodología y la aplica a la caracterización hidrodinámica del arrastre del molusco *C.edule*. En un trabajo en donde participa el mismo autor, se comenta que la metodología DAM ha sido aplicada en diversos campos de la ingeniería como flujos atmosféricos, flujos de aire sobre masas de árboles u otras superficies rugosas (p.ej. edificaciones), flujos hidráulicamente rugosos, e incluso flujos subsuperficiales (Nikora & Rowinski, 2008).

Adicionalmente Anta Álvarez (2009) agrega de modo resumido, que se puede indicar que esta metodología se basa en promediar las ecuaciones de Reynolds en un volumen o superficie de control. El procedimiento de promediado se basa en descomponer las variables promediadas temporalmente en su componente de media y fluctuación espacial de manera que la media temporal de cualquier variable aerodinámica o hidrodinámica θ_i se puede escribir como:

$$\bar{\theta}_i = \langle \bar{\theta}_i \rangle + \tilde{\theta}_i$$

donde los paréntesis angulares denotan promedio espacial, la barra superior promedio temporal y la tilde fluctuación espacial (Nikora *et al*, 2007). Esta descomposición es similar a la descomposición de Reynolds de las variables instantáneas en su promedio temporal y en la componente de fluctuación, $\theta_i = \bar{\theta}_i + \theta_i'$.

Se menciona que aplicando esta metodología para determinar el perfil de velocidades, se pueden definir dos tipos de promediados en función del operador empleado. Las diferencias entre la media superficial y la media intrínseca. Para el análisis de flujos aerodinámicamente rugosos, es más correcto emplear la media intrínseca (Nikora *et al*, 2007). La velocidad u intrínseca doblemente promediada se puede definir como (Mignot *et al*, 2009):

$$\langle \bar{U}(x, t) \rangle = \frac{1}{A_f} \iint_{A_f} \bar{U}(x + r, t) dS$$

donde A_f es el área ocupada por el fluido a una cota determinada z , siendo A_0 la superficie total donde se realiza el promediado para esa misma cota z r es un vector de posición que describe el valor de A_f en el entorno de un punto con coordenadas x y dS es un elemento diferencial de área.

A.4. SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos es el proceso por medio del cual los fenómenos físicos del mundo real son transformados en señales eléctricas que a su vez son medidas y convertidas a un formato digital para su procesamiento, análisis y almacenamiento en un ordenador (Park & Mackay, 2003).

En la gran mayoría de aplicaciones, los DAS's, son diseñados no solo para adquirir datos, sino también para ejecutar acciones que garanticen su correcto funcionamiento. En definitiva, el desarrollo de los DAS's se extiende a incluir aspectos de control del sistema total.

Un DAS debe por tanto cumplir con los siguientes requisitos básicos:

- Adquirir.
- Almacenar.
- Visualizar.
- Distribuir.
- Reconocer eventos.

Las exigencias para el desarrollo de un DAS varían dependiendo de la aplicación hacia la cual esté dirigida (Figura 8). Realizar un sistema para la validación de un diseño requiere de un menor número de canales de entrada de señales en comparación a un Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA) y por tanto su complejidad es mucho menor; pero la velocidad de muestreo para la validación de un diseño es mucho mayor que para un sistema SCADA (Domínguez, 2009). Distinguir el contexto en el que se enmarcará el desarrollo ayuda a no sobre-dimensionar, o por el contrario, adquirir dispositivos y programas demasiado ajustados a los requerimientos.

El DAS requerido, debe ser por lo tanto un diseño dirigido hacia la aplicación del monitoreo ambiental.



Figura 8: Aplicaciones de DAS's y características para su diseño

Pero independiente de la aplicación a la cual esté dirigido el DAS, con el transcurso del tiempo la digitalización de los datos, la exigencia por saber todos los detalles de un proceso, la reducción de intervención manual es incremental (Figura 9). Requiere entonces diseños con características claras de flexibilidad, integración y escalabilidad para las futuras mejoras y ampliaciones.

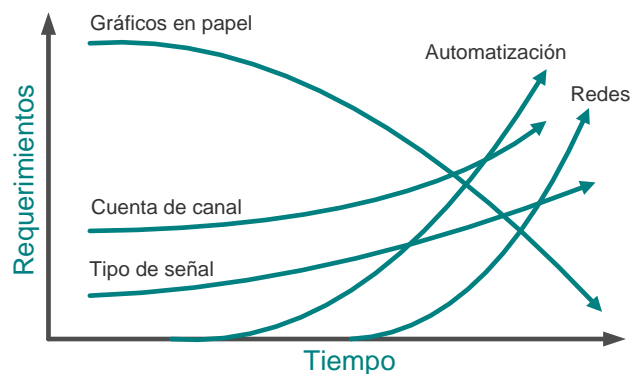


Figura 9: Exigencias técnicas de los DAS's con el paso del tiempo

A.4.1. Estructura de un DAS cableado

Los componentes más comunes que se encuentran en un DAS cableado son los siguientes:

- Sensores y transductores.
- Cableado de campo.
- Acondicionadores de señales.
- Dispositivos de registro de datos.
- Ordenadores.
- Programas para la adquisición de datos.

Actualmente con los avances en la electrónica y la computación estos conjuntos de componentes se encuentran difuminados entre ellos, ya que es posible encontrar dispositivos que integren varias de estas funciones. Sin embargo es posible esbozar por medio de diagramas de bloques la arquitectura de un DAS.

Es muy común encontrar DAS's con anatomías donde se concede a los equipos de campo gran responsabilidad sobre el proceso de adquirir señales (*Figura 10*). Se podría catalogar que es un enfoque muy tradicional y con bastante riesgo en comparación con las soluciones que se pueden plantear hoy en día, aunque exige menor velocidad en la comunicación, Ordenadores Personales (PC's) muy económicos y aprovecha al máximo las características de los dispositivos de campo.

Acudiendo a soluciones más actuales, se encuentran los DAS's basados en ordenador, donde todos los equipos electrónicos están integrados en un PC (*Figura 11*). Los sensores y posibles actuadores estarían cableados a tarjetas de adquisición instaladas en la unidad de procesamiento del ordenador. Este esquema está dirigido a laboratorios donde la resolución y calidad de las señales debe ser alta, reduciendo la probabilidad de agregar ruido en las mismas señales a través de los cables (Dam & Austerlitz, 2003; Kim *et al.*, 2011). Presenta una centralización absoluta, y poca flexibilidad desde punto de vista de instalación de componentes. Con los avances en la electrónica, este tipo de solución cada día es más económico y de excelentes prestaciones, hasta el punto que la misma miniaturización lleva al desarrollo de equipos embebidos, que no son más que mini-ordenadores, con apariencia de Controladores Lógicos Programables (PLC's) y un sistema operativo comercial en memoria para su uso.

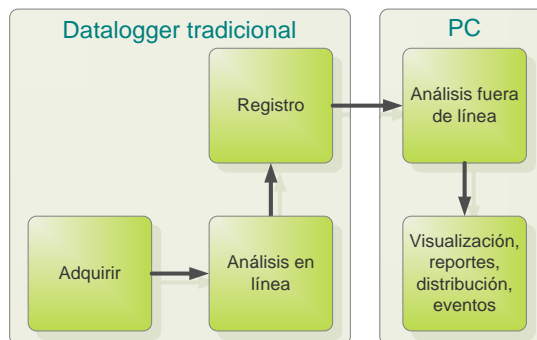


Figura 10: Arquitectura tradicional de un DAS

A menudo los sensores deben ser localizados remotamente del ordenador en donde algún procesamiento y almacenamiento se lleva a cabo. Esto es muy común en entornos industriales donde los sensores y posibles actuadores pueden situarse en ambientes hostiles y a menudo a

distancias considerables del ordenador. En ambientes muy ruidosos es difícil que señales tan débiles como pueden ser las entregadas por un termopar, sobrevivan en la transmisión a largas distancias o por lo menos que su calidad no vea comprometida.

Diseñar una aplicación distribuida es una de las arquitecturas que se pueden encontrar en un DAS (Figura 12). Esta solución es mucho más costosa pero proporciona más seguridad, dado que los equipos de adquisición continúan funcionando aún cuando el ordenador central u otro equipo fallen. Se facilita en gran medida la escalabilidad y flexibilidad para las posteriores mejoras o ampliaciones (Vyatkin, 2013).

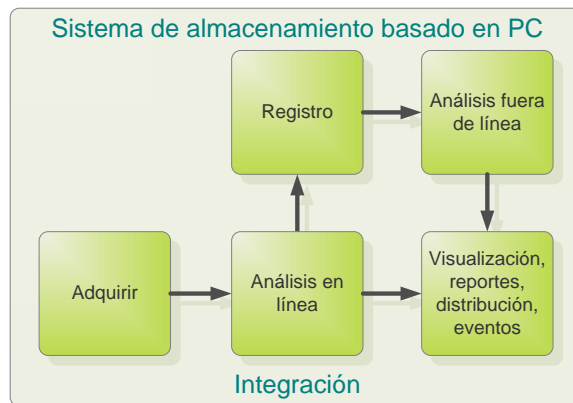


Figura 11: Arquitectura DAS de integración centralizada basada en PC

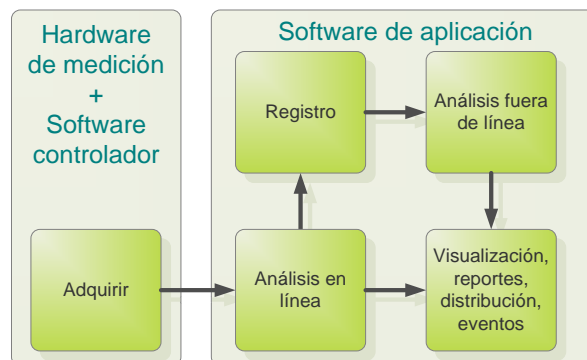


Figura 12: Arquitectura distribuida de un DAS

A.5. COMUNICACIONES EN CAMPO

Hoy en día, tener la posibilidad de comunicación entre los sistemas de adquisición, automatización, supervisión o control es una demanda y una necesidad prioritaria, incluso en el caso en que los sistemas posean una categoría menor o sencillamente presenten pocas cualidades técnicas en su diseño. Debido a la gran variedad de procesadores de comunicaciones, protocolos e interfaces de usuario, hacen de este mundo de sistemas tan heterogéneos un tema extremadamente complejo. El conocimiento básico de los principios detrás del funcionamiento de un del protocolo, los protocolos utilizables en redes tipo bus, así como sus propiedades, son tan importantes como la aplicación concreta de un enfoque de solución con base en ejemplos con bastantes pruebas de su implementación.

Quien emprende la tarea de diseño de un sistema como el que se presenta en el actual escrito, en la planificación de las soluciones de comunicación surgen las siguientes preguntas, las cuales se entrecruzan con los objetivos propuestos:

- ¿Qué sistemas con tecnologías tipo bus hay disponibles como base para alcanzar las soluciones planeadas?
- ¿Qué protocolo se puede emplear de manera eficiente en una estructura de bus de campo para la tarea prevista y que sea soportado por los dispositivos que se pretenden conectar?
- ¿Cómo se utilizan estos protocolos para lograr efectivamente la solución de adquisición, automatización, supervisión o control deseado?
- ¿Qué otros mecanismos y sistemas se necesitan para realizar el trabajo propuesto de manera eficiente?

A.5.1. Jerarquización en las comunicaciones en campo

La integración de los diferentes equipos y dispositivos existentes en una aplicación industrial como lo es un invernadero se hace dividiendo las tareas entre grupos de procesadores con una organización de predominio uno sobre otro. Así, dependiendo de la función y el tipo de conexiones, se suelen distinguir cinco niveles:

- N1: Nivel de entrada/salida.
- N2: Nivel de campo.
- N3: Nivel de control de proceso.
- N4: Nivel de control de producción.
- N5: Nivel de gestión o dirección.

Esta división de los niveles no es universal, varía con el tamaño del sistema de fabricación y sus características particulares. Además, para cualquiera de los niveles, no hay un estándar universalmente aceptado que cubra todos los aspectos desde el nivel físico al de aplicación del modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI) (*Figura 13*).

Este modelo OSI de 7 capas propuesto en 1984 se mostró ineficiente para su uso en redes industriales con requerimientos de baja latencia, debido a la sobrecarga que este modelo impone en cada capa. Para solventar este inconveniente, la mayoría de redes industriales utilizaron únicamente 3 de estos niveles, el nivel físico, el nivel de enlace y el nivel de aplicación, por lo que a continuación se repasan las particularidades de estos niveles en el entorno industrial.

El nivel físico define el medio físico que se utiliza en la transmisión y las características físicas del mismo, como niveles de voltaje, sistema de codificación, etc. Estas características determinan la topología, la velocidad de transmisión, el número máximo de nodos en una red, etc.

El nivel de enlace define los formatos de trama, mecanismos de protección ante errores en la transmisión (Comprobación de Redundancia Cíclica o CRC). En la mayoría de redes, incluyendo los buses de campo, en este nivel se ubica el subnivel de acceso al medio (Control de Acceso al Medio o MAC). La capacidad de satisfacer los requerimientos de tiempo real de las aplicaciones industriales dependerá en gran medida de si el mecanismo de acceso al medio tiene un comportamiento determinista o no determinista.

El nivel de aplicación define los interfaces entre el usuario y el sistema, y habitualmente incluye el nivel de usuario, denominado así dado que habitualmente es la forma en que el usuario ve el bus de campo, aislándolo del manejo de los niveles inferiores. Los estándares proponen a este nivel objetos específicos para diferentes dominios de aplicación (robótica, control numérico, control de procesos, etc.).



Figura 13: Esquema representativo de las diferentes capas del modelo OSI

A.5.2. Topologías de red

La topología de red o forma lógica de red esta referida a la representación como el cableado permite el enlace de los dispositivos (llamados nodos) para la transmisión de paquetes de datos o simplemente señales de tipo binario generalmente, haciendo uso de la herramienta matemático-computacional “*graphs*”, que es una gráfica abstracta en donde un conjunto de objetos son interconectados por medio de líneas que vendrían siendo los enlaces, que al aplicarles la “*graphs theory*” obtienen características de forma y/o funcionamiento. Dentro de las topologías de red se pueden encontrar dos tipos de acuerdo a su fin:

- Topología física
- Topología lógica

El nombre de una topología de red particular describe más su apariencia estética, y es probable encontrar casos en donde se utiliza la palabra arquitectura en un sentido relajado para hablar a la vez de la disposición física del cableado y de cómo el protocolo considera dicho cableado, lo cual actualmente se encuentra en discusión.

A.5.2.1. Topología física

Es la representación de la conexión física entre los dispositivos o nodos, facilitando la esquematización de su localización, el sistema de cableado, y las vías para su desarrollo. Las topologías físicas se clasifican de la siguiente manera:

A.5.2.1.1. Punto a punto

Es la topología mas simple que consiste en un enlace permanente entre dos extremos. La conmutación entre las topologías punto a punto es el modelo convencional de la telefonía. La transmisión de datos de un extremo al otro es casi garantizada, por lo tanto la fiabilidad en la transmisión es muy alta. La posibilidad de una alta demanda en una conexión punto a punto es proporcional al número de posibles pares suscritos, y se ha expresado en la ley de Metcalfe.

Permanente (dedicada): Es la configuración más fácil de entender de las variantes que pueden existir en las topologías punto a punto. Es un canal de comunicación que se encuentra permanente asociado entre los dos puntos, y por tanto la configuración dinámica es inexistente, siendo entonces iguales la topología física y la lógica para esta configuración.

Conmutada: Usa tecnologías de “*circuit-switching*” o “*packet-switching*”, que consisten en que el circuito o canal entre los nodos y terminales es establecido antes de que el usuario pueda comunicarse por medio sistemas electrónicos “inteligentes” y bajo ciertas reglas preestablecidas en la configuración de los equipos, como si los nodos estuviesen conectados físicamente como un circuito eléctrico. Se puede configurar de manera dinámica, y se puede eliminar cuando ya no sea necesario. Este es el modo básico del funcionamiento de la telefonía convencional.

A.5.2.1.2. Bus

En redes de área local, donde la tecnología de bus es usada, cada dispositivo esta conectado a un único cable. Un elemento terminador es necesario en cada extremo del cable del bus, para evitar que se de lugar a un rebote en contra dirección de la señal. Una señal del emisor (generalmente llamado maestro “*master*”) viaja en ambas direcciones hacia todas los equipos conectados en el cable del bus, hasta que encuentra la dirección a la que se remiten los datos, dirección que puede ser la MAC, la dirección del Protocolo de Internet (IP), o simplemente un nombre o número, asignado a cada uno de los dispositivos dispuestos a recibir. Dado que la topología de bus consta de un solo cable, es relativamente económico implementarlo, en comparación con otras topologías. Sin embargo, el bajo costo de la implementación de esta tecnología se ve compensado con el alto costo del manejo y gestión de la red. Además, puesto que solo se utiliza un cable, se convierte en un punto frágil, ya que si se rompe toda la red se cae, pero tiene la ventaja que de haber un correcto funcionamiento, la transferencia de datos entre los equipos es muy rápida.

Bus lineal: Es el tipo de topología de red en la que todos los nodos están conectados a un medio de transmisión común que tiene exactamente dos extremos (también se conoce comúnmente como “columna vertebral” o “troncal”). Todos los datos que puedan ser transmitidos entre los nodos en la red, pueden ser recibidos por todos los nodos integrantes de la red casi al mismo tiempo (sin tener en cuenta las demoras de propagación).

Nota: Los dos extremos de la red que normalmente finalizan con un dispositivo llamado “terminador” que posee la impedancia característica del medio de transmisión y que disipa o absorbe la energía que sobra de la señal para evitar que dicha señal se refleje o propague de nuevo en el medio en dirección opuesta, podría causar interferencias y degradación de las señales.

Bus distribuido: Es el tipo de topología de red en la que todos los nodos de la red están conectados a un medio de transmisión común que tiene mas de dos extremos, los cuales se crean al añadir ramas a la sección principal. Las siguientes son algunas particularidades que tiene este tipo de topología:

Todos los extremos del medio de transmisión común son normalmente finalizados con un dispositivo “terminador”.

La topología física de bus lineal es a veces considerada como un caso especial de la topología física de bus distribuido (no existe ninguna ramificación para el bus lineal)

La topología física de bus distribuido es en algunas ocasiones denominada incorrectamente como una topología física de árbol, dada su semejanza, pero la diferencia es que en la topología física de bus distribuido no existe ningún nodo central al que cualquier otro nodo se conecta, ya que esta funcionalidad jerárquica es reemplazada por el bus común.

A.5.2.1.3. Estrella

En las redes de área local, donde la topología de estrella es usada, cada dispositivo está conectado a un concentrador central. A diferencia de la topología de bus, la topología de estrella permite que cada dispositivo tenga una conexión punto a punto con el concentrador central, pasando por este último todo el tráfico que pueda generarse en la red. El concentrador actúa como amplificador de señal, indicando que los datos se pueden transmitir a grandes distancias. Es una topología de fácil implementación, pero posee la desventaja que si el concentrador central llega a fallar, toda la red se cae. Las siguientes son algunas particularidades que tiene este tipo de topología:

Los enlaces punto a punto descritos anteriormente, en ocasiones es clasificado como un caso especial de la topología física de estrella, ya que sería el tipo más básico de configurar, donde un nodo estaría conectado por medio de un enlace punto a punto a un segundo nodo, se escogería uno de los dos nodos como concentrador central y que el nodo que emita datos sea arbitrario.

Aunque la mayoría de las redes que se basan en la topología física de estrella suelen implementarse mediante un dispositivo especial o “inteligente”, como un concentrador o un conmutador como nodo central, también es posible hacerlo mediante un ordenador o incluso un simple punto de conexión común, aclarando con lo anterior que esta topología no hace indispensables dichos elementos de mayor tecnología para su desarrollo.

Las redes con topología tipo estrella pueden ser también descritas como de difusión con multi-acceso o no difusión con multi-acceso, dependiendo de si la tecnología de la red propaga automáticamente la señal desde el nodo central a todos los dispositivos receptores, o solo envía la señal al dispositivo receptor indicado.

Estrella extendida: Es el tipo de topología de red en la que una red que se basa en la topología física de estrella tiene uno o varios repetidores entre el nodo central y los periféricos o nodos receptores. Los repetidores se utilizan para ampliar la distancia máxima de transmisión de los enlaces punto a punto, entre el nodo central y los nodos periféricos más allá de lo que es soportado por la potencia de transmisión del nodo central o más allá de lo recomendado por la norma para la capa física en la que la topología física de estrella se basa.

Nota: Si los repetidores en una red que se basa en la topología física de estrella extendida son reemplazados con concentradores o “switches”, se crea inmediatamente una topología de red híbrida, que se conoce como una topología física de estrella jerárquica, aunque alguna bibliografía no hace distinción entre estas dos.

Estrella distribuida: Es el tipo de topología de red que se compone de redes individuales que se basan en la topología física de estrella conectadas entre sí de forma lineal, sin una conexión o nodo central de nivel superior o jerárquicamente superior.

A.5.2.1.4. Anillo

En las redes de área local, donde la topología de estrella es usada, cada dispositivo está conectado a la red en un circuito cerrado o anillo. Cada equipo tiene una dirección única que se utiliza para fines de identificación. Cada señal pasa a través de cada máquina en una sola dirección. La topología de anillo generalmente utiliza un esquema de paso de testigo, conocido en el medio como “token-ring”, usado para el control de acceso a la red. Al utilizar este sistema, sólo una máquina puede transmitir en la red a la vez. Los equipos conectados a la red actúan como potenciadores de la señal o repetidores que refuerzan las señales que atraviesan la red. La principal desventaja de la topología tipo anillo es que el fallo de un equipo generará que toda la red falle.

A.5.2.1.5. Malla

El tamaño de toda la red de malla es proporcional a la exponencial del número de dispositivos que hacen parte de la red, asumiendo que hay comunicación entre los grupos de cualquiera de los dos extremos e incluyendo la totalidad de los extremos, aproximándose esto por medio de “*Reed’s Law*”.

Totalmente conectada: Es el tipo de topología de red en la que cada uno de los nodos de la red está conectado a cada uno de los demás nodos constituyentes de la red por medio de un enlace punto a punto, lo que permite que los datos se puedan transmitir simultáneamente desde cualquier nodo simple a todos los otros nodos.

Nota: La topología física de malla totalmente conectada generalmente es demasiado costosa y compleja para las redes que hay en la práctica, aunque es utilizada cuando hay un pequeño conjunto de nodos a ser interconectados. Posee la gran ventaja que existen varias vías para establecer comunicación entre un nodo y otro, y por lo tanto es difícil que la transmisión de una señal pueda fallar en la capa física.

Parcialmente conectada: Es el tipo de topología de red en la que algunos de los nodos de la red está interconectado a más de uno de los otros nodos de la red por medio de un enlace punto a punto, lo que permite tomar la ventaja de generar algunas de las redundancias cuando se utiliza la topología física de malla cuando esta totalmente conectada, sin el costo y la complejidad necesaria para una conexión entre cada uno de los nodos que constituyen la red.

Nota: La topología física de malla totalmente conectada generalmente es demasiado costosa y compleja para las redes que hay en la práctica, aunque es utilizada cuando hay un pequeño conjunto de nodos a ser interconectados. Posee la gran ventaja que existen varias vías para establecer comunicación entre un nodo y otro, y por lo tanto es difícil que la transmisión de una señal pueda fallar en la capa física.

A.5.2.2. Topología lógica

La topología lógica, en contraste con la física, es la representación de la forma en que las señales actúan a través de la red, o la manera en que los datos pasan de un dispositivo a otro sin tener en cuenta la interconexión física. Una topología lógica no necesariamente tiene que ser igual a una topología física, pero puede darse el caso que lo sea, así como puede suceder que una topología física se mezcle con una topología lógica por las necesidades existentes en el diseño o desarrollo.

Las siguientes son algunas particularidades de las topologías lógicas:

- Las topologías lógicas están estrechamente relacionadas con el MAC sus métodos y protocolos.
- Las topologías lógicas son generalmente determinadas por los protocolos de red en lugar de ser determinado por la distribución física de los cables y los dispositivos de red o por el flujo lógico de dato, por lo tanto también es posible denominarla como “topología de la señal”
- Las topologías lógicas pueden ser dinámicamente reconfiguradas por medio de equipos especiales, tales como enrutadores y “*switchs*”.

A.5.3. Buses de campo estandarizados

Actualmente existen una gran cantidad de buses de campo en el mercado, tanto estandarizados como propietarios. En la *Tabla 9* se muestra la relación entre los diferentes estándares, el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) y el Comité Internacional de Electrotecnia (IEC), así como el nombre comercial por el que son más habitualmente conocidos.

Tabla 9: Relación de estándares de buses IEC y CENELEC

<i>CENELEC</i>	<i>IEC</i>	<i>Nombre Comercial</i>
EN 50170-1(07/1996)	IS 61158 type 3	<i>P-NET</i>
EN 50170-2(07/1996)	IS 61158 type 1/3/10	<i>Profibus</i>
EN 50170-3(07/1996)	IS 61158 type 1/7	<i>WorldFIP</i>
EN 50170-A1(04-2000)	IS 61158 type 1/9	<i>Foundation Fieldbus</i>
EN 50170-A2(04-2000)	IS 61158 type 1/3	<i>Profibus-PA</i>
EN 50170-A3(08-2000)	IS 61158 type 2	<i>ControlNet</i>
EN 50254-2(10-1998)	IS 61158 type 8	<i>Interbus</i>
EN 50254-3(10-1998)	IS 61158 type 3	<i>Profibus-DP</i>
EN 50254-4(10-1998)	IS 61158 type 7	<i>WorldFIP (FIPIO)</i>
EN 50325-2(01-2000)	IS 62026-3 (2000)	<i>DeviceNet</i>
EN 50325-3(04-2000)	IS 62026-5 (2000)	<i>SDS</i>
EN 50325-4(7-2002)	---	<i>CANOpen</i>
EN 50295-2	IS 6226-2 (2000)	<i>AS-Interface</i>

Para tener una visión global de las características los buses de campo más relevantes existentes en la actualidad, se muestra la *Tabla 10*.

Tabla 10: Comparativa de los principales buses de campo

<i>Bus de campo</i>	<i>Topología</i>	<i>Medio Físico</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Distancia segmento</i>	<i>Nodos segmento</i>	<i>Acceso al bus – Estándar</i>
ARCNET	Bus Estrella	Par trenzado Fibra óptica Coaxial	2.5 Mbps	122m	255	Paso testigo – ANSI 878
AS-I	Bus Árbol Estrella	Cable de dos hilos	167 kbps	100m	32	Sondeo principal-subordinadas
Bitbus	Bus	Par trenzado Fibra óptica	62.5/375 kbps 1.5 Mbps	1200m /300m	29	Sondeo principal-subordinadas – IEEE 1118

Tabla 10: Comparativa de los principales buses de campo (Continuación)

CAN	Bus	Par trenzado	50 kbps a 1 Mbps	1000m a 40m	127 hasta 64	CSMA/CD con arbitraje de bit – ISO 11898/11519
CC-Link	Bus	Par trenzado	156 bps a 10 Mbps	1200m a 100m	64	Sondeo principal-subordinadas
ControlNet	Bus Árbol Estrella	Coaxial Fibra óptica	5 Mbps 5 Mbps	1000m 3000m	48	CTDMA – Basado en CAN
DeviceNet	Bus	Par trenzado	125 – 250 – 500 kbps	500 – 250 – 100 m	64	CSMA/CD – ISO 11898 y 11519 (basado en CAN)
EIB	Libre	Par trenzado Infrarrojos Red eléctrica Radio	---	---	---	CSMA/CA – CENELEC TC105
Filbus	---	Par trenzado	375 kbps	1200m	32	---
Firewire	Bus Árbol	Cable de 6 hilos Fibra óptica	100 Mbps 200 – 400 Mbps	700m	63	Ranuras de tiempos – IEEE 1394
Foundation Fieldbus	---	Par trenzado	---	1900m	32	Paso testigo – ISA SP50/ IEC TC65
HART	Bus	Par trenzado apantallado	1200 bps	3000m	30	Sondeo principal-subordinadas – IEC TC65
Interbus-S	Anillo	Par trenzado	500 kbps	400m	256	Paso testigo – DIN E19258
J1939	Bus	Par trenzado apantallado	250 kbps	---	---	CSMA/CD con arbitraje de bit – SAE J1939 (Basado en CAN)

Tabla 10: Comparativa de los principales buses de campo (Continuación)

LonWorks	Bus Anillo Libre	Par trenzado Fibra óptica Red eléctrica Coaxial Radio Infrarrojos	78 kbps a 1.25 Mbps	2700 a 130m	64	CSMA/CA EIA-709
M3S	Bus	Cable de 6 hilos	---	---	---	CSMA/CD con arbitraje de bit – Basado en CAN
M-Bus	Bus	Cable de 2 hilos	300 a 9600 bps	1000m	250	Centralizado – IEC 870; EN 1434-3
Measurement Bus	Bus	Cable de 4 hilos	110 bps a 1 Mbps	500m	31	Sondeo principal- subordinadas – DIN 66348
Modbus	Bus	Par trenzado	300 bps a 19.2 kbps	1000m	248	Sondeo princ- subord
NBIP	Bus	Cable de 2 hilos	---	---	---	Sondeo principal- subordinadas
P-NET	Anillo	Par trenzado apantallado	76.8 kbps	1200m	125	Paso testigo Sondeo principal- subordinadas – CENELEC EN 50170 Vol.1; DSF 21906; DK 502058; DK 502066
PROFIBUS	Bus	Par trenzado apantallado	9.6 kbps / 19.2 kbps / 93.75 kbps / 187.5 kbps / 500 kbps	1200m / 1200m / 1200m / 600m / 200m	32	Paso testigo Sondeo principal- subordinadas – CENELEC EN 50170 Vol.2; DIN STD 19245

Tabla 10: Comparativa de los principales buses de campo (Continuación)

SDS	Bus	Cable de 4 hilos	125 kbps / 250 kbps / 500 kbps / 1 Mbps	500m	64	CSMA – ISO 11989 (basado en CAN)
SENSOPLEX	Bus	Coaxial	---	---	120	Sondeo principal- subordinadas
SERCOS	Anillo	Fibra óptica	2 Mbps	---	255	Anillo ranurado – IEC 61491
SERIPLEX	Bus	Cable de 4 hilos apantallado	98 kbps	1500m	300	Sondeo principal- subordinadas
WorldFIP	Bus	Par trenzado apantallado Fibra óptica	31.25 kbps 1 Mbps 2.5 Mbps 5 Mbps	1000m 750m 500m	32	Centralizado (árbitro de bus) – CENELEC EN 50170 Vol. 3; NFC 46 601 a 607

A.5.4. Ethernet Industrial

Una creciente demanda de posibilidades de comunicación han sido desarrolladas por el creciente nivel de automatización y sistematización de los procesos de producción. Mas allá de los sistemas de bus de campo, esta posibilidad de comunicación tenía por objeto permitir la conexión de las unidades, equipos y dispositivos individuales o de otras divisiones de una compañía, concretamente departamentos con un trabajo más administrativo. El estándar IEEE 802.3 Ethernet se convirtió en el sistema de bus preferido debido a su amplio uso en la comunicación en oficinas y Redes de Área Amplia (WAN). Sin embargo, para su uso en un entorno industrial como lo es un cultivo bajo invernadero, se requiere mejorar la inmunidad a interferencias y la robustez de los componentes individuales que conducen al estándar de Ethernet Industrial.

A.5.4.1. Propiedades del sistema de bus

La configuración física de Industrial Ethernet se define sobre la base del estándar Ethernet IEEE 802.3. Su alto rendimiento en la transferencia de datos es posible gracias a tasas de transmisión que van desde los 10 Mbit/s hasta rangos en unidades de Gbit/s. En el marco de la normalización del estándar Ethernet, el acceso al bus de uso común se definió a través del procedimiento de Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Detección de Colisiones (CSMA/CD). En Ethernet Industrial, los datos pueden ser transferidos a través de pares trenzados en un conjunto triaxial, cable de fibra óptica o Redes de Área Local (LAN) inalámbrica.

Las redes Ethernet se pueden configurar como

- bus lineal
- árbol
- estrella o

- topología de anillo,

configuraciones híbridas son también posibles. Aparte de la física, también es necesario un protocolo para la transferencia de datos.

A.5.4.2. Protocolos de Ethernet Industrial

Ethernet Industrial ofrece una gran selección de posibles protocolos. Dentro de los protocolos más comunes que se pueden encontrar en los dispositivos de adquisición, control o automatización que ofrecen las compañías del sector se observan en la *Figura 14*.

Dos capas fundamentales deben ser observadas por el usuario:

- El nivel que es más cercano al hardware, el nivel 4 (capa de transporte). En este nivel, se intercambian los primeros datos de todo un sistema por medio de rutinas de transporte, es decir que se crea comunicación entre las estaciones de trabajo.
- El nivel más cercano al software es el nivel 7 (capa de aplicación). En este nivel, los datos de la aplicación o la estructura de datos se transfieren a otras aplicaciones.

Estas diferencias afectan también a las interfaces de usuario de los protocolos individuales, por lo cual necesitan especial atención.

Una descripción más detallada de dichos protocolos es posible encontrarla en SIEMENS (2004).

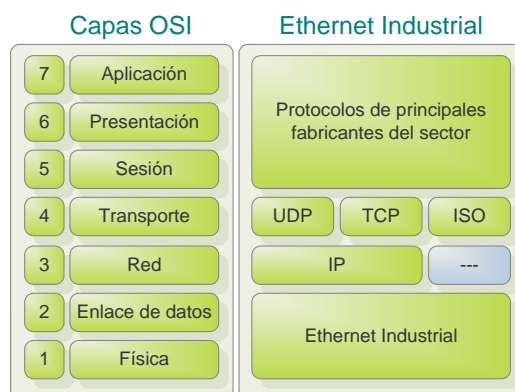


Figura 14: Principales protocolos soportados por los dispositivos de los principales fabricantes en el sector de la control y la automatización

A.5.5. Bus de campo PROFIBUS

Como se mencionó, en los entornos la transmisión de datos entre los equipos de control de planta se hace por medio de un bus de campo. La gran mayoría de los sistemas implementados en invernadero hacen uso de este tipo de red con conexión por cable. Se debe destacar que la gran ventaja de este tipo de redes es la robustez y el ancho de banda que ofrece para la transmisión de los datos (Mirabella & Brischetto, 2010). Comercialmente es posible adquirir tecnología para los diferentes tipos de protocolos estandarizados. Sin embargo es el estándar abierto PROFIBUS el líder mundial en proveer un bus de campo para uso en aplicaciones automatizadas y procesos de control (Powell, 2012); este aspecto permite encontrar bastantes estudios de sus características y modo de implementación, refinando así su nivel de estandarización frente a otros protocolos.

Por ser un estándar abierto, PROFIBUS es avalado por las Normas de Estándares Europeos EN 50170 y EN 50254. Por lo tanto es posible la comunicación entre dispositivos de diferentes

fabricantes sin la necesidad de realizar una interfaz de comunicaciones “ad hoc”. Se garantiza entonces una fiabilidad en su funcionamiento y por ende es posible encontrar variedad de equipos de diferentes fabricantes para el monitoreo y control automático que posean PROFIBUS como protocolo de comunicación para buses de campo.

La arquitectura del protocolo PROFIBUS está orientada al modelo OSI (Figura 15), de acuerdo al estándar ISO 7498. Este protocolo ofrece dos perfiles de comunicación en el nivel de aplicación: Protocolo de Periferia Descentralizada (DP) y protocolo de Especificación de Mensajes para Bus de Campo (FMS). Ofrece un perfil más de comunicación a nivel de enlace de datos: Enlace de Datos para Bus de Campo (FDL). En la Tabla 11 se puede observar una breve información de cada uno de los perfiles. Dependiendo de la aplicación, se puede trabajar con distintas tecnologías de transmisión o perfiles físicos: RS-485, IEC 1158-2, fibra óptica o infrarrojo.

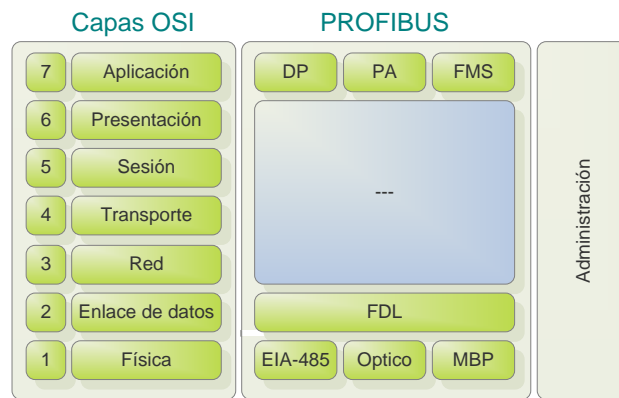


Figura 15: Protocolo PROFIBUS en el modelo OSI

Tabla 11: Relación de dispositivos adicionales del DAS

Capa en OSI	Perfiles de comunicación	Explicación	Versiones
Aplicación (Capa 7)	Profibus DP	Es usado en aplicaciones de automatización, para operar sensores y actuadores por medio de un controlador instalado en planta. Contiene además numerosos estándares de diagnóstico.	<p>DPV0: Provee las funcionalidades básicas incluyendo transferencia cíclica de datos, diagnóstico de estaciones, módulos y canales y soporte de interrupciones.</p> <p>DPV1: Agrega comunicación acíclica de datos, orientada a transferencia de parámetros, operación y visualización.</p> <p>DPV2: Permite comunicación entre esclavos. Está orientada a tecnología de drives, permitiendo alta velocidad para sincronización ente ejes en aplicaciones complejas.</p>
	Profibus PA	Es la solución integrada para control a nivel de proceso. Fue concebida como una variante de Profibus DP para comunicación con bus de campo en entornos peligrosos o con riesgo de explosión.	---

Tabla 11: Relación de dispositivos adicionales del DAS (Continuación)

	Profibus FMS	Diseñado para la comunicación a nivel de célula. Permite la transmisión de datos de usuario en un formato compatible con los mensajes de PROFIBUS y hace que los servicios sean accesibles para un usuario habilitado. Si bien fue la primera versión de PROFIBUS, es una versión cada más en desuso.	---
Enlace de datos (Capa 2)	Profibus FDL	Se concibió para transferir datos de un dispositivo a otro. Comprende lo que respecta al direccionamiento y la sincronización de las estaciones enlazadas a un bus por medio de un "token passing". No define ningún tipo de dato o la secuencia del protocolo.	---

A.5.5.1. Protocolo en PROFIBUS para acceso al medio

Aunque PROFIBUS FDL se expone como un protocolo independiente de PROFIBUS DP o FMS, estos últimos lo utilizan como protocolo de acceso al medio (MAC) por estar ubicado en el nivel 2 o de enlace de datos en el modelo de referencia OSI. Se responsabiliza de la transmisión fiable de la información a través de los circuitos de transmisión de datos gestionando la detección o corrección de errores y ocupándose del control de flujo de datos entre equipos interconectados. La comunicación se lleva a cabo en bloques de información o tramas, característico también de esta capa del modelo OSI, las cuales poseen una cabecera donde por lo general se incluye la dirección de origen y la de destino, y una cola donde se introducen datos para la detección de errores (Figura 16).

El MAC de PROFIBUS trabaja con un método acceso híbrido que combina un paso de "token", utilizado por las estaciones superiores ("masters") para comunicarse entre ellas, y el procedimiento maestro-esclavo utilizado por estaciones superiores para comunicarse con periféricos inferiores ("slaves").

PROFIBUS FDL provee una serie de servicios a los niveles superiores. Los servicios son solicitados por los protocolos de la capa de aplicación por ejemplo, a través de Puntos de Acceso al Servicio (SAP). En el caso del protocolo DP se asigna una función predefinida a cada punto de acceso al servicio. Se pueden utilizar varios SAPs de forma simultánea tanto para estaciones activas ("masters") como para estaciones pasivas ("slaves"). La distinción se realiza mediante el uso de Puntos de Acceso al Servicio Fuentes (SSAP), y Puntos de Acceso al Servicio Remotos (RSAP) (Tabla 12) (Soriano *et al*, 2000; Penin, 2011).

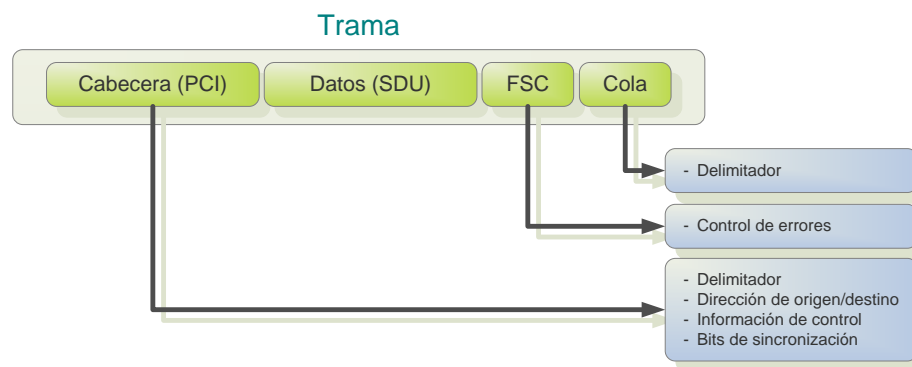


Figura 16: Bloques de los que se compone una trama de comunicación

Tabla 12: Servicios de nivel de enlace de PROFIBUS

<i>Servicio</i>	<i>Función</i>	<i>DP</i>	<i>FMS</i>
SDA	Envío de datos con reconocimiento		√
SRD	Envío y petición de datos con réplica	√	√
SDN	Envío de datos sin reconocimiento	√	√
CSRD	Envío y petición de datos con réplica cíclica		√

A.5.6. Protocolos serie

Todos los protocolos y sistemas de bus discutidos hasta ahora se refieren a protocolos de serie en los niveles más bajos, es decir, se transfieren de forma individual, sucesivamente, a través de una línea de datos. La diferencia entre estos y los siguientes protocolos es que estos protocolos y arquitecturas han sido diseñadas expresamente para la operación de múltiples puntos. Los siguientes protocolos han sido diseñados exclusivamente para la operación de punto a punto, con la excepción de los controladores con protocolos para ser instalados en los dispositivos que los soporten. Sin embargo, muchos equipos comerciales hacen uso de los protocolos serie no estandarizados, y lo que es aún más complejo, sus fabricantes y proveedores no desarrollan dichos controladores para ser instalados en otros equipos y así facilitar la integración. Se utilizan entonces protocolos serie propietario para la operación de múltiples puntos con reglas de funcionamiento particulares. Las interfaces más comunes que se encuentran en este tipo de protocolos son las siguientes:

- RS 232C
- RS 422/485
- 20 mA (ITY)

Las tres interfaces tienen requerimientos físicos y tecnológicos diferentes (*Tabla 13*).

Tabla 13: Requerimientos de las tres interfaces más comunes para protocolos serie no estandarizados

<i>Características</i>	<i>RS 232</i>	<i>RS422/485</i>	<i>20 mA (TTY)</i>
<i>Tipo de interface</i>	Interface de voltaje	Interface de corriente	Interface de voltaje diferencial
<i>Conector frontal</i>	9 pines Sub-D	9 pines Sub-D	15 pines Sub-D
<i>Máx. rango de transmisión</i>	Hata 115.2 kbit/s	Hata 19.2 kbit/s	Hasta 115.2 kbit/s
<i>Máx. longitud de la línea</i>	Máx. 15 m	Máx. 1000 m (a 9.5 kbit/s)	Máx. 1200 m (a 19.2 kbit/s)
<i>Norma a la que corresponde</i>	DIN-66020, DIN-66259, EIA-RS232C, CCITT v.24/v.28	DIN-66258 parte 1	DIN-66259 parte 1 y 3, EIA-RS422/485, CCITT v.11

Algunos protocolos de comunicación serie no estandarizados comunes en los equipos que se encuentran en el mercado son los siguientes:

- Protocolo RK512
- Procedimiento 3964(R)
- Protocolo Free ASCII

A.5.6.1. Protocolo FreeASCII

Los controles del protocolo ASCII para la transferencia de datos en una conexión punto a punto o multipunto entre una estación local y su par de comunicación se realizan a bajo nivel.. El protocolo ASCII contiene una capa de transmisión de bits (se encuentra en el nivel 1 del modelo de referencia OSI).

La estructura de los mensajes es completamente especificada por el usuario, por lo tanto es completamente posible el desarrollo de algunos protocolos basados en el protocolo ASCII. Solo un carácter de fin del mensaje debe ser definido para los mensajes recibidos.

Usando el protocolo ASCII, los datos pueden poseer cualquier estructura (todos los caracteres ASCII imprimibles, deben estar en la medida de lo posible dentro de una trama parametrizada) y pueden ser enviados y recibidos.

A.5.6.1.1. Servicios del Protocolo

El protocolo FreeASCII soporta los siguientes dos servicios de datos:

- ENVÍO

La función de ENVÍO esta disponible en los sistemas que soportan este protocolo tanto para la transmisión de un dato como de bloques de datos. Lo anterior es definido por medio de un parámetro de configuración de datos, donde se define el número de bloques de datos, la dirección de inicio y la duración de los datos a transferir.

— RECEPCIÓN

La función de RECEPCIÓN, para los sistemas que la soportan, transfiere los datos recibidos desde una pila de datos a un área de destino. El área de destino dentro de la estación local se especifica por medio de un bloque de datos, la cual se encuentra en la parte inicial de los datos. La longitud total de los datos recibidos se da después de la finalización exitosa de la función.

A.5.6.1.2. Ventajas y desventajas del protocolo FreeASCII

Las ventajas y desventajas cuando se usa el protocolo FreeASCII, se pueden observar en la *Tabla 14*.

Tabla 14: Características ventajosas y desventajosas del uso del protocolo FreeASCII

<i>Ventajas</i>	
1	El protocolo puede ser usado por cualquier fabricante libremente.
2	Apto para una cantidad de datos promedio (menor o igual a 1024 bytes)
3	El proceso de establecimiento de comunicación es muy bueno, ya que no existen rutinas de comienzo o finalización establecidas
4	Pueden ser transmitidos como datos todos los caracteres ASCII conocidos
<i>Desventajas</i>	
1	La transferencia de datos no es conocida
2	La seguridad de los datos es muy baja debido a la distancia Hamming 1, solo es usado el bit de paridad
3	Es necesario hacer un llamado coordinado de las funciones de ENVÍAR y RECIBIR en ambos lados de la comunicación

A.6. LAS WSN

Las WSN son sistemas embebidos a los cuales se acoplan sensores y circuitos electrónicos para realizar emisiones en radiofrecuencia, generando con ello comunicaciones inalámbricas y conformando por medio de estándares en las mismas emisiones de radio, redes de telecomunicaciones. La alimentación de cada integrante de la red o nodo se lleva a cabo por medio de una batería, generando un procesamiento autónomo de los datos con miras a una acción cooperada que busque objetivos comunes. Los principales beneficios ofrecidos por las WSN se basan en (Karl & Willing, 2007; Tiberi, 2011):

- Bajo coste
- Flexibilidad
- Escalabilidad
- Confiabilidad

- Tiempos de espera
- Eficiencia energética

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 *et al*, 2005; Willig, 2008). 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 & Tilbury, 2007; Sangiovanni-Vincentelli, 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).

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 que hagan uso de una WSN, pero especialmente en las de monitorización ambiental, existe un inconveniente a la hora de seleccionar los sensores para la detección de los gases de interés o gases 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 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 de tipo espectroscópico, catalíticos, semiconductores, entre otros (Somov *et al*, 2012). En promedio dichos sensores pueden consumir corrientes alrededor de 800mA (Nakano *et al*, 2005; Wobscholl *et al*, 2006; Ho *et al*, 2007; Xiaoqiang *et al*, 2010) lo cual es considerablemente alto para una aplicación electrónica que persiga un bajo consumo. Es entonces un obstáculo y tema en el cual se trabaja actualmente.

A.6.1. Aplicaciones de las WSN

Se han encontrado muchas aplicaciones en donde se hace uso de WSN. 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, minería subterránea, entre otras. Existe una extensa literatura que individualmente expone una aplicación específica de las WSN. También es posible encontrar trabajos donde se realiza una recolección de dichas aplicaciones y el planteamiento de una división o agrupamiento de las mismas (Martínez, 2008; Díaz 2010; Dargie & Poellabauer, 2010).

Hay diversas propuestas para la división de las aplicaciones. Algunas realizan dicha categorización por sectores de interés (Díaz, 2010; Dargie & Poellabauer, 2010) las 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 & Kumar, 2003). Probablemente hay muchos proyectos similares que se han centrado en este tema de investigación. Actualmente, las aplicaciones en ambientes militares se encuentran centradas 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 la presente categoría. Van desde el seguimiento de fauna silvestre, pasando 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 el desplazamiento 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 determinada, 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, 2015), 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, 2008). Sin embargo, se puede encontrar un tipo de división adicional, y es sencillamente clasificar las aplicaciones dependiendo si son para uso en exteriores o en interiores (Martínez, 2008; Oliveira & Rodrigues, 2011)

A.6.2. 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 aborda el tema de forma más específica. Algunos autores realizan dicho acercamiento gracias a una aplicación concreta, otros hacen un compendio de las características, necesidades y soluciones planteadas (Oliveira & Rodrigues, 2011; Othman & Shazali, 2012; Ioanna, 2012; Mukhopadhyay, 2012), permitiendo estos últimos una visión general del tema. Es posible entonces dentro del presente campo encontrar nuevas subdivisiones y trabajos realizados (Othman & Shazali, 2012)

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

A.6.3. 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 *et al*, 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, vigilados 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*, 2012). Con el paso del tiempo, en cuanto la técnica y la tecnología madura, van apareciendo productos comerciales, como es el caso de PPM Technology (Gaura *et al*, 2010; PPM Technology, 2015) 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.6.4. 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 creación de esta técnica. Sin embargo, dada la rigurosidad y la aparición de nuevas tecnologías 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 (Oberkampf *et al*, 1998). La motivación entonces para la validación y calibración de los modelos CFD se puede resumir en dos aspectos fundamentales (Hajdukiewicz *et al*, 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 *et al*, 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.

A.6.5. Marco técnico de WSN para los casos de estudio

Una red de sensores inalámbricos es entonces una serie de nodos independientes de procesamiento, que permite realizar la medición cooperada de una o algunas variables físicas. Dichos nodos efectúan una comunicación en dos direcciones: entre ellos mismos y con una estación base. La estructura y jerarquía de comunicación puede concebirse tan simple que la estación base sea el punto de recolección, tratamiento, almacenamiento y visualización final, como tan compleja que la estación base sea un punto intermedio en la transmisión de la información. En el último caso se buscaría una transferencia de datos a puntos geográficamente remotos, aprovechando la cobertura que tienen ciertas redes como lo es Internet (*Figura 17*). A pesar de las muchas capacidades que es posible incluir en cada sensor inalámbrico, en todo momento se debe llegar al compromiso entre los requerimientos mínimos que exige cada aplicación: consumo energético, costo de cada nodo, potencia necesaria para la transmisión, entre otros.

Para lograr el objetivo propuesto en el presente caso de estudio y en aras de escoger la plataforma idónea para la aplicación, similar a otros montajes basados en dispositivos que conformen una WSN, el sistema debía constar de cuatro partes fundamentales:

- Red de sensores inalámbricos
- Punto(s) de acceso de comunicación
- Centro de recepción
- Sistema de análisis y modelado de datos

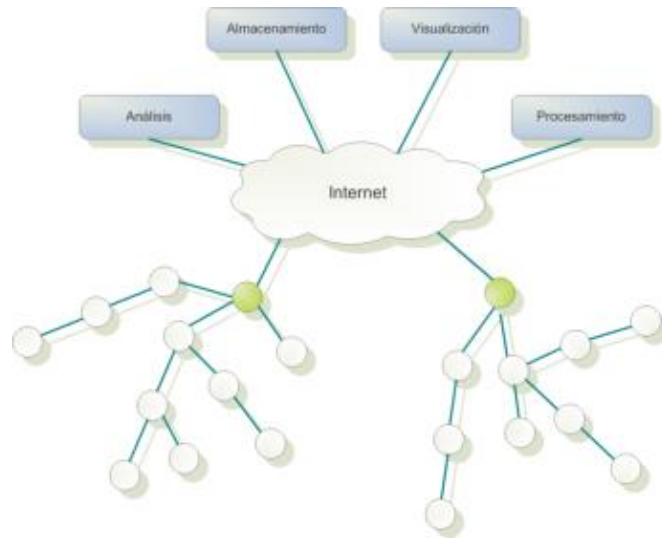


Figura 17: Estructura funcional de una WSN con topología compleja y desagregada

A.6.5.1. Red de sensores inalámbricos

Las WSN's poseen múltiples características técnicas, ya que es un compendio de tecnologías en electrónica, instrumentación, telecomunicaciones e informática. A pesar que es el transductor la particularidad más relevante en un nodo de una WSN, es la potencia de transmisión otro factor de cuidado en el diseño o la selección de los dispositivos. Por flexibilidad, en algunos dispositivos comerciales por ejemplo, dicha potencia puede ser ajustada por el usuario. Permite así considerar el tipo de antena y hasta el estándar de comunicación inalámbrico, con miras en muchos casos a un análisis del consumo energético de cada nodo (*Energy Harvesting* – EH).

Al realizar un estado del arte alrededor de las comunicaciones en los nodos de una WSN, una de las conclusiones de mayor peso es que el estándar que más se acomoda a los requerimientos de flexibilidad y consumo es el conocido como IEEE 802.15.4 (IEEE 802.15.4, 2007) (Zheng & Lee, 2004; Tytgat *et al*, 2015).

El estándar IEEE 802.15.4 hace parte de una familia de estandarizaciones creadas por el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) y agrupadas como 802, buscando generar interoperabilidad entre las Redes de Comunicaciones de Área Local (LAN) y Metropolitanas (MAN). A su vez la subfamilia 802.15 establece un estándar para las comunicaciones entre Redes de Área Personal (PAN) y el apartado 802.15.4 se refiere a las Redes Inalámbricas de Bajo Consumo de Área Personal (LR-WPAN). Desde su creación el estándar IEEE 802.15.4 ha sufrido variadas revisiones, principalmente en la búsqueda que el estándar responda a aplicaciones especializadas o mejoras en algunas de sus características. Dentro del modelo OSI el estándar interviene desde el nivel o Capa Física hasta el nivel o Capa de Control de Acceso al Medio (MAC). Entre las variadas características técnicas que organiza el estándar, en el nivel físico donde se controla el transeptor de radiofrecuencia para la selección del canal y el control de consumo de potencia de la señal, se establece que la operación se realizará en una de las tres posibles bandas de frecuencia de uso no regulado, conocidas como bandas libres para la investigación:

- 868 a 868,8 MHz: Para Europa, permite un canal de comunicación (versión de 2003), extendido a tres en la revisión de 2006.
- 902 a 928 MHz: Para Norte América, hasta diez canales (2003) extendidos a treinta (2006).
- 2400 a 2483,5 MHz: Para uso en todo el mundo, hasta dieciséis canales (2003, 2006).

Comercialmente es posible encontrar diferentes fabricantes con referencias que se acogen al estándar IEEE 802.15.4. Dado que el estándar de la IEEE sólo estructura los primeros niveles del modelo OSI, han surgido propuestas de protocolos de alto nivel como lo es ZigBee (desarrollado por la alianza de varias compañías a nivel global), Digimesh (desarrollado por la compañía Digi) o SimpliciTI (desarrollado por la compañía Texas Instruments). Las diferencias entre los diferentes protocolos de alto nivel, tema que se desarrollará un poco más en un apartado posterior, en ciertos aspectos pueden llegar a ser bastante notorias y convenientes. Aunque ZigBee es un protocolo más desarrollado y usado en variadas aplicaciones, posee Digimesh por ejemplo mejores características de enrutamiento de datos y creación de topologías de red menos restrictivas (Figura 18), así como un modo de bajo consumo más óptimo y un mayor alcance en las transmisiones.

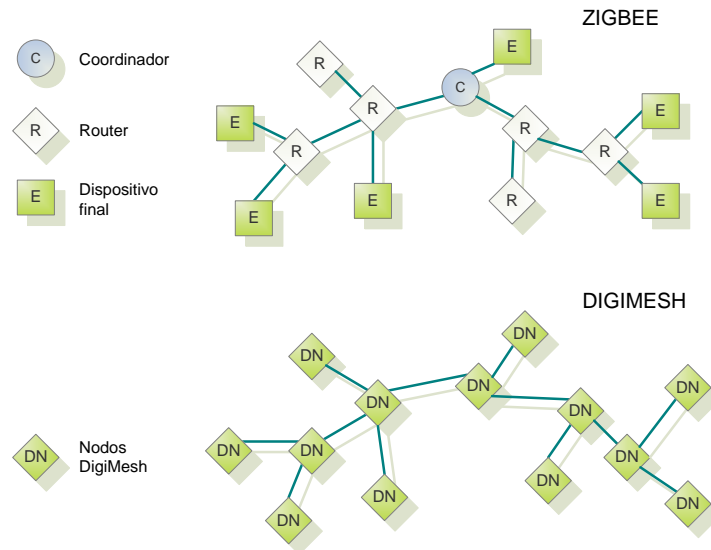


Figura 18: Estructura funcional de una WSN con topología compleja y desagregada

Una de las compañías más reconocidas que produce dispositivos ya sea con el protocolo de bajo nivel como con protocolos de alto nivel, es la empresa Digi International Inc. (los mismos desarrolladores del protocolo Digimesh mencionado en los párrafos anteriores). Una línea de productos de la compañía Digi, es la denominada como XBee. Consiste en un conjunto de módulos para realizar comunicaciones por radiofrecuencia, en los cuales compacta la antena de comunicación, la electrónica de amplificación y acondicionamiento de señal, la electrónica de procesamiento y filtrado y finalmente algunos periféricos como pueden ser entradas y salidas análogas o digitales, puertos de comunicación, entre otros. Dependiendo de la referencia de un módulo XBee, se consigue realizar la comunicación inalámbrica por una de las tres bandas libres anteriormente detalladas. El espectro de frecuencia más trabajado es el que se encuentra alrededor de 2,4 GHz, con un consumo aproximado de 1 mW en estado de transmisión, alcanzando con dicha potencia y una antena de 5 dB una cobertura radial de hasta 500 m en campo abierto. Digi posee otra referencia entre sus módulos XBee que trabaja igualmente en la banda 2,4 GHz, pero con una capacidad de transmisión de hasta 7000m en campo abierto, aumentando claro está su consumo hasta 63 mW. En la Tabla 15 se plasma una comparación de las características técnicas más relevantes de los módulos XBee con protocolo de comunicación 802.15.4.

Como se puede observar en los anteriores párrafos, algunos de los temas han sido planteados de forma introductoria. En apartados posteriores se especificará con mayor detalle ciertos temas técnicos a la luz de los productos que es posible adquirir comercialmente y de la bibliografía existente alrededor de los mismos. Siguiendo con la definición de los componentes que conforman un nodo de la WSN requerida (Figura 19) se decidió acotar que cada nodo tuviese un consumo de corriente aproximado de 10mA en modo encendido, con el fin de optimizar la descarga de energía contenida en una batería de Li-Ion recargable. Así como existía un modo de encendido, debía incorporarse en el procesamiento otros modos de consumo o funcionamiento, característica posible con los nuevos microcontroladores y microprocesadores:

- Modo de encendido, consumo aproximado: 10mA
- Modo de reposo, consumo aproximado: 70µA
- Modo de hibernación, consumo aproximado: 1µA

Tabla 15: Principales características de los módulos XBee con protocolo de comunicación inalámbrica IEEE 802.15.4

<i>Plataforma</i>	<i>XBee 802.15.4 (Series 1)</i>	<i>XBee-PRO 802.15.4 (Series 1)</i>	<i>XBee-PRO XSC</i>
Desempeño			
Velocidad de transmisión de datos en RF	250 kbps	250 kbps	10 kbps / 9,6 kbps
Alcances en interiores/urbano	30 m	100 m	370 m
Alcances en exteriores línea vista	100 m	1,6 km	9.6 km
Potencia de transmisión	1 mW (+0 dBm)	60 mW (+18 dBm)	100 mW (+20 dBm)
Sensibilidad de recepción (1% PER)	-92 dBm	-100 dBm	-106 dBm
Características			
Interfaz serial de datos	3,3 V CMOS UART	3,3 V CMOS UART	3,3 V CMOS UART
Método de configuración	Comandos API o AT, local o a distancia	Comandos API o AT, local o a distancia	Comandos AT
Banda de frecuencia	2,4 GHz	2,4 GHz	902 MHz a 928 MHz
Inmunidad a la interferencia	DSSS	DSSS	FHSS
Velocidad de transmisión de datos	1200 bps – 250 kbps	1200 bps – 250 kbps	1200 bps – 57,6 kbps
Entradas ADC	(6) Entradas de 10 bits	(6) Entradas de 10 bits	Ninguna
I/O Digitales	8	8	Ninguna
Opciones de antena	Chip, alambre, U.FL y RPSMA	Chip, alambre, U.FL y RPSMA	Alambre, U.FL y RPSMA
Redes y seguridad			
Encriptación	128-bits AES	128-bits AES	No
Confiabilidad de entrega de paquetes	Reintentos / Admitidos	Reintentos / Admitidos	Reintentos / Admitidos
IDs y canales	PAN ID, MAC IEEE de 64-bits, 16 canales	PAN ID, MAC IEEE de 64-bits, 12 canales	PAN ID, direcciones de 32-bit, 7 canales
Requerimientos de potencia			
Voltaje de alimentación	2,8 a 3,4 VDC	2,8 a 3,4 VDC	3,0 a 3,6 VDC
Corriente de transmisión	45 mA @ 3,3 VDC	215 mA @ 3,3 VDC	Típicamente 265 mA
Corriente de recepción	50 mA @ 3,3 VDC	55 mA @ 3,3 VDC	Típicamente 65 mA
Corriente de apagado	<10 µA @ 25° C	<10 µA @ 25° C	45 µA terminal

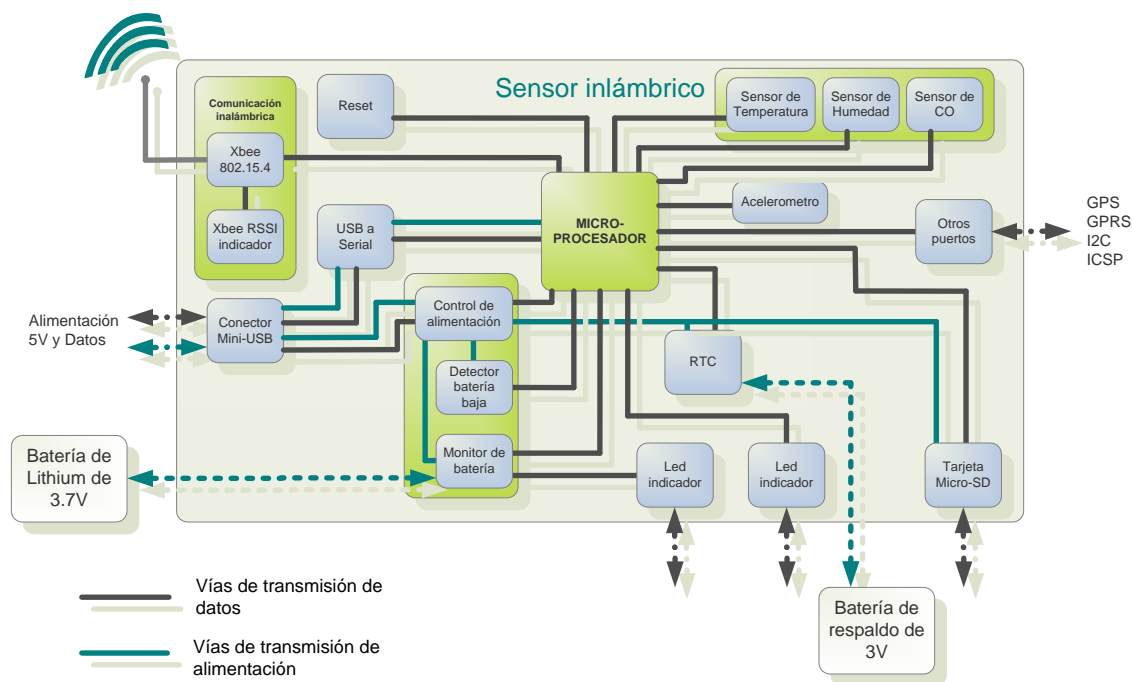


Figura 19: Diagrama de bloques de las partes del dispositivo

A.6.5.2. WSN prototipo y comerciales

Actualmente existen variados prototipos que han sido desarrollados en proyectos de investigación sobre WSN. En la *Tabla 16* se observan algunos trabajos publicados en diferentes sectores (Dargie & Poellabauer, 2010). Algunos de ellos se han llevado a la producción y comercialización, pero son solo unas pocas compañías las que ofrecen productos acabados para la implementación de WSNs, y muchas las que brindan servicios y soluciones con tecnología de otros fabricantes. Sin embargo, la anterior afirmación tenderá a cambiar con el transcurrir de los años, ya que es en las últimas dos décadas que los fabricantes de semiconductores, al ver el gran potencial económico de producir microprocesadores de bajo consumo y altas prestaciones, que han apostado por el desarrollo de productos muy convenientes para las WSNs.

Tabla 16: Resumen de prototipos realizados en diferentes aplicaciones

<i>Aplicación</i>	<i>Proyecto</i>	<i>Documento</i>	<i>Notas</i>
Monitoreo del estado de las estructuras	Wisden	Xu <i>et al</i> , 2004 Chintalapudi <i>et al</i> , 2006	Detección de vibraciones
	Para el Golden Gate Bridge	Kim <i>et al</i> , 2007	Detección de vibraciones
Control de tráfico	Monitoreo tráfico áreas urbanas	Knaian, 2000	Detección magnética de vehículos
	Movimiento de vehículos militares	Arora, <i>et al</i> , 2004	Detección magnética de vehículos y soldados
Cuidado de la salud	Microsensores en retinas artificiales	Schwiebert <i>et al</i> , 2001	Detección de luz por medio de semiconductores
	Monitoreo de pacientes de Parkinson	Lorincz <i>et al</i> , 2009	Detección de movimiento por acelerómetros

Tabla 16: Resumen de prototipos realizados en diferentes aplicaciones (Continuación)

	Monitoreo de pacientes de Parkinson	Weaver, 2003	Detección de movimiento por acelerómetros en 3D
Válvulas	PipeNet	Stoianov <i>et al</i> , 2007	Detección de pH y presión
Agricultura de precisión	Monitoreo en el sur de España	Riquelme, 2009	
	Monitoreo en US	Pierce <i>et al</i> , 2008	
	Variación de temperatura en viñedos	Beckwith <i>et al</i> , 2004	Detección de temperatura y humedad
	Lofar Agro (Control de la Phitophthora)	Baggio, 2005	Detección de temperatura y la humedad
	Monitoreo en India	Panchard <i>et al</i> , 2007	
	Monitoreo en Italia	Matese <i>et al</i> , 2009	
Volcanes activos	Monitoreo de actividad de volcanes en Ecuador	Werner-Allen <i>et al</i> , 2006	Detección de movimiento y sonido
Minería subterránea	Monitoreo en una mina de carbón	Li <i>et al</i> , 2009	
	Localización en minas subterráneas	Chehri <i>et al</i> , 2009	Detección de localización por algoritmos

Entre las razones que explican la variedad de prototipos y el creciente número de empresas creadas para ofertar soluciones con WSNs, se encuentra el amplio abanico de necesidades presentes en diferentes ámbitos, la especificidad de alguno de los requerimientos (Schwiebert *et al*, 2001; Albarakati, 2015), y la aproximación a un comportamiento estable de la tecnología (Römer, 2004). Se intenta así en varias publicaciones, hacer una división por sectores de aplicación sin que interese si se hace uso de prototipos o productos comerciales (Yick *et al*, 2008; García-Hernández *et al*, 2007; Akyildiz *et al*, 2002). Yick *et al* (2008) por ejemplo, consigue dividir y describir estructuralmente los tipos de WSN en cuatro sectores fundamentales:

- WSN terrestres
- WSN subterráneas
- WSN subacuáticas
- WSN multi-medios
- WSN móviles

Sin embargo, los fabricantes más conocidos solo ofrecen dispositivos multipropósito. Nuevamente Yick *et al* (2008) en uno de sus anexos, (Tabla 17), expone una muestra de algunas de las compañías que manufacturan nodos para realizar WSN, y de acuerdo a las características técnicas de cada producto, intenta plasmar el sector al que más se adecuan.

Tabla 17: Muestra de algunos fabricantes de dispositivos multipropósito para WSN (Yick et al (2008))

<i>Compañía</i>	<i>Aplicación del sensor</i>	<i>Tecnología del sensor</i>	
Crossbows	Monitoreo sísmico de estructuras Monitoreo ambiental en interiores y exteriores Monitoreo para la seguridad, la protección y la vigilancia Monitoreo de inventario Monitoreo de la salud	Motes	Mica2, Mica2Dot, MicaZ
		Nodo concentrador	Stargate, MIB600
		Tarjeta de interface:	MIB600 Ethernet, MIB510 Serial, MIB520 USB
Wisden	Aplicaciones de monitoreo interior y exterior	Motes	T-mote sky
		Nodo concentrador	T-mote connet
Dust Networks	Monitoreo y automatización de edificios Monitoreo de procesos industriales Monitoreo para la seguridad y la defensa	SmartMesh-XT motes	M1030, M2030, M2135
		SmartMesh-XT administrador	PM1230, PM2030, PM2130
Millennial net	Monitoreo en edificios Monitoreo de procesos industriales	MeshScape 916 MHz y 2.4 MHz	Mesh node, mesh gate, node
		Mesh 485	Mesh sub-based router, mesh router, mesh bridges
Sensicast	Monitoreo industrial de temperatura y energía	Nodos	Sensicast EMS y RTD
		Otros	Puerta de enlace y Puente Sensicast, enrutador de red

Watteyne *et al* (2012) hace un resumen actualizado de las plataformas de hardware que se pueden encontrar comercialmente, algunas de las cuales se indican en la *Tabla 17*. En la *Tabla 18*, *Tabla 18: Resumen de alternativas comerciales (Watteyne et al, (2012)) (Continuación)*

TelosB/T-Mote Sky	TI MSP430	Chipcon CC2420
Tinynode	TI MSP430	Semtech SX1211
Waspote	ATmega 1281	ZigBee/802.15.4/DigiMesh/RF
Zolertia Z1	TI MSP430F2617	Chipcon CC2420

Tabla 19 y *Tabla 20* se puede encontrar dicho resumen anexando algunas filas que corresponden a dispositivos que se encuentran en el mercado recientemente.

Tabla 18: Resumen de alternativas comerciales (Watteyne et al, (2012))

<i>Nombre</i>	<i>Microprocesador</i>	<i>Radio</i>
Arduino	ATmega 1281	DigiMesh/RF
AVRraven	ATmega1284p + ATmega3290p	AT86RF230
BTnode	ATmega 128L	Chipcon CC1000 (433–915 MHz) and Bluetooth (2.4 GHz)
EZ430-RF2500	TI MSP430	CC2500
Iris Mote	ATmega 1281	AT86RF230
FireFly	TI MSP430	Chipcon CC2420

MicaZ	ATmega 128L	TI CC2420
KMote	TI MSP430	Chipcon Wireless Transceiver 2.4 GHz 802.15.4
RedWire-Redbee	MC13224V	MC13224V SoC 2.4 GHz 802.15.4
Shimmer	TI MSP430	TI CC2420
SunSPOT	ARM 920T	TI CC2420

Tabla 18: Resumen de alternativas comerciales (Watteyne et al, (2012)) (Continuación)

TelosB/T-Mote Sky	TI MSP430	Chipcon CC2420
Tinynode	TI MSP430	Semtech SX1211
Waspote	ATmega 1281	ZigBee/802.15.4/DigiMesh/RF
Zolertia Z1	TI MSP430F2617	Chipcon CC2420

Tabla 19: Sistemas operativos soportados (Watteyne et al, (2012))

<i>Nombre</i>	<i>Microprocesador</i>	<i>Radio</i>
Arduino	8K SRAM	Arduino libraries
AVRraven	128K Flash + 16K RAM	BitCloud + Contiki + TinyOS
BTnode	64K Flash + 180K RAM	BtNut/OS + TinyOS
EZ430-RF2500	4K RAM	Simplicity + Contiki + TinyOSa
Iris Mote	8K RAM	Contiki + TinyOS
FireFly	8K RAM	Nano-rk RTOS + TinyOS
MicaZ	4K RAM	Contiki + TinyOS
KMote	10K RAM	Contiki + TinyOS
RedWire-Redbee	120K Flash + 96K RAM	Contiki + TinyOS
Shimmer	48K Flash + 10K RAM	TinyOS + C library
SunSPOT	512K RAM	Squawk Java ME virtual machine
TelosB/T-Mote Sky	10K RAM	Contiki + TinyOS + MantisOS + SOS
Tinynode	8K RAM	Contiki + TinyOS
Waspote	8K SRAM	Arduino libs + Libellium libs
Zolertia Z1	8K RAM	Contiki + TinyOS

Tabla 20: Valor promedio de las plataformas más conocidas en el momento

<i>Nombre</i>	<i>Microprocesador</i>	<i>Radio</i>
Arduino	Acelerometro en la tarjeta + disponibilidad de múltiples extensiones	58 s/u (minimum) + extensions (102 €/u)
AVRraven	Pantalla LCD	35 €/u
BTnode	Ninguna	165 €/u
EZ430-RF2500	Temperatura	19 €/u

Iris Mote	None on board, 51-pin port for expansion	82 €/u + sensor board
FireFly	Movimiento + luminosidad + temperatura aceleración y almacenamiento en memoria FLASH todo en la misma tarjeta	120 €/u
MicaZ	Ninguna en tarjeta, 51-puertos para expansión	70 €/u + sensor board

Tabla 20: Valor promedio de las plataformas más conocidas en el momento (Continuación)

KMote	Temperatura + pantalla LCD y otras versiones con sensores integrados de humedad + temperatura + luminosidad	29 €/u production cost (open hardware), sold at 47 s (KMote-BR)
RedWire-Redbee	Ninguna	39 €/u
Shimmer	Acelerometro en 3-ejes	147 s/u (a kit is the minimum purchase 1200 s)
SunSPOT	Acelerometro en 3 ejes + temperatura + luminosidad	89 €/u (a kit is the minimum purchase 600 s)
TelosB/T-Mote Sky	Humedad + temperature + luminosidad	98 €/u
Tinynode	Temperatura	91 €/u
Waspnode	Acelerometro en 3 ejes + temperatura + almacenamiento en memoria FLASH + puerto de expansión para múltiples sensores todo en la misma tarjeta	95 €/u
Zolertia Z1	Temperatura + acelerometro en 3 ejes + puerto para extensiones	75 €/u

A.6.5.3. Estándares en la comunicación de las WSN

Como se comentó al inicio de la presente sección, en el campo de las WSN han surgido variadas propuestas de protocolos propietarios. Sin embargo, es un planteamiento de desarrollo limitado ya que impide generar interconectividad. Ante el limitante, algunas instituciones y agrupaciones de compañías decidieron trabajar en pro del desarrollo de estándares de comunicación inalámbricas. Entre las instituciones más reconocidas que se sumaron a la tarea se encuentra la IEEE, dividiendo el desarrollo de los estándares en grupos de trabajo. Es por lo anterior que Gutierrez *et al* (2001) explica que mientras la mayoría de los grupos de trabajo para el estándar IEEE 802 inalámbrico se concentraron en la mejora y aumento de las tasas de transmisión de datos, rendimiento y calidad de servicio, los grupos de trabajo para el estándar 802.15.4 LR-WPAN apuntan a otros objetivos. Los enfoques del estándar 802.15.4 se encuentran en la reducción del consumo de energía, de los costes y de las tasas de transferencia de datos, con el fin de conectar dispositivos que no habían sido enlazados en red o a una red.

García-Hernández *et al* (2007) menciona además en uno de los apartados de su estado del arte sobre WSN, que dicho trabajo de realización de estándares, también fomenta un mejor nivel de conectividad con otros tipos de redes, permitiendo a los productos con bajo volumen de producción y que no les justifica el desarrollo de una solución propietaria, que puedan conectarse de forma inalámbrica.

Para el estándar 802.15.4, dos especificaciones de capas físicas fueron elegidas: la capa física que trabaja en la banda de radiofrecuencia de 2,4 GHz con autorización para su uso a nivel mundial y la capa que estipula la combinación de las bandas de 868 MHz para Europa, 902MHz para Australia, y 915 MHz para los Estados Unidos. En tales bandas es que se soporta el Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS).

Paralelo al desarrollo de la familia de estándares 802, la IEEE propuso en 1997 otra familia de estándares para interconexión de pequeños dispositivos transductores denominada IEEE 1451, con la cual se observó que las WSN podrían aprovecharse de su formalización. Describe pues un conjunto de interfaces abiertas, comunes e independientes de un enlace a una red para la conexión de los transductores (sensores o actuadores) a microprocesadores, sistemas de instrumentación, y redes de campo para realizar control. La característica principal de estas normas es la definición de una Hoja Electrónica de Datos de Transductores (TEDS). Las TEDS se hacen efectivas en un dispositivo de memoria conectado al transductor, el cual almacena la identificación del transductor, calibración, los datos de corrección, y la información relacionada con el fabricante. El objetivo entonces del estándar 1451 es permitir el acceso de los datos provenientes de las diferentes interfaces que se encuentran conectadas en un transductor, a sistemas o redes cableadas o inalámbricas por medio de la definición de una interfaz global y común (Figura 20). La IEEE P1451.5 específicamente, define la interfaz de Procesador de Aplicaciones con Funciones de Red (NCAP) y TEDS para transductores inalámbricos. Los estándares inalámbricos tales como 802.11 (WiFi), 802.15.1 (Bluetooth), 802.15.4 (ZigBee) están siendo consideradas como algunas de las interfaces físicas para el estándar IEEE 1451.5 (García-Hernández *et al*, 2007; Higuera *et al*, 2012).

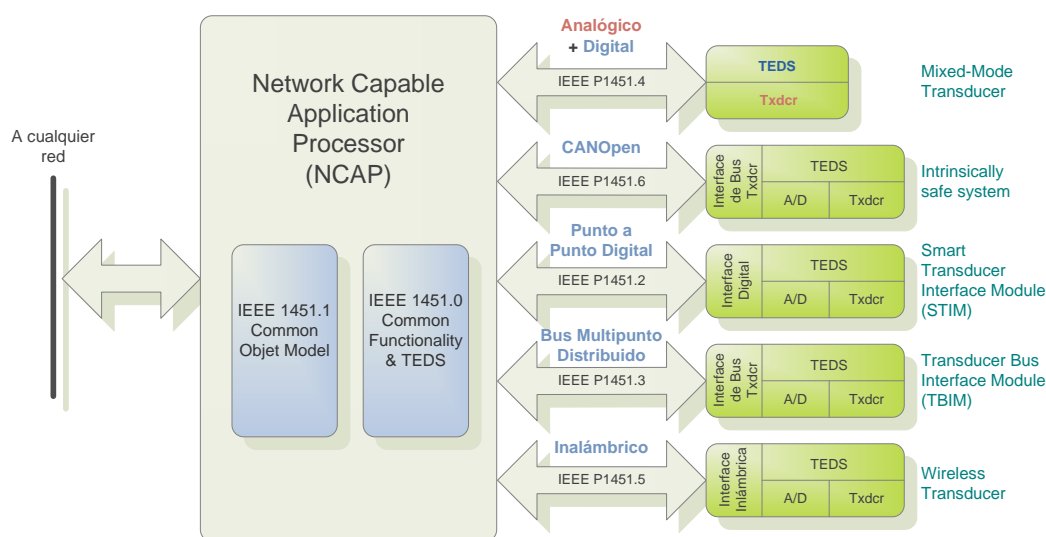


Figura 20: Diagrama de bloques de las partes del dispositivo

Como se observa en los anteriores párrafos, se han realizado diferentes estándares para la comunicación entre las WSNs. Sin embargo, en los nodos comerciales sólo se han logrado posicionar algunos, los cuales se ingresan en la Tabla 21 junto con sus principales características.

Tabla 21: Principales características de los estándares para la comunicación inalámbrica en las WSNs

Estándar	Frecuencia	Zona de uso	Protocolo	Antena SMA		Antena On-Chip	
				Potencia	Distancia	Potencia	Distancia
IEEE 802.11 (WiFi – IEEE 802.11g)	2.4GHz	Todo el mundo	802.11b/g	12dbm	100 – 300m	-	-
802.15.4			1mW	500m	1mW	100m	
802.15.4 - Pro			63mW	7Km	63mW	360m	

ZigBee (IEEE 802.15.4)			ZigBee – Pro	2mW	500m	2mW	100m
ZigBee – Pro (IEEE 802.15.4)				50mW	7Km	50mW	360m
Bluetooth (IEEE 802.15.1)			802.15.1	-	-	2.5dbm	30 – 100m

Tabla 21: Principales características de los estándares para la comunicación inalámbrica en las WSNs (Continuación)

Wibree			802.15.1	-	-	-6dbm	10m
6lowpan (IEEE 802.15.4)			802.15.4	-	-	-	-
868	868MHz	Europa	RF	315mW	12Km	-	-
900	900MHz	EEUU y Canadá		50mW	10Km	-	-
XSC				100mW	12Km	-	-

De los protocolos más establecidos en los diferentes dispositivos comerciales, es posible realizar un compendio con las características más relevantes. Estas se pueden observar en la *Tabla 22*.

A.6.5.4. Sistemas de alimentación

En las WSNs uno de los mayores retos se encuentra en la batería que soporta los dispositivos que conforman dicha red, sobre todo cuando crece el número de nodos. Existen dos alternativas actualmente que dan respuesta a tal reto (Knight *et al*, 2008):

- Utilizar fuentes de energía con mayor densidad de almacenamiento de energía
- Generar localmente la energía necesaria para la alimentación del nodo

Investigaciones en diferentes ámbitos y bajo variados enfoques se están desarrollando en el momento, pues la forma de suplir la energía requerida para el funcionamiento de cada nodo en la gran mayoría de las aplicaciones es por medio de baterías recargables, baterías que permiten sólo un periodo limitado de entrega de corriente. Para la fabricación de estos dispositivos de alimentación, se hace uso de componentes químicos tóxicos como es el Níquel y metales pesados como el Cadmio, dificultando además su eliminación y reciclaje.

Tabla 22: Comparación de los estándares de comunicación inalámbrica más extendidos

<i>Característica</i>	<i>WiFi (IEEE 802.11.g)</i>	<i>Bluetooth (IEEE 802.15.1)</i>	<i>ZigBee (IEEE 802.15.4)</i>
Radio	DSSS, (Direct Sequence Spread Spectrum)	FHSS, (Frequency Hopping Spread Spectrum)	DSSS, (Direct Sequence Spread Spectrum)
Velocidad	54 Mbps	1 Mbps	250 kbps
Nº nodos por master	32	7	64000
Latencia	≈ 3s	≈ 10s	≈ 30ms
Tipo de datos	Video, audio, gráficos, ficheros	Audio, gráficos, ficheros	Pequeños paquetes de datos

Expansión	Roaming	No	Si
Duración batería	≈ 12 a 48 horas	≈ 1 semana	≈ 100 a 1000 días
Complejidad	Complejo	Muy complejo	Sencillo
Aplicación principal	WLAN	WPAN	Control y monitorización
Memoria necesaria	1 MB+	250 KB	4 KB – 32 KB
Parámetros más importantes	Velocidad y flexibilidad	Costes y perfiles de aplicación	Fiabilidad, bajo consumo y bajo coste

A pesar de la inminente necesidad de nuevas alternativas de alimentación para los circuitos electrónicos, las opciones disponibles comercialmente se reducen a unas pocas. Algunos desarrollos innovadores se encuentran aún en fase de prototipado o en prueba en laboratorio. La empresa Libelium por ejemplo, en su catálogo comercial, ofrece para la alimentación de los nodos tan solo los dispositivos que se presentan en la *Tabla 23*. Las opciones presentadas no varían con los demás fabricantes de nodos para WSN.

Entre los trabajos realizados alrededor del tema se encuentran Chandrakasan *et al* (2002), Kahn, J.M *et al* (1999), Rabaey *et al* (2000), Rughunathan *et al* (2002) y en particular Roundy *et al* (2004), Karl *et al* (2007) y Knight *et al* (2008).

Tabla 23: Ejemplo de opciones de alimentación comerciales

Característica	WiFi (IEEE 802.11.g)	Bluetooth (IEEE 802.15.1)	ZigBee (IEEE 802.15.4)
Batería	Li-ion recargable	1150mAh	10€
		2300mAh	18€
		6600mAh	30€
	No recargable	13000mAh	55€
Panel solar		Rígido 7V – 500mA	30€
		Flexible 7.2V – 100mA	34€
Conector USB		USB – 220V	3€
		USB – Mechero coche	3€

Baterías tradicionales: La fuente de poder de un sensor inalámbrico es comúnmente una batería, algunas veces no recargable (“batería primaria”) o si existe una forma de conexión a un suministro de energía externa y hay componentes electrónicos que mantener energizados aunque se presente un corte en la alimentación principal, se instalan también baterías no recargables (“batería secundaria”) (*Tabla 24*). De una forma u otra, las baterías son almacenamientos de energía electroquímicos, razón por la cual dichos componente químico se convierten en el factor determinante de la tecnología de la batería.

Aunque es común a cualquier tipo de batería, en particular a las baterías tradicionales se les exige parámetros de funcionamiento con altas estándares. Entre las variables que se evalúan se encuentran:

- Gran capacidad
- Gran capacidad con carga
- Correcta descarga

- Recarga eficiente
- Efecto de relajación óptimo

Tabla 24: Densidades de energía para varias baterías primarias y secundarias (Roundy *et al*, 2004)

<i>Batería</i>	<i>Elemento químico</i>	<i>Energía [J/cm³]</i>
Primaria	Aire-Zinc	3780
	Lithium	2880
	Alcalina	1200
Secundaria	Lithium	1080
	NiMHd	860
	NiCd	650

Almacenamiento de energía no convencionales: Fuera de las baterías tradicionales, existen otras formas de reservorios de energía que pueden ser contempladas. En un sentido más amplio, las pilas de combustible también se clasifican como un almacenamiento electroquímico de energía, produciendo directamente la energía eléctrica mediante la oxidación combustibles hidrogenados o de hidrocarburos. Las pilas de combustible tienen realmente una excelente densidad de almacenamiento de energía (por ejemplo, el metanol como combustible almacena 17,6 kJ/cm³) pero los sistemas actualmente disponibles no poseen los tamaños apropiados para la aplicación en WSN, ya que se requiere bombas, válvulas y demás. Un enfoque ligeramente más tradicional a la utilización de la energía almacenada en hidrocarburos es la de utilizar una versión miniatura de los motores térmicos, por ejemplo, una turbina (Epstein *et al*, 2004). La disminución de estos motores de calor a las dimensiones requeridas todavía requiere un considerable esfuerzo de investigación en sistemas microelectromecánicos (MEMSs) (Roundy *et al*, 2004). Las alternativas para la generación y almacenamiento de energía son variadas, incluso sustancias radioactivas se han propuesto como almacenamiento (Lal *et al*, 2004). También es posible encontrar los llamados “gold caps”, condensadores de alta calidad y alta capacidad que pueden almacenar cantidades de energía relativamente grandes, los cuales poseen una rápida y fácil recarga, y no se desgastan con el tiempo (Knight *et al*, 2008) (Duffy *et al*, 2008).

Convertidores DC – DC: Desafortunadamente, las baterías (u otras formas de almacenamiento de energía) por sí solos no son suficientes como una fuente de alimentación directa para un sensor inalámbrico. Un problema típico es la reducción del voltaje de una batería cuando su capacidad disminuye. Un detrimento en la cantidad de energía que se suministra a los circuitos del nodo sensor, repercute inmediatamente en funcionamiento regular del dispositivo. Se altera por ejemplo la frecuencia del oscilador principal y se rebaja la potencia en la transmisión: un nodo con una carga de batería débil, tendrá un alcance de transmisión de datos menor que uno con una batería totalmente cargada, sumado a que probablemente se genere una descalibración de algunos de los componentes electrónicos, pues fueron tales calibraciones realizadas cuando la batería suministraba una energía constante.

Un convertidor DC - DC se puede acondicionar para ayudar a superar el problema comentado. Se logra con la regulación de la tensión suministrada a la circuitería del nodo. Para asegurar una tensión constante cuando la batería se esté descargando, el convertidor DC - DC se diseña para proveer cada vez más corriente, aunque se acelere con ello la descarga total de la batería (Raghunathan *et al*, 2002). Además, el convertidor DC - DC consume energía para su propio funcionamiento, lo que reduce la eficiencia global. Pero las ventajas de su operación durante el ciclo de vida de la batería pueden superar estos los contras de su integración en un sistema embebido.

Energía generada in-situ: Algunas formas de almacenamiento de energía no convencionales se han descrito anteriormente: las baterías de combustible, mini motores térmicos, radiactividad. Pero el suministro total de energía se almacena en el nodo y una vez que el combustible o la carga se agote, el nodo dejará de funcionar.

Para asegurar un funcionamiento ininterrumpido de los nodos y por ende de una WSN, se requiere un medio de suministro de energía diferente a la que provee un dispositivo de almacenamiento. Es por esto que la energía en el ambiente que rodea un nodo, debe ser aprovechada y puesta a disposición del dispositivo. Debe darse entonces una generación de energía in situ y constante. Existen varias propuestas que se pueden observar en Rabaey *et al* (2000), Roundy *et al* (2004), Karl *et al* (2005), Knight *et al* (2008) y Beeby & White (2014). Algunas alternativas mencionadas son:

- Generación fotovoltaica
- Gradientes de temperatura
- Vibraciones
- Variaciones de presión
- Flujo de aire y líquido

Un breve comparación de las diferentes fuentes de energía es posible encontrarla en la *Tabla 25* (Rabaey *et al*, 2000)

Tabla 25: Comparación de fuentes de energía

<i>Fuente de energía</i>	<i>Densidad de energía</i>	<i>Capacidad de la energía</i>
Baterías (aire-zinc)	1050 – 1060 mWh/cm ³	
Baterías (recargables de lithium)	300 mWh/cm ³ (para 3 – 4V)	
Solar (exterior)		15 mW/cm ² (sol directo) 0.15 mW/cm ² (día nublado)
Solar (interior)		0.006 mW/cm ² (en un escritorio estándar) 0.57 mW/cm ² (lámpara de escritorio <60W)
Vibraciones		0.01 – 0.1 mW/cm ³
Ruido acústico		3*10 ⁻⁶ mW/cm ² a 75 dB 9,6*10 ⁻⁴ mW/cm ² a 100 dB
Sistema pasivo de tracción humana		1.8 mW (insertado en los zapatos)
Reacción nuclear		80 mW/cm ³ , 106 mWh/cm ³

A.6.5.5. Punto(s) de acceso de comunicación

La comunicación se realiza entre los diferentes nodos de forma dinámica, siendo posible la búsqueda automática de caminos virtuales alternativos para el envío de la información a una estación base, como se ejecuta en una red teleinformática normalmente (*Figura 21*). Se considera entonces que dicha estación base puede ser la central de procesamiento para el almacenamiento, análisis, modelado y visualización, o un punto intermedio de recolección, puente y conversión a otra tecnología de comunicación mucho más potente, y por lo tanto con capacidad de transmisión de la información a distancias mayores. En ambos casos esta estación base por lo general se ubica en un lugar donde se pueda proveer alimentación de una red eléctrica, regulada y estabilizada.

Actualmente las tres tecnologías más extendidas para los puntos de acceso de comunicación son las siguientes:

- Enviar la información a una red bajo el estándar Ethernet o en el caso en el cual la WSN se encuentre ubicada en un ambiente electromagnéticamente ruidoso, Industrial Ethernet
- Transmitir la información a ordenadores remotos gracias a la disposición de un punto de acceso a Internet (lo cual puede incluir una red inalámbrica WIFI)
- Comunicación por medio de una red GPRS (red de teléfonos móviles)

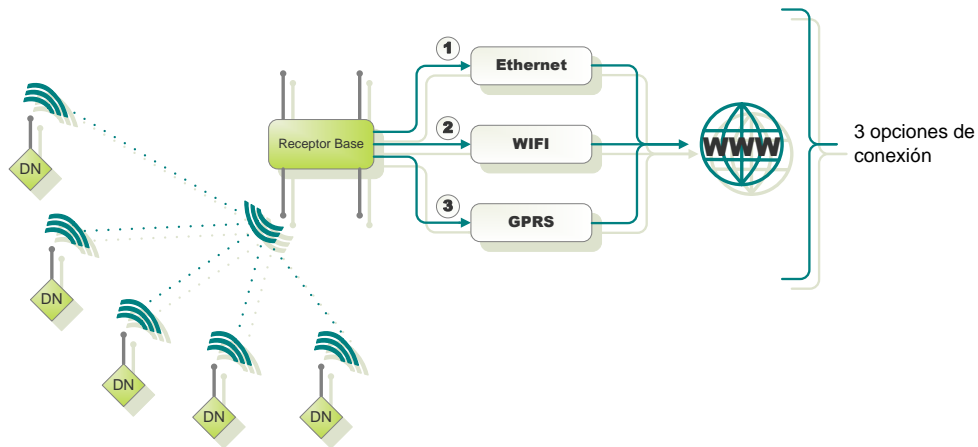


Figura 21: Opciones de conexión con el receptor base

La combinación de las anteriores tecnologías sería el objetivo a ser alcanzado, pues en el caso más crítico de desconexión o caída del punto de acceso a Internet, los mensajes de alerta de prioridad crítica, serían enviados por medio de la red GPRS haciendo uso del servicio SMSs. Es también posible con la combinación de tecnologías, un almacenamiento ordenado intermedio en ordenadores o puntos de procesamiento gracias a la red Ethernet, y al disponer del acceso a la red Internet, es posible consultar el estado del área controlada, así como del sistema desde cualquier parte del mundo, sumado al respaldo seguro de los historiales generados en la toma continua de datos.

A.6.5.6. Punto de recepción central

El centro de recepción central en la mayoría de los casos se conforma por medio de un ordenador de notables características técnicas. Su ubicación dependerá de la conveniencia del caso, es decir, cerca del área de instalación de la WSN, caso en el cual se acoplaría también el receptor base, o ya en un punto geográfico remoto y comunicado por medio de Internet con el receptor base (*Figura 22*). Para este componente de la WSN, por lo general se crean habitaciones especiales, dado que debe cumplir parámetros constantes de seguridad, refrigeración y estanqueidad.

En el centro de recepción central las principales tareas a realizar son:

- Almacenamiento en tiempo real
- Almacenamiento de históricos en bases de datos (Programadas en lenguaje SQL)
- Almacenamiento automático y cronológico de los avisos, alertas y alarmas del sistema
- Visualización de las variables adquiridas

- Visualización del estado de funcionamiento del sistema (En lo que se incluiría mapas con herramientas GIS para su representación y ubicación geográfica)
- Visualización priorizada de avisos, alertas y alarmas del sistema
- Generación de reportes dinámicos para el posterior análisis del comportamiento del sistema o edición de informes
- Dirección de los respaldos de la información en ordenadores remotos
- Control de acceso de usuarios para la visualización, consulta o manipulación del sistema (Diferenciación del nivel de acceso de los usuarios)
- Albergue del sistema de análisis y modelado con los datos históricos

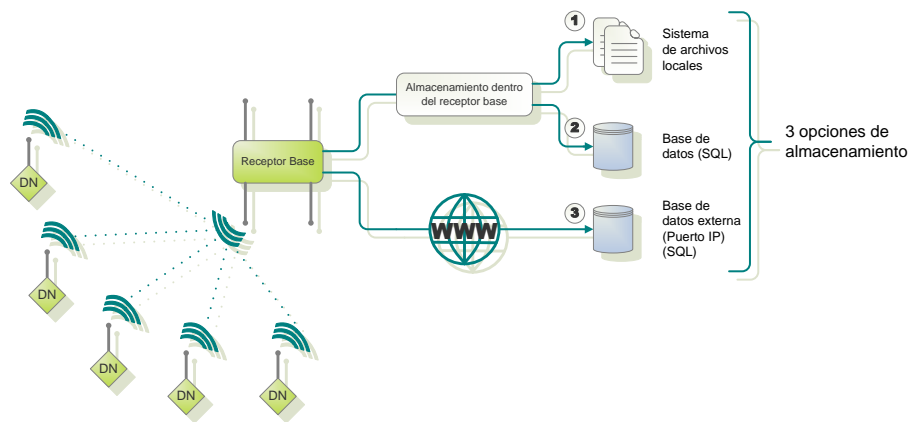


Figura 22: Opciones de almacenamiento con el receptor base

A.7. PROGRAMACIÓN AVANZADA CON REDES DE PETRI

Los PLC's son ordenadores diseñados para trabajar en ambientes industriales, como lo es un invernadero, con la finalidad de controlar una amplia gama de procesos productivos.

La construcción y funcionamiento del PLC es un tema estudiado en la literatura (Moon, 1994; Frey, 2000; García Moreno, 2001; Pérez *et al*, 2009; Vyatkin, 2013), y su desarrollo se ha nutrido de los avances en microprocesadores, memorias y lenguajes de programación, con la diferencia de que el PLC está diseñado para ambientes hostiles donde la humedad, las vibraciones y el polvo son condiciones inherentes de los procesos productivos. En el caso de un dispositivo electrónico ubicado en un recinto como es el cultivo bajo invernadero, la humedad y las temperaturas críticas de funcionamiento son los eventos más comunes a los que debe exponerse y demostrar un correcto funcionamiento.

Existen varios métodos formales para definir algoritmos de control con los que son programados los PLC's, entre ellos, la teoría de autómatas finitos, la lógica temporal, el lenguaje Z, etc. Sin embargo, estas técnicas no son utilizadas ni aceptadas por fabricantes de PLC's para la programación de sus productos. Los fabricantes han estandarizado sus lenguajes en la norma IEC 61131-3 (John, 2010), pero dicha norma sólo describe los lenguajes, no las metodologías de diseño. Se ha adoptado el Grafcet como aproximación en la norma IEC 60848 (David, 1995), pero ésta carece de partes esenciales en el diseño de algoritmos para controladores, tal como el levantamiento de requerimientos, los criterios de aceptación, el proceso de validación del algoritmo, etc.

La importancia de los métodos de diseño formales, validados y verificados, es que permiten contar con algoritmos de control computacionalmente más eficientes, más seguros y más fáciles de implementar. Dichos métodos formales pretenden resolver los problemas en forma sistemática.

En el área de las ciencias de la computación, surgen en 1962 las PN en la tesis de disertación de Carl Petri. Las PN son un formalismo matemático para el modelado del flujo asincrónico de información (Peterson, 1981). Según Murata (1989), las PN se utilizan para el modelado de sistemas que demandan procesos de cómputo concurrentes.

Actualmente, las PN se constituyen en una herramienta fundamental para el modelado de sistemas dinámicos de eventos discretos (Uzam, 1998; Lee *et al*, 2004a; Lee *et al*, 2004b; Cansever & Kucukdemiral, 2006; Reisig, 2013; entre otros). Se puede decir entonces que existe una amplia lista de referencias donde se desarrolla o utiliza alguna familia de las PN para la obtención de algoritmos de control para PLC.

A.7.1. Redes de Petri

Las Redes de Petri clásicas se conciben como un grafo dirigido que posee dos tipos de nodos principales: los lugares representados por círculos y las transiciones representadas por barras rectangulares (Figura 23). Entre los nodos se ubican los arcos dirigidos, los cuales se encargan de unir las transiciones con los lugares y viceversa. Cada arco dirigido posee un número que indica su peso, el cual determina la cantidad de marcas que consume de un lugar o deposita en un lugar, siempre y cuando se haya disparado una transición habilitada. Los arcos dirigidos sin número se entiende que consumen o depositan una marca. Las marcas se representan en forma gráfica como puntos negros que se ubican dentro de cada lugar.

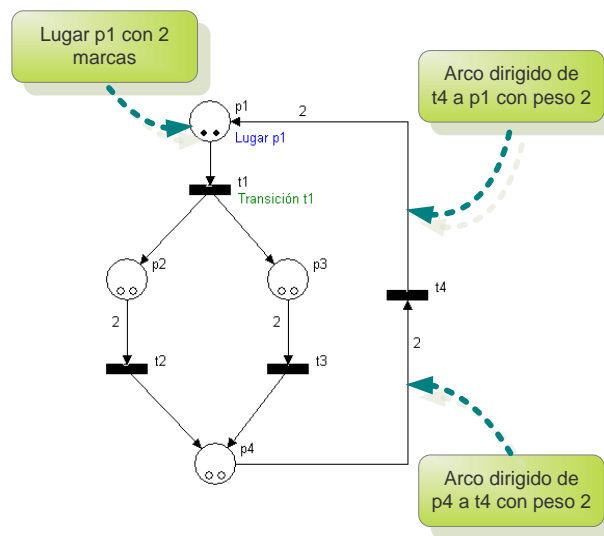


Figura 23: PN de ejemplo con cuatro lugares, cuatro transiciones y 2 marcas de inicio

Formalmente, una Red de Petri se define como una quintupla,

$$PN = (P, T, F, W, M_0)$$

Donde:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ es un conjunto finito de lugares.

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ es un conjunto finito de transiciones.

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ es un conjunto de arcos dirigidos.

$W: F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ es una función de pesos de los arcos.

$M_0: P \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ es el marcado inicial de la red.

$$P \cap T = \emptyset \text{ y } P \cup T \neq \emptyset.$$

El marcado inicial de una PN son las marcas que posee cada lugar de la red en su inicio. Una Red de Petri con la estructura (P, T, F, W) sin especificar su marcado inicial es denotada por N . Por otro lado, una PN con un marcado inicial dado es denotado por $PN=(N, M_0)$.

El comportamiento de los sistemas puede ser descrito en términos de sus estados y sus cambios. En las Redes de Petri, el estado del sistema, o mejor dicho, el marcado de la PN cambia de acuerdo con las siguientes reglas de disparo o transición:

- Se dice que una transición es habilitada si cada lugar de entrada p de t es marcada con al menos $w(p,t)$ marcas, donde $w(p,t)$ es el peso del arco de p a t .
- Una transición habilitada puede o no ser disparada (esto depende solamente del carácter no determinista del evento).
- El disparo de una transición t habilitada remueve $w(p,t)$ marcas de cada lugar de entrada p de t y agrega $w(t,p)$ marcas a cada lugar de salida p de t , donde $w(t,p)$ es el peso de los arcos de t a p .

Las Redes de Petri son nombradas según sus características, por ejemplo, una PN es *ordinaria* si el peso de sus arcos es siempre uno. Se dice que una PN es *pura* si no existen auto bucles. Los auto bucles están definidos como el par lugar y transición, donde el lugar p es el lugar de entrada y salida de la transición t . Además, existen dos tipos de transiciones adicionales, la transición *fuelle* que es aquella que no posee un lugar de entrada y la transición *sumidero* que es llamada transición de *sumidero*.

La fortaleza del modelado de las PN radica en sus propiedades, que se dividen en dos grandes áreas, las dependientes del marcado inicial llamadas propiedades dinámicas o del comportamiento y las propiedades independientes del marcado, llamadas estructurales o estáticas.

A.7.1.1. Principales propiedades dinámicas de las PN

Alcanzabilidad: La alcanzabilidad es la principal propiedad dinámica y consiste en que cada disparo de una transición habilitada modifica la distribución de los marcados dentro de la red, de acuerdo con las reglas de disparo. Una secuencia de disparos generará una secuencia de marcados. Se dice que un marcado M_n es alcanzable desde el macado M_0 si y sólo si existe una secuencia de disparos que transforme M_0 en M_n . La secuencia de disparos se denota por sigma:

$$\sigma = M_0 \ t_1 \ M_1 \ t_2 \ M_2 \ \dots \ t_n \ M_n$$

En este caso, M_n es alcanzable desde M_0 por σ , lo cual se escribe de la siguiente forma: $M_0[\sigma > M_n$. El conjunto de todos los marcados posibles a partir de M_0 es denotado por $R(N, M_0)$ y el conjunto de todos los posibles disparos desde M_0 es denotado como $L(N, M_0)$. El problema de alcanzabilidad consiste en encontrar un $M_n \in R(N, M_0)$.

Limitable o Acotada: una red $PN=(N, M_0)$ se dice limitada si el número de marcas de la red en cada lugar no excede un número finito k para cualquier marcado alcanzable desde M_0 y existirá dentro de todos los posibles marcados de la red, $M(p) \leq k$, y $M(p) \in R(N, M_0)$. Se dice que una red es segura si es acotada a uno, esto es si todos los marcados posibles de los lugares poseerán a lo más una marca.

Vivacidad: Se dice que una red es viva si no importa cuál marcado halla sido alcanzado, siempre será posible una nueva secuencia σ de disparos y alcanzar un nuevo marcado. Esta propiedad lo que indica es que una red viva garantiza una operación libre de bloqueos. Esta propiedad es deseable en la ejecución de programas.

Reversibilidad y estado inicial: De una Red de Petri (N, M_0) se dice que es reversible si para cada marcado M_n existente dentro de $R(N, M_0)$, M_0 es alcanzable desde M_n . De esta forma una PN reversible es aquella donde siempre es posible alcanzar nuevamente el marcado inicial o estado inicial del sistema.

Cobertura: Un marcado M dentro de una PN (N, M_0) en un conjunto de marcados cubiertos o contenido, si existe un marcado M' dentro de $R(N, M_0)$ tal que $M'(p) \geq M(p)$ para cada lugar p dentro de la Red.

Persistencia: Una Red de Petri es persistente si para cualquiera de dos transiciones habilitadas, el disparo de una transición no deshabilitará a la otra transición.

Distancia Sincrónica: Es una métrica asociada al grado de dependencia mutua entre dos eventos en un sistema condición/ evento. La distancia sincrónica de las transiciones t_1 y t_2 en la $PN=(N, M_0)$ está dada por:

$$d_{12} = \max_{\sigma} | \sigma'(t_1) - \sigma(t_2) |$$

donde σ es una secuencia de disparos iniciando en cualquier marcado M perteneciente a $R(N, M_0)$ y $\sigma'(t_i)$ es el número de veces que una transición t_i es disparada en σ .

A.7.1.2. Métodos de análisis de propiedades dinámicas de las PN

Los métodos de análisis de las propiedades dinámicas son tres:

- El árbol de cobertura.
- Matriz de incidencia y ecuación de estado.
- Reglas de reducción.

El árbol de cobertura: Dada la Red de Petri (N, M_0) con marcado inicial M_0 , se puede obtener tantos nuevos marcados como transiciones habilitadas disparadas. Este proceso resulta en un árbol de marcados infinito para una PN no acotada. Para redes acotadas, el árbol de cobertura es llamado *árbol de alcanzabilidad*. El algoritmo para calcular todos los posibles marcados es descrito en detalle por Murata, T. (1982).

Matriz de Incidencia: Para una Red de Petri N con n transiciones y m lugares, la matriz de incidencia es una matriz de enteros de $n \times m$, llamada $A = [a_{ij}]$, y a_{ij} está dada por:

$$a_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^-$$

donde $a_{ij}^+ = w(i, j)$ son los pesos de los arcos de las transiciones i a los lugares de salida y $a_{ij}^- = w(j, i)$ son los pesos de los arcos de los lugares de entrada j a la transición i .

Murata, T. (1982) expone la ecuación de estados de una PN como una ecuación matricial que define el estado de la red, dado un marcado inicial y una secuencia de disparos de transiciones habilitadas. La ecuación fundamental de una PN es:

$$M_d = M_0 + A^T \sum_{k=1}^d U_k$$

Donde M_d es un vector columna de $m \times 1$, el vector de control o vector de disparo llamado U_k es un vector también columna de $n \times 1$. La matriz A es de incidencia porque denota como cambiará el marcado.

A la sumatoria de todos los vectores de disparo se le nombrará x y se denota:

$$A^T \sum_{k=1}^d U_k = A^T x$$

Igualando a cero el término $A^T x$, donde x es la secuencia de disparos que se busca, el resultado es un vector conformado por números enteros, que reciben el nombre de invariantes T (transiciones invariantes). En forma análoga, si buscamos un vector y resolviendo la ecuación $Ay=0$, se obtienen los invariantes P (lugares invariantes, conocidos también como invariantes S). Las invariantes T y P son útiles para determinar propiedades estructurales de una PN en forma analítica; además, son utilizadas para la obtención de soluciones mínimas mediante PN.

Reglas de reducción: Las reglas de reducción permiten convertir sistemas complejos en sistemas más simples de menos lugares y transiciones, preservando sus propiedades originales. Algunas reglas de reducción son las siguientes:

- Fusión de lugares en serie.
- Fusión de transiciones en serie.
- Fusión de transiciones paralelas.
- Fusión de lugares paralelos.
- Eliminación de auto bucles en lugares.
- Eliminación de auto bucles en transiciones.

A.7.1.3. Principales propiedades estáticas de las PN

Las propiedades estáticas que se mencionan a continuación solo aplican a PN ordinarias y puras.

Vivacidad Estructural: Una PN es estructuralmente viva si tiene un marcado inicial para N.

Controlabilidad: De una PN, se dice que es completamente controlable si cualquier marcado es alcanzable desde cualquier otro marcado. Para una red completamente controlable se cumple que

$$\text{Rango}(A) = m$$

donde m es la cantidad de lugares de la red.

Limitación o acotado estructural: Una PN es limitada estructuralmente si es limitada para cualquier conjunto finito de marcados iniciales M_0 .

Conservabilidad: Una PN es conservativa si existe un entero positivo $\gamma(p)$, para cada lugar p tal que la sumatoria de marcas sea constante para cada $M \in R(N, M_0)$.

Repetibilidad: Una PN es repetible si existe un marcado M_0 y una secuencia de disparos σ desde M_0 , tal que las transiciones se disparan infinitamente en la secuencia definida por σ .

Consistencia: Una PN es consistente si existe un marcado M_0 y una secuencia de disparos reversible σ desde M_0 hacia M_0 , tal que cada transición halla sido disparada al menos una vez en σ .

A.7.2. Lenguajes de programación para PLC's

Como se ha mencionado, los autómatas programables o PLC's, se han convertido en la base de la ejecución de labores de automatización en las industrias modernas. Su elección para tareas de control de automatización se debe a su bajo coste, facilidad de programación, potencia y fiabilidad. Esto ha ocasionado que las aplicaciones crezcan en tamaño y complejidad para sacar partido a ese potencial (Higuera, 2005).

Normalizar los códigos para la programación de los PLC's es un tema actual, pues el desarrollo de los lenguajes para estos dispositivos ha sido bastante lenta en comparación con la estructuración de códigos para ordenadores.

La norma IEC 61131-3 intenta que las aplicaciones sean comprensibles, debido a que muchos lenguajes anteriores al estándar para el desarrollo de las rutinas generaron gran confusión, mala coordinación, y pérdida de tiempo.

La norma IEC 61131 está dividida por familias:

- IEC 61131-1 Información general: definición de términos, normas para la elección de PLC's y periféricos.
- IEC 61131-2 Hardware: requisitos mínimos de construcción y servicio.
- IEC 61131-3 Lenguajes de programación: elementos comunes, sintaxis, semántica.
- IEC 61131-4 Guía de usuario: para todo proyecto de automatización.
- IEC 61131-5 Comunicaciones: PLC – periféricos, PLC – PLC, PLC – PC.

Como se observa, la familia 61131-3 de la norma IEC, se encarga del diseño de software para sistemas de control industrial, en particular para PLC's, la cual fue publicada por primera vez en 1993. Hasta entonces no había ningún estándar para la programación de sistemas PLC.

Entre los lenguajes incluidos en la norma IEC 61131-3 se encuentran (*Tabla 26*):

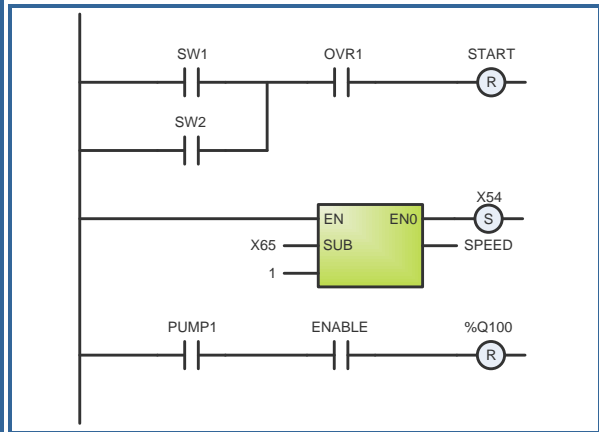
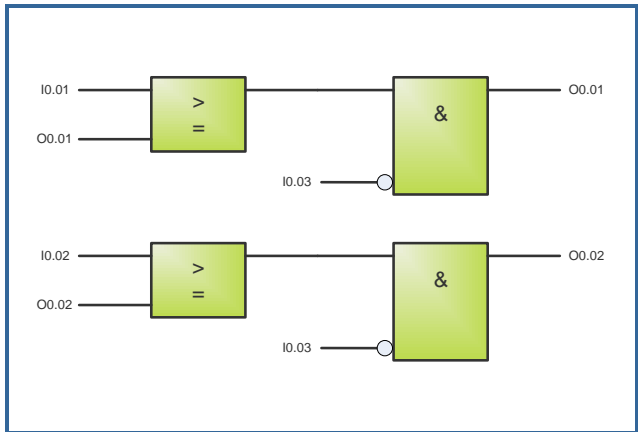
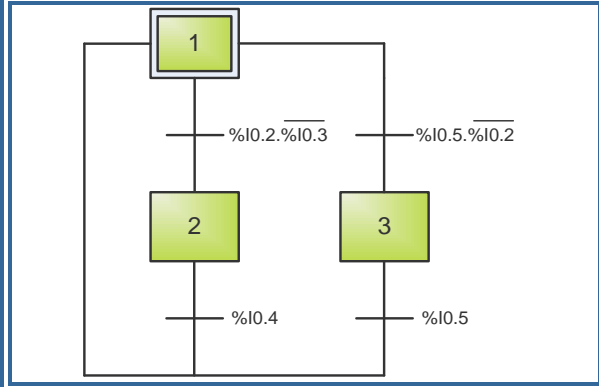
- Ladder Diagram (LD)
- Structured Text (ST)
- Functional Block (FB)
- Instruction List (IL)
- Sequential Function Chart (SFC)

De los lenguajes disponibles, el más utilizado para la programación de los PLC's es el lenguaje gráfico por símbolos LLD. Muchos usuarios industriales de PLC's prefieren programar en LLD utilizando método heurístico. Sin embargo, a medida que los sistemas se hacen más complejos, el manejo eficiente de los programas se hace cada vez más difícil y las desventajas expuestas a continuación se hacen más evidentes:

- Los diagramas de contactos no son fácilmente legibles y una persona diferente al desarrollador le resulta difícil de entender el flujo general de control a partir del programa.
- Las dificultades en el diseño y depuración de sistemas complicados dan lugar a tiempos de desarrollo mayores.

- Las instrucciones inapropiadas en sistemas de control en tiempo real son difíciles de localizar.
- La ampliación de programas en LLD para evitar efectos colaterales inesperados es una tarea especialmente complicada.

Tabla 26: Tipos de programación normalizada por la IEC 61131-3

	
<p>Lenguaje de Contactos (LLD)</p>	<p>Diagrama de bloques funcionales (FBD)</p>
<pre> VAR CONSTANT X : REAL := 53.8 ; Z : REAL : END_VAR VAR aFB, bFB : FB_type ; END_VAR bFB (A := 1, B := 'OK') ; Z := X - INT_TO_REAL (bFB.OUT1) ; IF Z>57.0 THEN aFB (A := 0, B := "ERR") ; ELSE aFB (A := 1, B := "Z is OK") ; END_IF </pre>	<pre> 000 LD %I0.1 Bp. inicio ciclo AND %I0.0 Dp. presencia vehiculo AND %M3 Bit. autorización reloj calendario AND %I0.5 Fc. alto rodillo AND %I0.4 Fc. detrás pórtico 005 S %M0 Memo inicio ciclo LD %M2 AND %I0.5 OR %I0.2 Bp. parada ciclo R %M0 010 LD %M0 ST %Q0.0 Piloto ciclo </pre>
<p>Texto estructurado (ST)</p>	<p>Lenguaje por Lista de Instrucciones (IL)</p>
	
<p>Sequential Function Chart (SFC)</p>	

De esta lista inconvenientes se puede concluir que, a medida que crece la complejidad, se hace cada vez más necesario disponer de metodologías de diseño para la programación de los PLC's. Dentro de los lenguajes incluidos por la norma IEC, el SFC es un acercamiento a lo que el

programador de PLC's verdaderamente necesita; sin embargo, la norma como tal dirige la programación en C o SFC, con diseño "Statecharts", a los autómatas gama alta.

Las PN se exponen como una herramienta de alto nivel para ayudar a resolver los problemas presentados. Han tenido mucho éxito dada su aplicación en sistemas de eventos discretos. Con la ayuda de las PN se realiza el diseño en diagrama de contactos capaz de resolver los problemas en las fases de diseño, prueba y mantenimiento en sistemas complejos, como es el caso de la comunicación por medio de un meta-protocolo entre el PLC y un periférico.

A.7.3. Uso de las PN en la programación de PLC's

El correcto registro en la unión entre la PN y el correspondiente diagrama de contactos, permite hacer un seguimiento cuando se produce un error, por ejemplo en operaciones reales. Es posible también monitorizar y diagnosticar el sistema real a un nivel más alto por medio del estado del PLC en tiempo real. Lo anterior da a ver, que a pesar de que los diagramas de contactos son ampliamente utilizados con PLC's, no se trata de un lenguaje de programación lo suficientemente estándar. El mismo programa puede dar lugar a comportamientos diferentes cuando se ejecuta en autómatas de diferentes fabricantes, dado el tipo de compilador que cada uno posee.

El proceso de realización de traducción de las PN al lenguaje LLD se puede resumir en una tarea con un doble lazo de retroalimentación (Figura 24). Un desarrollo siguiendo la línea de los dobles lazos, además que ayuda a búsqueda de errores, genera un estándar con portabilidad entre PLC's de diferentes fabricantes (Higuera, 2005).

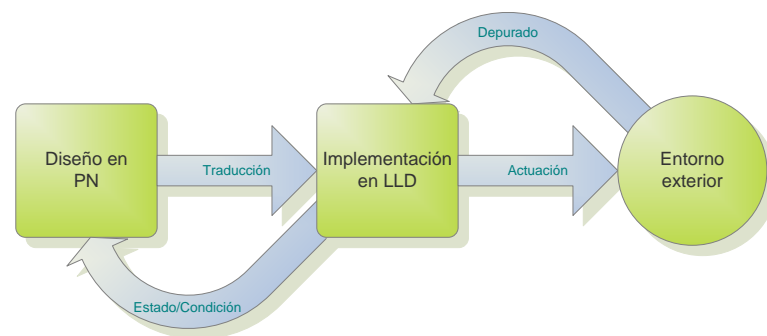


Figura 24: Proceso de programación de PLC con PN para lenguaje LLD

Sin embargo fue Frey (2000) quien realizó un análisis exhaustivo de los métodos formales para programar PLC y de los estándares que se han generado para su programación. En su artículo explica en detalle un modelo genérico para diseñar algoritmos de control de procesos industriales, los cuales serán implementados en PLC. Adicionalmente, el artículo muestra los distintos estándares generados en el transcurso de los años para regular la programación de PLC.

Frey (2000) propone el diseño de programa para controladores como los que se aprecia en la Figura 25. El proceso de diseño se debe dividir en tres actividades fundamentales:

- Reinterpretación y formalización.
- Síntesis y la implementación.
- Verificación y validación (V&V).

La formalización es dividida en tres actividades independientes y son realizadas según casos particulares. Las tareas que menciona son: formalización de propiedades específicas, modelado formal de procesos sin controlar y modelado formal directo de algoritmos de control.

La síntesis y la implementación utilizan como insumo la especificación formal obtenida en las actividades anteriores. La síntesis del algoritmo pretende obtener un diseño del algoritmo y la implementación de un algoritmo codificado de acuerdo con un lenguaje de programación de PLC estandarizado. Las corrientes actuales lo que pretenden es que ese código estándar sea realizado automáticamente utilizando un software especializado.

Las actividades de verificación y validación (V&V) son actividades que se aplican a los resultados de la especificación formal y al resultado final. La V&V de especificaciones informales se divide en: basadas en el modelo, basadas en el no modelo y las basadas en las limitantes. La verificación de la especificación formal puede ser realizada de las siguientes seis formas: Redes de Petri, sistemas condición/evento, autómatas finitos e híbridos, lógica de alto nivel, lenguajes sincronizados, sistemas generales de transición y ecuaciones algebraicas. Finalmente, la validación del resultado final se puede realizar utilizando: simulación, análisis de alcanzabilidad, chequeo del modelo y métodos de prueba de axiomas del modelo utilizando lógica matemática.

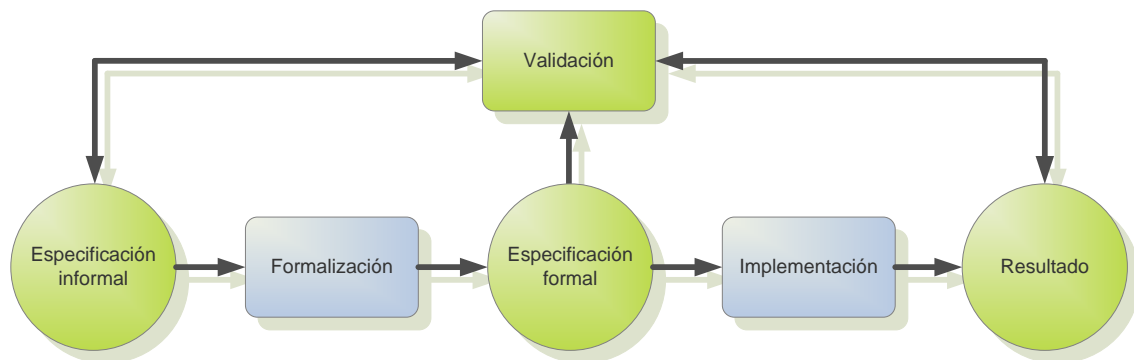


Figura 25: Esquema general del método de diseño para algoritmos de control de PLC

B. CASOS DE ESTUDIO

B.1. CASO JUSTIFICATIVO: MEDICIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES MEDIANTE INSTRUMENTACIÓN DISTRIBUIDA

El cultivo bajo invernadero es un sistema de microclima afectado por un gran número de condiciones ambientales internas y externas al recinto. Es posible describir un conjunto de treinta y tres variables que influyen en la dinámica ambiental para la producción de plantas en general (Hanan, 1997). De este sistema multivariable, se puede acotar a cinco los parámetros más relevantes para un invernadero (Plaksina & Rausch, 2005). En el DAS a ser instalado en invernaderos de dimensiones comerciales, se tienen en cuenta las variables escritas en la *Tabla 27*, dentro de las cuales se encuentran los cinco parámetros más relevantes del sistema.

Tabla 27: Relación de variables seleccionadas para la medición en el invernadero

<i>Variable</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Tecnología</i>
Temperatura	- Exterior invernadero - Interior invernadero - Suelo interior invernadero	- PT100/4 hilos
Humedad Relativa	- Exterior invernadero - Interior invernadero	- Higrómetro electrónico
Radiación Solar y Terrestre	- Exterior invernadero - Interior invernadero	- Piranómetro - "Pyrgometer"
Velocidad y dirección del Viento	- Exterior invernadero - Interior invernadero	- Anemómetro sónicos 3D - Anemómetro sónico 2D - Veleta
Grado Apertura de Ventanas	- Interior invernadero	- Potenciómetro - Encoder

Se toma para el proceso de integración las RTU's existentes en el momento de la ampliación del DAS los equipos que aparecen en la *Tabla 28*.

Tabla 28: Relación de variables seleccionadas para la medición en el invernadero

<i>Dispositivo</i>	<i>Fabricante</i>	<i>Referencia</i>	<i>Especificaciones técnicas</i>
Registadores de datos	Gantner Instruments	IDL 100	Posee 8 entradas directas análogas de propósito general para voltaje, corriente o resistencia (ya sea de 2, 3 o 4 hilos) con configuración independiente. 6 canales digitales de entrada o de salida. Memoria internas RAM de 256kB con expansión a través de un PCMCIA hasta 8MB. Conversor A/D de 16 bits. Comunicación vía RS232 o RS485 como bus de campo con protocolo ASCII-Gantner. Software propio para su configuración.
		IDL 101	Posee 6 entradas directas análogas de propósito general para voltaje, corriente o resistencia (ya sea de 2, 3 o 4 hilos) con configuración independiente. 1 salida análoga de voltaje. 16 canales digitales de entrada o de salida. Memoria internas RAM de 512kB. Conversor A/D de 10 a 12 bit. Comunicación vía RS232 o RS485 como bus de campo con protocolo ASCII-Gantner. Software propio para su configuración.
		IMX 102	Posee 6 entradas directas análogas de propósito general para voltaje, corriente o resistencia (ya sea de 2, 3 o 4 hilos) con configuración independiente. 1 salida análoga de voltaje. 16 canales digitales de entrada o de salida. Memoria internas RAM de 512kB. Conversor A/D de 10 a 12 bit. Comunicación vía RS232 o RS485 como bus de campo con protocolo ASCII-Gantner. Software propio para su configuración.
Anemómetros 3D	Gill Instruments	WindMaster	Posee un rango de medida de 0-45m/s, con una resolución de 0.01 m/s. Es posible medir la temperatura sónica en un rango de -40°C a 70°C, con una resolución de 0.01°C. La velocidad del sonido que maneja es de 300-370 m/s, con una resolución de 0.01 m/s. La frecuencia de muestreo interna es de 20 Hz y de salida desde 1 hasta 20 Hz, siendo posible variar las unidades de medición, así como los formatos de salida entre cartesianas, polares y NMEA. Comunicación vía RS232, 422, 485, con velocidad de transmisión entre 2400 y 115200 bit/s. El protocolo de comunicación es propietario basado en ASCII.
Sensores digitales	IVIA	---	---

Otros equipos incluidos en la realización del DAS se observan en la *Tabla 29*.

Tabla 29: Relación de de dispositivos adicionales del DAS

<i>Dispositivo</i>	<i>Fabricante</i>	<i>Referencia</i>	<i>Especificaciones técnicas</i>
Ordenador de supervisión	Varios	Varias	<p>Posee procesador de 4 núcleos Intel 2 Quad, una memoria RAM de 2 GB, una capacidad de disco duro de 2 TB y una placa base Intel S3200SH.</p> <p>El programa usado para la supervisión es:</p> <ul style="list-style-type: none"> - LabVIEW 8.6 <p>Otros programas instalados en el equipo para la realización del trabajo son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> - STEP 7 (Programación del PLC) - WinCC 2007 (Programación del panel de control) - SIMATIC NET (Uso de OPC de SIEMENS) - SQL Server 2005 (Administración de datos) - Excel 2003 (Estadísticas, reportes y análisis de tramas) - ICP 100 - FreePORT
PLC	SIEMENS	CPU 315 2-PN/DP	<p>Memoria de trabajo de 128 kB/42 kB de instrucciones. Tiempo de procesamiento entre 0.1 μs y 3.0 μs. Memoria expandia de 4MB. Interfaz I-Ethernet/PROFINET I/O y PROFIBUS DP con velocidad de transmisión de hasta 12MBaudios.</p>
Pasarelas	ICP CON	I-7550	<p>Protocolo PROFIBUS DP-v0 acoplable solo como esclavo. Detecta la velocidad de transmisión automáticamente (9.6 a 12000 kbit/s). Soporta una longitud máxima de datos de 128 Bytes. La dirección de esclavo puede ser entre 0-126, configurada por medio de micro-interruptores o en memoria EEPROM. La comunicación serie soportada puede ser RS232, 422, 485. En el puerto serie soporta velocidades entre 1.2 y 115.2 kbit/s.</p>

B.1.1. Estructura y jerarquía del sistema

Para el desarrollo realizado, se ha elegido una arquitectura descentralizada, donde todos los controladores de los niveles más bajos pueden comunicarse entre ellos, sin depender para su funcionamiento del ordenador central del nivel de supervisión.

Por ser un sistema jerarquizado, se encuentran varias capas de acuerdo al medio físico y al protocolo de comunicación utilizado (*Figura 26*). La primera capa concierne a la tecnología primaria, es decir los sensores del sistema. Ascendiendo en la pirámide de la integración, se encuentra la capa donde se acoplan las RTU's existentes en las redes RS485 y demás comunicaciones con protocolos no estandarizados. Como puente a un nivel superior cumple su función de pasarela PROFIBUS DP-RS422/RS485/RS232 ICP DAS I-7550. En la tercera capa está el bus de campo PROFIBUS DP, gobernado por el PLC SIEMENS S7-300 CPU 315-2 PN/DP que hace las veces de maestro para las redes inferiores, siendo los esclavos cada una de las pasarelas o puentes a las redes RS485. En el mismo bus de campo PROFIBUS DP se acoplarían algunos módulos inteligentes de entradas y salidas descentralizados.

El PLC, que posee conexión Ethernet, se enlazó a la red donde se encuentran una pasarela para generar una red AS-i, y un ordenador para el almacenamiento de datos, control e interfaz hombre-máquina, lo que conformaría el último nivel, o capa de supervisión. Esta capa de supervisión en lo que respecta a la interfaz hombre-máquina, se encuentra difuminada con el nivel de bus de campo, ya que existe la posibilidad de conectar paneles de operador (OP) instalados en campo para la visualización datos y estados del sistema, además de la posibilidad de realizar control restringido.

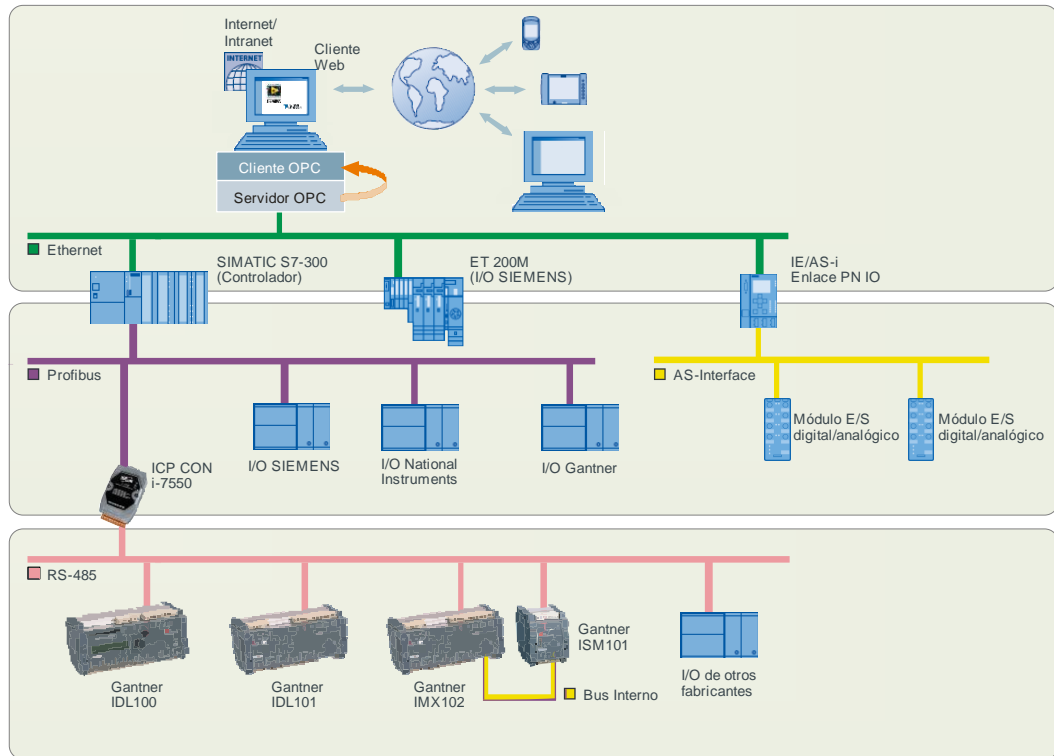


Figura 26: Parte de la estructura del sistema donde se observa la pasarela I-7550. Verde (Red Ethernet), Morado (Red Profibus), Amarillo (Red As-Interface) y Rosado (Red en RS485)

Debido a que las escalas de tiempo para la comunicación deben reducirse a medida que se alcanza el nivel más alto, es decir el nivel de supervisión (Speetjens *et al*, 2008) en el desarrollo presentado, el nivel inferior alcanza una velocidad de 38400 bps, pasando por la velocidad propia del PROFIBUS de hasta 12 Mbps, y llegando a los 100 Mbps que puede alcanzar la red Ethernet.

B.1.1.1. Selección de PROFIBUS DP como bus estándar

En el caso de algunas RTU's, como lo son por ejemplo los equipos de la marca Gantner utilizados en el desarrollo, el fabricante ha dispuesto tres protocolos para su integración:

- PROFIBUS Capa 2
- Modbus_RTU
- ASCII - Gantner

Entre los tres protocolos anteriores, el más robusto es el PROFIBUS Capa 2 o PROFIBUS FDL. Dado que es un protocolo estandarizado presenta las mejores condiciones para su implementación. No obstante, otros equipos como por ejemplo los anemómetros sónicos tridimensionales fabricados por Gill Instruments a ser integrados en el sistema requerido, aunque disponen de una comunicación para la conexión en red entre los mismos anemómetros con

interfaces estándares RS485 propia de la capa física, carecen del protocolo PROFIBUS. Han sido diseñados solo con dos protocolos de comunicación:

- ASCII - Gill
- Binario

Ambos protocolos son para comunicaciones seriales, y poseen tramas y comandos para la transmisión de los mensajes establecidos por el fabricante.

El uso de PROFIBUS FMS como protocolo estandarizado para la integración de dichas RTU's con protocolo propio del fabricante podría ser una solución, dada la posibilidad de transmitir datos de usuario en un formato compatible con los mensajes de PROFIBUS, es decir que el protocolo puede ser usado con gran flexibilidad con sistemas de terceros. Aunque FMS tiene la capacidad de enviar mensajes SDN, la gran mayoría de transferencia de datos se realiza por medio del servicio SDA de la capa de enlace del modelo de referencia OSI, donde las transferencias son reconocidas, lo cual es ventajoso en su implementación. Adicionalmente es posible acceder a las variables individuales, así como es posible la conexión a los dispositivos inferiores, como entre los mismos equipos superiores del sistema jerarquizado.

Sin embargo la aparición y evolución de los protocolos TCP/IP hizo que PROFIBUS FMS perdiera fuerza y tiende a ser obsoleto. Esto debido a que el protocolo PROFIBUS FMS es lento y como consecuencia de la saturación presentada ante la gran información que necesita administrar; además, los esfuerzos para su configuración son considerables, pues requiere definir todas las variables simbólicamente y puede ser necesario adaptar los parámetros de conexión.

Teniendo en cuenta lo anterior, se descarta la implementación de PROFIBUS FMS. Se observa que para realizar la integración se puede usar una pasarela con la capacidad de transmitir datos con dos protocolos al mismo tiempo o al menos en modo secuencial, o seleccionar un protocolo no estandarizado, flexible y común a los diferentes dispositivos. Estas posibilidades se analizan con detenimiento a continuación.

La compañía SIEMENS ofrece Procesadores de Comunicación (CP) modulares que se conectan en el mismo bastidor de la CPU, es decir al maestro de red seleccionado S7-300. Se pueden encontrar CPs con diferentes especificaciones de comunicación de acuerdo a las necesidades del usuario. Para el presente caso, la referencia CP340 es la que más se acerca a los requerimientos de desarrollo, ya que dispone de una interfaz serie que puede ser configurada como el estándar RS232, TTY, RS485 o RS422, y es posible la transferencia de datos por medio de los protocolos 3964 (R), ASCII, RK 512, o es posible cargarle los controladores para la transmisión haciendo uso de Modbus o Data Highway DF1. El obstáculo en el uso de una CP es que no es posible configurar dos protocolos de comunicación para su funcionamiento al mismo tiempo. Es decir que es imposible transmitir en la misma red RS485 haciendo uso el protocolo ASCII y PROFIBUS FDL.

Se restringe entonces las opciones a la selección de una comunicación con un protocolo de tipo serie no estandarizado, flexible y común a los diferentes equipos a ser integrados; este es el caso del protocolo serie ASCII.

Debido a la restricción a un solo protocolo serie, es posible ahora usar un módulo CP, o una pasarela como la que ofrece la compañía ICP DAS con referencia i-7550, que permiten el paso de PROFIBUS DP a comunicaciones que se encuentran bajo uno de los estándares RS422/RS485/RS232. La ventaja fundamental de este tipo de pasarelas frente al uso de una CP, es que se acoplan como esclavos de un bus de campo PROFIBUS DP, permitiendo así obtener una mayor distancia máxima a las RTU's conectadas en la red del bus serie, además de poseer todo el respaldo de diagnóstico y fiabilidad de un bus de campo como lo es PROFIBUS DP.

B.1.1.2. Implementación de PROFIBUS DP

Se ha elegido como maestro del bus de campo PROFIBUS DP y al mismo tiempo pasarela para los niveles superiores del sistema jerarquizado, al PLC SIEMENS S7-300 CPU 315-2 PN/DP. La razón de la anterior selección se fundamenta en que es la compañía SIEMENS el fabricante que ha impulsado y ofrecido por defecto el protocolo PROFIBUS para la integración de equipos en campo, por su fiabilidad, asesoría y documentación de los diferentes productos que oferta.

PROFIBUS está basado en el estándar EN 50170 (anteriormente conocido como DIN 19245). Como se observó en el modelo de referencia OSI de la sección del Marco Teórico, físicamente el bus de campo se basa en un sistema bidireccional con tensión diferencial entre dos conductores, llamado RS485. Debido a que la transferencia se realiza a través de dos cables, PROFIBUS soporta tres tipos de topologías de red:

- Topología tipo bus lineal.
- Topología tipo anillo.
- Topología tipo árbol (con especificaciones particulares).

Para el desarrollo, se ha seleccionado la topología de red tipo bus lineal. Por norma, se deben tener en cuenta las especificaciones eléctricas de puesta a tierra y aislamiento (DIN 57899/VDE 0800) con el fin de minimizar los efectos de reflexión en las señales transmitidas. En el bus de campo PROFIBUS se debe instalar o activar en el caso que los terminales la posean, una resistencia tanto en el primero como en el último nodo (*Figura 27*), conocidas como resistencias terminales o terminadores de bus y el cable debe ser de par trenzado y apantallado.

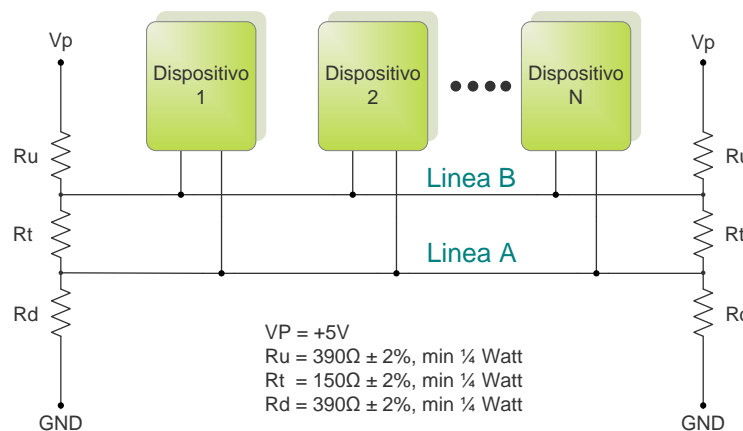


Figura 27: Estándar de la conexión PROFIBUS

En el estándar PROFIBUS el conector está construido con la resistencia terminal interna (*Figura 28*). En el presente desarrollo se adquirieron dichos conectores.

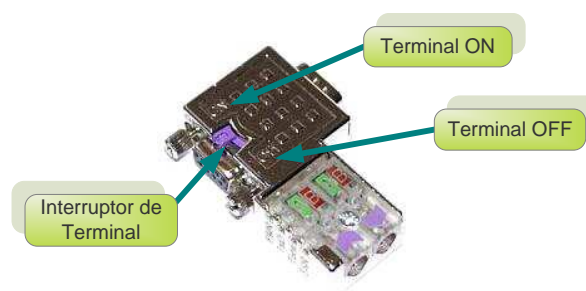


Figura 28: Conector estándar para un bus de campo PROFIBUS

B.1.1.3. Pasarela entre buses de campo

Para la transmisión de datos entre las redes no estandarizadas y el bus de campo PROFIBUS, se escogió la pasarela ICP DAS I-7550 (Figura 29) que está diseñada como un dispositivo esclavo para el protocolo PROFIBUS DP. Ofrece tres tipos de comunicación de interfaz RS232, RS422 y RS485, los cuales reconoce y selecciona automáticamente al detectar los niveles de voltaje en la transmisión de datos. En la comunicación por medio del protocolo PROFIBUS se detecta automáticamente la velocidad de transmisión, esto es entre 9.6 y 12000 kbps. En el presente diseño se hace uso de la máxima velocidad, que corresponde a 12000kbps, determinando este parámetro en la configuración del maestro de red. La única disposición que se debe hacer para el funcionamiento de la pasarela en la aplicación de configuración es ingresar los valores de transmisión para la red no estandarizada, los cuales son:

- Velocidad de transmisión: 38400
- Número de bits: 8
- Sincronización: Ninguna
- Paridad: 1 bit

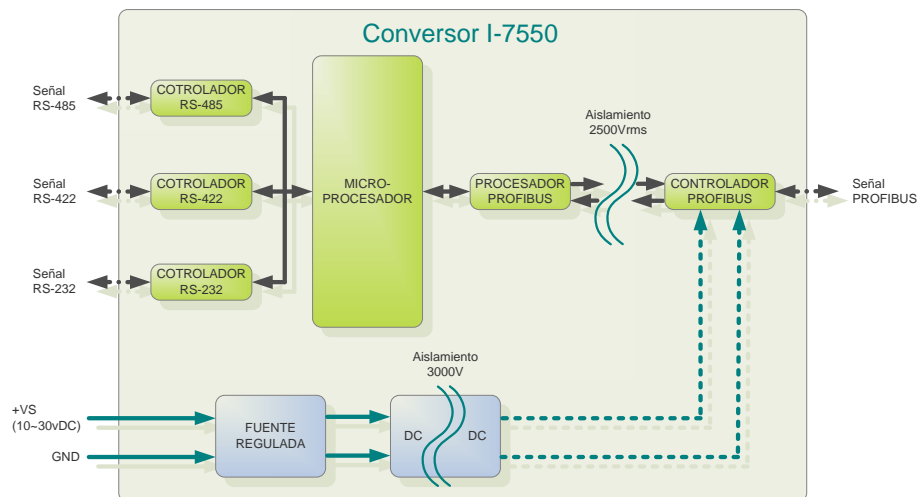


Figura 29: Terminales externas de la pasarela ICP DAS I-7550

La parámetros de configuración del conversor aparecen al instalar de acuerdo a la norma, un fichero de Descripción General de la Estación (GSD) entregado por el fabricante del dispositivo en la aplicación SIMATIC STEP 7 v5.4 de SIEMENS que sirve para la programación del maestro de red. Como el modo de funcionamiento de una red PROFIBUS es tipo “token-ring” es necesario establecer para cada estación o esclavo acoplado a la red una dirección única. En el caso de la pasarela I-7550, dicha dirección es asignada por el usuario, por medio de la combinación binaria de unos micro-interruptores que se encuentran al interior del equipo (Figura 30). Si la combinación de los micro-interruptores establece que la dirección de la estación es 126, es posible que la estación acoja la dirección almacenada en la memoria EEPROM de la que dispone el dispositivo (Tabla 30).

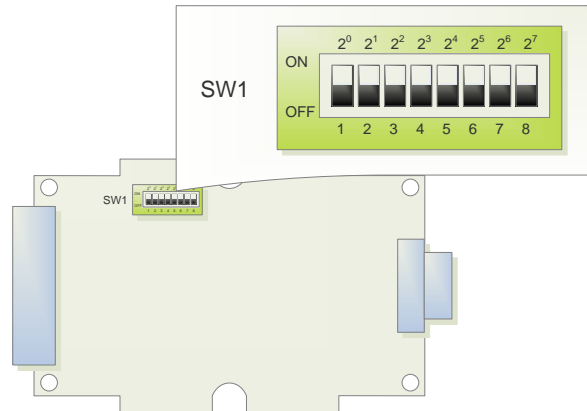


Figura 30: Micro-interruptores para la asignación del número de esclavo del I-7550

Tabla 30: Combinación de micro-interruptores para asignación de esclavo

<i>Dirección de la estación</i>	<i>Interruptores DIP</i>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0	0	0	0	0	0	0
10	0	1	0	1	0	0	0	0
126	0	1	1	1	1	1	1	0

<i>Configuración de interruptores DIP</i>	<i>Dirección de la estación</i>	<i>Descripción</i>
0 - 125	Configurada por medio de los interruptores DIP	<ul style="list-style-type: none"> - La dirección de la estación I-7550 es configurada por medio de los interruptores DIP y no tiene en cuenta la EEPROM. - La estación I-7550 no aceptará la dirección impuesta por telegrama en las herramientas de configuración de la red PROFIBUS.
126	Configurada por medio de la EEPROM	<ul style="list-style-type: none"> - La dirección de la estación I-7550 se establecerá por medio de la EEPROM y no tendrá en cuenta la establecida en los interruptores DIP - Si la dirección que el usuario guardó en la EEPROM es 126, la estación I-7550 puede aceptar la dirección configurada por medio de las herramientas de configuración de la red PROFIBUS y guardarla en la EEPROM.
255	126	<ul style="list-style-type: none"> - Se borra la dirección de la estación guardada en la EEPROM la última vez y establece un 126 como dirección de la estación en la EEPROM.

B.1.1.4. Red RS485 inicial

La red dispuesta inicialmente para la realización del desarrollo y de las pruebas corresponde a la obtenida de interconectar los equipos Gantner mencionados en apartados anteriores. Se hace uso de la interfase RS485 en modo “*half duplex*”, con una topología de bus lineal (*Figura 31*).

Los registradores Gantner tienen la posibilidad de interconectarse para formar una red RS485 con un protocolo propio ASCII. De igual forma es posible interconectar los anemómetros 3D Gill en una red RS-485 con su propio protocolo. Para el desarrollo del sistema se ha elegido la red que se conforma con los registradores Gantner como red para la programación, ensayos y puesta a punto, y la que corresponde a los anemómetros como dispositivos para la evaluación de las características propuestas en el tercer objetivo de este trabajo.

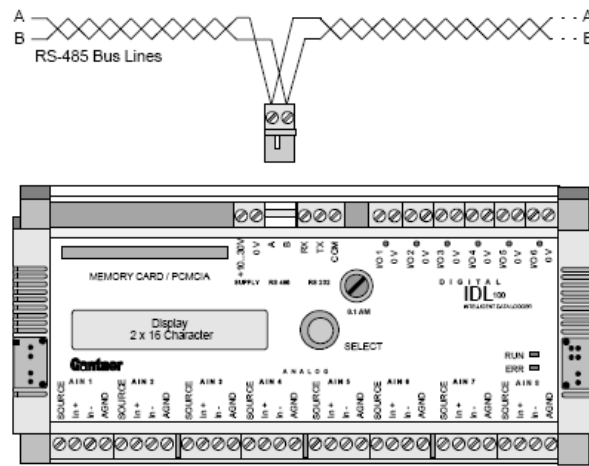


Figura 31: Forma de conexión a bus RS-485 en equipos Gantner

Al igual que en la implementación de una red PROFIBUS, se habilitan las resistencias terminales. Debido a que el inicio de la red se encuentra en la pasarela I-7550, como se mencionó en el anterior apartado, la resistencia de comienzo del bus se habilita por medio de un puente que se realiza en el interior del equipo. En el caso de los dispositivos Gantner, la resistencia final se habilita instalando unos puentes externos dispuestos para este fin (*Figura 32*).

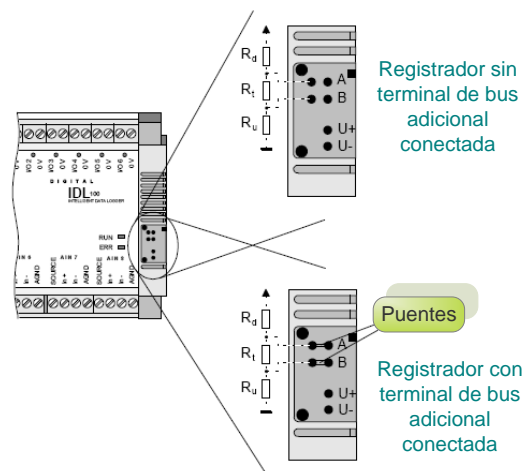


Figura 32: Plano para habilitar resistencia terminal en registradores Gantner

B.1.2. Reconocimiento de tramas de comunicación

Las RTU's a integrar en el sistema de adquisición de datos, como la gran mayoría de los dispositivos que posean la opción de comunicación en red, presentan en sus manuales las características de los protocolos propios de los cuales disponen. Entre estas características es posible observar las velocidades de comunicación, los delimitadores, los tiempos de envío y la respuesta para cada uno de los protocolos.

Sin embargo, es necesario corroborar que dichos parámetros indicados en el manual cumplan sus cometidos. En el presente desarrollo se realizó el reconocimiento de las tramas de las RTU's por medio de un analizador de transmisión del puerto serie RS232 como es el "Free Serial Port Monitor". Se intercepta de esta forma las peticiones y las respuestas inicialmente de los registradores de datos Gantner, conectándolos de forma directa al puerto del ordenador y luego formando una red para observar la variación de las tramas.

El montaje realizado para la interceptación de la comunicación se puede visualizar en la *Figura 33* donde se ha utilizado una pasarela entre RS485 y RS232. Dicha pasarela ICP DAS i-7520 al igual que la referencia i-7550, detecta la velocidad de transmisión y el formato de los datos de manera automática, controlando el envío y la recepción de datos en la red RS485.

El hecho de que los dispositivos Gantner hagan uso de un protocolo propio ASCII exige un programa en el ordenador con el puerto RS232 que gestione tal comunicación. Es por esto que se utiliza un servidor intercambiador dinámico de datos (DDE) que provee el fabricante, el cual analiza el tipo de módulos conectados a la red, su configuración, el estado de funcionamiento y los datos que se obtienen por los diferentes canales habilitados, en este caso de los registradores. Está dirigido entonces a la supervisión de los datos adquiridos, y no a la configuración de los dispositivos. Para la configuración, es necesario utilizar otra aplicación propietaria llamada ICP 100. En dicho programa se configuraron las estaciones con números de identificación de acceso o de esclavo 3, 4 y 5, como lo exigen las redes en serie basadas en RS485. Adicionalmente se habilitaron todo los canales análogos disponibles para la recepción de señales en cada uno de los módulos, con un formato de salida de datos tipo enteros con dos decimales de precisión. Aunque los equipos pueden adquirir señales digitales, éstas no son utilizadas temporalmente, ya que los sensores de la aplicación entregan únicamente señales analógicas no tratadas.

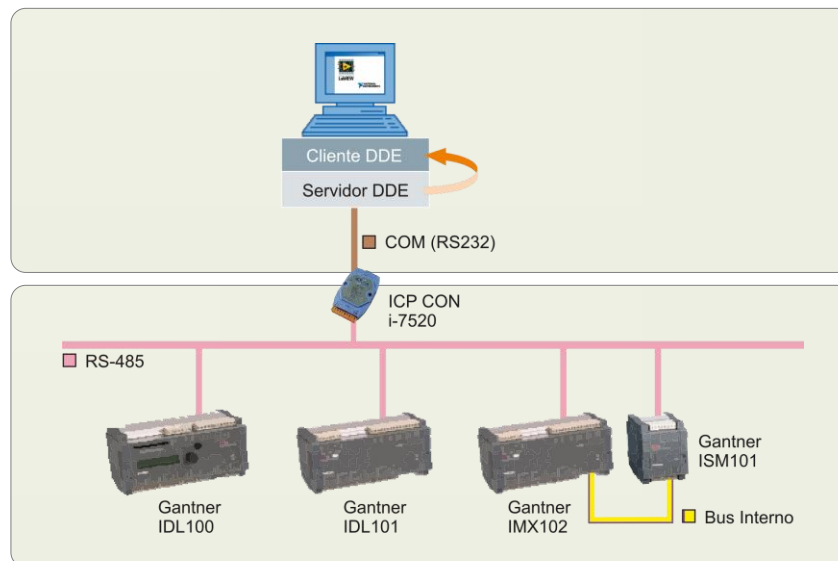


Figura 33: Disposición de equipos para la interceptación de la comunicación por el puerto RS232

Se muestra en la *Tabla 31* una selección del contenido, en formato hexadecimal, de las transmisiones de tramas por parte del ordenador poseedor del servidor DDE al registrador con

dirección única de red número 3, que corresponde al dispositivo Gantner IDL 100. La trama de respuesta es posible observarla en la *Tabla 32*.

Tabla 31: Prueba de la trama de petición para un registrador Gantner

Espacio de datos de la trama	
Datos que se tienen en cuenta en la suma para el FCS	
ED	16
FCS	4F
SSAP	0
DSAP	0
FC	4C
SA	80
DA	83
SD2	68
LEr	5
LE	5
SD2	68

El hecho de poder comunicar por medio de un servidor DDE los equipos Gantner con los niveles superiores abrió la posibilidad de simplificar la solución mediante programación, ya que el fabricante ofrece el cliente DDE para ser gestionado desde LabVIEW. Sin embargo, el consumo de procesamiento en el ordenador central es de un 70% de su capacidad total, penalizando así el sistema con un retraso en la adquisición de los datos, lo cual invalidó su uso.

Tabla 32: Prueba de la trama de respuesta de un registrador Gantner

Espacio de datos de la trama	
Datos que se tienen en cuenta en la suma para el FCS	
ED	16
FCS	47
Oct:Canal	E0
Sep:Canal	E0
Sex:Canal	E0
Qui:Canal	E0
Quar:Canal	E0
Ter:Canal	E0
Seg:Canal	E0
Pri:Canal	E0
	0
	0
	FE
	0
SSAP	0
DSAP	0
FC	8
SA	83
DA	80
SD2	68
LEr	19
LE	19
SD2	68

En la *Tabla 31* y la *Tabla 32* se observa y reconocen los valores de los bytes que se transmiten tanto en la petición como en la respuesta. Como es común en los formatos de telegramas, estos poseen una cabecera y un terminador, también llamados byte delimitador de inicio (SD) y byte delimitador de finalización (ED). Dichos delimitadores varían de acuerdo al protocolo. En el caso de los equipos Gantner, éstos fueron configurados para realizar la comunicación por medio del protocolo ASCII. Según el manual de usuario de los dispositivos los telegramas poseen la estructura que se visualiza en la *Figura 34*.

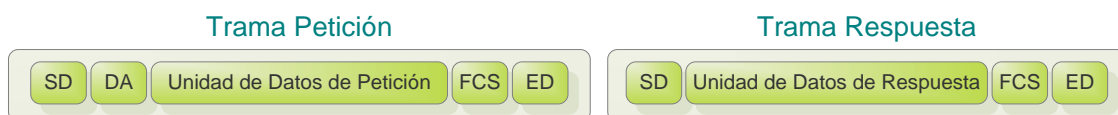


Figura 34: Estructura de tramas para protocolo ASCII de los registradores Gantner

Los telegramas para este protocolo pueden tener la secuencia de verificación de la trama (FCS) mediante una suma para el control de la redundancia (*checksum*), u omitirla. Dependiendo de su omisión o no, los delimitadores cambian. Es por esto que se puede encontrar dos tipos de delimitadores en este protocolo (*Tabla 33*).

Tabla 33: Delimitador inicial SD para el protocolo ASCII de los dispositivos Gantner

<i>SD</i>	<i>Telegrama de Petición</i>	<i>Telegrama de Respuesta</i>
Con suma de verificación	# (23 _{hex.})	> (3E _{hex.})
Sin suma de verificación	\$ (24 _{hex.})	= (3D _{hex.})

Sin embargo los delimitadores que se muestran en la *Tabla 31* y la *Tabla 32* no corresponden a ninguna de las dos posibilidades del protocolo ASCII, a pesar de haber sido configurado en los equipos. Al realizar una inspección del mismo manual de usuario de los dispositivos con los que se trabaja es posible deducir que los delimitadores corresponden al protocolo PROFIBUS capa 2 o PROFIBUS FDL (*Tabla 34*) para transmisión de datos con un tamaño de 1 a 256 bytes, a pesar de que en la configuración de usuario se elija una comunicación con protocolo ASCII y una velocidad impropia del protocolo PROFIBUS.

Tabla 34: Delimitador inicial SD para el protocolo PROFIBUS capa 2 o PROFIBUS FDL

<i>Formato del Telegrama</i>	<i>Telegrama de Petición</i>	<i>Telegrama de Respuesta</i>	<i>Tamaño del Capo de Datos</i>
SD1	10 _{hex.}	10 _{hex.}	0
SD2	68 _{hex.}	68 _{hex.}	1...256 (32)
SD3	A2 _{hex.}	A2 _{hex.}	8

Se tiene entonces que al menos los mensajes enviados y recibidos por el servidor DDE corresponden en su estructura a las tramas habilitadas en el protocolo PROFIBUS FDL para la transmisión de la información de los canales habilitados en los registradores. Se hace uso entonces de la unidad de datos del telegrama, la cual es variable (*Figura 35*).

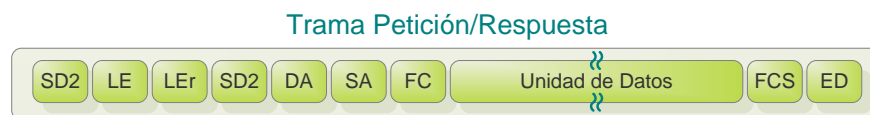


Figura 35: Estructura de la trama para la comunicación con PROFIBUS capa2 o FDL

Los diferentes campos simbolizan lo siguiente:

- *SD*: (Tamaño = 1 byte) Delimitador inicial (Varia de acuerdo a la *Tabla 34*).
- *LE*: (Tamaño = 1 byte) Identifica el tamaño del telegrama cuando contiene los datos de los canales, es decir, cuando la estructura esta encabezada con el delimitador SD2 y comprende los caracteres desde el DA hasta el final de la Unidad de Datos. Esto corresponde a un tamaño de la unidad de datos más tres bytes y puede contener valores entre 4 y 249.

- *LEr*: (Tamaño = 1 byte) Corresponde a una repetición del parámetro LE y tiene únicamente de control en el telegrama.
- *DA*: (Tamaño = 1 byte) Es el campo con la dirección de destino de la estación a la que se desea enviar el telegrama. Puede tomar valores entre 0 y 127 en el protocolo PROFIBUS, es decir entre 00_{hex} y 7F_{hex}.
- *SA*: (Tamaño = 1 byte) Es el campo que contiene la dirección de la estación de la que procede el telegrama. Al igual que en el campo DA, puede tomar valores entre 0 y 127 (00_{hex} y 7F_{hex}).
- *FC*: (Tamaño = 1 byte) Identifica el tipo de telegrama (si es de petición o de respuesta), el tipo de estación (si es pasiva o activa, en otros términos si es maestro o esclavo), el tipo de transmisión y el reconocimiento del telegrama. Este campo corresponde a la norma que estandariza PROFIBUS, la DIN 19245, parte 1.
- *Unidad de Datos*: (Tamaño = 0...n bytes) Es el campo donde se insertan los datos de usuario en el telegrama, tanto si es de petición como de respuesta.
- *FCS*: (Tamaño = 1 byte) El campo con la secuencia de chequeo identifica la suma de chequeo del telegrama. En el protocolo PROFIBUS corresponde a la suma de chequeo de los valores ASCII desde el campo DA hasta el final de la Unidad de Datos, acogiendo un valor hexadecimal entre 00_{hex} y 7F_{hex} para el protocolo PROFIBUS, es decir:

$$Checksum_PROFIBUS = [DA + SA + FC + Unidad_Datos]_{hex}$$
- *ED*: (Tamaño = 1 byte) Es el delimitador final e identifica la terminación del telegrama. En el protocolo PROFIBUS corresponde al valor 16_{hex}.

B.1.2.1. Adaptación del protocolo PROFIBUS a la capa 2

Existen dos campos adicionales que se observan en la *Tabla 32* después del campo FC. En el caso de los registradores Gantner usados para la aplicación actual, los SAPs son usados para identificar (o direccionar) los diferentes datos y comandos de los registradores. Estos campos se encuentran en la Unidad de Datos (*Figura 36*), y por lo tanto son sumados en la secuencia de chequeo de la trama. Por medio de la especificación del número DSAP (también llamado RSAP) en el campo de datos del telegrama de petición se le informa al registrador de datos qué datos debe transmitir o qué funciones debe realizar. El dispositivo también puede ser informado por medio del SSAP y los datos deben ser retornados.



Figura 36: Servicios SAP en el protocolo PROFIBUS para los dispositivos Gantner

La entrada de un número DSAP o SSAP se identifica al habilitar el bit más alto en el byte que corresponde al campo DA o de SA respectivamente. Es por esto que en la *Tabla 31* y *Tabla 32* se observa en el campo DA y SA los números hexadecimales 80_{hex} y 83_{hex}, que corresponden a la dirección 0 (la cual identifica al ordenador) y la dirección 3 (así denominado al registrador Gantner IDL 100 integrado a la red RS485), pero que en una conversión a números binarios (80_{hex} = 10000000_{bin} y 83_{hex} = 10000011_{bin}) se reconoce en la posición del bit más alto con un valor unitario, habilitando así los servicios DSAP y SSAP.

Los campos DSAP y SSAP en el telegrama de petición también aparecen en el telegrama de respuesta, donde DA, SA, DSAP y SSAP corresponden al SA, DA, SSAP y DSAP en el telegrama de petición.

B.1.2.2. Reconocimiento del formato de salida de la información

Es importante reconocer el formato de salida de los datos en la comunicación, ya que dependiendo de esto los valores entregados por cada canal varía en su longitud de memoria ocupada.

De acuerdo a las pruebas de interceptación de tramas se hace un compendio de los formatos posibles en la transmisión cuya longitud y rangos se observan en la *Tabla 35*, y su visualización (para interpretar la *Tabla 32*) se plasma en la *Tabla 36*.

Tabla 35: Formatos posibles interceptados en las tramas de comunicación para los equipos Gantner

<i>Formatos posibles</i>	<i>Longitud</i>	<i>Rango de los valores posibles</i>
Booleano	1 Byte.	(dec. 0: FALSO) y (dec. 255: Verdadero)
Entero	2 Byte	(dec. - 32768) ≤ i ≤ (dec. +32767)
Real	4 Byte	(dec. -2 ¹²⁹) ≤ x ≤ (dec. +2 ¹²⁹)

Tabla 36: Visualización de valores de las variables dependiendo del formato de salida

<i>Decimales</i>	<i>Booleano</i>	<i>Entero</i>		<i>Real</i>	
0	---	00 32	(50)	42 49 3C D3	(50.3094)
1	---	01 F7	(503)	42 49 3C D3	(50.3094)
2	---	13 A6	(5030)	42 49 3C D3	(50.3094)
3	---	xx xx	(50309)	42 49 3C D3	(50.3094)
4	---	xx xx	(503094)	42 49 3C D3	(50.3094)
5	---	xx xx	(5030940)	42 49 3C D3	(50.3094)
6	---	xx xx	(50309400)	42 49 3C D3	(50.3094)

B.1.3. Redes de Petri para la programación

La pasarela de PROFIBUS a serie ICP DAS I-7550 necesita que se instale el archivo GSD en el maestro de la red para que, por medio de su configuración sea reconocido como esclavo de la red estándar PROFIBUS. Este proceso de instalación del archivo se observa en la *Figura 37* al lado izquierdo. El proceso de establecimiento de la comunicación se lleva a cabo por medio del algoritmo que se observa en la *Figura 37* al lado derecho, el cual es en definitiva el proceso automático que se realiza al usar PROFIBUS DP.

Sin embargo es en la trama de PROFIBUS DP que se debe empaquetar la estructura de bytes organizados que comunica con la red RS485 aguas abajo de la pasarela. Esto se hace en el campo que se observa en la *Figura 37* al lado derecho, denominada como “Intercambio de datos entre el Master y el i-7550”.

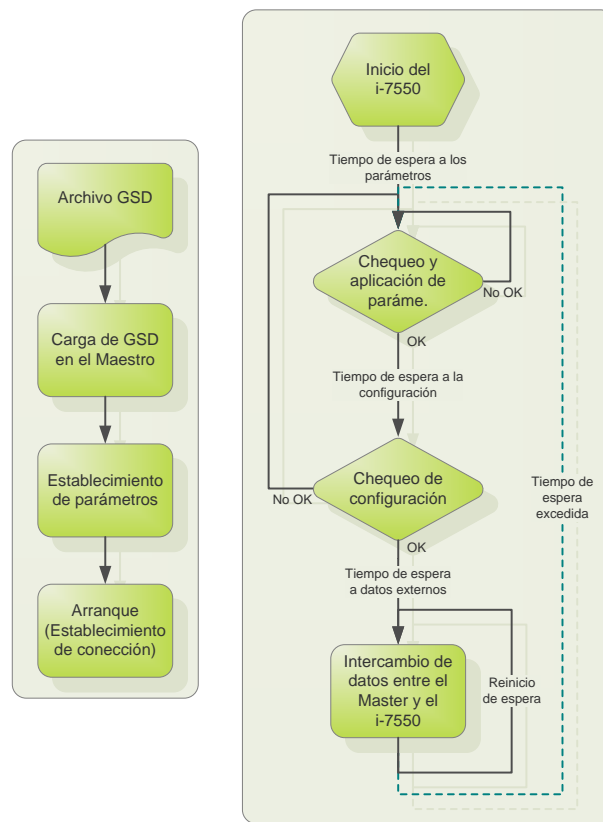


Figura 37: Establecimiento de conexión entre el maestro la pasarela i-7550

B.1.3.1. Encapsulado de protocolo ASCII en protocolo PROFIBUS DP

El PLC como maestro del bus de campo, debe de enviar la trama de petición de datos al esclavo de la red RS485, haciendo uso de la pasarela PROFIBUS a serie, teniendo en cuenta las características de funcionamiento del dispositivo ICP DAS i-7550. El esquema en bloques del funcionamiento de la electrónica del convertor para el manejo de las memorias internas se observa en la *Figura 38*.

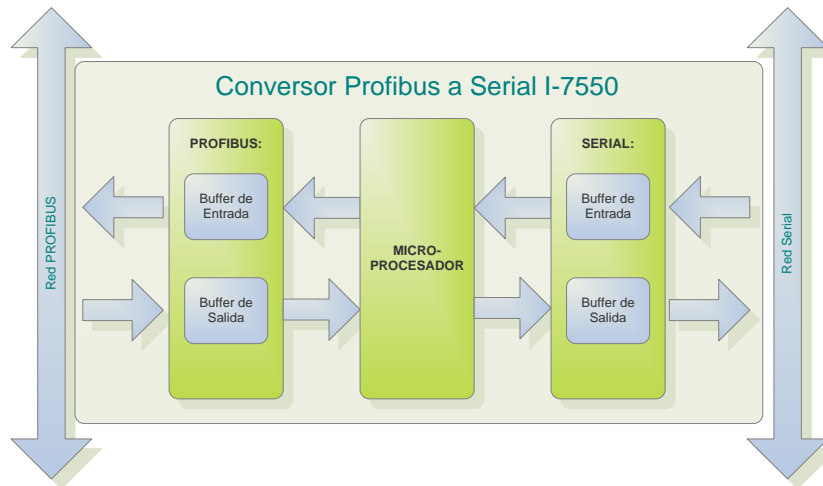


Figura 38: Funcionamiento en diagrama de bloques del conversor I-7550

Para controlar el paso de información de los buffer de entrada a los buffer de salida (Figura 38), el microprocesador del dispositivo se vale del estado de unas áreas de memoria preestablecidas de la trama. Esto sucede tanto para la trama de petición o de salida, como para la trama de recepción o de entrada. En las Tabla 37 y Tabla 38 se pueden observar dichas áreas de memoria de registro que debe poseer las estructuras de comunicación.

Tabla 37: Área de entrada de datos de la pasarela i-7550

Módulo	Byte	Datos	Descripción
Módulo de configuración del sistema	0	0x00	Si el i-7550 no esta comunicando
		0x01	Si el i-7550 está transmitiendo datos al puerto serie
		0x02	Si el i-7550 está recibiendo datos desde el puerto serie
	1	Tamaño	Longitud en bytes de los datos recibidos
Módulo de entrada de datos	2 ~ 127	Datos	Datos recibidos desde el puerto serie

Los caracteres hexadecimales con longitud de un byte que permiten la comunicación se posicionan dentro de la trama final como se visualiza en la Figura 39. En dicha gráfica se puede observar en la parte superior la trama de comunicación del protocolo PROFIBUS DP, el cual está habilitado para la comunicación entre el PLC y los esclavos, como lo es la pasarela esclava de red I-7550. De dicho protocolo sólo es variable por norma algunos parámetros de funcionamiento cuando se utiliza un dispositivo de la compañía SIEMENS. Sin embargo, es en el área de datos donde se introducen las memorias los valores del “módulo de configuración del sistema” que se observa tanto en la Tabla 37 como en la Tabla 38 para la administración de la comunicación. De igual forma es en el “módulo de entrada de datos” donde se ingresa la cadena de caracteres hexadecimales que conforman la trama que permite la comunicación con los dispositivos acoplados a la red serie RS485. En el caso de los equipos Gantner, como se ha visto en secciones anteriores, la cadena de datos corresponde a una trama de forma de PROFIBUS FDL. Para otros equipos acoplados a la red u otra red basada en RS485 y protocolo propio de fabricante, la trama a usar es de tipo ASCII general no estandarizada.

Tabla 38: Área de salida de datos de la pasarela i-7550

Módulo	Byte	Posición de Bit								Descripción
Módulo de configuración del sistema	0	-	-	-	-	-	-	-	T	Bit de control
	1									Longitud en bytes de datos de salida
	2									Valor del tiempo de espera
	3									Longitud fija en el área de los datos de entrada
Módulo de salida de datos	4 ~ 127									Salida de datos al puerto serie

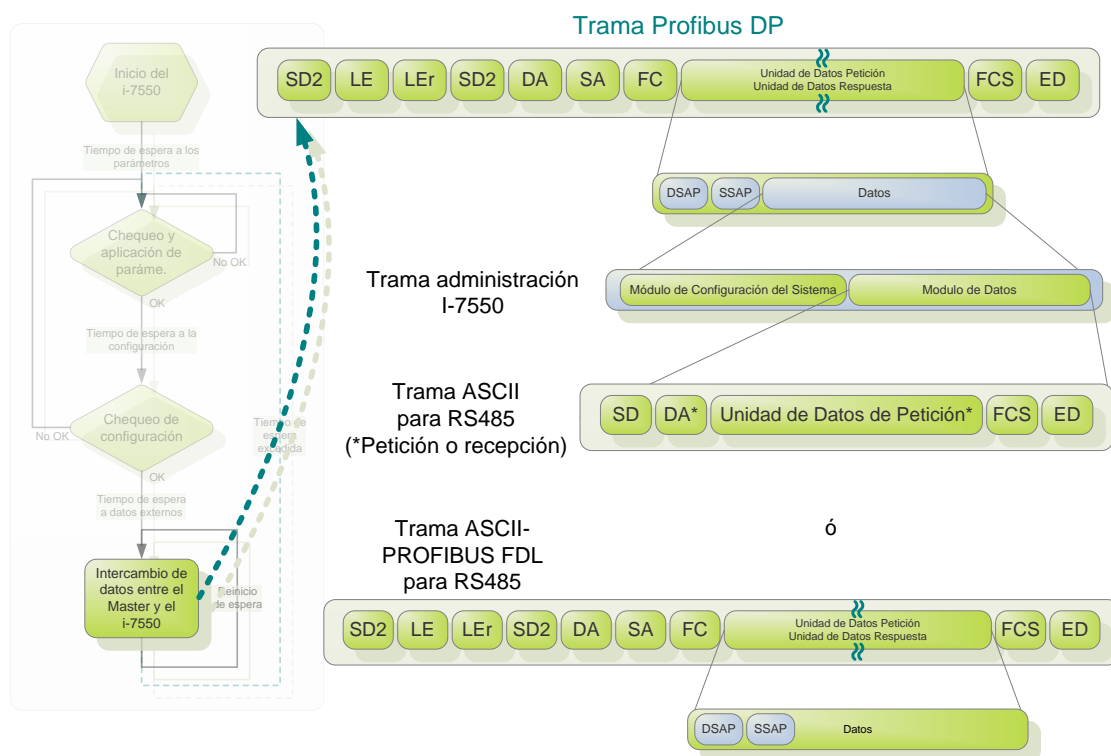


Figura 39: Encapsulado y posicionamiento de los bytes de información para la transmisión de datos desde el PLC hasta las RTU's.

De acuerdo a las características de funcionamiento del dispositivo i-7550, el controlador de red realiza un envío de una trama de petición que es almacenada por la pasarela en el buffer de salida para el protocolo PROFIBUS (Figura 38). Una vez el controlador realice un cambio en el bit menos significativo del byte 0 del módulo de configuración del sistema para el área de salida de datos (Tabla 37), los datos que conforman la trama son enviados por el microprocesador del equipo al buffer de salida para el protocolo serie. Se debe especificar además los parámetros del módulo de configuración de sistema para el área de salida, como son la longitud de los datos de salida, el tiempo de espera y la longitud fija de los datos que se recibirán. Si la cadena de información es

correcta y llega a los dispositivos acoplados a la red serie antes de un tiempo límite establecido, el dispositivo al que se le haya realizado la petición responderá. Si en la memoria intermedia, es decir en el buffer de entrada para la red serie, se detecta una trama de respuesta, se avisa por medio de un registro de estado de este cambio al controlador de red. Si en el buffer de entrada del puerto serie no se detecta una trama nueva, el buffer de entrada para el protocolo PROFIBUS almacenará el último dato recibido correctamente. Se corrobora seguidamente el correcto estado de los datos recibidos por medio de algunas operaciones matemáticas y comprobación de valores de datos de la misma trama.

En el maestro de red una vez instalado el archivo GSD, se deben crear las memorias de intercambio de información con el esclavo de la red PROFIBUS i-7550, o lo que el fabricante ICP DAS denomina módulo de configuración de sistema y módulo de datos, tanto para la entrada como para la salida de datos. En la *Figura 40* es posible observar en la parte superior la vista gráfica de la red PROFIBUS configurada con la pasarela acoplada como esclavo, y en la parte inferior la tabla con las memorias asignadas y su correspondiente direccionamiento.

Slot	Ident. DP	Referencia / Denominación	Dirección E	Dirección S	Com...
1	24DE	System setting	0...2		
2		System settings		0...4	
3	31	16 Byte In	3...18		
4	31	16 Byte In	19...34		
5	31	16 Byte In	35...50		
6	31	16 Byte In	51...66		
7	31	16 Byte In	67...82		
8	31	16 Byte In	83...98		
9	31	16 Byte In	99...114		
10	28	13 Byte In	115...127		
11	47	16 Byte Out		5...20	
12	47	16 Byte Out		21...36	
13	47	16 Byte Out		37...52	
14	47	16 Byte Out		53...68	
15	47	16 Byte Out		69...84	
16	47	16 Byte Out		85...100	
17	47	16 Byte Out		101...116	
18	42	11 Byte Out		117...127	
19					

Figura 40: Vista del programa Step 7 de SIEMENS para la configuración de las redes y los equipos de red

B.1.3.2. Realización de la Red de Petri

Para el desarrollo de la programación del PLC se hace uso del modelo genérico detallado, propuesto por Frey & Litz (1998), Frey (2000) y Zhou (2012). La razón es que los autores realizaron un análisis exhaustivo de los métodos formales para programar PLC y de los estándares que se han generado para su programación, convirtiendo su publicación y el método en una referencia fundamental para la tarea que han emprendido varios grupos de investigación de, realizar una aplicación para la generación automática de código para PLC mediante un formalismo simulado y validado.

B.1.3.2.1. *Especificación informal y formalización*

Según el esquema general del método de diseño para algoritmos de control de PLC propuesto por Frey & Litz (1998), lo que correspondería a la *especificación informal* de la programación, se encontraría en los párrafos contenidos en la sección B.1 del presente escrito sobre la estructura y

jerarquía del sistema, junto con la sección B.1.3.1 donde se plasma el encapsulado de protocolo ASCII en protocolo PROFIBUS DP.

Siguiendo el mismo proceso de diseño, la *formalización* de las especificaciones es el próximo ítem. Dado que el objetivo en esta tarea es que se desarrolle una directiva estructurada y organizada de las especificaciones informales, se ha elegido para el presente desarrollo que dicha formalización se encuentre englobada en el diagrama de bloques que se observa en la *Figura 41*. En dicho diagrama se observa la secuencia principal del algoritmo, pasando por alto varias condiciones de seguridad y funcionamiento que posee la aplicación final, así como características de jerarquización, anidamiento y reutilización de código.

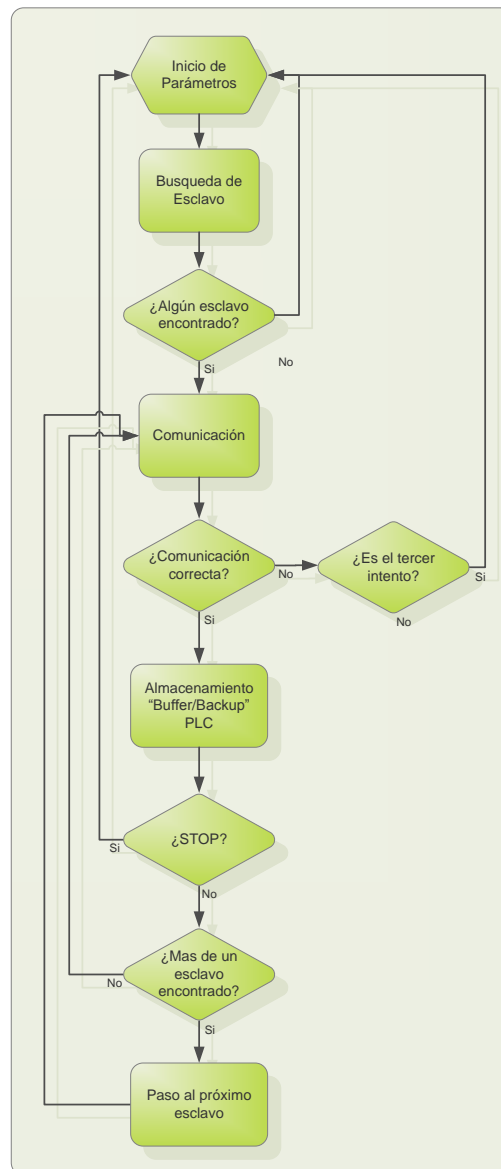


Figura 41: Diagrama de flujo de la secuencia principal del algoritmo para la comunicación de las RTU's

Se debe destacar que en la *Figura 41* se visualiza un cuadrante de “Búsqueda de esclavos” y otro de “Almacenamiento *Buffer* PLC”. El primero simboliza todo el código creado para el mapeo de los dispositivos acoplados a las redes seriales con protocolos no estándar, por medio del envío de tramas con las posibles direcciones que pueden tomar los esclavos de esta red. En el caso de obtener respuesta de alguna estación, la dirección de dicho esclavo entrará a formar parte de una tabla de esclavos accesibles. Este proceso se realiza solo en la energización, inicio de comunicación

o en caso de reestablecimiento del maestro de red, ya sea por una causa forzada como lo es una alarma por errores de comunicación recurrentes, o por iniciativa del propio administrador.

Debido a que los datos obtenidos de las RTU's son de vital importancia, se creó un código que corresponde al segundo cuadrante. Almacenamiento tipo *buffer/backup* en el PLC es una gestión de la dinámica de la memoria del controlador para que guarde los datos de forma temporal, de tal forma que si entre el sistema superior de supervisión y el controlador se presenta la incidencia de pérdida de comunicación, se tendrá respaldo de dichos datos por un tiempo establecido, tal cual sistema *buffer*. No interviene entonces en las posibles ralentizaciones que pueda tener la red Ethernet. Si se presenta el problema de incomunicación es posible una vez se reanuden las transmisiones, volcar los datos a la base de datos configurada para el DAS. Si dicho daño se presenta durante un periodo de tiempo establecido y con posibilidad de variación, se envía una alarma a un servidor de correos electrónicos o vía un Servicio de Mensajes Cortos (SMS).

La rutina de “Almacenamiento Buffer/Backup PLC” es un avance importante, pues la compañía SIEMENS llama a este servicio como SIMPLUS RIC y posee una infraestructura o dispositivos con tecnología de telecontrol flexible. Exige así equipos específicos, pues la gestión de memoria en el PLC es observada como inadecuada por la filosofía base de este tipo de controladores, llevando esta tarea a dispositivos embebidos de alta tecnología con altas prestaciones y por ende altos costes.

B.1.3.2.2. Especificación formal

Se hace una *formalización de las propiedades específicas* usando lógica temporal, condiciones algebraicas y autómatas. Con el fin de realizar una verificación y una validación basada en modelo, se hace uso del formalismo en Redes de Petri. Se ha elegido una PN Autónoma con las características que se destacan en la *Figura 42*.

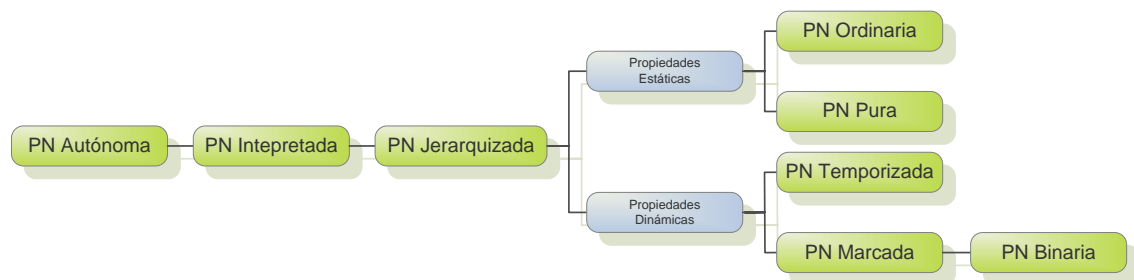


Figura 42: Características de configuración para la Red de Petri desarrollada

Dado que la PN tiene la característica de ser ordinaria y binaria, se simplifica en gran medida el posterior trabajo de verificación y validación. Sin embargo, la estructura total del proceso puede formar un grafo complejo, por lo que se hace necesaria la jerarquización del modelo, ayudando además a la organización del programa cuando sea implementado. Una PN jerarquizada permite la reutilización de código y rutinas creadas, dirigiendo así su desarrollo a una programación avanzada dirigida a objetos.

Un seguimiento del modelo de la *Figura 43* evidencia la secuencia plasmada en la *Figura 41* de la rutina principal del programa, teniendo con más detalle la temporización de las transiciones, sus condiciones con flancos o con algebra binaria. La caracteres alfanuméricos que aparecen entre corchetes corresponden al área de memoria estrictamente del sistema SIEMENS S7 para gama de PLC's medios, como lo son las CPU S7-300, y las frases en colores verdes y azules son parte de la documentación de la aplicación.

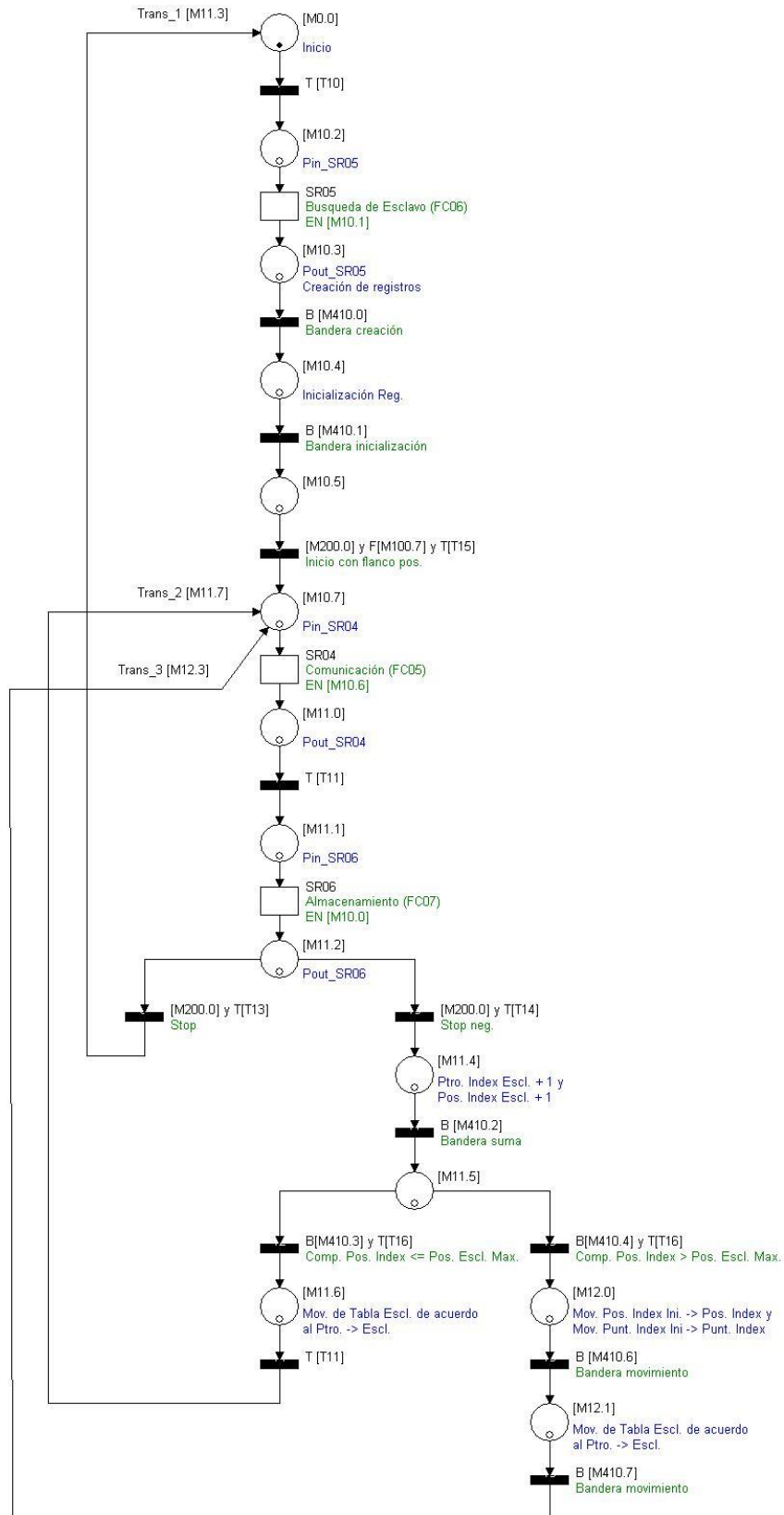


Figura 43: Red de Petri de secuencia principal sin módulos independientes ni anidado

Las transiciones en las que aparece el contorno solo hacen alusión al llamado de una subrutina, siendo esta reutilizable o no. En la *Figura 44* se puede observar el despliegue de una de las rutinas, en este caso la que corresponde a la comunicación. En dicha rutina se encuentran otras subrutinas

anidadas, que corresponden al envío y la recepción de información al convertor y desde el mismo de los datos obtenidos de la red RS485.

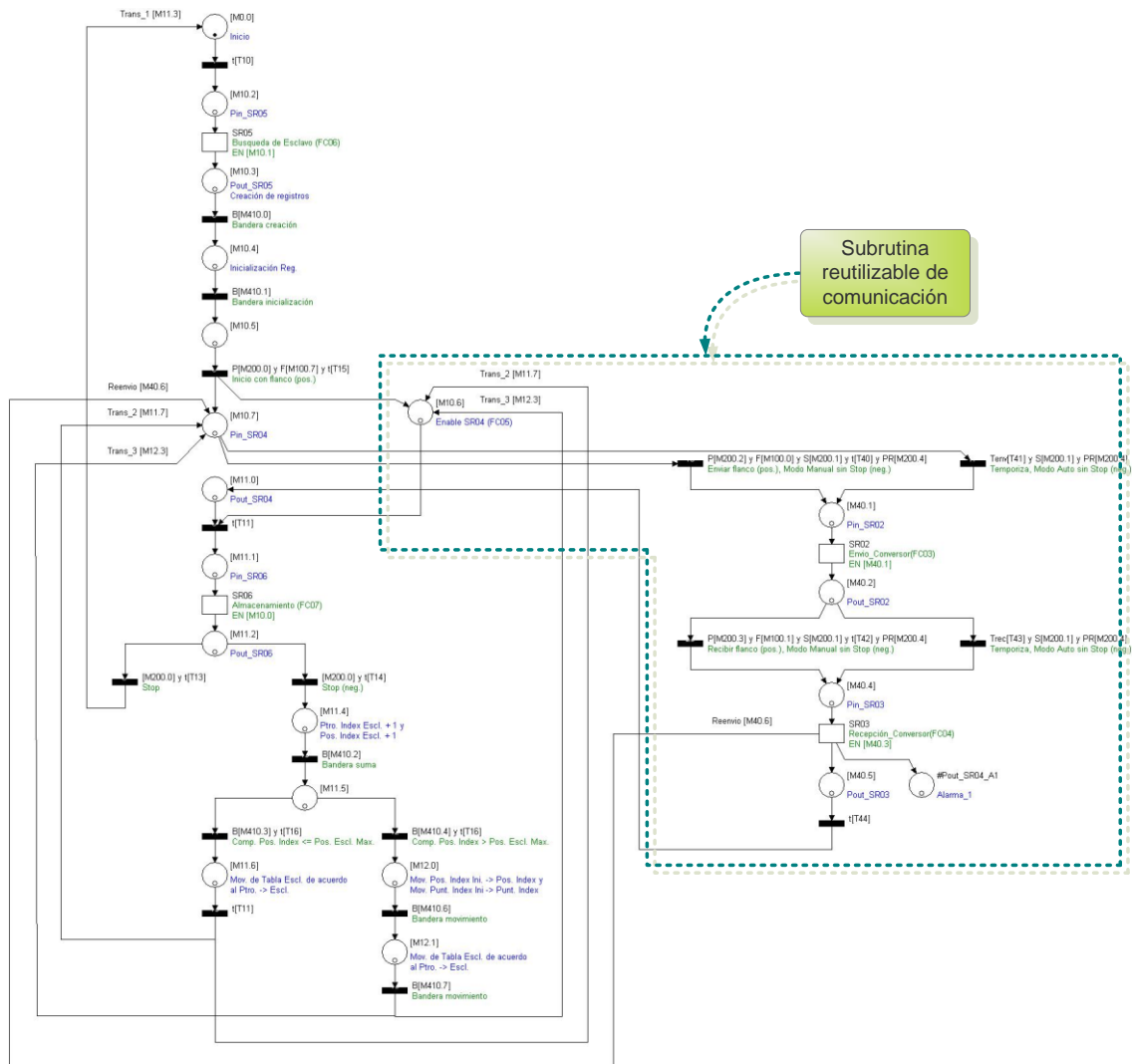


Figura 44: Despliegue de la subrutina reutilizable de comunicación de la red principal

B.1.4. Funciones superiores del sistema

En el nivel más alto de todo el sistema se encuentra el ordenador donde se almacenan y tratan los datos provenientes de las redes y equipos, se visualiza el estado de los componentes, se realiza el procesamiento posterior y se habilitan todas las funciones que robustecen virtualmente al sistema.

Se hace uso del programa LabVIEW 8.6 (Figura 45) para todo el proceso superior. Por medio de un servidor tipo OLE para control de procesos (OPC) y un cliente OPC es posible realizar el puente entre el PLC y el sistema de supervisión LabVIEW. Los datos son almacenados en la base de datos Citadel 5, y con una conexión abierta para bases de datos (OBDC) se obtiene un enlace con una base de datos SQL. Cada cierto tiempo se realiza un respaldo de los datos almacenados en un servidor. Por medio de la interfaz hombre-máquina realizada para un uso amigable, es posible consultar los datos por medio de reportes generados automáticamente en Excel o simplemente visualizarlos, seleccionado el periodo y los sensores de interés. En la misma interfaz se observa el estado del sistema, se consultan alarmas generadas y se controlan funciones del mismo. Algunos cálculos estadísticos en línea han sido habilitados, pero también hay la opción de escoger el conjunto de datos de los que se quiere sacar algún tipo de conclusión. Se debe mencionar que es

posible correr el mismo programa en un ordenador que se encuentre en la misma red, y obtener un funcionamiento paralelo sin que esto implique ningún tipo de retardo o fallo en el sistema, descentralizando así el nivel de supervisión.

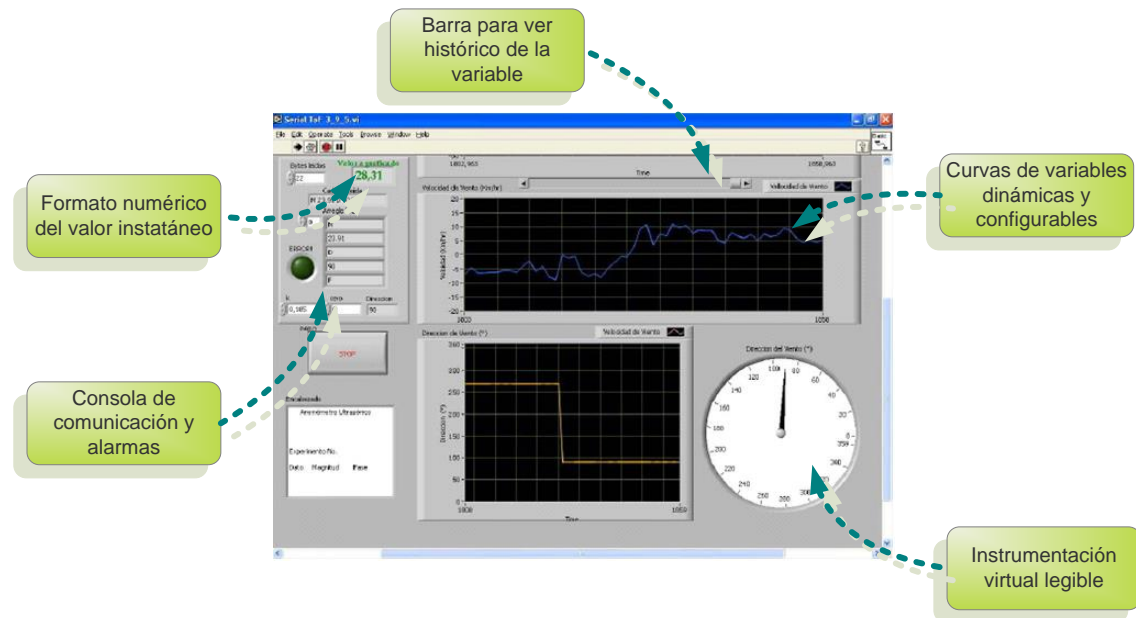


Figura 45: Aspecto de una de las ventanas de la interfaz del sistema de adquisición

B.1.5. Pruebas y resultados

El desarrollo, incluyendo el código de programación basado en modelos, siguiendo la metodología propuesta por Fray (2000), debe ser validado y verificado. Para ello se sigue la metodología estructurada por Fray, G. y Litz, L. (1998), que condensa los procedimientos y criterios necesarios para determinar la viabilidad del modelo. Si los resultados son satisfactorios, la implementación se lleva a cabo asegurando su funcionamiento, control de errores, flexibilidad y fiabilidad.

B.1.5.1. Verificación y Validación (V&V) de la Red de Petri

Dado que existen diferentes métodos de V&V, en la presente sección se muestran los resultados de algunos de estos métodos. Se han utilizado aplicaciones informáticas de uso libre para la academia y la investigación, y comerciales para obtener dichos resultados, debido a las dimensiones de la PN analizada. Entre los programas usados se encuentran los siguientes:

- Matlab v.R2008b
- Netlab v.1(2K)
- HPSIM v.1.1
- Cabernet Win v.4.0
- CPNTool
- Pipe 3.0

Los trabajos realizados por Kummer *et al* (2004), Heiner *et al* (2012) y Betz *et al* (2010), donde se estudian los códigos existentes para la creación, simulación y análisis de las PN, permiten escoger las anteriores aplicaciones de acuerdo a un compendio resultante de los programas con las mejores características para las tareas propuestas.

B.1.5.1.1. Simulación de la Red de Petri

De las aplicaciones existentes actualmente para la simulación de PN, no hay desarrollado un código en el que además de poder introducir una PN jerarquizada, sea posible simular y analizar de forma eficiente. Los programas creados hasta la fecha están dirigidos más al análisis de las complejas propiedades dinámicas que cada día posee una PN, y con menor énfasis a las mejoras estructurales que en la teoría se ha avanzado. Una propuesta para la solución de este inconveniente es el desarrollo de la aplicación CPNTool que está siendo construida por el grupo CPN de la Universidad de Aarhus de Dinamarca, y por el momento se encuentran sus repositorios inaccesibles. Es por esto entonces que se toma el programa desarrollado hasta el momento y que se encuentre mejor calificado por sus características de interfaz, simulación y análisis de PN, sacrificando la versatilidad que pudiese tener en cuanto al tipo de PN soportadas. Aunque exige un poco más de trabajo, al imposibilitarse introducir la PN jerarquizada diseñada en papel en la aplicación informática, es posible simular cada una de las rutinas que contiene la totalidad del algoritmo, ya que el hecho de ser una PN Pura y Binaria simplifica en gran medida el trabajo.

Se hace uso de la aplicación HPSIM v1.1, obteniendo simulaciones sin bloqueos para cada una de las subrutinas. Se corroboran estos resultados con el programa Netlab v.1(2K) (Figura 46) que permite una interfaz con Matlab, abriendo la posibilidad de un análisis matemático y matricial más exhaustivo. Los resultados que arroja Netlab en las simulaciones son algunos bloqueos, que corresponden a errores en la aplicación de las normas que rigen estos modelos. Sin embargo, existen otros errores que son analizados mediante las técnicas de las próximas secciones.

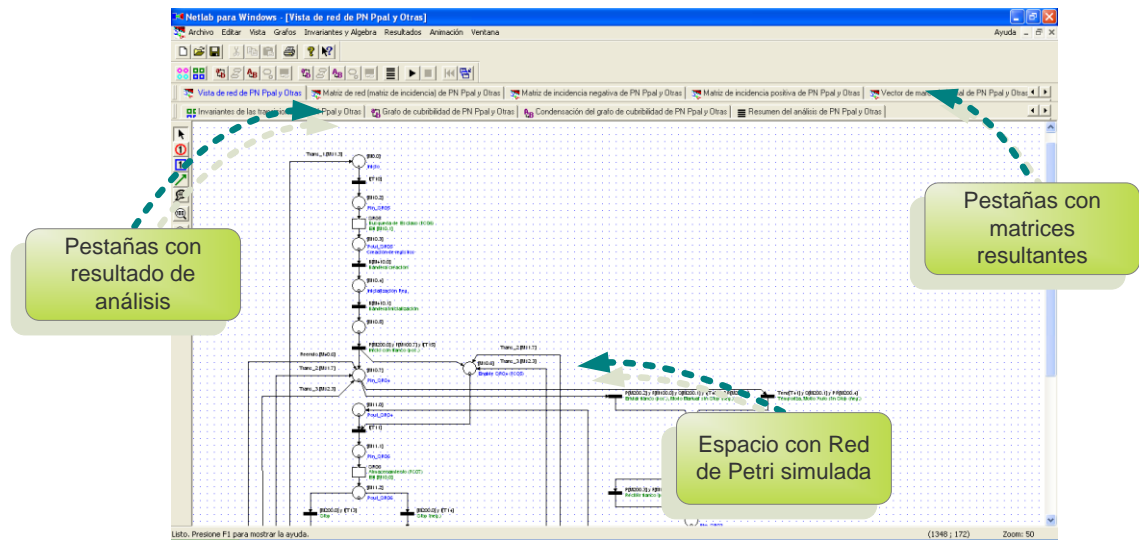


Figura 46: Pantalla principal en la simulación de la PN en el programa Netlab v.1(2K)

B.1.5.1.2. Alcanzabilidad y T-Invariantes de la Red de Petri

La aplicación Netlab genera como resultado el grafo de alcanzabilidad de a la red (Figura 47).

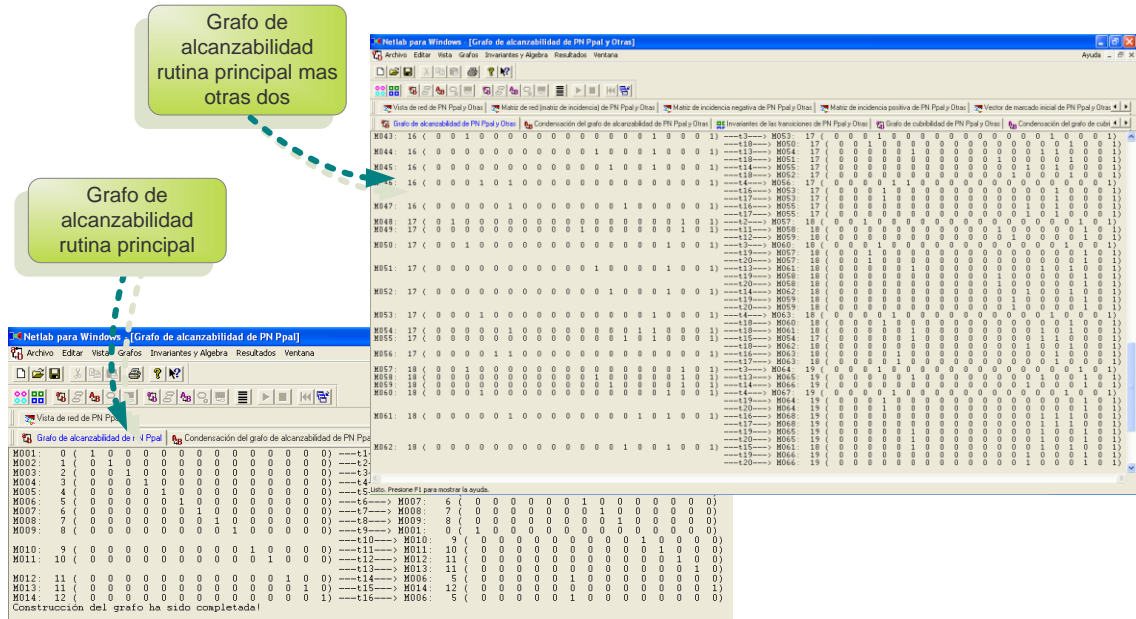


Figura 47: Resultado del grafo de alcanzabilidad para una rutina de la red y para rutinas desplegadas

Un grafo de alcanzabilidad es revelador cuando el peso de la PN es bajo, pero resulta inmanejable cuando la red toma proporciones aún más considerables. Se recurre entonces al resumen del resultado del análisis que provee el programa. Esta es una de las razones de la jerarquización de la red. Simulando cada rutina se obtiene resultados como los que se muestran en la *Figura 48*, donde:

- Las redes son vivas y algunas parcialmente vivas, pues no poseen transiciones muertas y por lo tanto no existen atascos o bloqueos no premeditados en la ejecución del código a ser implementado. Como la red sí posee bloqueos premeditados, es ésta la razón por la cual Netlab arroja algunos errores que fueron mencionados en la sección anterior, y que HPSIM pasa por alto.

```

Resultados del análisis de red:

Transiciones muertas (GÀ):
ninguno(a).

Atasco (deadlock) total (GÀ):
ninguno(a).

Reversibilidad (GÀ, condensado):
La red es reversible.
Condiciones necesarias para las invariantes:
  Existe una invariante T no negativa.
  Por lo tanto, la condición necesaria para la reversibilidad se satisface,
  y la red puede ser reversible.

Atascos (deadlocks) parciales existen en los siguientes desaguederos (sinks) (GÀ, condensado):
ninguno(a).

Vivacidad (GÀ, condensado):
La red es viva.
Condiciones necesarias para las invariantes:
  Existe una invariante T positiva.
  Por lo tanto, la condición necesaria para la vivacidad se satisface,
  y la red puede ser viva.

Restricción (GÀ):
La red es restricta.
Condiciones suficientes para las invariantes:
  La invariante P aún no ha sido determinada.

Conflictos (GÀ):
M9:
  Se desactivó interruptor de t9 t10
  Se desactivó interruptor de t10 t9
M11:
  Se desactivó interruptor de t12 t13
  Se desactivó interruptor de t13 t12

Colisiones (GÀ):
ninguno(a).

```

Figura 48: Resultado de análisis de la subrutina principal de la PN

B.1.6. Implementación

Para la *implementación* resultante se hace uso de un lenguaje de PLC estandarizado y la especificación formal del algoritmo de control es implementada indirectamente usando una interpretación literal del formalismo en el PLC. El proceso se basa en los métodos publicados por Frey (2000) y Lucas & Tilbury (2005).

B.1.6.1. Modos de operación

El DAS desarrollado posee dos modos de operación frente a las redes implementadas. Un modo manual y uno automático, los cuales se encuentran entre las funciones superiores del sistema, teniendo por defecto el modo automático en sus directrices de funcionamiento. Sólo se puede ingresar al modo manual accediendo a nivel de administrador, ya que su función es estrictamente de corroboración, mantenimiento, detección, o arreglo de errores que competen a la comunicación con las redes serie con protocolo no estandarizado acopladas al sistema general.

En modo manual es posible tener un mayor control de las secuencias de funcionamiento, pues solo se hace un ciclo y automáticamente se alargan los temporizadores de funcionamiento. Se espera a la acción del usuario para el envío o la recepción de tramas, a través de pulsadores que se habilitan en el sistema supervisor cuando se encuentra el sistema en este modo de operación. Se habilitan además consolas para la visualización y variación de los datos que conforman la trama.

En el modo de operación automático no es necesaria la intervención del usuario en la secuencia de funcionamiento. Desde el mismo momento de energización, se establece que una vez finalizada la rutina de búsqueda de esclavos conectados a una red serie, se inicie la comunicación con los dispositivos encontrados. Sólo se detendrá su funcionamiento en el caso en que se presente una incidencia por el salto de una alarma tanto si proviene del fallo del sistema como si ha ocurrido un error en la comunicación, o si en un determinado momento el usuario ha pulsado el botón virtual de paro.

B.1.6.2. Manipulación de modos de operación

Los modos de operación se encuentran interrelacionados para evitar secuencias improductivas o redundantes. En la *Figura 50* se observa el formalismo desarrollado e implementado en el algoritmo del PLC, donde con color azul se nombra el estado del modo de operación y con color verde las acciones a realizar para el paso de un estado otro. En la siguiente descripción se encuentran, dentro de corchetes las memorias virtuales asignadas a los pulsadores e interruptores las cuales son asignadas en el sistema superior de supervisión para el direccionamiento de las acciones:

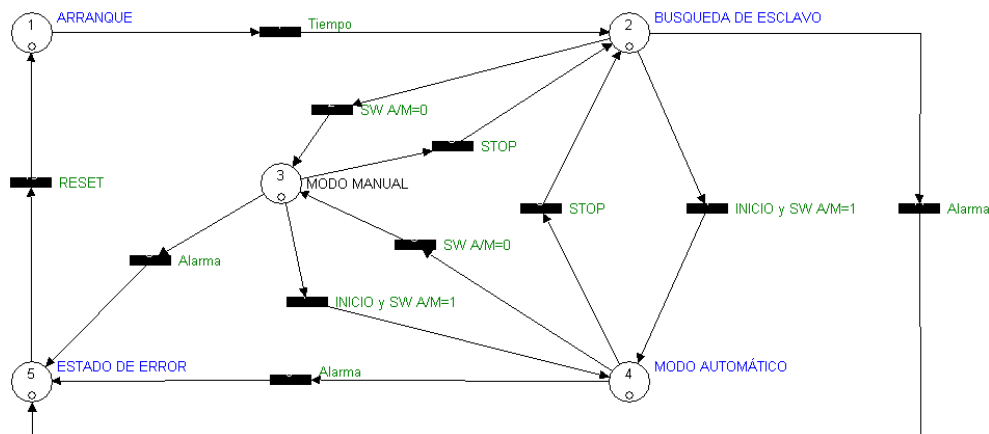


Figura 50: Red de Petri para graficar los diferentes estados de los modos de funcionamiento

- SW A/M [M200.1]: Interruptor para selección del modo Manual o Automático.
- INICIO [M200.0]: Pulsador de inicio en la secuencia de automático en el caso de que previamente se hubiese presentado un estado de error.
- STOP [M200.4]: Pulsador de paro de la secuencia tanto en el modo Manual como en el Automático. Una vez activado, la rutina de adquisición termina su funcionamiento hasta almacenar los datos adquiridos en el PLC.
- RESET [M200.5]: Pulsador para el reestablecimiento del sistema en el caso de haberse presentado una alarma.
- ENVIAR [M200.2] (Solo para el modo de operación Manual): Permite activar la subrutina de petición de datos por parte del PLC a uno de los esclavos conectados a la red serie.
- RECIBIR [M200.3] (Solo para el modo de operación Manual): Permite activar la subrutina de recepción de datos por parte del PLC transmitidos por uno de los esclavos conectados a la red serie. Finalizada la subrutina de recepción el sistema automáticamente almacena en el PLC los datos.
- TIEMPO [T5]: Temporizador al trabajo que introduce una pausa en el paso del estado de arranque al estado de búsqueda de esclavos con el fin de consolidar las memorias iniciales.
- ALARMA [FC25]: Subrutina con anidamiento de memorias que activan el estado de error. En el suceso de una alarma se almacena en un histórico en el sistema de supervisión la incidencia y su código de fallo al igual que se presenta en la pantalla principal la incidencia y se envía instantáneamente a un correo determinado la presencia del estado de error que requiere la intervención del usuario. Los históricos, al igual que la información adquirida son almacenados en una base de datos, teniendo la posibilidad de consultarlos de manera interactiva, eligiendo los periodos de consulta de sucesos, un código de error determinado, las incidencias más frecuentes, y así plantear mantenimientos o mejoras al sistema.

B.1.6.3. Organización del programa

Las diferentes subrutinas y anidamiento planteado en la PN, así como la reutilización de código se puede observar en la *Figura 51*, donde se observa además un esquema de una parte del programa implementado en el PLC. Esto se puede cerciorar en la *Figura 52* que presenta la ventana de referencia de la estructura del programa. La gran mayoría de subrutinas fueron programadas en KOP o lenguaje de escalera, pero dada la gran cantidad de direccionamiento de tablas que poseían algunas secuencias, se realizó el bosquejo inicial en KOP y se pasó y finalizó en AWL o lenguaje de

lista de instrucciones, por comodidad y funcionalidad. Aunque en la imagen aparecen bloques de datos interrogados (DB²) representando una espera de asignación de bloques de datos específicos, se debe observar que dichas subrutinas poseen instancias. O lo que es lo mismo, llamados externos con memorias independientes para las subrutinas reutilizables como por el ejemplo la función FC81 llamada IBLKMOV, que mueve conjuntos de datos de una tabla determinada a otra por medio de punteros direccionados.

Programa S7

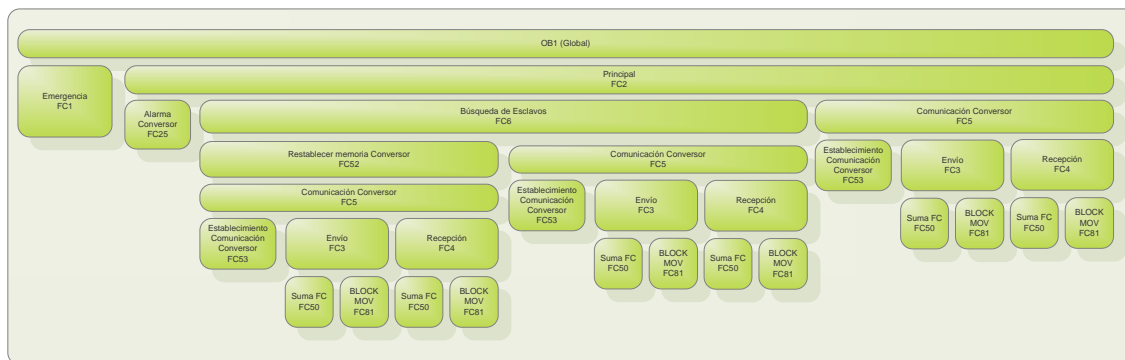


Figura 51: Fragmento de la organización del programa implementado en el PLC S7300

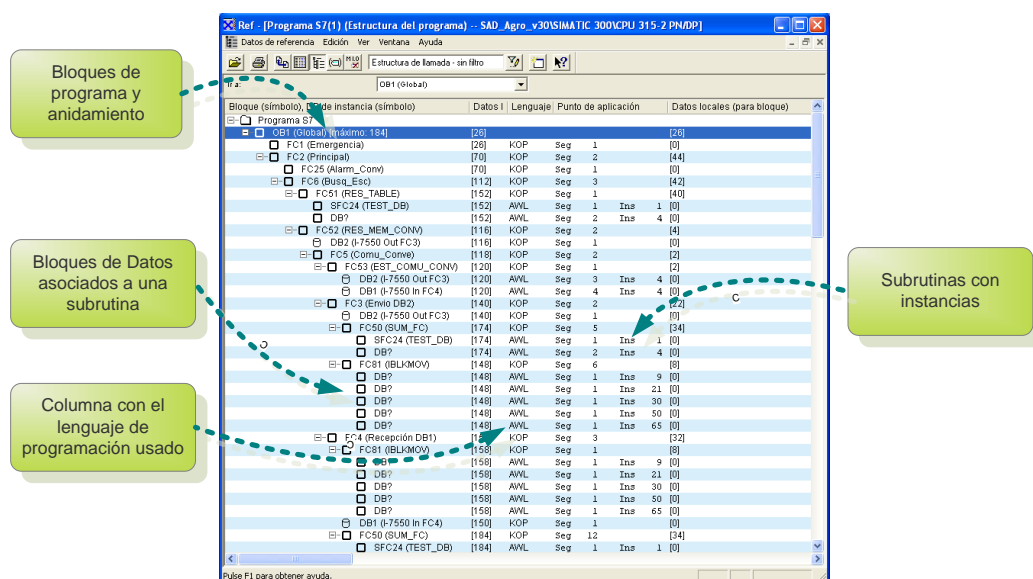


Figura 52: Aspecto de la estructura del programa en la aplicación Step 7 para el PLC S7300

B.1.7. Datos obtenidos y tiempos

Un ejemplo de una consulta realizada a la DB se observa en la Figura 53 entregando un reporte con los valores obtenidos por un sensor PT100 de la temperatura en un periodo de tiempo conectado en el canal 1 del dispositivo Gantner acoplado a la red serie con número de esclavo 3. En dicha consulta se ha utilizado una interpolación de los valores de 1 segundo, pues como se observa en la Figura 54 los periodos de transmisión entre la petición y la recepción de la información de uno de los esclavos, tienen una media de 15,6 ms. Por medio de la dirección URL se pudo habilitar en el programa LabVIEW la opción para que sean accesibles remotamente, es decir que es

posible consultar los valores de la misma base de datos por medio de un cliente automático instalado en un servidor remoto. El reporte de la *Figura 53* se obtuvo remotamente, probando así las funciones de accesibilidad y el correcto almacenamiento.

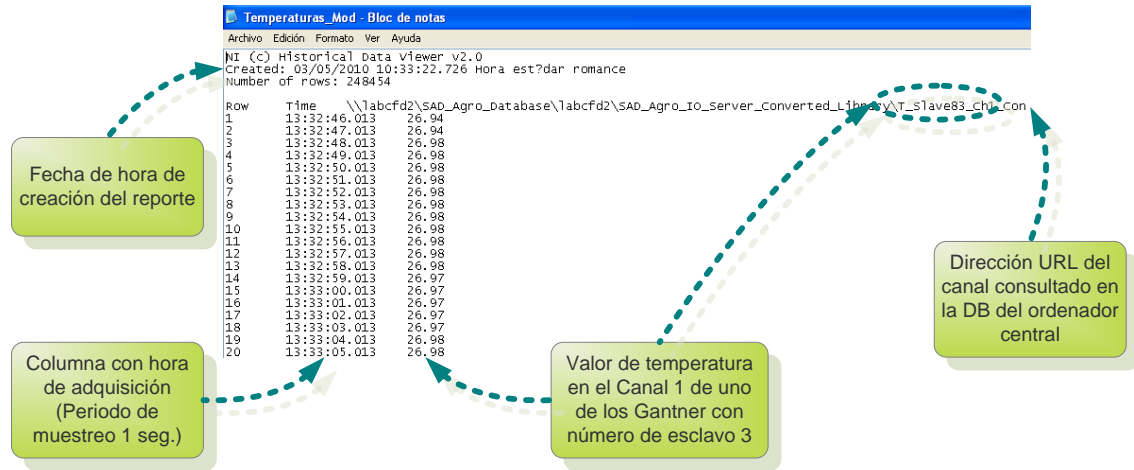


Figura 53: Reporte generado en texto plano desde la aplicación de supervisión de algunos de los valores almacenados en la base de datos

El resultado de las pruebas de periodos de comunicación se obtuvo por medio de la interceptación de las tramas entre el PLC y la red serie gracias al convertor i-7520. Como se comentó en el párrafo anterior, en la *Figura 54* se observa un fragmento de dicha interceptación siendo posible ver los envíos y llegadas de paquetes de datos con bytes hexadecimales para cada uno de los esclavos interconectado a la red RS485, en este caso los esclavos Gantner con dirección de esclavo únicas 3, 4 y 5.

La media de dichos periodos corresponde al valor de 15,6 ms entre la trama de petición y la de recepción, conteniendo cada trama hasta 8 valores análogos, y en caso de habilitarse los canales digitales de las RTU's, 6 valores más por cada dispositivo en el mismo periodo de tiempo. Con esto se deduce que el valor de un sensor conectado a un canal de un dispositivo Gantner, es posible obtenerlo con una frecuencia máxima aproximada de 20 Hz, es decir un periodo mínimo de 50 ms. Dicho periodo es una dimensión muy cercana al valor del periodo mínimo de muestreo de 20ms posible en un dispositivo Gantner, cuando éste solo tiene habilitado un canal con su respectivo sensor conectado.

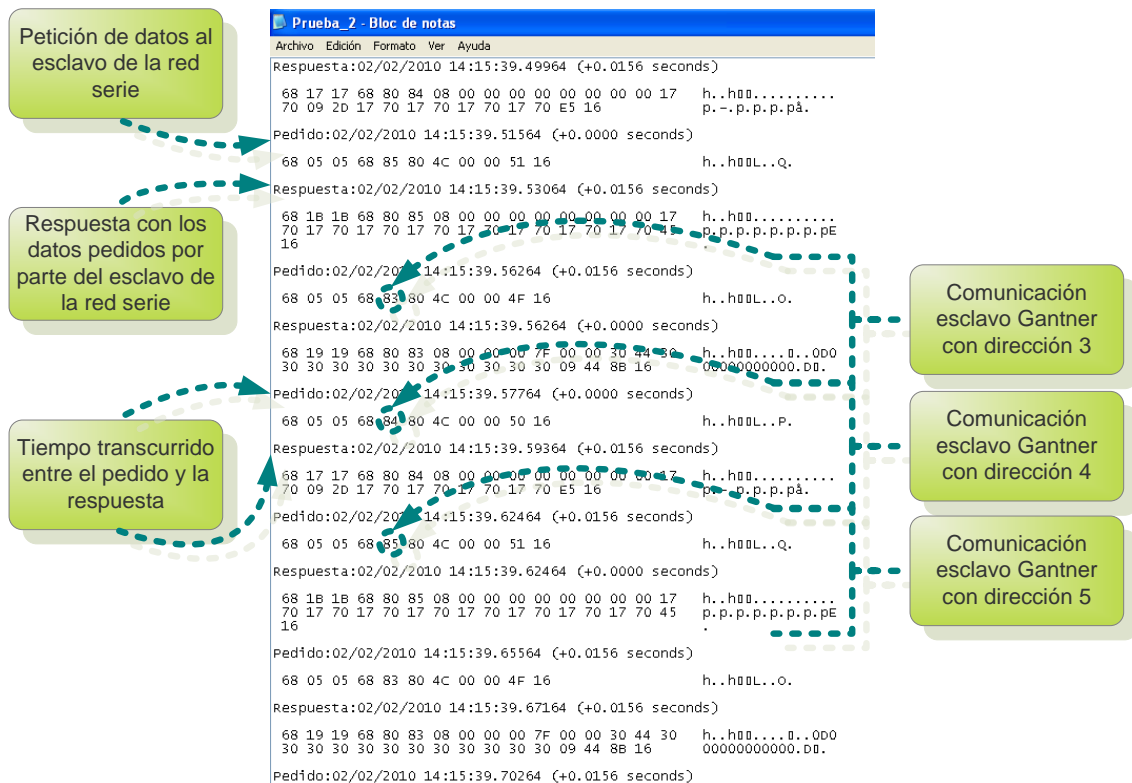


Figura 54: Prueba de comunicación habiendo implementado el programa y la infraestructura

B.1.8. Acoplamiento de otra redes serie de anemómetros

La prueba total del sistema se realiza conectando otros dispositivos acoplables a una red serie RS485 y con protocolo de comunicación propio del fabricante. Este es el caso de los anemómetros ultrasónicos. El protocolo que posee se encuentra en ASCII y en Binario y se pueden hacer redes de hasta 8 anemómetros interconectados, con velocidades de transmisión posibles entre 2400 y 57600 baudios.

Se hace con ellos la red con topología de bus y se lleva a cabo todo el procedimiento descrito en la sección B. “Descripción de Desarrollo”, siendo muy importante el procedimiento de certificar las tramas descritas por el fabricante en el manual de usuario para el equipo. Para este dispositivo la trama de respuesta con los valores de las diferentes variables se observa en Figura 55.



Figura 55: Trama de respuesta del anemómetro sónico GILL Wind Master

Donde para adquisición de datos en coordenadas polares corresponde a:

- <STX>: Cabecera de inicio de la trama (Valor 2 en ASCII)
- <ID>: Dirección de esclavo del anemómetro.(Puede tomar desde la A hasta la Z)
- DDD: Dirección del viento en grados
- MMM.MM: Magnitud del viento
- ±WWW.WW: Velocidad en el eje “W”
- U: Unidades (M=m/s, N=knots, P=mph y K=kph)
- ±CCC.CC: Velocidad del sonido
- ±TTT.TT: Temperatura sónica en °C
- SS: Chequeo de datos (Código desde el 00_{hex} hasta el 0B_{hex})
- <ETX>: Cabecera de fin de datos en ASCII (Valor 3 en ASCII)
- CC: Suma de datos entre <STX> y <ETX> para el chequeo de la trama (Valor hex.)
- <LF>: Cabecera de final de la trama

En el PLC se generan las tablas para el envío de la trama de petición de información a estos equipos y se obtiene la respuesta observada en la *Figura 55*. En la *Figura 56* se observa un fragmento del reporte generado desde la DB principal al realizar una consulta por las variables correspondientes al anemómetro con dirección “B”, corroborando que el reconocimiento de la trama, el acoplamiento, la parametrización de la comunicación, la misma comunicación, el tratamiento de los datos y el almacenamiento funcionan correctamente.

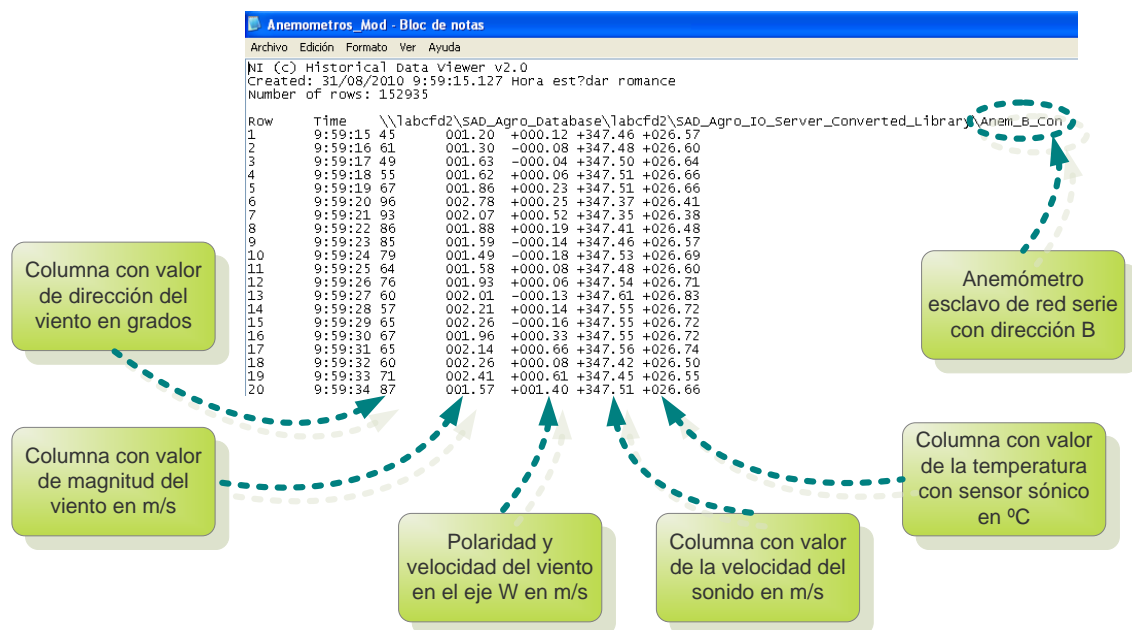


Figura 56: Reporte de valores almacenados en la DB de uno de los anemómetros acoplados a una red serie

B.1.9. Conclusiones del caso

Debido a la necesidad de monitorización de las variables más influyentes en la caracterización del clima en cultivos bajo invernadero, en el presente trabajo se ha propuesto el desarrollo de un Sistema de Adquisición de Datos flexible y escalable para alcanzar una resolución espacial considerable en los puntos de muestra. Para su diseño se han tomado dispositivos adquiridos con limitaciones para la comunicación y se han integrado junto con equipos nuevos con mejores prestaciones y características para la conexión a sistemas de supervisión de última generación. Después de un estudio comparativo entre las tecnologías y protocolos para la comunicación a nivel industrial, se integró a un bus de campo (PROFIBUS) cuyo maestro de red es un PLC, además de equipos descentralizados, dos redes en RS485 con protocolo propio del fabricante, la primera con registradores de datos, y la segunda con unos anemómetros de precisión. Con el fin de estandarizar la programación necesaria para la integración, se utilizaron modelos matemáticos basados en Redes de Petri. Se habilitó además una red Ethernet para la comunicación de unidades adicionales, así como para el envío de datos del PLC a un ordenador con el programa LabVIEW que da soporte a todo el desarrollo gráfico, administración y almacenamiento de datos, y supervisión de estados de los niveles superiores de funcionamiento del sistema.

Una vez realizado e implementado el sistema, se ha instalado y puesto a punto. Con toda la arquitectura en marcha se ejecutaron las pruebas para observar el cumplimiento de los objetivos. La integración de las RTU's existentes al bus de campo se realiza con éxito, demostrando la posibilidad de acoplar dispositivos existentes con limitación en la comunicación a la nueva tecnología.

Los resultados de las pruebas al formalismo de la PN son una garantía del correcto funcionamiento del algoritmo final implementado. Dicha garantía del formalismo se alcanza tras un proceso estructurado de diseño, especificación, validación, verificación e implementación basado en el desarrollado de Frey, G (2000).

Con las pruebas se observa lentitud en la transmisión de datos desde las redes que encabezan los convertidores y cierta rigidez en los mismos. Tal lentitud se debe al uso inicial de bajas velocidades, esto es 19,2 kbit/s en la transmisión de datos para la red PROFIBUS y 9,6 kbit/s para la red serie en RS485, ya que se debía asegurar la correcta transmisión de los datos con la extensión de cable máxima de 1 km, que es la admitida por un protocolo basado en RS485 sin que se presenten fugas de voltaje por la resistencia del medio. Sin embargo, en un aumento de dichas velocidades al máximo admitido por los equipos (12 Mbit/s para PROFIBUS y 38,4 kbit/s para la red serie en RS485) el término de lentitud es comparado frente a la capacidad de procesamiento de los equipos instalados, la cual corresponde a una frecuencia de muestreo (adquisición de datos, y no la frecuencia máxima para señales de frecuencia en los canales digitales) de 50 Hz por canal para los equipos Gantner o de 20 Hz para los anemómetros. Se obtuvo que la frecuencia máxima de adquisición se encuentra en una media de 20 Hz por variable adquirida, siendo la comunicación lenta frente a equipos como son los registradores, pero ajustado frente a los anemómetros. Se concluye que la frecuencia alcanzada es suficiente, pues en la aplicación realizada para invernaderos, las posibles variables a tomar por los equipos Gantner corresponden a variables con notable inercia, como la temperatura o la humedad. Sin embargo es recomendable optimizar el algoritmo de comunicación entre el PLC y los convertidores esclavos del bus de campo PROFIBUS buscando reducir el tiempo de procesamiento y por ende, los periodos de adquisición. De esta forma podrían aprovecharse todas las medidas de los anemómetros ultrasónicos, cuyas variables adquiridas poseen reducida inercia y pueden ser de gran importancia para el estudio del flujo instantáneo y así de las turbulencias. Dada la estandarización de los algoritmos por medio de PN, es sencillo obtener un mejor resultado de la respuesta final.

En cuanto a la rigidez observada, se debe principalmente a que las redes con protocolos no estandarizados alcanzarían un término intermedio de distribución, dado que sí que funcionarían independientemente, y el fallo de una de ellas no afectaría a las otras, pero todavía existe una dependencia del PLC para la comunicación.

Se observa que entre la transmisión de la trama de petición y la recepción de la trama de respuesta para cada esclavo acoplado a la red serie basada en RS485 se conserva un periodo constante, pero se concluye que el periodo de adquisición de una variable independiente se incrementa a medida que se conectan nuevos dispositivos a dicha red; por lo tanto es recomendable diseñar varias redes pequeñas con protocolo no estandarizado con conversor, con el objetivo de aprovechar la velocidad máxima que posee PROFIBUS, y no penalizando el muestreo con las velocidades posibles a configurar en una red serie en RS485. El resto de dispositivos conectados tanto a la red PROFIBUS como a la red Ethernet tienen una correcta respuesta ante errores y ruidos, velocidad de transmisión, fiabilidad y descentralización.

En el nivel superior se obtiene un sistema muy versátil y escalable, gracias a las innumerables herramientas que el programa LabVIEW ofrece para este tipo de aplicaciones. El almacenamiento de los datos, las seguridades formuladas, la posibilidad de visualización de los históricos y la facilidad para el tratamiento posterior son destacables. Se debe hacer hincapié en que para el trabajo actual se logró realizar consultas de valores almacenados en la DB remotamente, teniendo la posibilidad de desarrollar respaldos automáticos en servidores de datos igualmente remotos.

Se consigue, por tanto el sistema escalable y flexible propuesto en los objetivos, al que pueden acoplarse de forma relativamente sencilla nuevas y viejas RTU's, sensores y demás equipos dispuestos para conformación de un DAS, gracias al uso de redes de diferentes niveles de integración, es decir, redes basadas en protocolos propietarios serie en RS485 y redes con protocolos e infraestructura estandarizada como PROFIBUS y Ethernet Industrial.

B.2. DISPERSIÓN DE GASES CONTAMINANTES EN UNA CÁMARA CON VENTILACIÓN CONTROLADA

B.2.1. 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 57). 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.

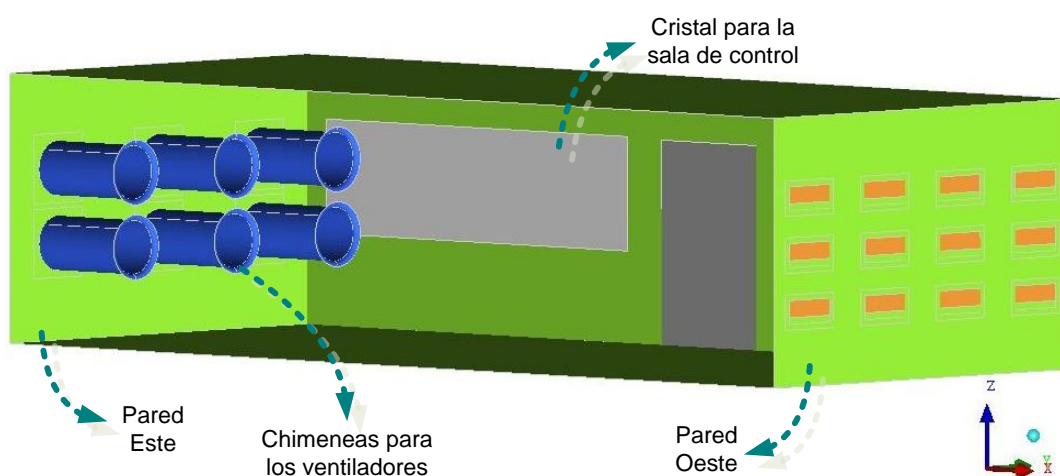


Figura 57: Sala de experimentación de ventilación del Departamento de Ciencia Animal de la Universidad Politécnica de Valencia

En la pared del lado Este de la sala de experimentación, se han instalado seis turbinas extractoras de la compañía EXAFAN (Figura 58). 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 59). 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.

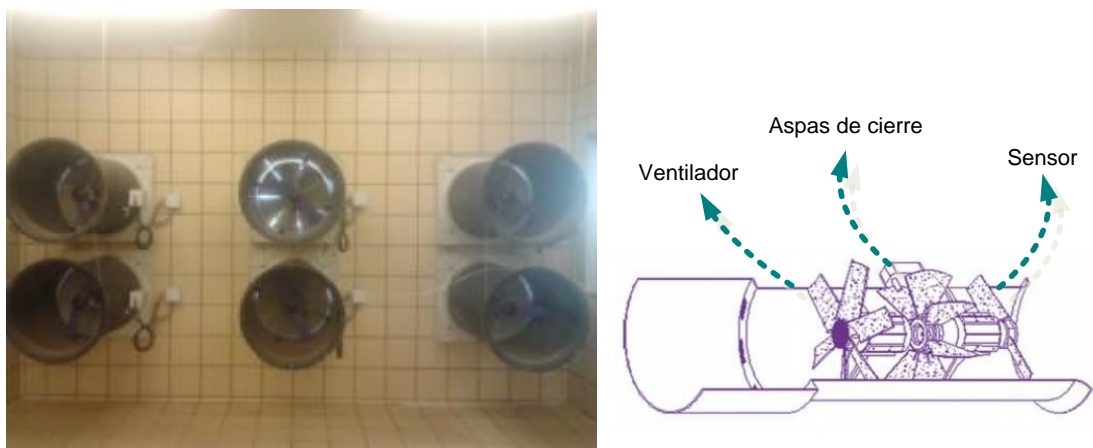


Figura 58: Imagen de la pared Este de la sala con los seis sistemas de extracción (izq.) y componentes de cada turbina de extracción (der.)



Figura 59: Imagen de la pared Oeste de la sala con las doce ventanas abatibles (izq.) y sistema para la apertura de la ventana (der.)

B.2.2. Instrumentación para las pruebas

En el presente apartado solo se hace un compendio de los dispositivos de medición necesarios y usados (Tabla 39). 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 39: Instrumentación necesaria y usada en las pruebas experimentales








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

Tabla 39: Instrumentación necesaria y usada en las pruebas experimentales (Continuación)

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

B.2.3. 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.2.3.1. 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 60). 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.

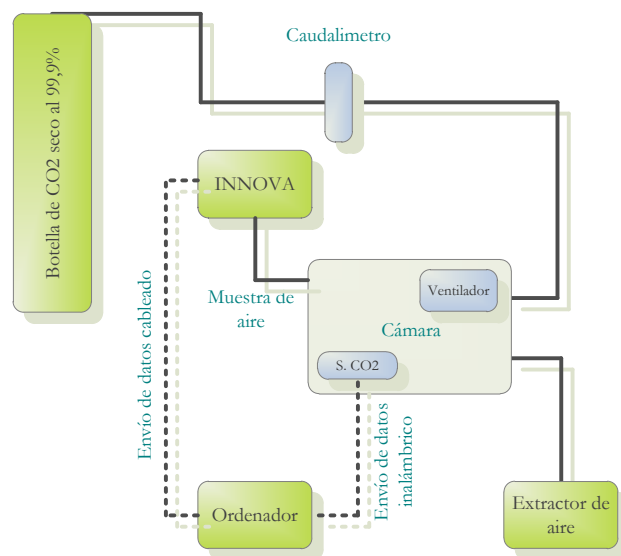


Figura 60: Esquema de la instalación realizada para la calibración de los sensores de CO₂

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.2.3.2. 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.2.3.3. 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 61*). 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 40* 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 40*,

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..

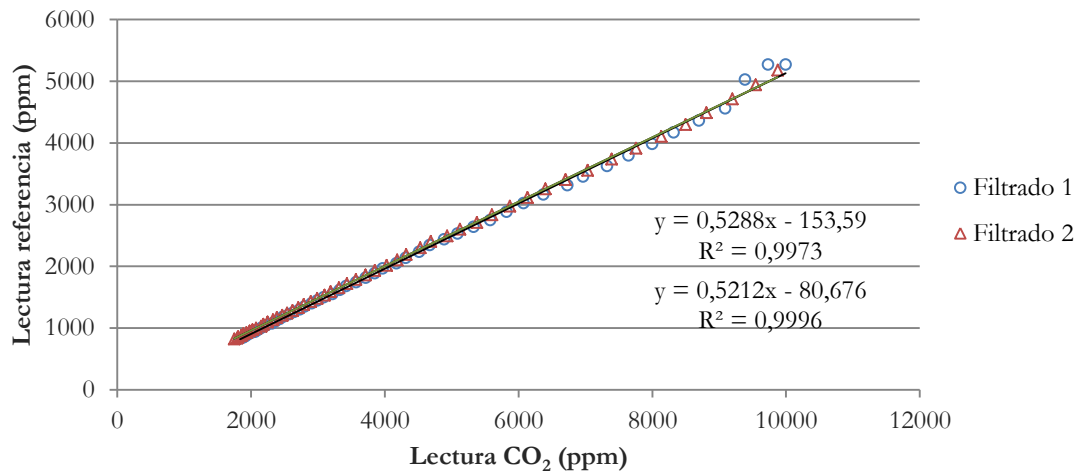


Figura 61: Resultados de uno de los ensayos de linealidad en la medida de concentración de CO₂ con el sensor analizado

Tabla 40: 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 41* 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 41: 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.2.4. Pruebas realizadas

Se pretende entonces usar el CO_2 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 CO_2 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.2.5. 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 62* es posible observar en color rojo las entidades seleccionadas para la conformación del caso real (Errata en la *Figura 62* 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

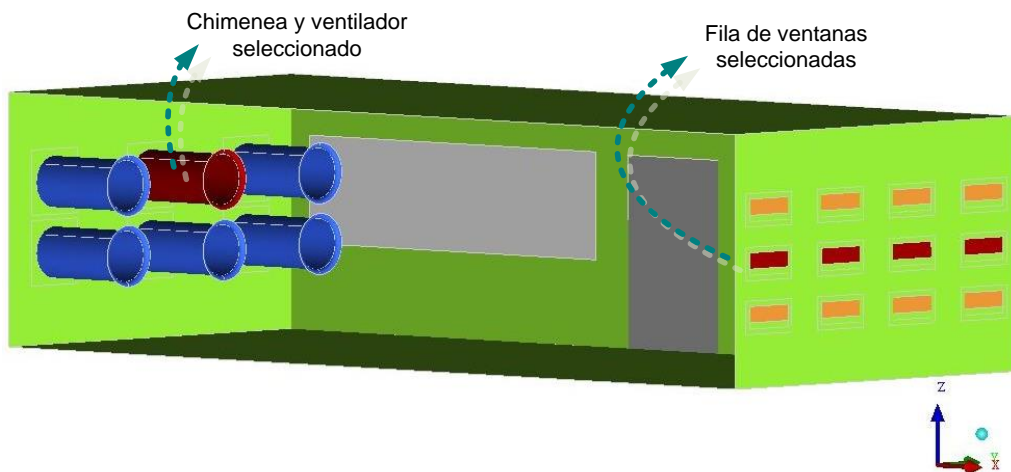


Figura 62: Chimenea y ventanas seleccionadas para la conformación del caso real de estudio

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 42* 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 las 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 42: Velocidad del aire recomendada para distintas especies así como el espacio necesario para su alojamiento

<i>Especie</i>		<i>Espacio</i>		<i>Velocidad del aire [m/s]</i>	
		<i>m2</i>	<i>Nº Animales</i>	<i>Invierno</i>	<i>Verano</i>
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 63*. 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.

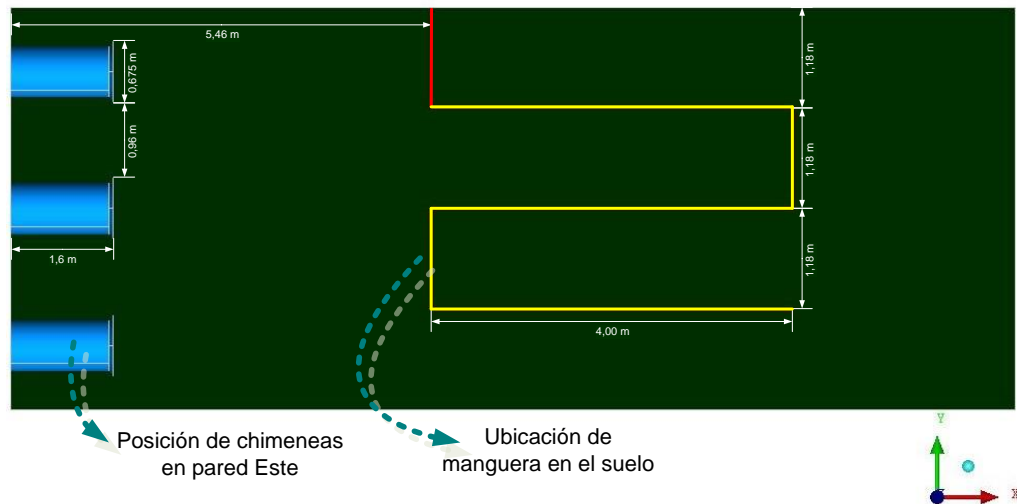


Figura 63: Ubicación de la manguera a nivel del suelo de la sala, donde el tramo en color amarillo posee las perforaciones para la salida del CO₂

B.2.5.1. 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 43* 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:

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

También se recogen la *Tabla 43* 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 64* donde se visualiza el aspecto de algunas de las paredes con la malla de densidad o tamaño medio.

Tabla 43: 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	$9,43407e^{+0}$	$8,51936e^{+0}$	$9,48281e^{+0}$	-	-

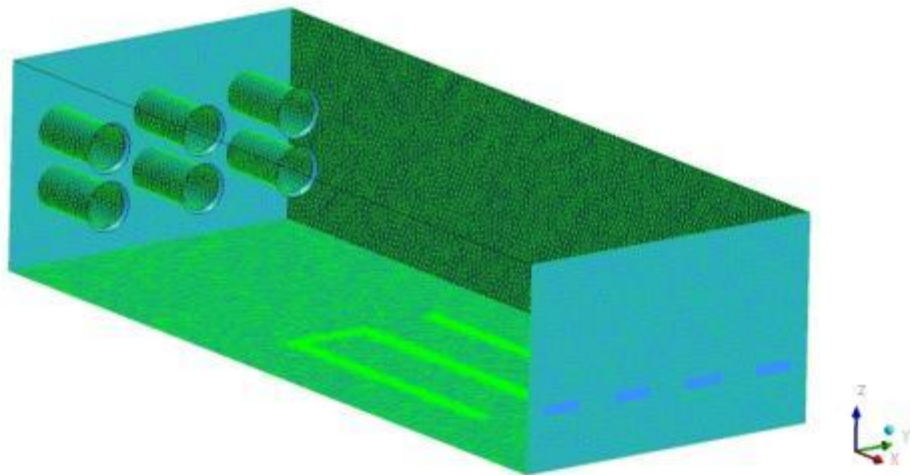


Figura 64: Vista de algunas de las paredes del modelo con la malla media no estructurada generada

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 65).

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 66). 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.

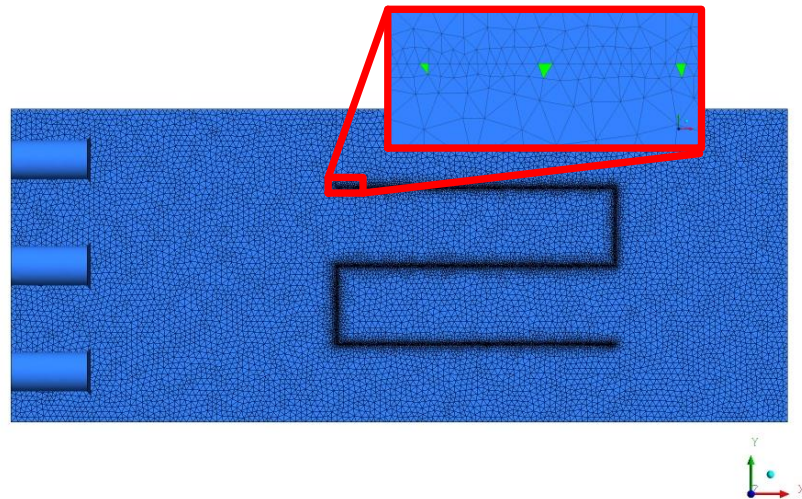


Figura 65: Idealización de los orificios de la manguera con caras de las celdas que circundan la manguera



Figura 66: Idealización en el mallado de los rebordes de las toberas

B.2.5.2. 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 67). Los dos restantes se ubicaran 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 44* 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.

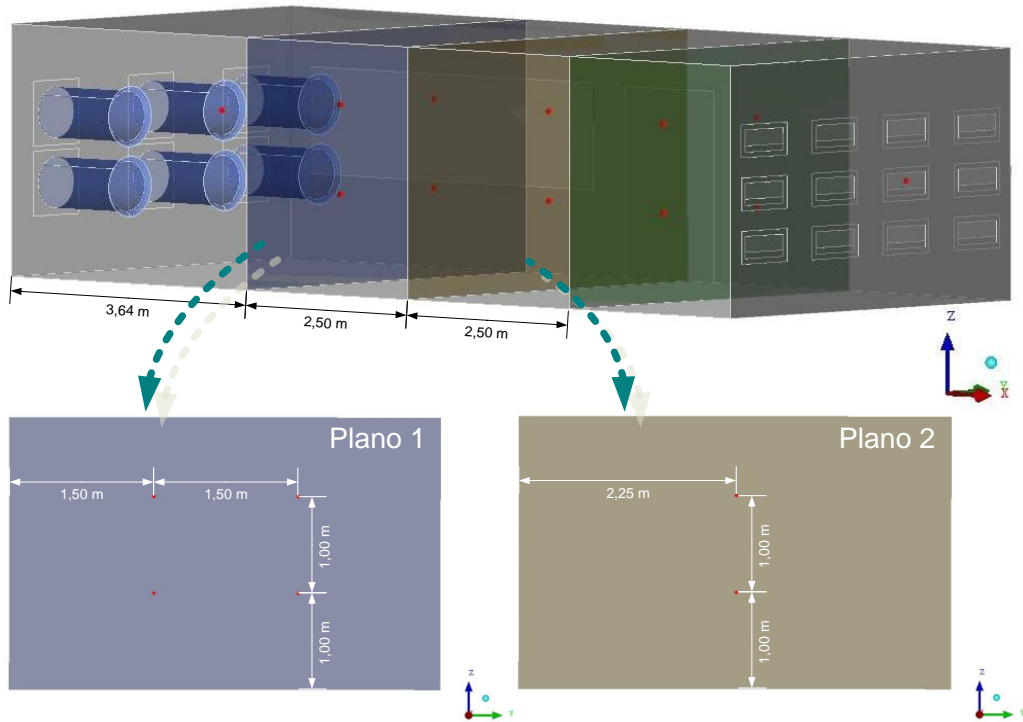


Figura 67: Planos para la ubicación de los sensores de CO₂ en la sala de estudio

Tabla 44: Asignación de cada nodo a una posición específica dentro del volumen de estudio

<i>Sensor</i>	<i>Número de nodo</i>
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.2.5.3. 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 B.2.6. 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 $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$) 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 45*). 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 45* 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 46*, 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 47* se hace un compendio de los diferentes parámetros ingresados como variables de contorno para las zonas de componen la geometría del modelo.

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).

Tabla 45: 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 46: 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 47: Compendio de las condiciones de contorno del modelo CFD

<i>Zona</i>	<i>Tipo</i>	<i>Energía</i>	<i>Masa y momento</i>	<i>Especie</i>
Ventilador 1 1	Wall	$T_i = 26,85$ [°C] $h_c = 0$ [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] $h_c = 0$ [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] $h_c = 0$ [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] $h_c = 0$ [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]	$cm_{o2} = 0$ [%]
Ventilador 2 3	Wall	$T_i = 26,85$ [°C] $h_c = 0$ [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] $h_c = 0$ [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]	$cm_{o2} = 1$ [%]
Chimeneas	Wall	$T_i = 26,85$ [°C] $h_c = 0$ [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] $h_c = 0$ [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] $h_c = 0$ [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] $h_c = 0$ [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] $h_c = 0$ [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]	$cm_{o2} = 0,05$ [%]

B.2.6. Pruebas y resultados del caso

B.2.6.1. 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 68* 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 48*). La comparación cualitativa de la *Figura 68* 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 48* 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 49* 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 malla 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.

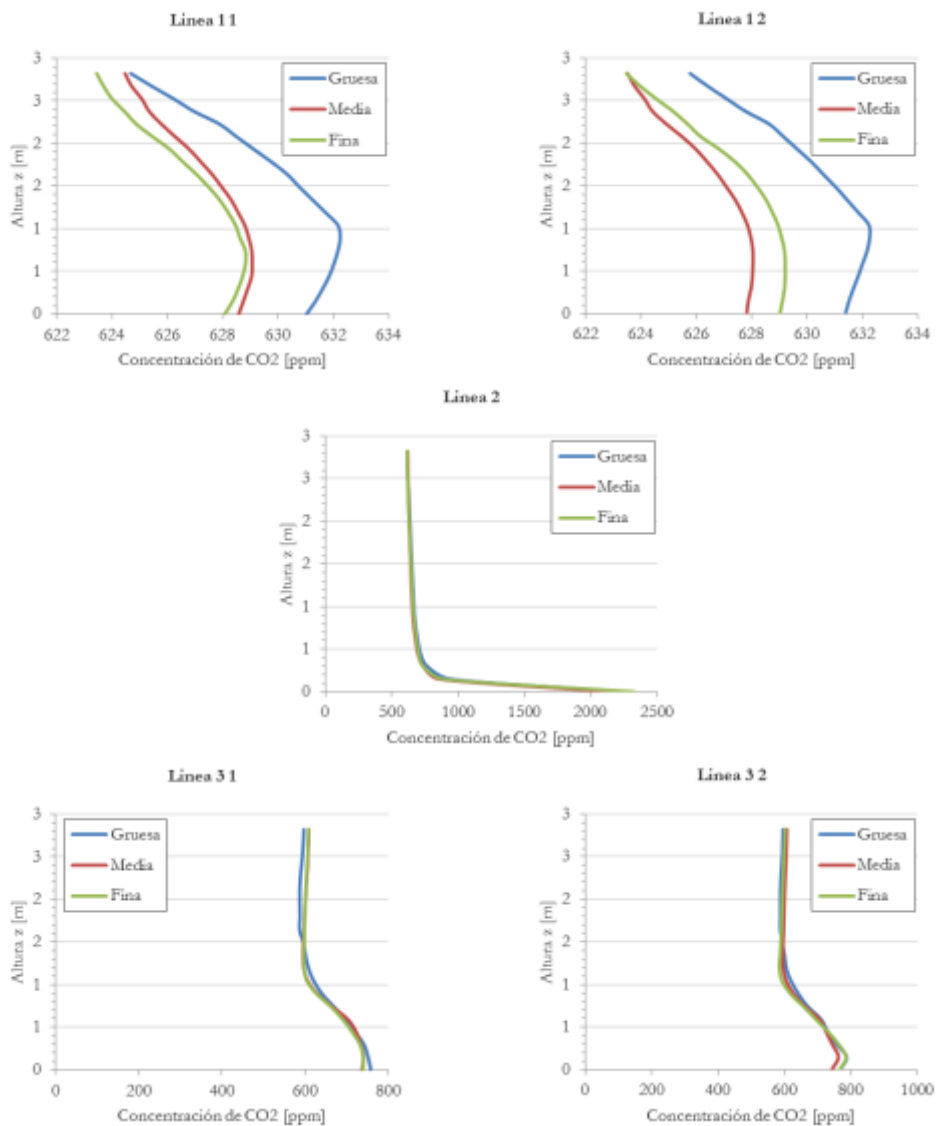


Figura 68: Perfiles de concentración de CO_2 de las verticales donde se encuentran ubicados los sensores

Tabla 48: Índice de convergencia para las mallas planteadas en la predicción de la concentración de CO_2

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

Tabla 48: Índice de convergencia para las mallas planteadas en la predicción de la concentración de CO₂ (Continuación)

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 49: 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

B.2.6.2. 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 inicializaron 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. Acogiéndose entonces SIMPLEC como el método de acoplamiento, se pudo entonces completar la disposición del modelo en lo que respecta al método de resolución (Tabla 50).

Tabla 50: 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 51*). El número de Reynolds confirma que el flujo dentro de la sala era de naturaleza turbulento. Lo anterior se refuerza en la *Figura 69*, en donde se observa la turbulencia principal que se genera a lo largo de la sala.

Tabla 51: 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]

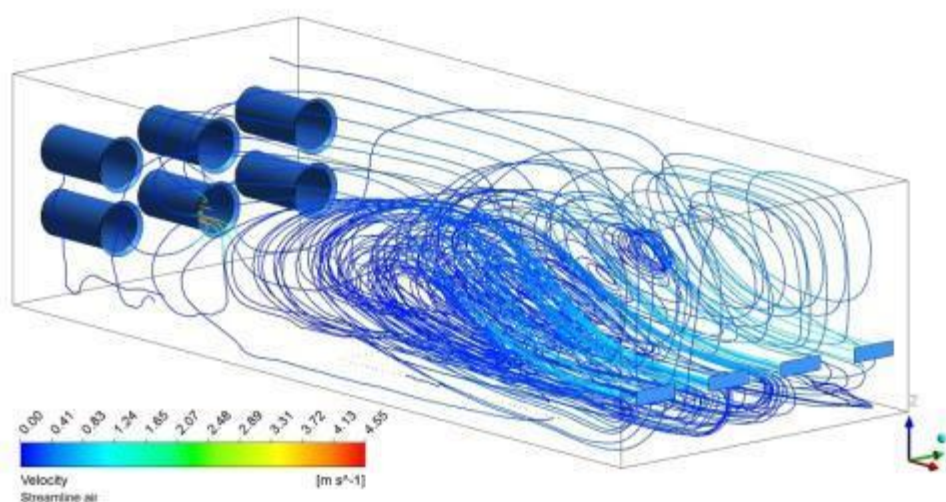


Figura 69: Estructura turbulenta del flujo del aire en la sala de experimentación

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 70 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 modulo (Tabla 52). El modulo de la velocidad responde a la siguiente expresión:

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

Gracias también a la Tabla 52 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 45). 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 las pérdidas de carga que no se tienen 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 52 a la ubicación del “sensor 2 2” y que en la Tabla 45 se denomina como plano 2

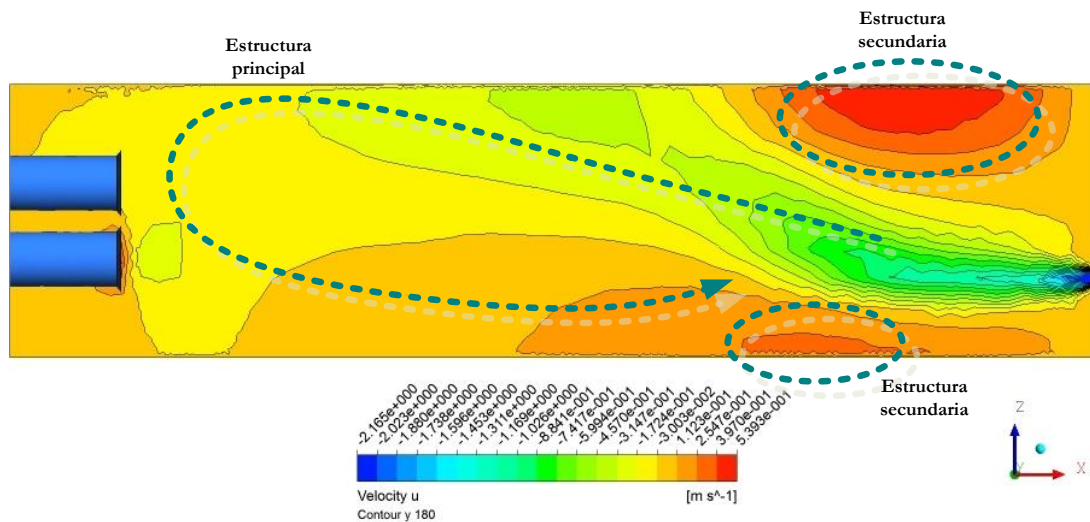


Figura 70: Plano con los contornos de velocidad en la coordenada y 1,80m

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 71 y Figura 72 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 71 se observa mucha variación, realmente es del orden de decimas, siendo el valor entero de 101327 Pa. Numéricamente se puede corroborar en la Tabla 53 la poca variación de los datos. Llevando a cabo una comparación con las muestras experimentales (ver Tabla 45), 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 diferencias presentadas se deben a las pérdidas de carga ignorada, así como a una homogenización exhaustiva de la simulación.

Tabla 52: 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

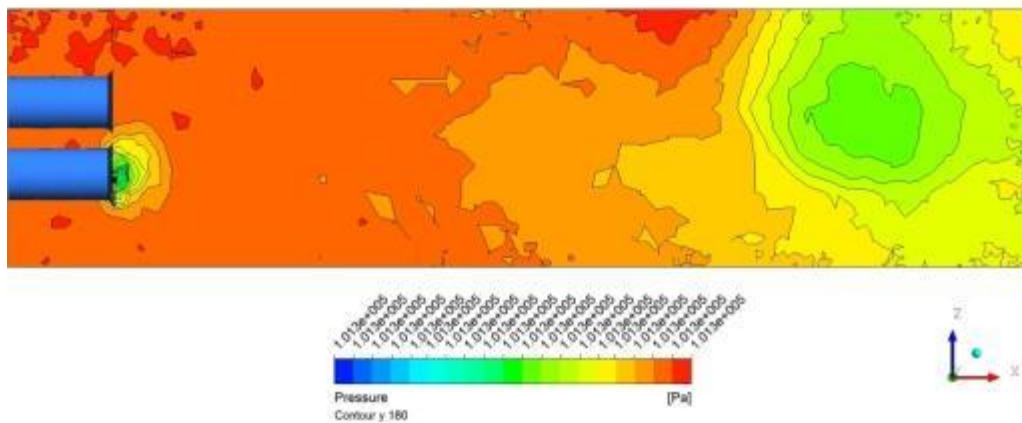


Figura 71: Plano de los contornos de presión en la coordenada y 1,80m

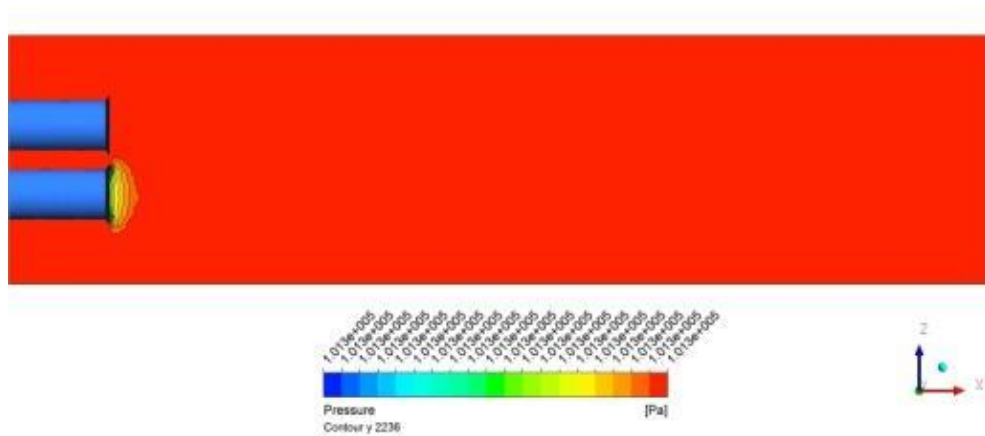


Figura 72: Plano de con los contornos de presión en la coordenada y 2,23m

Tabla 53: 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

B.2.6.3. 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 73*, 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. Lo anterior significa que una de las condiciones de contorno a ingresar en la simulación del modelo, vendría siendo la presión con que es expulsado el gas de los orificios de la manguera.

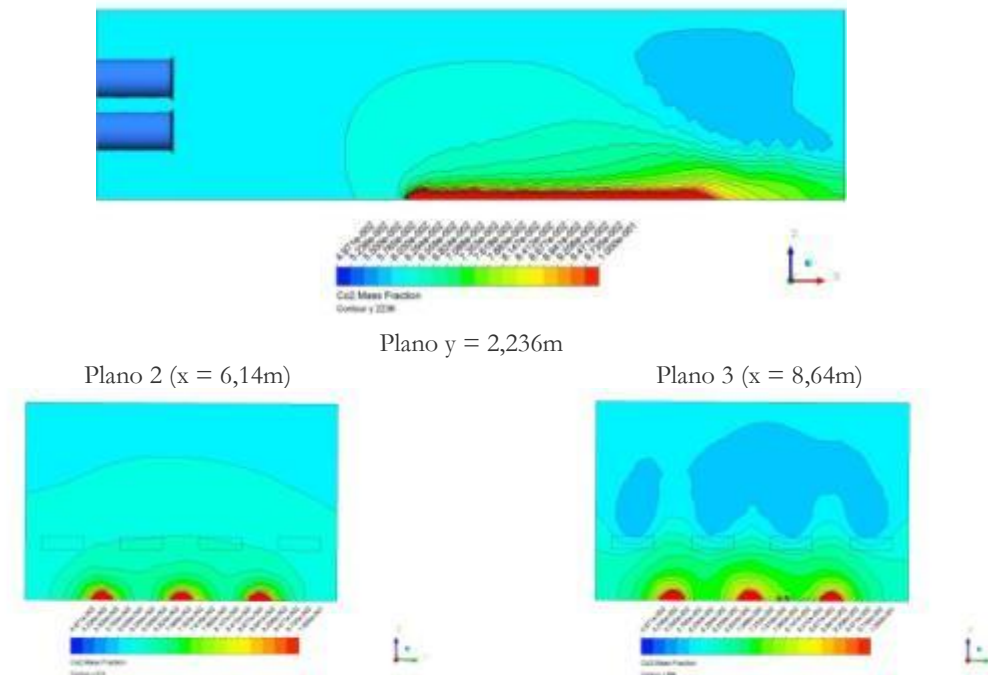


Figura 73: Planos con la distribución de la concentración de masa del CO₂

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 B.2.4, 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 65*). 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 de 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 la 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 está 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 74*).



Figura 74: 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 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 75* 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.

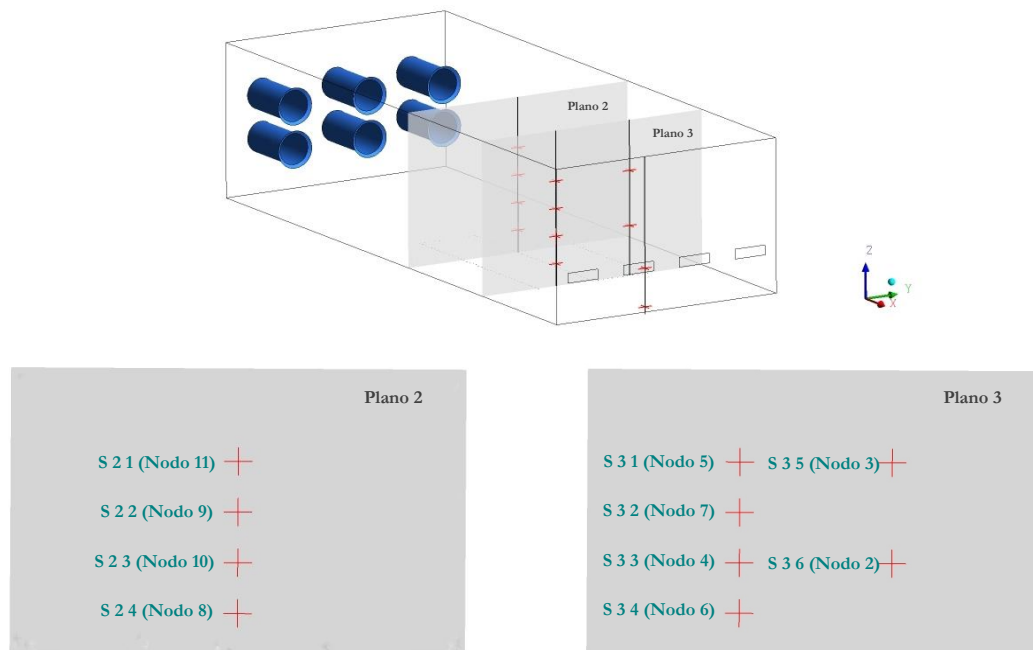


Figura 75: Disposición de los sensores de concentración de CO₂ para la medición de la acumulación del gas en una esquina

Tras la inyección del CO₂ en dos pruebas diferenciadas (*Figura 76*), 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.

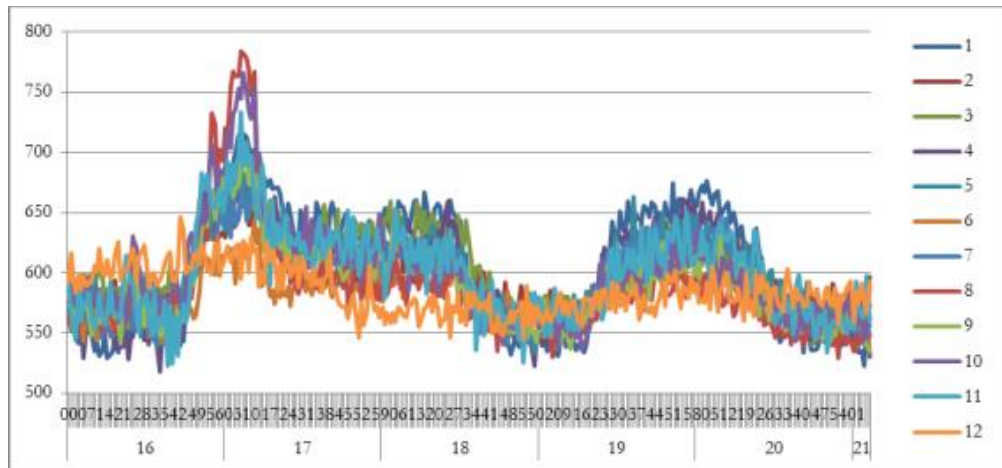


Figura 76: Medidas tomadas por los sensores de concentración [ppm] de CO₂ tras la inyección del gas en dos pruebas [hh:mm]

En la *Figura 77* 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 78* 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 varía 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 ($P_{ref} = 101325 \text{ Pa}$).

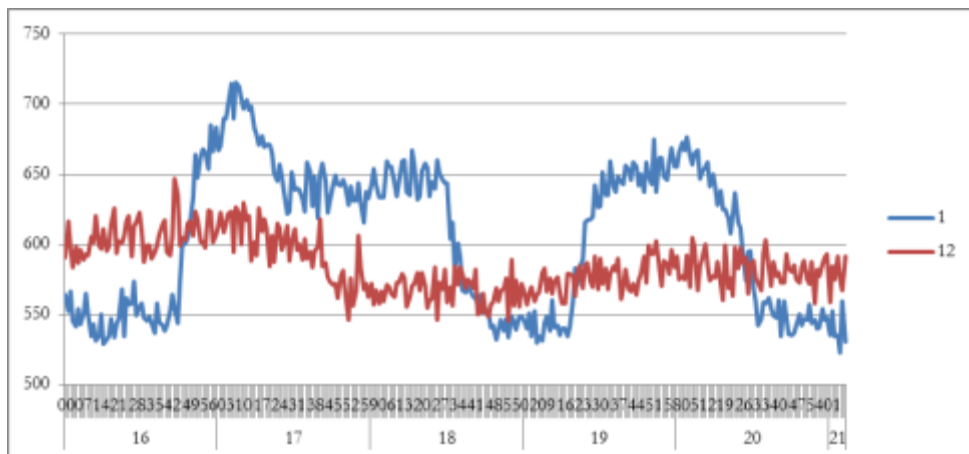


Figura 77: Medidas de concentración [ppm] de CO₂ por parte de los sensores ubicados en la vertical de la pared de las ventanas

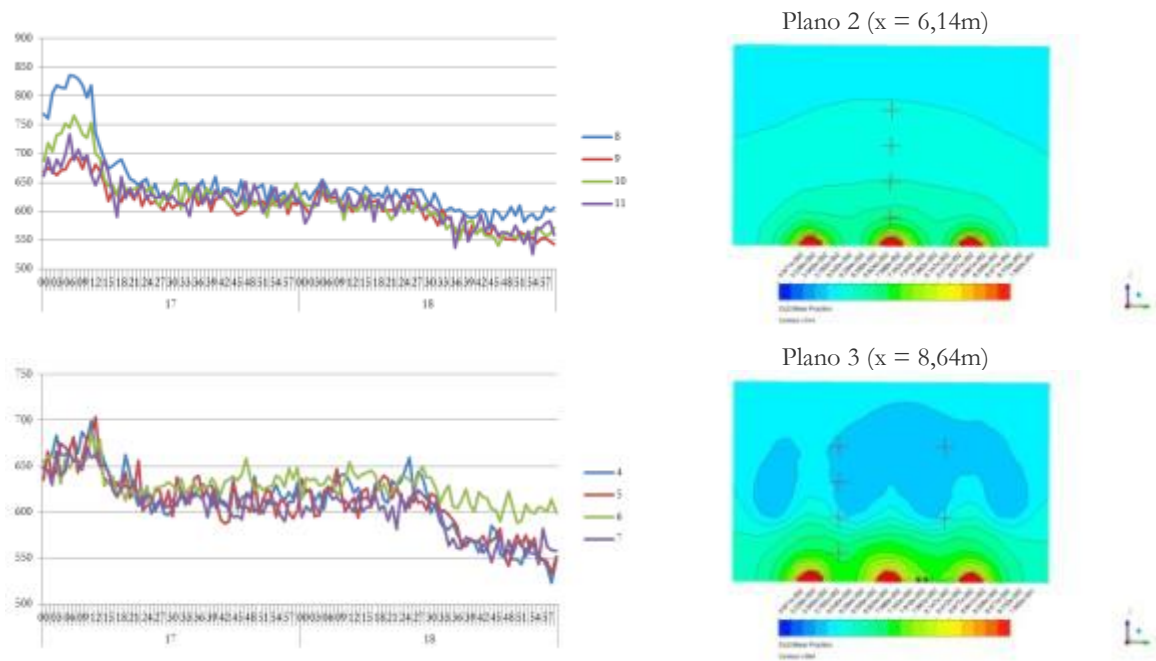


Figura 78: Comparación de la concentración del CO2 [ppm] entre una de las pruebas y la simulación

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 79* 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 P_{man} tan solo incrementa las diferencias verticales de estratificación entre los sensores. Como se ve en la *Figura 78* tales diferencias son bajas y por lo tanto se resuelve que el valor más adecuado para la condición de contorno es de 101329 Pa.

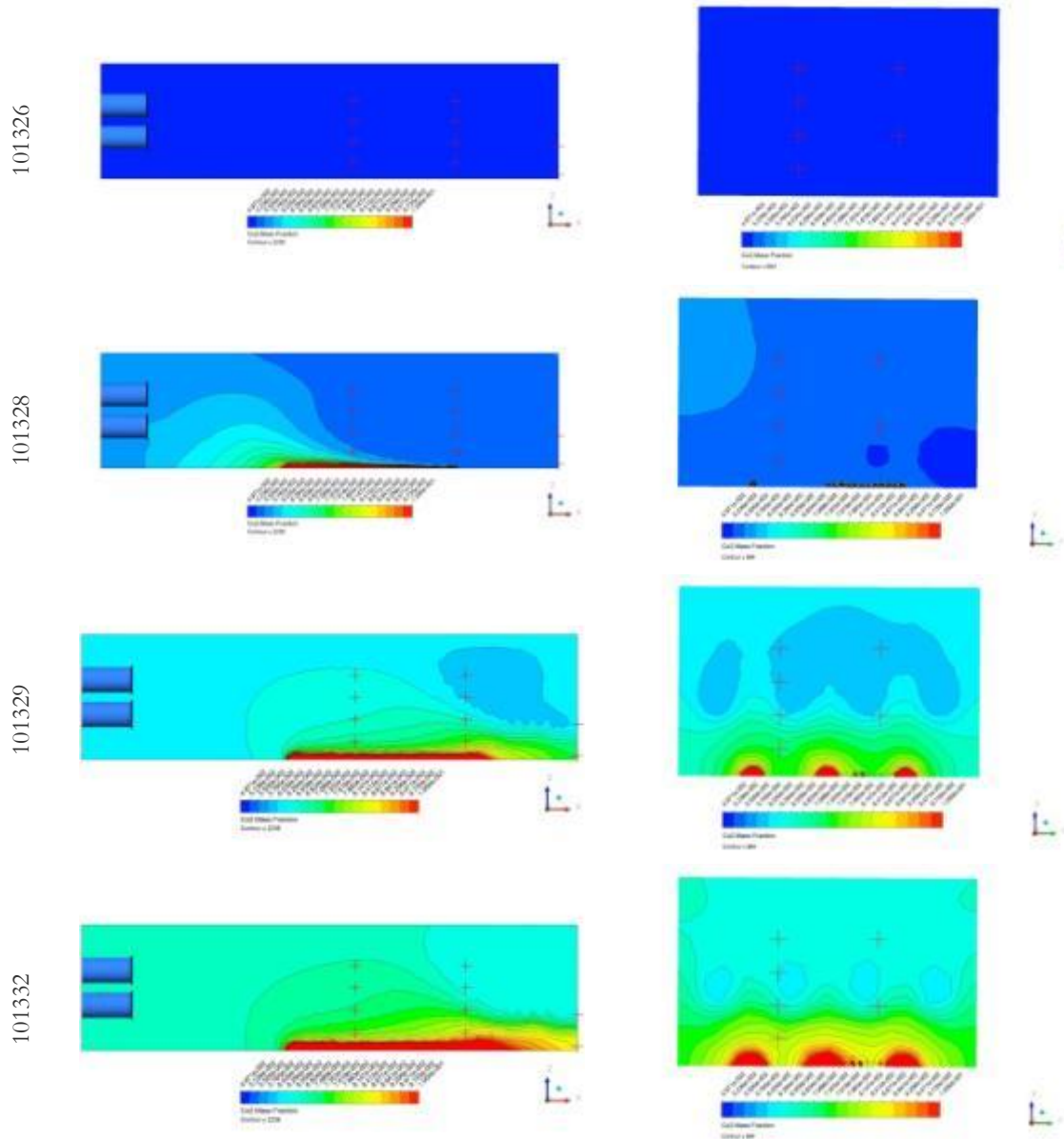


Figura 79: Comparación de algunos casos seleccionados donde se varía la presión de salida del CO₂ desde los orificios de la manguera

B.2.6.4. 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 80* 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.

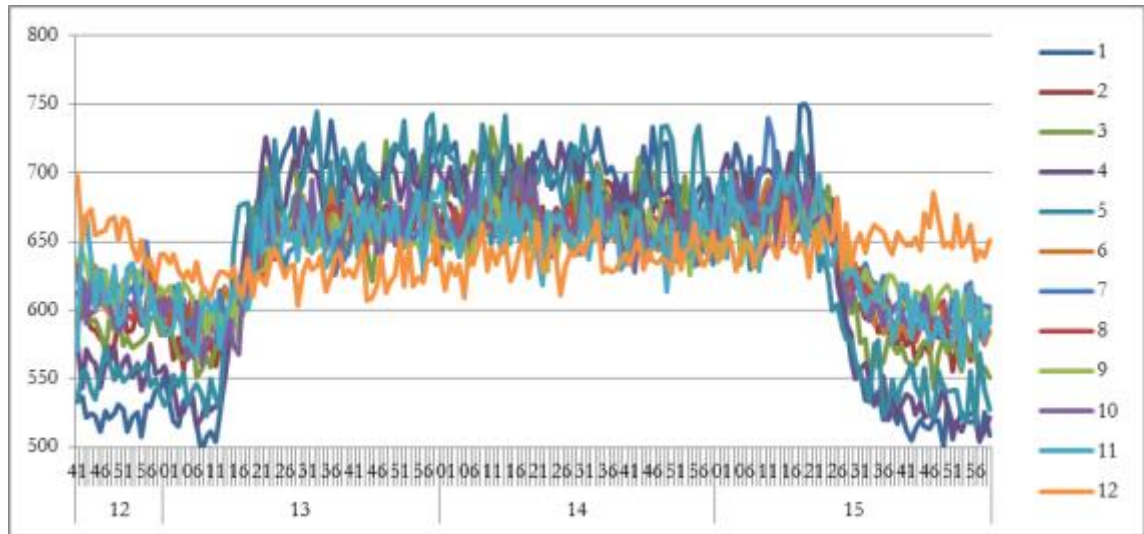


Figura 80: Curvas de medición de los sensores de concentración de CO₂ ante la inyección de gas y con ventilación constante

En la *Figura 81* 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 54* 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 81* 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 la 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.

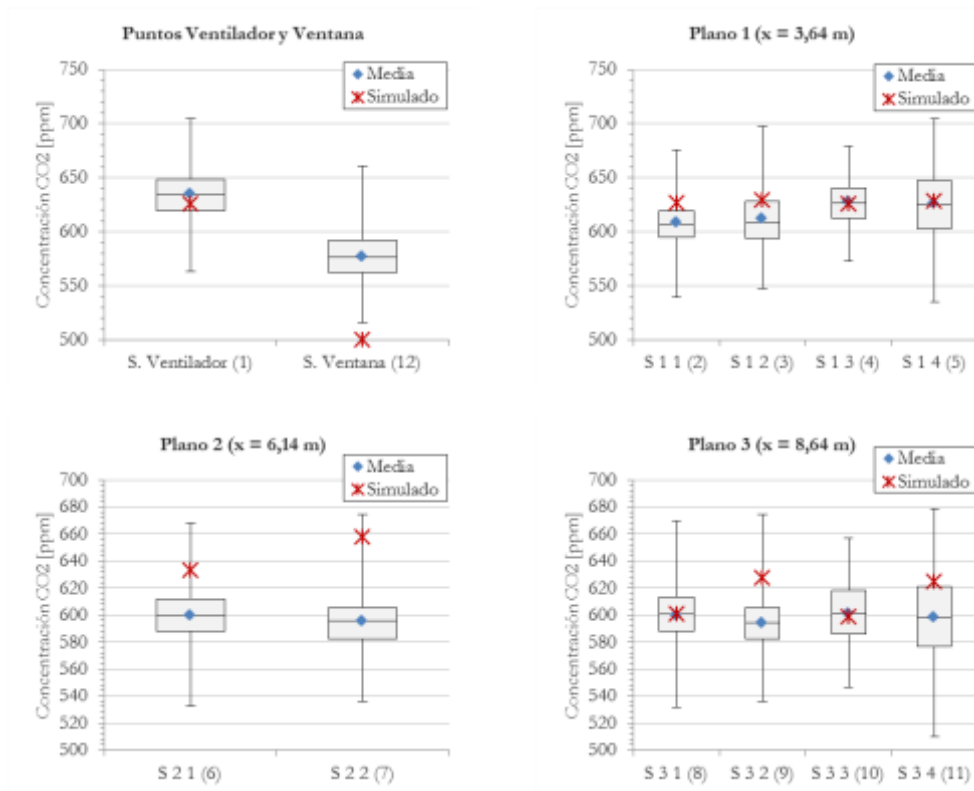


Figura 81: Comparación gráfica entre los rangos con cuartiles de las mediciones y los datos simulados en la misma posición

Tabla 54: 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)

<i>Sensor</i>	<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

B.2.7. Conclusiones del caso

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 turbulenta el $k - \epsilon$ 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 acepción 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 cómo 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 obtengan 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 se 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 (CH_4), 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 m^3 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 hallan 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 CO_2 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.

B.3. ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN DEL TRÁFICO EN UN AMBIENTE URBANO DE ESPAÑA

En la presente sección se recoge el estudio realizado para la comprensión de la dispersión de un contaminante en un área no controlada. Posee pues un incremento de la complejidad respecto al caso plasmado en la sección anterior. Se busca aplicar así las técnicas y tecnologías usadas en el caso de la cámara de ventilación controlada, con el fin de lograr un modelo numérico que explique las concentraciones y dinámicas de un contaminante gaseoso presente en una zona urbana delimitada de la ciudad de Valencia, España. El modelo teórico y las simulaciones desarrolladas en otras palabras, buscan obtener resultados de concentración de contaminantes, de su transporte y difusión en función del flujo de aire.

Se presentan algunos apartados que contienen el análisis de los datos arrojados por las estaciones climáticas instaladas por el Ayuntamiento de Valencia alrededor de la ciudad. El banco de datos generado servirá junto con los obtenidos por medio de la WSN diseñada y ubicada en puntos estratégicos del área de estudio, para obtener las variables de contorno necesarias en las simulaciones con CFD, como para la respectiva validación de los mismos modelos. Se logra entonces en otro apartado, un modelo estadístico de regresión con el banco de datos que sirve al posterior trabajo de obtención del modelo numérico de dispersión y transporte de sustancias contaminantes.

Para la sección central del caso que es la del desarrollo del modelo matemático, se plantean diferentes situaciones de tráfico y condiciones aerodinámicas. La técnica CFD empleada es RANS, la cual permite resolver las ecuaciones de Navier Stokes que gobiernan el flujo, así como los modelos de turbulencia y de dispersión. A diferencia del caso anterior, el mallado en esta ocasión se desarrolla estructurado, permitiendo un mayor control del dominio de simulación.

B.3.1. Especificaciones del espacio de estudio

En el presente apartado se relata la selección del área de estudio (a nivel de unos cientos de metros en alguna zona urbana importante de la ciudad de Valencia). Para ello se tienen en cuenta diferentes características que afectan el modelo matemático al que se desea llegar (tráfico, morfología urbana, niveles de contaminación, etc.). Implica entonces algunas reuniones y decisiones compartidas con el Ayuntamiento de Valencia, así como la tramitación de los permisos y licencias que permiten realizar la instalación de la WSN y equipos de medida en espacios públicos.

Se lleva a cabo un estudio de campo de las zonas que a priori, resultaban de interés, evaluando además el cumplimiento de las condiciones que se consideren óptimas para la experimentación y definición del caso piloto.

En este estudio de dichas zonas se observan esencialmente 3 aspectos:

- Condiciones morfológicas de la topología urbana (tales como homogeneidad del trazado, de las alturas de los edificios circundantes, etc.).
- Intensidad de tráfico (un primer análisis *de visu* y un segundo fundamentado en los datos de tráfico del Ayuntamiento de Valencia).
- Posibilidades prácticas de ubicación de los sensores.

Una vez seleccionada el área del caso piloto para la experimentación, se desarrolla un nuevo estudio de campo en el que se analiza la semaforización de la vía para la búsqueda de la ubicación idónea de los nodos.

B.3.1.1. Selección de la zona para el caso piloto

Se proponen para la definición de la zona de análisis y modelado de dispersión de contaminantes en la ciudad de Valencia, 3 posibles áreas: Barrio de Ruzafa, C/ Colón y adyacentes, y C/ Clariano. A continuación, se detallan los croquis y un resumen de algunos aspectos de interés de la zona en cuestión.

Zona Ruzafa: Para el caso de estudio se plantea la zona del barrio de Ruzafa por sus características generales siguientes (*Figura 82*):

- Barrio antiguo, emblemático de la ciudad de Valencia y céntricamente situado.
- Topología urbana con rasgos homogéneos en parte del trazado pero con la suficiente diversidad espacial.
- Zona urbana, comercial con un intenso uso público.
- Densidad de tráfico alta por su ubicación general en la ciudad, rodeado por grandes vías y por lo tanto contaminación significativa.

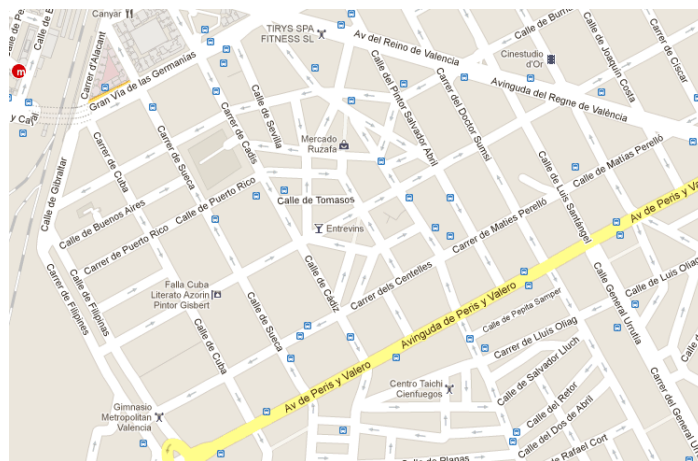


Figura 82: Ubicación del barrio Ruzafa dentro de la Ciudad de Valencia (Google Maps)

En la *Figura 83* se plasma un esquema con las principales vías a considerar para el estudio de caso y la posible disposición de la WSN en la zona de Ruzafa.

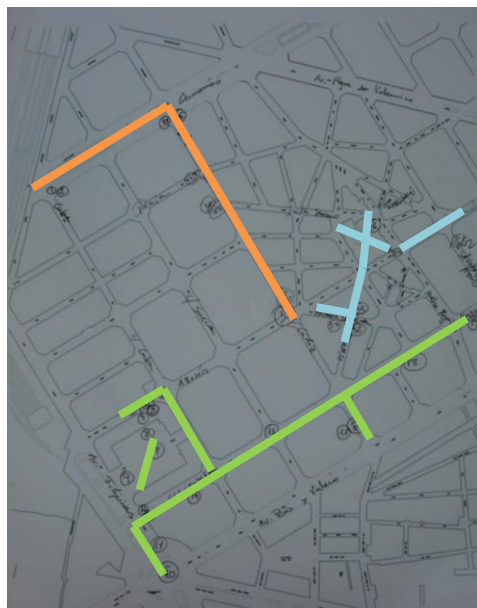


Figura 83: Vías de interés para el estudio dentro de la zona de Ruzafa

Dado que a partir de los datos de la morfología urbana de la zona seleccionada se define el modelo geométrico, se distinguen a su vez 3 sub-zonas que buscan facilitar la organización de los experimentos:

- Sub-zona 1, cuadrante superior izquierdo: Puntos de máxima afluencia de tráfico entre Gran vía Germanías, C/ Filipinas y desvío a la C/ Cádiz.
- Sub-zona 2, C/ Centelles y alrededores: Consiste en proponer la C/ Centelles y su continuación, C/ Maties Perelló, considerando alguna referencia en los alrededores.
- Sub-zona 3, Mercado de Ruzafa y alrededores: Con una topología intensamente irregular y combinando áreas peatonales, el núcleo característico sería el Mercado de Ruzafa.

En la *Figura 84* se puede observar la comparativa de la intensidad media diaria de tráfico en las principales calles que conforman la zona propuesta. Se visualiza un nivel de intensidad alto en las vías Gran Vía Marqués del Turia y Av. Peris y Valero, un nivel de intensidad medio en la Av. Filipinas (por debajo de 30.000 vehículos/día) y un nivel de intensidad bajo (menos de 10.000 vehículos/día) en las calles Centelles, Cádiz, Sueca y Maties Perelló.

Por otro lado, en cuanto a la evolución anual del tráfico se observa un periodo de máximos en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre (con máximo absoluto en el mes de octubre) tendencia que coincide para todas las vías. En cuanto a las intensidades mínimas se presentan en el mes de agosto, donde todas las vías evaluadas presentan el mismo fenómeno (hecho que concuerda con el periodo vacacional).

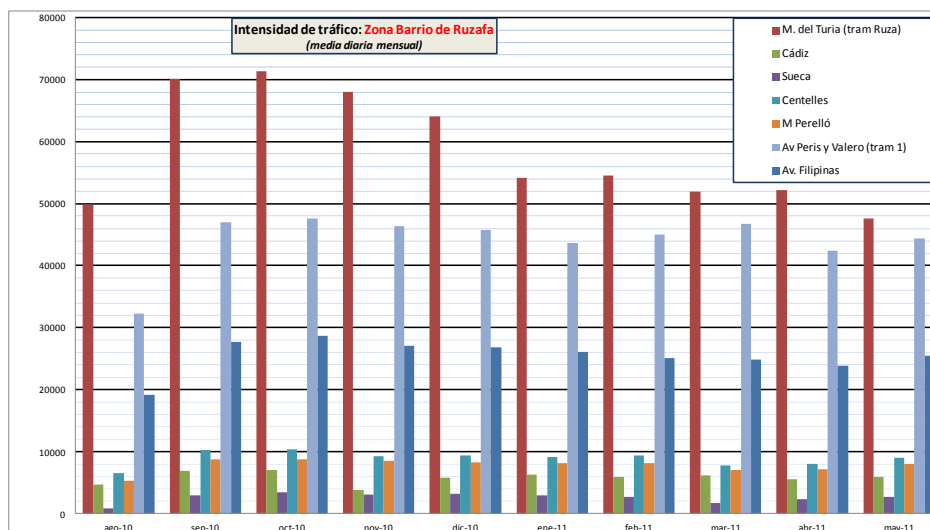


Figura 84: Evolución anual de la intensidad media diaria del tráfico en la zona de Ruzafa

Zona Colón: Para el caso de estudio se plantea la zona de la C/ Colón y alrededores, por sus características generales siguientes (Figura 85):

- Centro neurálgico, emblemático del comercio de la ciudad de Valencia, céntricamente situado.
- Topología urbana con rasgos homogéneos, cuadrícula de vías de trazado muy regular.
- Zona urbana, comercial con un intenso uso público.
- Densidad de tráfico alta por tratarse de una de las grandes vías de la ciudad, arteria central (por tanto, nivel de contaminación alto o significativo).

En la *Figura 86* se plasma un esquema con las principales vías a considerar para el estudio de caso y la posible disposición de la WSN en la zona de Colón y alrededores.

En la *Figura 87* se puede observar la comparativa de las distintas calles y cuantificar los niveles de tráfico para cada una de ellas. Se observa un nivel de intensidad de tráfico medio - alto en los dos tramos de la C/ Colón y en la C/ Ruzafa (cerca de los 30.000 vehículos/día como máximo y los 15.000 como mínimo) y un nivel de intensidad bajo (rondando los 5.000 vehículos/día) en las calles adyacentes a la C/Colón Isabel la Católica, Hernán Cortés y Roger de Lauria.

Por otro lado, en cuanto a la evolución anual del tráfico se observa un periodo de máximos en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre (con máximo absoluto en el mes de octubre) tendencia que se constata coincidente para todas las vías. Se presenta además un mínimo en el mes de agosto, que es coincidente para todas las vías (hecho que parece explicarse, al igual que en la zona anterior, por el periodo vacacional y por tanto la disminución de concentración de la población urbana).

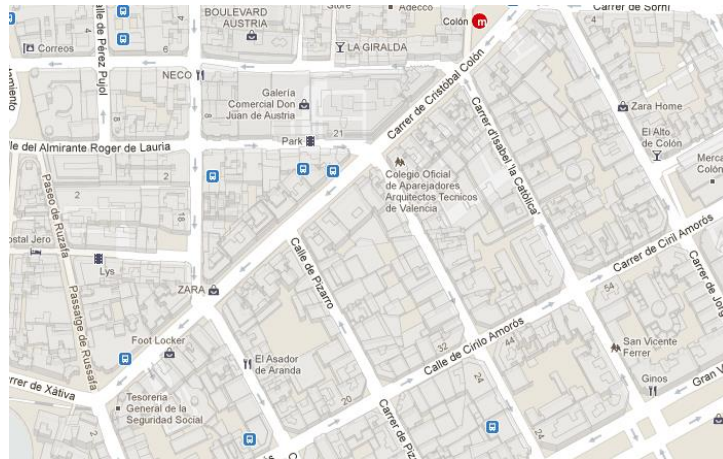


Figura 85: Ubicación de la C/ Colón y alrededores dentro de la Ciudad de Valencia (Google Maps)

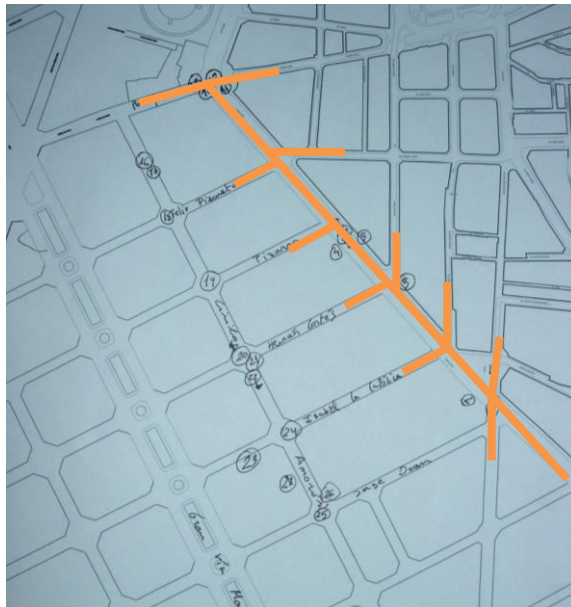


Figura 86: Vías de interés para el estudio dentro de la zona de Colón y alrededores

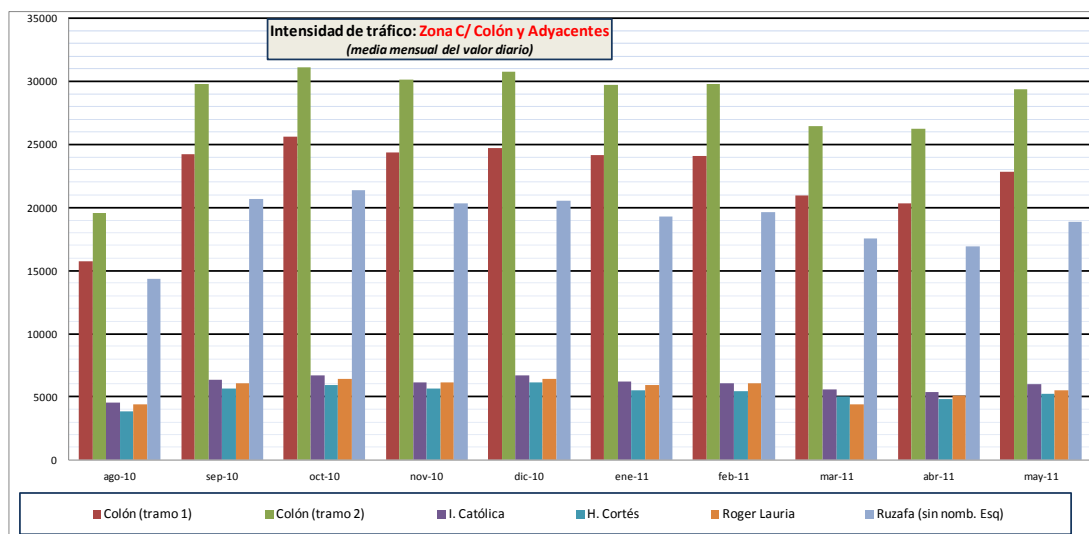


Figura 87: Evolución anual de la intensidad media diaria del tráfico en la zona de Colón y alrededores

Zona Clariano: Para el caso de estudio se plantea la zona de la C/ Clariano y alrededores, por sus características generales siguientes (Figura 88):

- Una de las principales entradas a la ciudad de Valencia, tráfico intenso.
- Topología urbana con rasgos homogéneos, cuadrícula de vías de trazado muy regular.
- Zona urbana, comercial con un intenso uso público.
- Densidad de tráfico alta por tratarse de una de las grandes vías de la ciudad, arteria central (por tanto, nivel de contaminación alto o significativo).



Figura 88: Ubicación la C/ Clariano dentro de la Ciudad de Valencia (Google Maps)

En la *Figura 89* se plasma un esquema con las principales vías a considerar para el estudio de caso y la posible disposición de la WSN en la zona de Clariano.

En la *Figura 90* se puede observar la comparativa de las distintas calles y cuantificar los niveles de tráfico para cada una de ellas de la zona de Clariano. En la comparativa de las intensidades de tráfico, se observa un nivel de intensidad alto (por encima de los 50.000 vehículos/ día) en los dos tramos de la Av. Blasco Ibáñez y en la Av. Catalunya, principales vías de influencia en la zona, un nivel de intensidad medio (en torno a los 30.000 vehículos/día) en las vías C/Clariano y C/ Ramon Llull y un nivel de Intensidad Bajo en la C/ Serpis.

Por otro lado, en cuanto a la evolución anual del tráfico se observa un periodo de máximos en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre (con máximo absoluto en el mes de octubre) coincidiendo con la pauta general observada también para las otras dos zonas analizadas aunque en este caso, con unos picos menos marcados, es decir con una tendencia media anual más constante. Se presenta también un mínimo en el mes de agosto coincidente para todas las vías (hecho que se explica, al igual que en las zonas anteriores, con la temporada vacacional y por tanto la disminución temporal en la concentración de la población urbana).

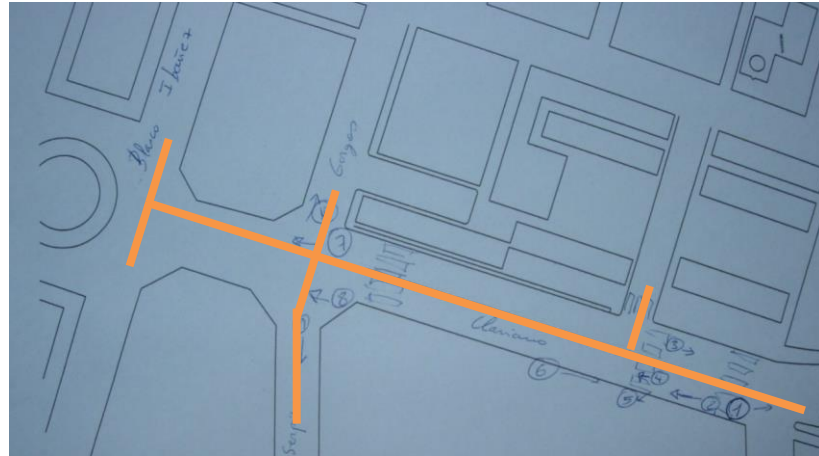


Figura 89: Vías de interés para el estudio dentro de la zona de Clariano

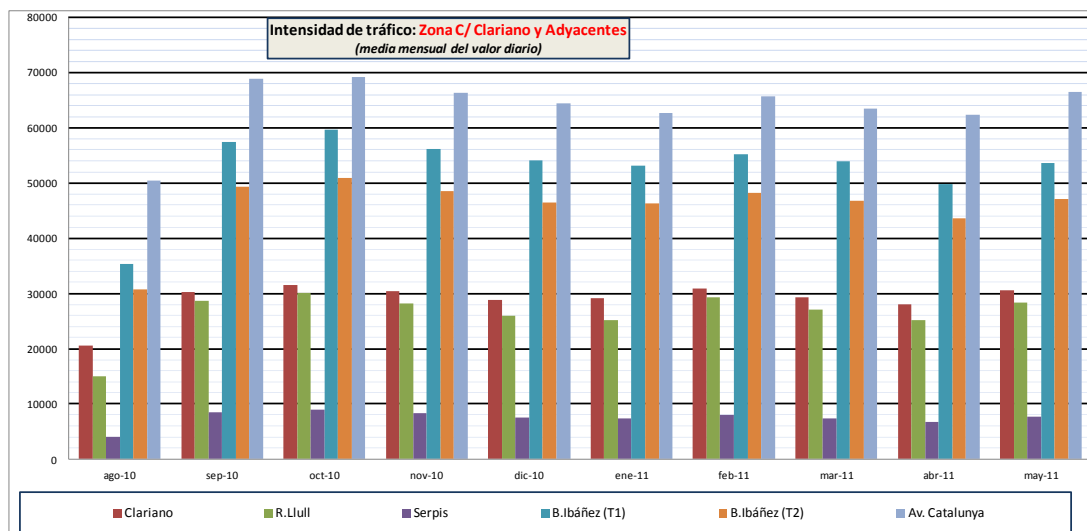


Figura 90: Evolución anual de la intensidad media diaria del tráfico en la zona de Clariano

Tras el análisis de las zonas planteadas, se decide realizar la campaña experimental del caso de estudio en zona de la C/ Colón y alrededores, ya que en comparación con las otras zonas propuestas, presenta mejores condiciones por lo siguiente:

- Área situada céntricamente respecto al núcleo urbano de la ciudad de Valencia.
- Tráfico más homogéneo y significativo.
- Morfología más encerrada lo que provoca mayor concentración de contaminantes.
- Mayor uso público y frecuencia poblacional.

Por lo anterior, se realiza una inspección visual que se encuentra en la *Tabla 76* del *ANEXO II*, al igual que una extracción de las características más relevantes que posee la morfología de la zona.

B.3.1.2. Selección de ubicación de sensores

A continuación se expone una descripción detallada de los cruces de la C/ Colón en el tramo de estudio indicando para cada uno de ellos el número de semáforos totales y el tipo (se distinguen 3 tipos, que a continuación se detallan) acompañando el texto de imágenes de todos los elementos.

Los tipos generales de semáforos que se han detallado son dos (A y B), subdividiéndose los últimos en otros dos (B2 y B3).

- Tipo A: Semáforos altos, con mástil que se eleva y curva hasta la horizontal, alcanzando en vuelo la parte media de la calle.
- Tipo B: Semáforos bajos, en los cuales el mástil o poste acaba recto a altura normal. Dentro de estos, se ha subdividido en dos tipos en función si tienen 2 o 3 lámparas en la cabeza dedicada a la regulación del tráfico peatonal. Esta tercera lámpara, que se añade a las de luz verde o roja, se trata del contador de segundos que incorporan algunos semáforos para peatones y que indica el tiempo que resta para el cambio de luz.

A parte de la caracterización general, cada elemento tiene sus particularidades (sean señales acopladas, orientación, distribución y número de lámparas, etc.) que pueden resultar de interés para el objeto presente estudio por lo que se analizan individualmente, elemento a elemento, la gran mayoría de características.

En la zona de estudio definida para la C/ Colón (tramo desde Plaza de los Pinazo hasta el inicio, unión con Ruzafa), contando los dos extremos, existen 6 cruces con otras vías que a continuación se detallan (*Figura 91*).

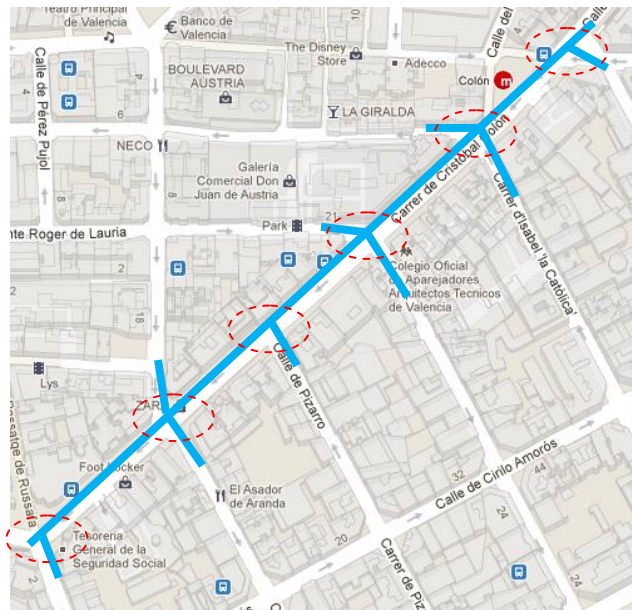


Figura 91: Zona de estudio en la C/ Colón con los 6 cruces señalados

Cada cruce ha sido individualmente caracterizado y plasmado desde la *Tabla 77* a la *Tabla 82* que se encuentran en el *ANEXO II* y que contienen los siguientes campos:

- Nombre de las calles que conforman el cruce.
- Croquis de campo y paralelamente, para su mejor comprensión, foto aérea del mismo.
- Breve descripción general.
- 3 columnas de descripción con imágenes. Donde, en la 1ª columna se indica el número de la imagen que se corresponde con lo anotado en el croquis de campo y a su lado (/) los tipos de semáforos que se encuentran en la imagen, en la 2ª columna la imagen y en la 3ª columna una breve descripción explicativa de lo representado.

El análisis realizado, junto con las diferentes reuniones llevadas a cabo con la Sección de Control de Tráfico del Ayuntamiento de Valencia da como resultado la identificación de los elementos de semaforización aptos para la instalación de los nodos o sensores.

Se ha evitado entonces los dos cruces extremos de la zona de estudio, por considerarse más irregulares morfológicamente y por tanto con mayores turbulencias en el comportamiento del flujo del fluido, lo que genera una distribución aún más irregular de los contaminantes en el aire.

Cabe señalar que por motivos de seguridad todos los semáforos que se seleccionan para la ubicación de sensores han sido de tipo A (altos), pudiendo así además localizarse a una distancia de 3 m sobre el plano de la calzada.

B.3.2. Análisis descriptivo de la contaminación en la ciudad de Valencia

B.3.2.1. Caracterización de las estaciones de medida de la contaminación atmosférica del Ayuntamiento de Valencia

El Ayuntamiento de Valencia ha instalado 6 estaciones en diferentes puntos de la ciudad para la monitorización y el control ambiental. Éstas son nombradas de la siguiente forma:

- *UPV*
- *MOLÍ DE SOL*
- *PISTA DE SILLA*
- *VIVEROS*
- *FRANCIA*
- *BULEVARD SUD*

En el presente apartado sólo se comentará la caracterización de la estación de Viveros. La información para las restantes estaciones se adjuntará en el *ANEXO I*.

Como se observa la *Figura 92*, esta estación se encuentra ubicada en el interior del Jardín de Viveros, lo que a escala micro puede influir en su caracterización. En una escala más amplia, como puede observarse en el plano de localización de estaciones (*Figura 93*), su posición es céntrica respecto a la ciudad de Valencia, más alejada de la influencia marítima que la estación de la UPV y sometida a una mayor influencia de la atmósfera urbana cerrada.



Figura 92: Imágenes aéreas obtenidas con Google Maps con la ubicación de la estación de Viveros

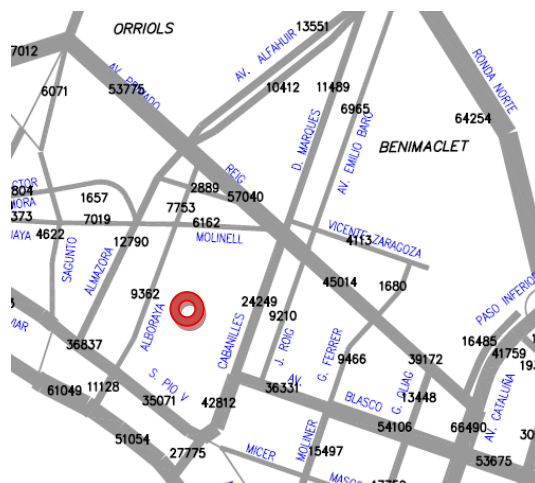


Figura 93: Plano de la intensidad del tráfico en inmediaciones a la estación de Viveros

En la caracterización del tráfico circundante a la estación, pese a su particular localización a escala micro dentro del Parque de Viveros, se sitúa según el siguiente esquema de intensidades (Figura 94) y se considera de referencia las vías de C/ Alboraya y C/ de S. Pio V.

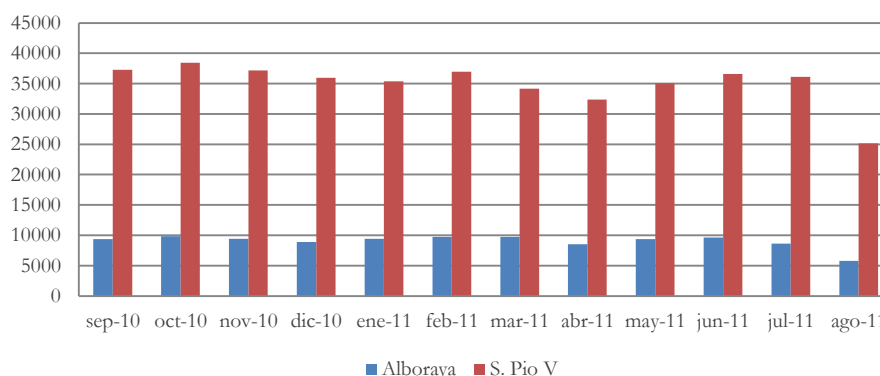


Figura 94: Intensidad media del tráfico alrededor de la estación de Viveros (Elaboración propia a partir de los datos de la estación del Ayuntamiento de Valencia)

Existe una patente diferencia de magnitud entre ambas vías: intensidad alta (en torno a los 35000 vehículos medios diarios) para S. Pío V y Media (en torno a los 10000 vehículos medios diarios) para C/ Alboraya. Pero pese a esto, ambas son coincidentes en la localización temporal de un máximo en el mes de octubre y un mínimo en el mes de agosto. Retirando el mes de agosto del análisis, las variaciones no son muy amplias en el resto de periodos, notándose un ligero incremento en los meses de septiembre, noviembre, febrero, junio y julio.

B.3.2.2. Análisis por estaciones del Ayuntamiento de Valencia

Es posible adjuntar las medidas de cada una de las estaciones habilitadas en la red monitoreo y control ambiental dispuestas por el Ayuntamiento de Valencia. No obstante, en el presente apartado sólo se plasmará una de ellas, la cual se considera como la más cercana a la zona de estudio. Sin embargo la cercanía y preponderancia se discutirá en una de las siguientes secciones. El análisis de las demás estaciones se adjunta en el ANEXO I.

La estación seleccionada a comentar en el presente apartado es la de Viveros. Viveros, con datos disponibles desde el año 2003, se localiza en los jardines del Real (Viveros). Los contaminantes de los que está proporcionando datos diariamente son los siguientes: SO₂, Ozono, NO_x, NO, NO₂, CO, como en otras estaciones de la Red, incluyendo además la medición de los compuestos

Benceno, Tolueno y Xileno, hidrocarburos aromáticos, lo que correspondería a compuestos orgánicos volátiles (VCO's). No proporciona datos de partículas en suspensión pero sí de contaminación acústica midiendo el nivel de presión sonora (SPL) que se expresa en decibelios (dB).

En la *Figura 95* se representa la evolución anual de los contaminantes objeto de estudio que coinciden en este caso con los medidos en la estación de viveros, siendo: SO₂, Ozono, NO, NO₂ y CO.

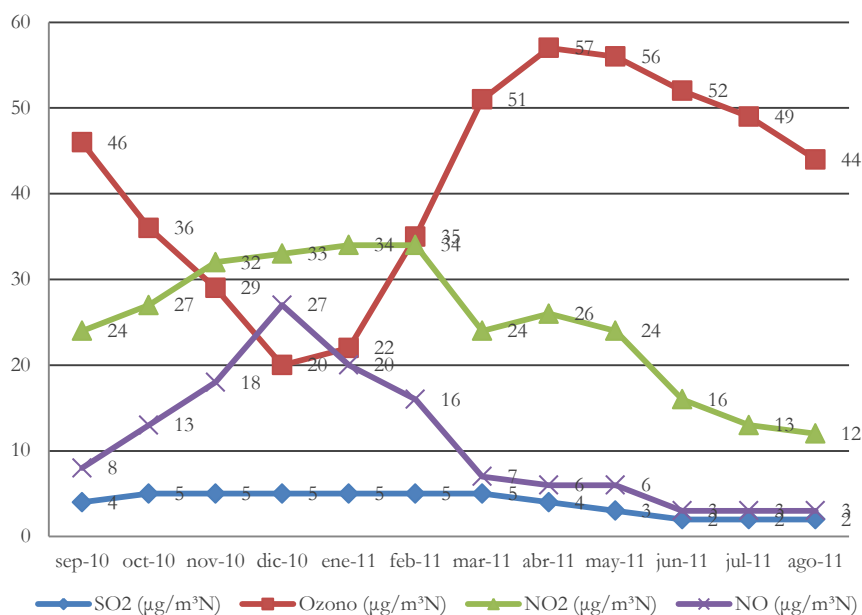


Figura 95: Evolución anual de la concentraciones medias mensuales de los contaminantes medidos por la estación ambiental de Viveros (Elaboración propia a partir de los datos de la estación del Ayuntamiento de Valencia)

Es posible extraer entonces:

- El *dióxido de azufre* se mantiene entre unos valores bajos de 2 a 5 µg/m³N, alcanzando su valor máximo en el periodo de octubre a marzo y el mínimo en los meses de junio-julio y agosto.
- El *ozono* vuelve a seguir una pauta muy similar a la estudiada en otras estaciones, con un máximo (algo desplazado) entre abril y mayo y un mínimo en el mes de diciembre. Se mantiene pues clara la tendencia, posiblemente asociada a una variación estacional.
- El *dióxido de nitrógeno* se sitúa en valores más altos en el periodo de noviembre a febrero (tendencia creciente hasta este mes de valor máximo, febrero) para después descender el resto del año hacia un mínimo marcado en agosto. Este comportamiento también marca una tendencia similar a las anteriores estaciones.
- El *monóxido de nitrógeno* vuelve a seguir líneas similares a las pautas del dióxido de nitrógeno, con mayores saltos, agudizando un máximo muy marcado en diciembre, para después descender brusca y constantemente hacia un valor mínimo que se mantiene los meses de junio, julio y agosto.
- El máximo que se produce en diciembre para el NO, coincide con el periodo alto del NO₂, pero no tiene en este caso sin embargo, una identificación paralela exacta con el máximo de del anterior, sino ligeramente desplazada hacia la izquierda.

- La concentración medida de CO permanece bastante constante en la media de 0,3 mg/m³N prácticamente todo el año, con una ligera bajada en el mes de julio y los meses de septiembre y octubre (*Figura 96*).

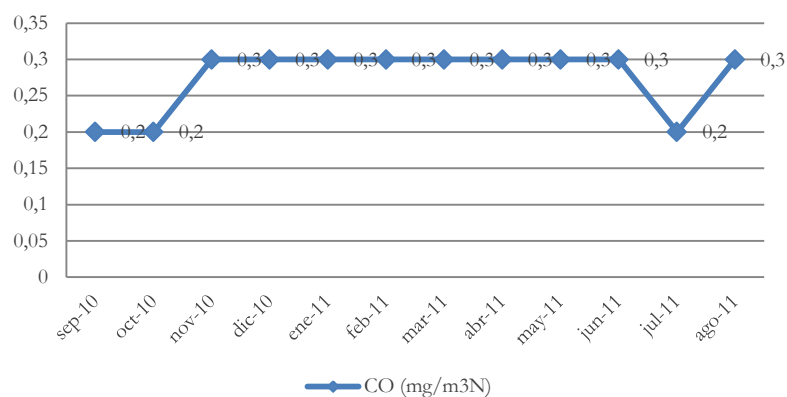


Figura 96: Evolución anual de la concentración media mensual del CO medido por la estación ambiental de Viveros (Elaboración propia a partir de los datos de la estación del Ayuntamiento de Valencia)

Al encontrarse la estación ubicada en un el parque de Viveros, se considera la posibilidad de la influencia de las producciones de CO proveniente de la vegetación en los datos adquiridos.

B.3.2.3. Análisis por contaminantes de las estaciones del Ayuntamiento de Valencia

Tras un análisis de la tendencia los contaminantes medidos en cada estación de la red y habiendo extraído las conclusiones posibles de estas tendencias anuales, es de gran interés realizar un estudio comparativo por contaminante.

Para ello, a partir de los datos de concentración anuales para cada contaminante suministrados por el Ayuntamiento de Valencia, se realizan las gráficas comparativas que se exponen a continuación y de cuya observación se extraen las conclusiones para cada uno de los contaminantes estudiados.

B.3.2.3.1. Ozono

Las máximas concentraciones de Ozono troposférico se producen en el mes de mayo, coincidiendo así, como se observa en la *Figura 97*, en todas las estaciones de medida de la red de la ciudad de Valencia, suponiendo esto una marcada tendencia estacional. Dentro de esto, el valor máximo absoluto para este componente se obtiene en la estación UPV.

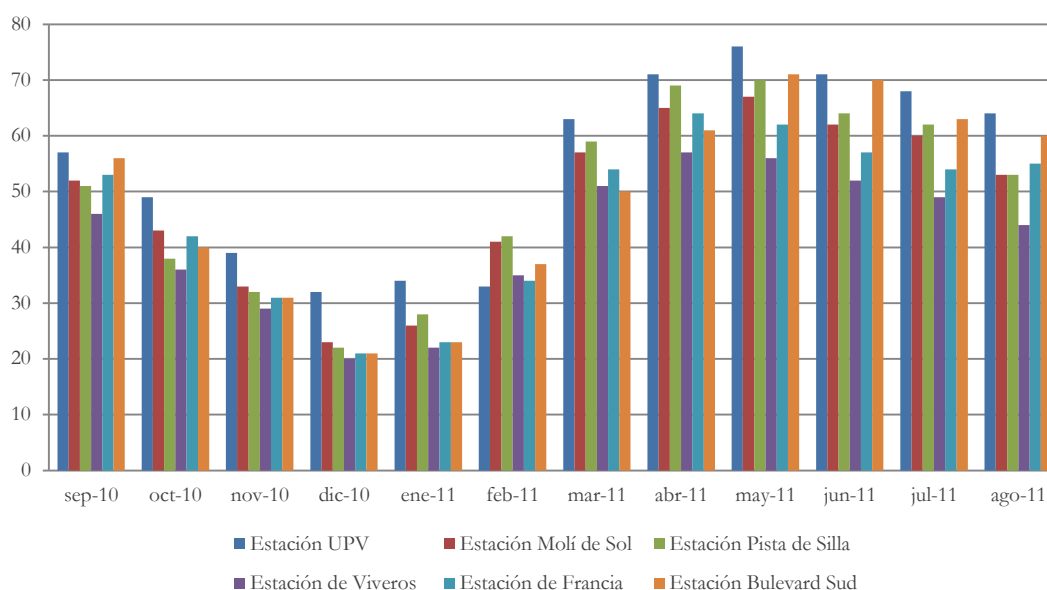


Figura 97: Valores medios mensuales de las concentraciones de Ozono troposférico [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] por estaciones

B.3.2.3.2. Dióxido de Azufre

La estación que alcanza valores máximos para el dióxido de azufre es, en cambio, la estación Bulevard Sud (Figura 98). También este componente sigue una pauta temporal similar a lo largo del año en todas las estaciones de la red, marcando su máximo en febrero y el mínimo entre julio y agosto, aunque no de un modo tan marcado ni exactamente coincidente como en el ozono troposférico (no se cumple, por ejemplo, para la estación de Francia donde el mínimo se produce entre el mes de mayo y junio).

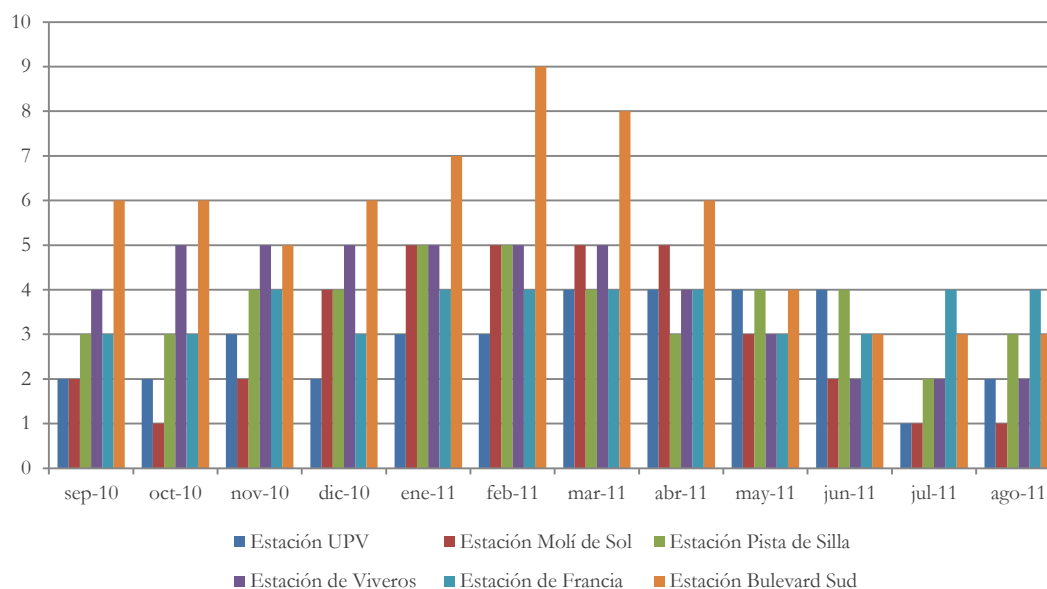


Figura 98: Valores medios mensuales de las concentraciones de Dióxido de Azufre [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] por estaciones

B.3.2.3.3. Dióxido de Nitrógeno

Las máximas se obtienen en la estación Bulevard Sud (Figura 99) y el máximo absoluto en el mes de diciembre, marcándose ese periodo invernal como de máximos generales en todas las estaciones.

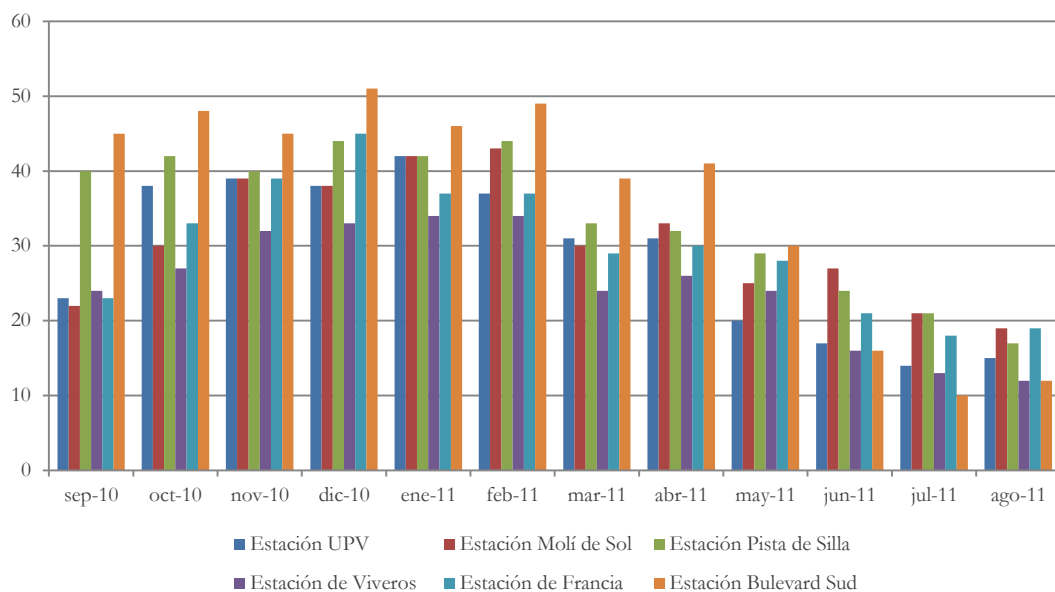


Figura 99: Valores medios mensuales de las concentraciones de Dióxido de Nitrógeno [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] por estaciones

B.3.2.3.4. Monóxido de Nitrógeno

Valores máximos en la estación Pista de Silla (Figura 100), y máximo, coincidiendo con el dióxido de nitrógeno con el que como ya se ha observado mantiene un alto grado de paralelismo en el comportamiento tendencial a lo largo del año, también en el mes de diciembre.

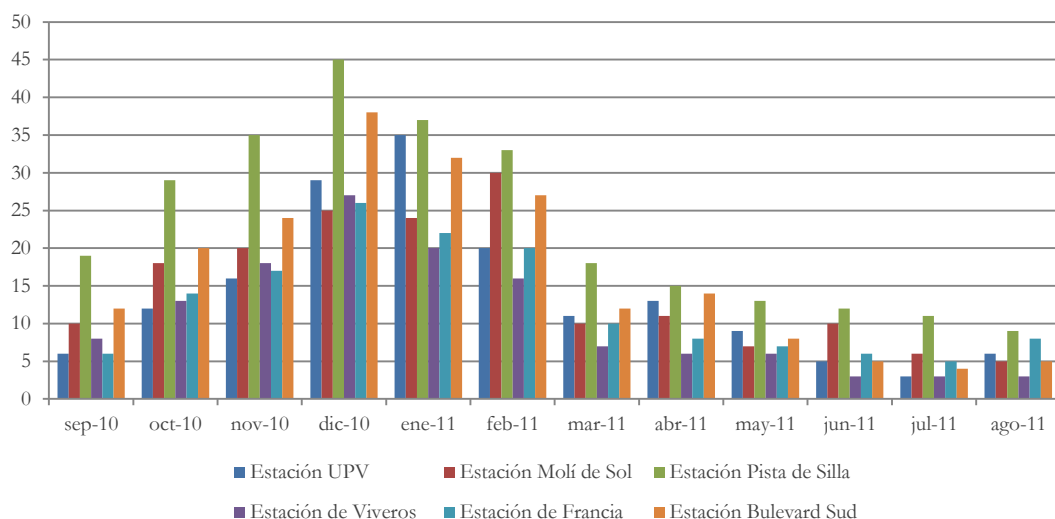


Figura 100: Valores medios mensuales de las concentraciones de Monóxido de Nitrógeno [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] por estaciones

B.3.2.3.5. Partículas PM10

El caso de las PM10 sigue un comportamiento tendencial irregular (Figura 101), similar a los fenómenos en forma “diente de sierra” por lo que se hace imposible a priori establecer alguna pauta estacional. No obstante, en general los valores máximos se observan para la red de medición de contaminantes atmosféricos de la ciudad de Valencia en las estaciones de Pista de Silla y Boulevard Sud.

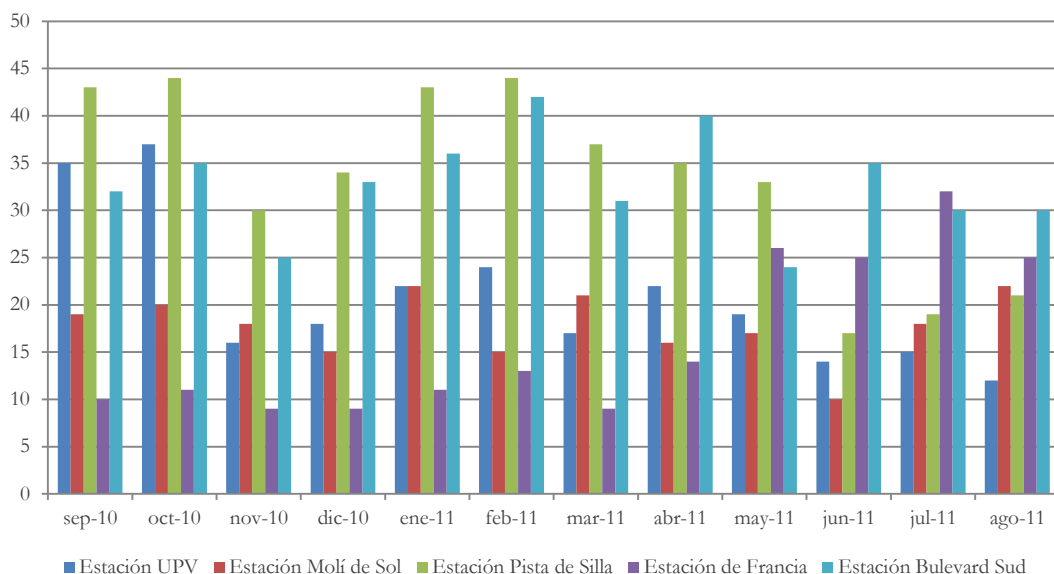


Figura 101: Valores medios mensuales de las concentraciones de PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] por estaciones

B.3.2.3.6. Monóxido de Carbono

Máximo absoluto en la estación Boulevard Sud en el mes de octubre (Figura 102).

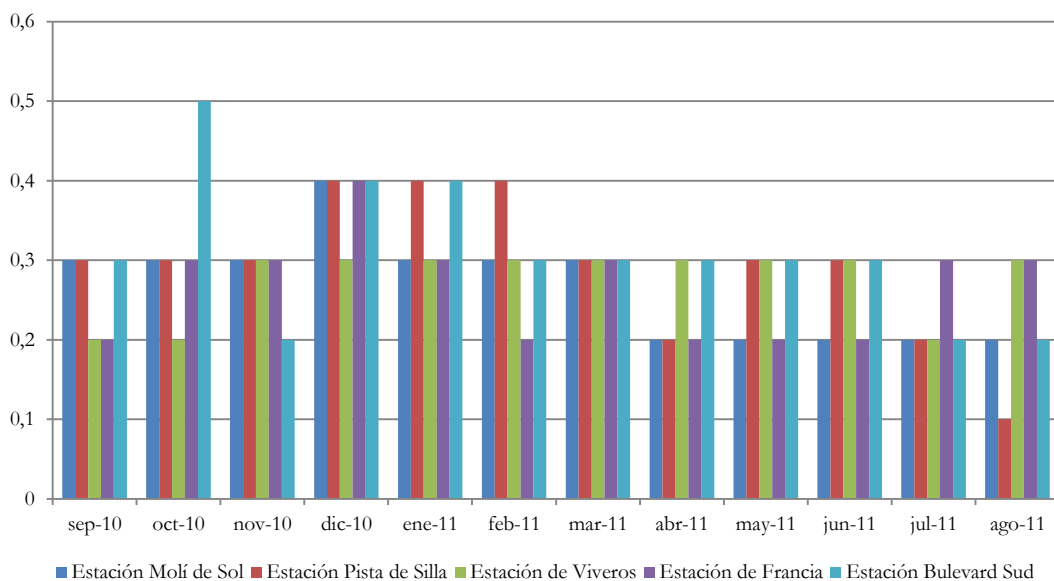


Figura 102: Valores medios mensuales de las concentraciones de Monóxido de Carbono [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] por estaciones

B.3.2.4. Estimación de los valores de contaminantes atmosféricos en la zona de estudio

El objeto del presente apartado es obtener un valor estimado de cada uno de los contaminantes del análisis para la zona de estudio del área de la C/ Colón. Para esto, se relacionan todos los datos de las distintas estaciones ambientales instaladas por el Ayuntamiento de Valencia, valorando en función de la similitud de distintos aspectos (problema multicriterio) entre la ubicación de cada estación y el escenario objetivo, de modo que se pondere la importancia de cada dato dentro del conjunto.

Se trata, finalmente, de integrar las variables de tráfico, morfología de la zona, cercanía y otras, en lo que sería una media aritmética, mejorando así la aproximación al problema y al dato objetivo.

El problema se convierte entonces en la integración de variables etéreas para su transformación en un valor cuantificable y ordenado. Para ello, se emplea el proceso analítico jerárquico (AHP) de comparación por pares, que facilita el trabajo de decisión mediante un proceso de jerarquización.

B.3.2.4.1. Método AHP de comparación por pares

El método AHP (Saaty, 1988) se basa en la obtención de preferencias o pesos de importancia para los criterios y las alternativas (en el caso actual, las medidas de contaminación atmosférica obtenidas en cada estación, así como la importancia de cada estación). Para ello, el decisor establece “juicios de valor” a través de la escala numérica de Saaty (del 1 al 9) comparando por parejas y facilitando la decisión en el proceso de jerarquización (Tabla 55). En la escala de medida de Saaty los números pares vendrían siendo los valores intermedios entre los dos extremos. De este modo, aplicando el proceso al tema de estudio, se obtiene una valoración de la similitud (y por tanto validez de los datos de contaminación atmosférica medidos) entre cada estación y el escenario objeto de estudio (C/ Colón). La decisión comparativa es pues saber que estación influye más en el valor estimado final para la C/ Colón.

Tabla 55: Escala de medidas de Saaty (Saaty, 1988)

<i>Escala numérica</i>	<i>Escala verbal</i>	<i>Explicación</i>
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro
5	Fuertemente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible

Mediante esta comparación cuantitativa se obtiene una matriz cuadrada, recíproca y positiva, denominada “Matriz de comparación por pares”. La resolución de esta matriz, siguiendo el proceso de cálculo que indica el autor del método, conduce finalmente a la obtención de un valor numérico para cada una de las estaciones en función de su influencia en el resultado, de modo que se cumple que: $A_1 + A_2 + \dots + A_i = 1$. La aplicación de ecuación polinómica resultante para cualquier concentración de contaminante (X), entregaría el valor del mismo en el área de C/ Colón. La forma general de la ecuación polinómica estaría dada por:

$$(X)_{C/Colón} = A_1(X_1) + A_2(X_2) + \dots + A_i(X_i)$$

donde A_1, A_2, \dots, A_i son cada una de las estaciones ambientales instaladas alrededor de la ciudad por el Ayuntamiento de Valencia.

B.3.2.4.2. Aplicación del método

Analizando cada una de las estaciones, se obtiene entonces:

- Estación UPV (A): Similitud de condiciones respecto a la C/ Colón muy baja. Alta influencia y proximidad al mar, situación periurbana, influencia de tráfico restringida.

- Estación Viveros (B): Mayor influencia que la estación UPV, por cercanía a la zona de estudio y por ubicación, céntrica respecto a la ciudad. Baja similitud en cuanto a su localización a escala micro, ya que esta se encuentra en un parque y la de estudio es una vía urbana.
- Estación Molí de Sol (C): Localización periurbana, lo que disminuye su similitud, con todo un lado abierto a zona de huerta. Pero el alto sometimiento a intensidad de tráfico, con bastante cercanía a la estación aumenta la consideración de las similitudes con el escenario de estudio. Tampoco puede considerarse alta la influencia del mar, lo que se considera un factor de desviación respecto a la c/ Colón.
- Estación Bulevard Sud (D): Estación también periurbana, posición periférica con morfología abierta lo que difiere fuertemente del escenario objeto de estudio. Pero, sometida a altas concentraciones de tráfico (mayores que en la C/ Colón) con mucha proximidad de la estación a las vías de circulación lo que puede compensar el ambiente abierto en cuanto a la similitud de la concentración de emisiones. Situación pues, similar a la anterior estación (C), aunque quizás relativamente más importante porque en esta no existen desviaciones como la cercanía al cementerio (con la influencia del horno crematorio).
- Estación Pista de Silla (E): Máxima cercanía con la zona de estudio (prácticamente equidistante con Viveros) pero mayor similitud en las condiciones. Se trata de una estación céntrica, sometida pues intensamente a la atmósfera urbana aunque presenta importantes anomalías de apertura morfológica respecto a la C/ Colón (Estación del Norte, campos, etc.). El tráfico es similar al de la C/ Colón, aunque hay que considerar el efecto de aminoración de las concentraciones que produce una morfología tan abierta.
- Estación Francia (F): Se trata de una estación relativamente periurbana, con alta influencia marítima y que pese a estar sometida a alta intensidad de tráfico va a considerarse por su ubicación, muy poco similar a la C/ Colón.

En función de las descripciones anteriores, se genera la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** con la ponderación para cada uno de los pares de estaciones. Siguiendo el método, se obtienen los valores finales de ponderación que se observan en la

Tabla 56: Tabla con la ponderación de los pares de acuerdo a la escala de medida de Saaty (Continuación)

D frente a E	1/3	
D frente a F	5	
E frente a F	9	

Tabla 57.

Tabla 56: Tabla con la ponderación de los pares de acuerdo a la escala de medida de Saaty

<i>Pares</i>	<i>Ponderación</i>	<i>Explicación</i>
A frente a B	1/5	Fuertemente más la influencia de B que de A
A frente a C	1/7	Mucho más fuerte la importancia de C que de A
A frente a D	1/8	
A frente a E	1/9	
A frente a F	1/2	
B frente a C	1/3	Moderadamente más importante C que B
B frente a D	1/4	

B frente a E	1/7	Mucho más fuerte la importancia de E que de B
B frente a F	3	Moderadamente más importante B frente a F
C frente a D	2	Casi igual, moderadamente más importante C que D
C frente a E	1/4	
C frente a F	3	

Tabla 56: Tabla con la ponderación de los pares de acuerdo a la escala de medida de Saaty (Continuación)

D frente a E	1/3	
D frente a F	5	
E frente a F	9	

Tabla 57: Tabla con los valores ponderados finales tras continuar desarrollando el método de Saaty

<i>Pares</i>	<i>Ponderación</i>
A	0,03
B	0,09
C	0,19
D	0,19
E	0,46
F	0,05

El polinomio resultante tomaría así la siguiente forma:

$$(Colón) = 0.03 * (UPV) + 0.09 * (Viveros) + 0.19 * (Molí de Sol) + 0.19 * (Bulevard Sud) + 0.46 * (Pista de Silla) + 0.05 * (Francia)$$

Aplicando la ecuación para los datos de las 6 estaciones por meses y por contaminantes, se obtienen los valores estimados para la C/ Colón que se representan plasman en la *Tabla 58*.

Tabla 58: Valores de los diferentes contaminantes medidos por las estaciones ambientales obtenidos a través de la ecuación polinómica resultante del método AHP

<i>Aplicación del método AHP: 0.03*(UPV) + 0.09*(Viveros) + 0.19*(Molí de Sol) + 0.19*(Bulevard Sud) + 0.46*(Pista de Silla) + 0.05*(Francia)</i>												
<i>C/ Colón</i>												
<i>[µg/m³N]</i>	sep. 10	oct. 10	nov. 10	dic. 10	ene. 11	feb. 11	mar. 11	abr. 11	may. 11	jun. 11	jul. 11	ago. 11
SO ₂	3,47	3,37	3,91	4,40	5,32	5,70	5,08	4,15	3,71	3,24	2,09	2,58
Ozono	52,48	40,06	32,21	22,29	26,34	39,98	56,65	66,14	68,84	64,18	61,04	54,48
NO ₂	35,13	39,36	40,36	43,51	42,21	43,74	32,83	33,55	27,95	22,21	18,04	16,19
NO	14,12	22,79	27,41	37,27	31,61	29,05	13,92	12,98	9,99	9,09	7,57	6,89
PM10	31,04	32,37	22,93	25,78	32,04	32,47	27,89	28,13	24,87	18,07	19,93	21,18
CO	0,26	0,31	0,25	0,36	0,33	0,31	0,27	0,20	0,24	0,24	0,18	0,14

B.3.2.5. Análisis estadístico de los datos

Como complemento a las secciones anteriormente desarrolladas, se realizó un análisis estadístico considerando sólo las estaciones de Viveros y Pista de Silla, y una serie de variables climáticas, de contaminación y de tráfico para tratar de comprender en mayor medida los procesos y relaciones entre variables.

Se cuenta con datos diarios de concentración de contaminantes (CO, NO₂ y O₃), datos diarios climáticos de la estación meteorológica de Viveros (Temp, velocidad y dirección del viento, radiación solar, precipitación y presión atmosférica) y los datos de intensidad media diaria de tráfico mensuales, en las calles circundantes a cada una de las estaciones analizadas.

La serie de datos completa alcanza los 2.953 datos, abarcando desde el 1 de marzo de 2003 hasta el 31 de marzo de 2011. El ajuste de regresión de las diferentes concentraciones estudiadas en función de los parámetros descritos arroja los resultados que aparecen en la .

Tabla 59: Resultados del ajuste de la regresión de las diferentes concentraciones de los contaminantes analizados

<i>Contaminantes</i>	<i>Valores de R²</i>	
	<i>Pista de Silla</i>	<i>Viveros</i>
O ₃	40,6%	52,3%
NO ₂	23,0%	34,7%
CO	33,7%	28,9%

Al analizar los modelos obtenidos se observa que en general existe una relación significativa con el tráfico y con algunos factores climáticos dependiendo del contaminante, aunque estos modelos no parecen representar adecuadamente lo que ocurre a escala local.

Es posible que la ubicación de las estaciones y la morfología urbana en estas zonas no sirva para determinar niveles de contaminación locales, sino niveles generales de fondo. Esta información es muy útil para definir estrategias globales de disminución de la contaminación, pero no ofrece información relevante para poder acometer medidas de disminución locales. Además, estos valores ponen de manifiesto que episodios concretos de contaminación excesiva en zonas del centro del casco urbano, no serían detectados con las estaciones actuales, no pudiendo plantear actuaciones de emergencia. En este contexto, el caso desarrollado trata de plantear y analizar posibles soluciones tanto tecnológicas, como de conocimiento teórico de los fenómenos intervinientes.

B.3.3. Uso de la WSN para la obtención de las variables de interés

Cada nodo de la WSN se debe localizar estratégicamente de acuerdo a las necesidades de cobertura que exige el espacio de estudio seleccionado, lo cual implica unas características de comunicación idóneas. Un periodo de muestreo regular de las variables físicas es además imperioso, lo que indica un procesamiento equilibrado en el dispositivo. Sin embargo, entre todas las características técnicas que debe poseer cada nodo, el puntaje de mayor relevancia se asigna a los tipos y tecnología de los transductores. Algunas de las variables a muestrear y de importancia para el presente caso de estudio, son las siguientes:

- Temperatura
- Humedad relativas
- Monóxido de carbono (CO)

- Dióxido de carbono (CO₂)
- Compuestos orgánicos volátiles(VCO)

Existen dos variables importantes en estudios medioambientales. Sin embargo en el caso tratado es innecesario disponer del mismo número de nodos que tenían las variables anteriormente citadas, es decir la resolución espacial que debía tener las variables adicionales era menor en comparación con las demás variables escogidas. Se resolvió entonces que las últimas variables en cuestión no requerirían la concepción de un nodo que se acoplase a la WSN como tal. Dichas variables fueron entonces:

- Dirección del viento
- Velocidad de viento

Una vez se seleccionó la zona de estudio a monitorizar (ver sección B.3.1), se decidió instalar la red de sensores en un mismo plano horizontal a una cota de 3 metros de altura (*Figura 103*). Se deseaba adquirir una distribución de contaminantes cada cierto periodo de tiempo sobre la calzada y así analizar la evolución y distribución de los mismos. Obteniendo las autorizaciones apropiadas del Ayuntamiento de Valencia, se aprovechó la red de semáforos que posee la ciudad en el área de estudio, para la instalación de los dispositivos electrónicos.

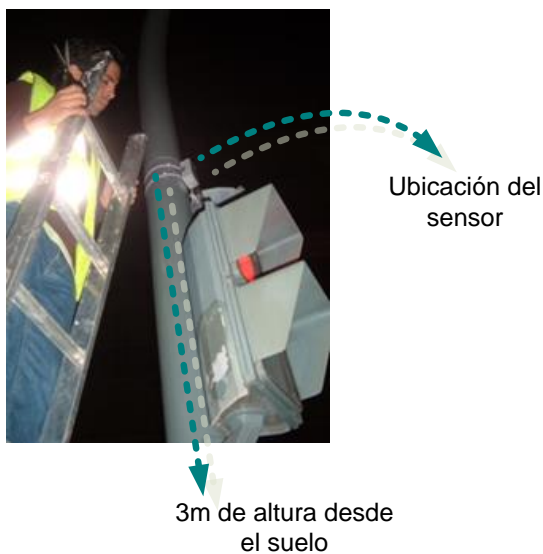


Figura 103: Disposición de uno de los sensores de la WSN en uno de los semáforos de la zona de estudio

Para la toma de datos, basado en la revisión técnica y bibliográfica que se plasmó en el anterior apartado (sección A.6.5), se seleccionaron y adquirieron los elementos necesarios para conformar una WSN. En la *Tabla 60* se realiza un compendio de las principales características de los equipos.

Los sensores escogidos para la toma de datos son de tipo semiconductor de oxido metálico para el caso de los sensores de gases y capacitivos para el caso de los sensores de humedad y temperatura. En lo que respecta a la medición de una variable en estado gaseoso por medio de un sensor de tipo semiconductor, para su correcto funcionamiento es indispensable agregar un tiempo de calentamiento o activación de un calentador interno del dispositivo. El tiempo de calentamiento se encuentra entre 5 y 10 minutos. Los sensores se adquirieron calibrados, tarea realizada por el proveedor de los mismos. Se obtuvieron entonces valores directos en ppm del contaminante en cuestión, gracias al acondicionamiento electrónico que se realiza en la tarjeta de gases y al algoritmo programado en la tarjeta de procesamiento de cada nodo.

A nivel climático se ha considerado interesante medir la temperatura y la humedad relativa en el propio nodo, dado que son variables relevantes en el caso e influyen en la concentración local de los contaminantes de interés. Es por ello que se incorporó un sensor de temperatura y humedad a cada nodo. Las variables restantes que pudiesen generar algún efecto en los fenómenos analizados, se tomaron de la estación climática más cercana al área de estudio, en este caso la que se encuentra ubicada en el parque de Viveros. Sin embargo, sí que se acondicionó uno de los nodos para la recolección de los datos generados por un anemómetro tipo cazoleta y una veleta, y se instaló en un punto de control o punto seleccionado al inicio de la zona de estudio. Lo anterior con el fin de asegurar la baja interferencia de las construcciones circundantes en la dinámica del flujo del aire, o las poca diferencia entre las mediciones aportadas por la estación de Viveros y las adquiridas localmente con el nodo. Las anteriores disposiciones permitirían aumentar la fiabilidad de las condiciones de contorno introducidas en el modelo numérico.

Tabla 60: Resumen de los elementos y características técnicas que conforman la WSN seleccionada

<i>Característica</i>	<i>Descripción</i>
Fabricante	Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L.
Tarjetas electrónicas	— Waspote 802.15.4-PRO SMA 5dBi — Tarjeta de integración de gases
Módulo de comunicaciones	Digi XBee PRO 802.15.4 antena externa
Antena	Externa para una potencia de 5dBi
Alimentación	Batería recargable de litio de 1500mAh
Medio de almacenamiento local	SD card 2GB
Sensores	— Sensor semiconductor de CO/VCO e2v MiCS-5521 — Sensor de temperatura y humedad Sencera 808H5V5 — Sensor de temperatura on-chip -40°C, +85°C — Sensor acelerómetro on-chip $\pm 2g(1024 \text{ LSB/g}) \pm 6g(340 \text{ LSB/g})$
Punto de acceso	Meshlium 802.15.4-PRO-3G-AP
Centro de recepción	Ordenador procesador Intel Core 2, 4GB de RAM, 500GB DD

Debido a la modularidad con la cual el fabricante de las tarjetas electrónicas creó sus dispositivos, la placa de gases, que es donde se acoplan los sensores seleccionados, debe conectarse a la placa de procesamiento. En la tarjeta electrónica principal o placa de procesamiento se controla el suministro de energía a los diferentes componentes, se adquieren los valores eléctricos entregados por los transductores, se realiza la conversión de la componente eléctrica de los sensores a las unidades de la variable del sensor (para el caso de los sensores de gases generalmente partes por millón, ppm), y finalmente se realiza la transmisión de los datos al punto de recepción central vía inalámbrica. Procurando un comportamiento redundante en el almacenamiento, la información adquirida se guarda además en una memoria incorporada estática en punto de recepción central.

Para que cada nodo pudiera soportar las condiciones de trabajo exterior, se realizó un encapsulamiento de los circuitos electrónicos, dentro del cual se incorporó además la batería de Li-ion recargable (*Figura 104*).

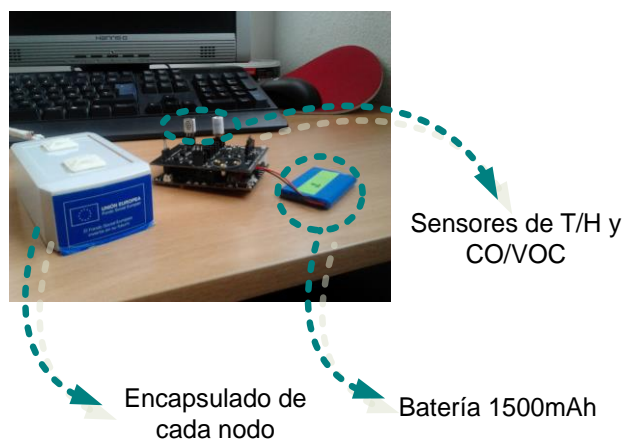


Figura 104: Encapsulado de los nodos que componen la WSN

En los anexos al presente documento se adjuntan las fichas técnicas de los diferentes dispositivos empleados en la campaña experimental. La WSN configurada contó finalmente con 12 nodos estándar, un nodo con el sensor de velocidad y dirección del viento, un punto de acceso de comunicación y un punto de recepción central.

Dentro de las tareas de configuración de la WSN se realizaron inicialmente trabajos de puesta a punto de los equipos, lo que se decantó en la programación del hardware y la calibración de los transductores. Se buscó pues con el firmware creado, un algoritmo que permitiera el ahorro energético, con el fin de optimizar la carga de la batería y aumentar la duración de la misma. Para los doce nodos estándar el periodo de muestreo se fijó en 10s. Éste periodo podía presentar una tolerancia de $\pm 10\%$, la cual se debía esencialmente al tiempo de calentamiento al que se debía someter cada transductor de gases. El nodo al que se le acopló los sensores de velocidad y dirección del viento, sí mantuvo un periodo de muestreo regular. Las restantes variables climáticas se adquirieron con los horarios y la regularidad de la estación climática de Viveros, obteniéndolos desde el servidor de datos de AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) disponibles en la web en ficheros con los valores separados por comas o con extensión .csv. Las campañas de recolección de datos se ejecutaron entre los meses de septiembre y de diciembre.

Aunque es una variable no adquirida mediante la WSN, cabe mencionar en el presente apartado que para el caso de estudio, la intensidad de tráfico del área de análisis es otra incógnita de relevancia. Para la obtención de sus valores el Ayuntamiento de Valencia dispone de diversos puntos de aforo de tráfico instalados en la ciudad. Uno de los puntos se encuentra ubicado en la zona de estudio, concretamente en el cruce de la C/ Colón con la C/ Félix Pizcueta. Dichos aforadores están programados con una tasa de muestreo del orden de minutos, pero con un reporte del promedio de las muestras a plataforma cada hora. Es posible acceder a ellos por medio del Servicio de Circulación, Transportes e Infraestructuras de la Ciudad de Valencia.

B.3.4. Análisis estadístico de los valores adquiridos y obtención de modelo previo

Como se comentó en el anterior apartado, el periodo de muestreo se estableció en 10s $\pm 10\%$ (una media de cinco lecturas por minuto). El volumen de datos adquiridos fue elevado, suficiente para poder realizar un análisis de regresión multivariante.

Como es de esperarse en el uso de tecnologías prototipo, la WSN presentó en algunos periodos de recolección, fallas de funcionamiento relacionadas especialmente con bloqueos irreversibles de alguno de los nodos. Generaba entonces vacíos en los datos y requería de intervención técnica con un reinicio del dispositivo *in-situ*. Se eligió entonces un lapso de tiempo estable y que abarcara los fenómenos de interés para el estudio, es decir un periodo tiempo donde se percibiera el impacto en la contaminación ambiental por el alto flujo vehicular en días laborables, y la reducción de la misma tras un decremento del número de vehículos en circulación en los días festivos. Concretamente los

datos estudiados a continuación recogen los valores tomados entre el día 24 de noviembre (jueves) y 29 de noviembre (martes), incluyendo efectivamente algunos días laborables y días festivos.

En el análisis se han tomado los datos recolectados de los sensores de VCO y de temperatura. Al banco de datos generado por cada uno de los nodos se le aplicó un filtrado inicial, excluyendo algunas medidas que por su dispersión respecto del dato medio era excesivo (3 veces la desviación típica). Se realizó además una media de los valores adquiridos, obteniendo un vector inicial de medidas de dimensión 35.031.

Se realizaron algunas operaciones adicionales para mermar el número de datos sin perder representatividad en el estudio. En primera medida se redujo aún más el número de días, conservando del periodo anteriormente mencionado los siguientes:

- Viernes (día laborable final de semana)
- Sábado (día festivo, pero con gran actividad comercial en la C/ Colón)
- Domingo (día festivo, con los comercios cerrados)
- Lunes (día laborable inicio de semana)

La dimensión del vector de medidas se redujo a 26.596 datos. Siguiendo con las operaciones para el acondicionamiento de los datos, se observó que a pesar del filtrado inicial los valores continuaban presentando variaciones considerables. Las altas variaciones se debían esencialmente al propio proceso de medida del sensor y a que la entrada a la cámara de gases del sensor no es forzada, por lo que en ciertos instantes existe aire remanente dentro de la cámara con niveles de contaminación diferentes a los exteriores. No obstante, al trabajar con la media de los datos de los sensores instalados en cada nodo, se consiguió una evidente disminución de los efectos mencionados.

En la *Figura 105* se representan los valores del vector de medidas de la temperatura ambiente junto con los valores del VCO, éste último multiplicado por diez con el fin de comparar las series en niveles de magnitud similares. Se observa pues la fuerte relación entre la concentración de VCO con la temperatura, justificando con ello el trabajo previo de puesta a punto, donde un algoritmo para la compensación de la temperatura fue implementado en el dispositivo. Dicho algoritmo manipula el calentador interno del sensor, e incluye un arreglo matemático tras la conversión analógica/digital para regular los valores de las medidas en función de la temperatura a la que se encuentre sometido el transductor. El anterior procedimiento se debe llevar a cabo en cualquier aplicación que haga uso de sensores de gases semiconductores, ya que por su principio físico de funcionamiento, internamente se encuentran los electrodos de óxido metálico que cambian su conductividad con la presencia del gas en cuestión y de variables ambientales como lo es la temperatura y la humedad. Asegurando las actuaciones anteriores, en la misma *Figura 105* es posible apreciar algunas zonas que ponen de manifiesto las variaciones de las concentraciones de VCO (circunferencias rojas en la gráfica) independiente de la temperatura.

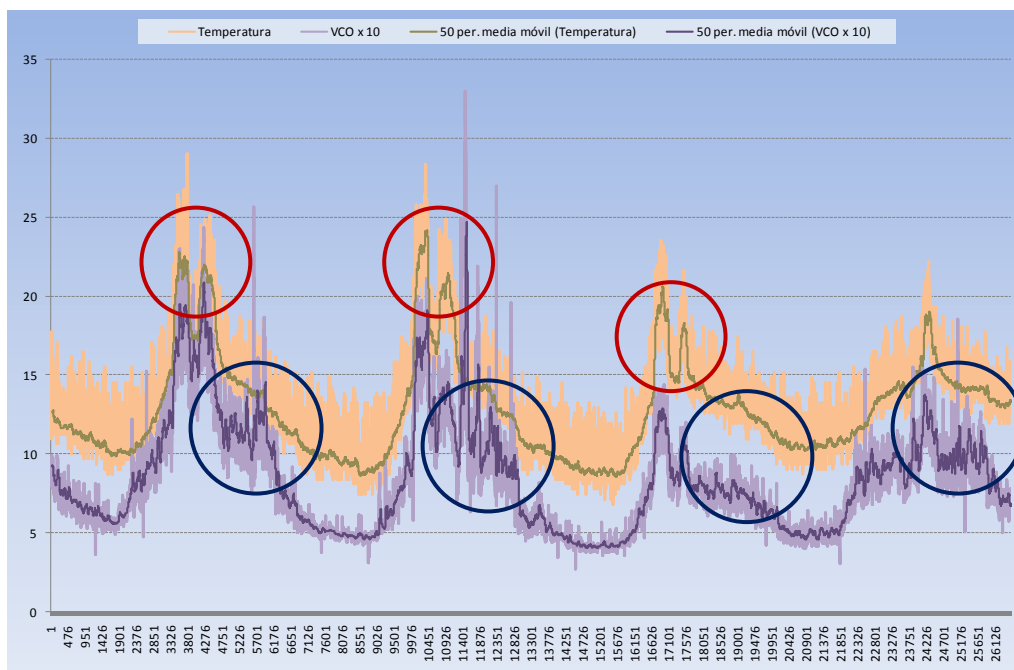


Figura 105: Diagrama del comportamiento del VCO [ppm] y la temperatura [°C] en el periodo seleccionado

Asegurando un periodo de muestreo de 10 min. en el vector de mediciones de la temperatura, se puede realizar una comparación directa con el vector de muestras obtenido de la estación climática de Viveros en el mismo periodo de análisis seleccionado. Se contempla que ambas gráficas (*Figura 105* y *Figura 106*) reflejan a grosso modo el mismo comportamiento o la misma tendencia, exceptuando algunos valores en los picos de la curva generada a partir de las mediciones realizadas con los nodos de la WSN, ya que son ligeramente superiores a los recogidos en Viveros. Una hipótesis plausible de las diferencias mostradas es que la ubicación de la estación climática en medio de una zona verde, atenúa ciertos transitorios que sí son capturados por los nodos, gracias a la ubicación de los últimos en una calle del centro de la ciudad. Puede ser en el momento una anomalía, pero a futuro convertirse en una situación ventajosa.

En el entorno comprendido entre los datos 3.300 y 4.500 se observan dos picos de temperatura (corresponde al periodo de muestreo entre las 12:00 y las 16:00 h), que se repiten el resto de días, excepto el lunes 28 de noviembre. Evidentemente las temperaturas más elevadas se produjeron en las zonas intermedias del día, lo que produce el primer pico de temperatura, sin embargo es visible también un pico adicional tras caer la curva del pico superior o un segundo pico de temperatura (circunferencias de color azul en la *Figura 105*). Esto es gracias al aporte generado por las medidas de temperatura provenientes de los nodos que estuvieron expuestos a la luz solar directa en el periodo seleccionado. Es decir, en el periodo del año escogido y en la zona de estudio, el sol incidía directamente en los nodos un instante después del mediodía.

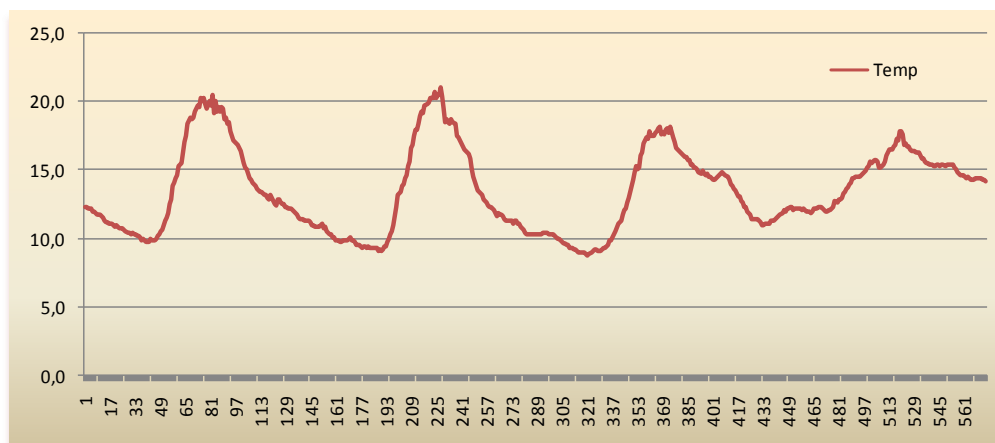


Figura 106: Comportamiento de la temperatura ambiental [°C] en la estación climática de Viveros

En cuanto al lunes 28, la no presencia del segundo pico de temperatura es debida a la menor radiación solar a la que estuvieron sometidos los nodos, ya que se presentaron nubes en el firmamento.

Siguiendo con la curva de la *Figura 105*, una zona de interés es la comprendida entre el dato 4.500 y el 5.800, que corresponde al lapso de medidas de la tarde del viernes entre las 16:00 h y las 21:00 h. Se observa como la temperatura desciende progresivamente a lo largo de la tarde, mientras que los niveles de VCO fluctúan considerablemente con una tendencia ascendente, rompiendo el paralelismo observado entre ambas series hasta el momento. El mismo efecto, pero mucho más acentuado se produce en la tarde del sábado y en la del lunes aunque esta última con cierta atenuación; sin embargo, tal efecto desaparece en la tarde del domingo, en la que los comercios permanecieron cerrados. Las anteriores observaciones ponen de manifiesto el efecto de otros factores, ajenos a la temperatura ambiente, en el comportamiento del sensor de VCO.

Para el análisis del comportamiento del tráfico en la zona de estudio, tomando como base los datos arrojados por la estación de aforo situada en la C/ Colón, N° 9, la cual mide la intensidad de tráfico en el tramo de la misma C/ Colón enmarcado entre la C/ Pascual, Genís y Xátiva, se obtiene la curva plasmada en la *Figura 107*. Se percibe entonces que el comportamiento del tráfico sigue un ciclo que presenta igualmente unos picos muy marcados a determinadas horas del día, lo que podría explicar los aumentos en los valores del sensor de VCO, tal y como se pretendía aseverar en las observaciones relatadas en el párrafo anterior. Para poder cuantificar dichos efectos y la influencia de las diferentes variables en la concentración de VCO, es necesario realizar un análisis de regresión múltiple.

La primera tarea para poder elaborar dicho análisis de regresión, era homogeneizar y preparar los datos. Para ello se requería transformar los datos tomados por los nodos de periodos de muestreo medios de 12 segundos a periodos regulares, con miras a generar una relación directa con los datos de la estación climática y del punto de aforo de tráfico. Se tomó entonces el valor más cercano en el tiempo al minuto concreto, reduciendo los más de 26.000 datos de partida en 5.760, correspondientes a los valores asignados a cada minuto exacto (0:00:00, 0:01:00; 0:02:00,...). El mismo ajuste se realizó a los valores de temperatura y humedad relativa, multiplicándolos además por diversos factores de escala para conseguir representación gráfica como los de la *Figura 108*. En lo que compete a los datos del tráfico, para poder determinar valores de intensidad cada minuto se realizó una interpolación lineal. Tras este proceso la gráfica obtenida se adjunta como la *Figura 109* en donde se puede observar que se mantiene la tendencia y los puntos críticos presentados en la gráfica original.

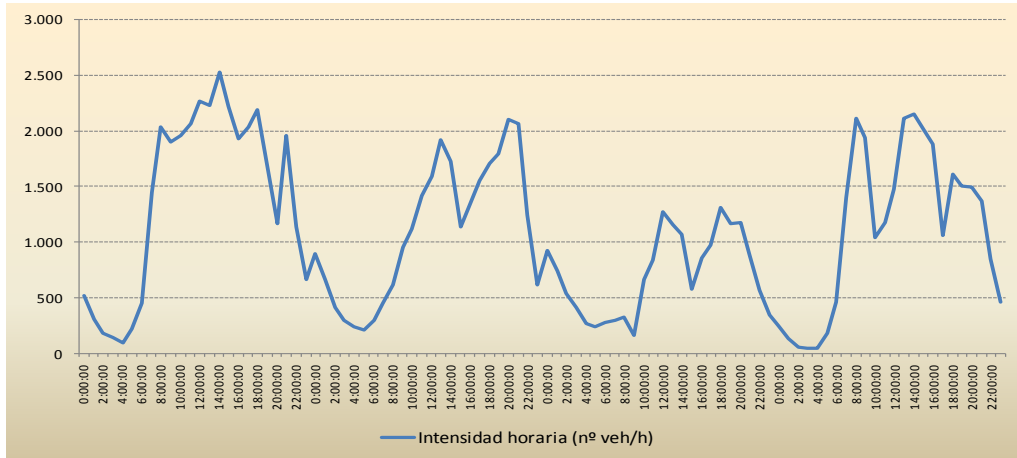


Figura 107: Intensidad de flujo de vehículos reportada por la estación de aforo de la C/ Colón N°9

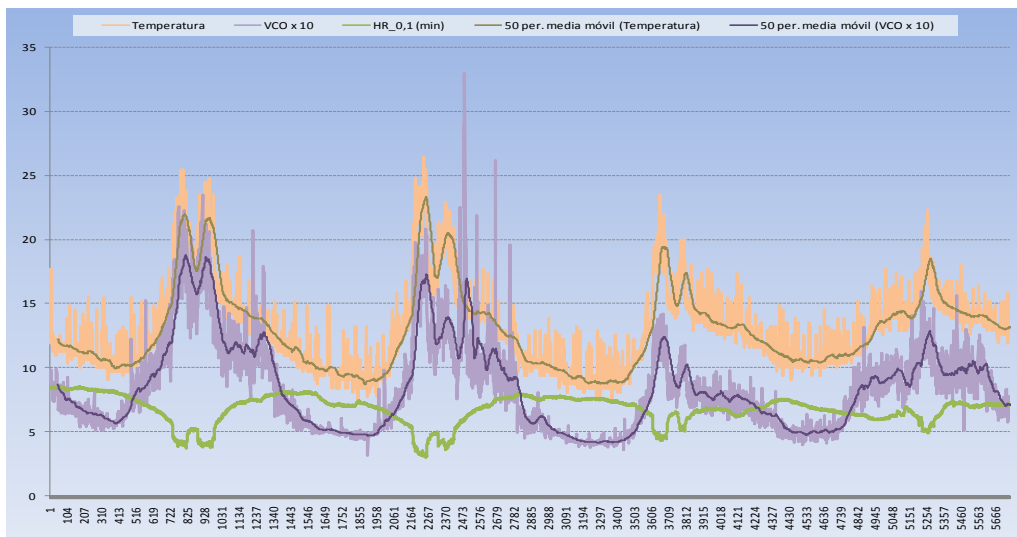


Figura 108: Homogenización del banco de datos en su periodo de muestreo (Temp. [°C], VCO [ppm] y HR [%])

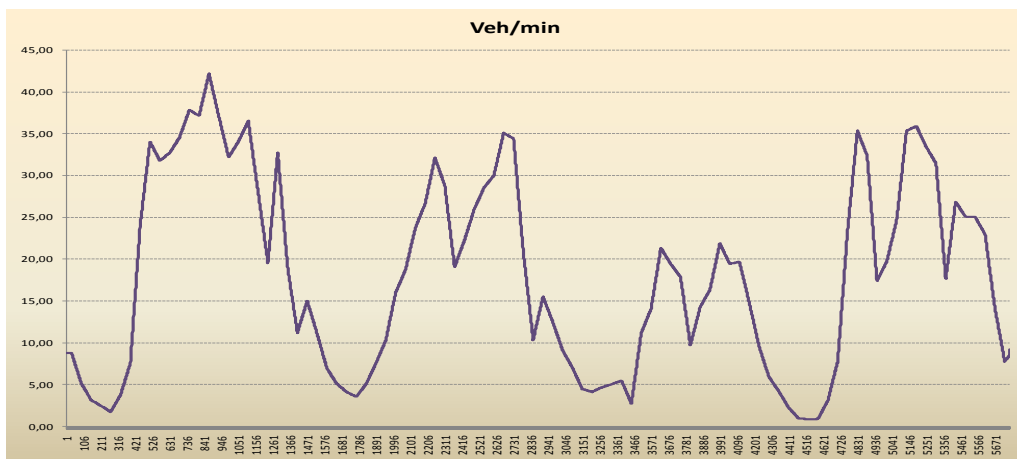


Figura 109: Datos de tráfico [veh/min] con interpolación lineal para alcanzar un periodo de muestreo de 1 min

Una vez homogenizados y se alcanza la misma dimensión en los diferentes vectores de medidas, se procede al análisis de regresión multivariado. En primer lugar se describen y analizan estadísticamente los valores obtenidos para cada variable que previsiblemente entrará en el modelo:

Med50_VCO: Es el valor suministrado por el sensor de VCO y el valor incógnita en el modelo. Este valor depende de la concentración de VCO en el aire, pero también está muy influenciado por las condiciones ambientales puntuales en las que se toma la medida. Como se ha comentado, para su tratamiento y para facilitar la comparación gráfica con el resto de variables, se ha multiplicado por un factor 10. Adicionalmente, con el propósito de evitar picos y fluctuaciones se considera la media móvil de los últimos cincuenta datos en cada punto. El resumen de los estadísticos básicos para esta variable se plasma en la *Figura 110*. Puede observarse la no-normalidad de la serie de valores (como era de esperar, dado que no es un fenómeno aleatorio) y una acumulación de valores en la parte inferior del rango. Si en lugar de considerar Med50_VCO se toma una variable Log_VCO se obtiene un resumen de los estadísticos básicos de la *Figura 111*. En este caso la distribución de valores se aproxima mucho mejor a una normal, aunque no puede considerarse como tal. Además, el fabricante del sensor recomienda realizar los ajustes en escala logarítmica por el procedimiento de medida del propio sensor. La definición de la variable sería: Logaritmo de la media móvil con periodo 50 del valor del sensor de VCO multiplicado por diez, expresado en ppm.

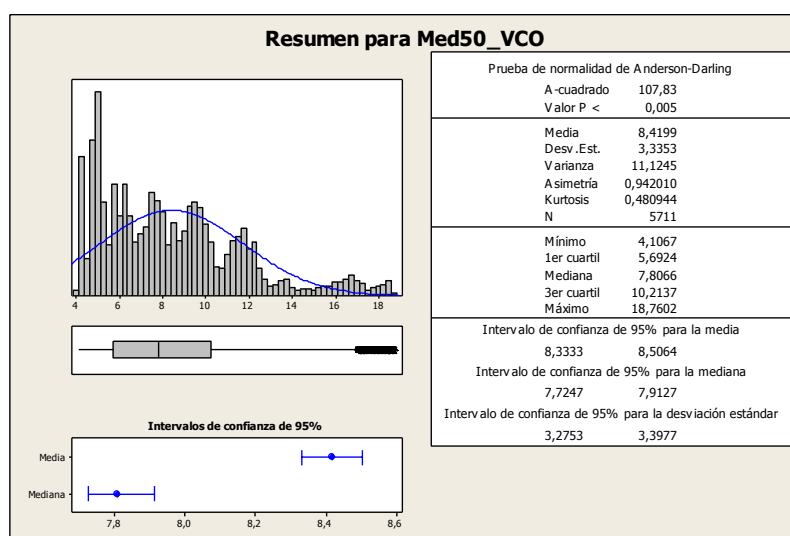


Figura 110: Resumen de estadísticos para las medidas de VCO con una media de cada 50 datos

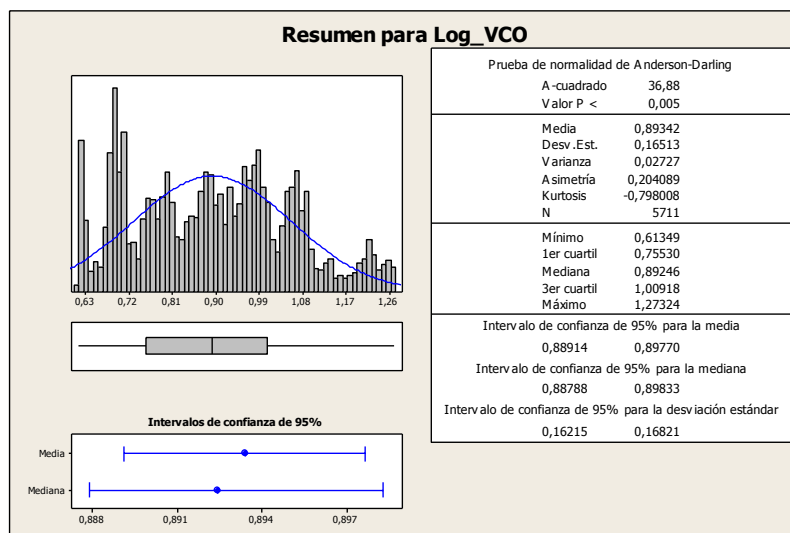


Figura 111: Resumen de estadísticos para las medidas de VCO usando la función logarítmica

Med50_Temp: Temperatura en grados centígrados medida por el sensor instalado en la placa de gases. Para minimizar las fluctuaciones del sensor se ha considerado la media móvil con periodo 50 de los datos de origen.

Veh_min: Número de vehículos que atraviesan la sección de estudio en un minuto con linealización en su periodo.

Para el análisis estadístico se ha empleado el software Minitab v. 16 que sirve para el tratamiento estadístico de datos. Dado que para dicho análisis se ha planteado la realización de un modelo, para su ajuste se comienza por estimar la relación entre Log_VCO y Med50_Temp. Inicialmente se observa una correlación cercana al 82%, pero las gráficas de residuos sugieren llevar a cabo el estudio de relaciones de segundo y tercer grado. Con dichos ajustes cuadráticos y cúbicos la mejoría de la dispersión de los residuos es notoria. Seguidamente se incluye la variable de la humedad relativa en el modelo, aunque sin aporte significativo. El coeficiente de determinación o R² con la inclusión de la nueva variable tan solo ascendería al 88,3%, lo que no justificaría la inclusión de un nuevo sensor en los nodos locales para la determinación de esta variable. Finalmente se considera incluir la variable tráfico, con la cual se perciben unos estadísticos bastante favorables. Se logra así un coeficiente de ajuste del 94,8% (*Figura 112*) y un modelo final nombrado como la ecuación de regresión.

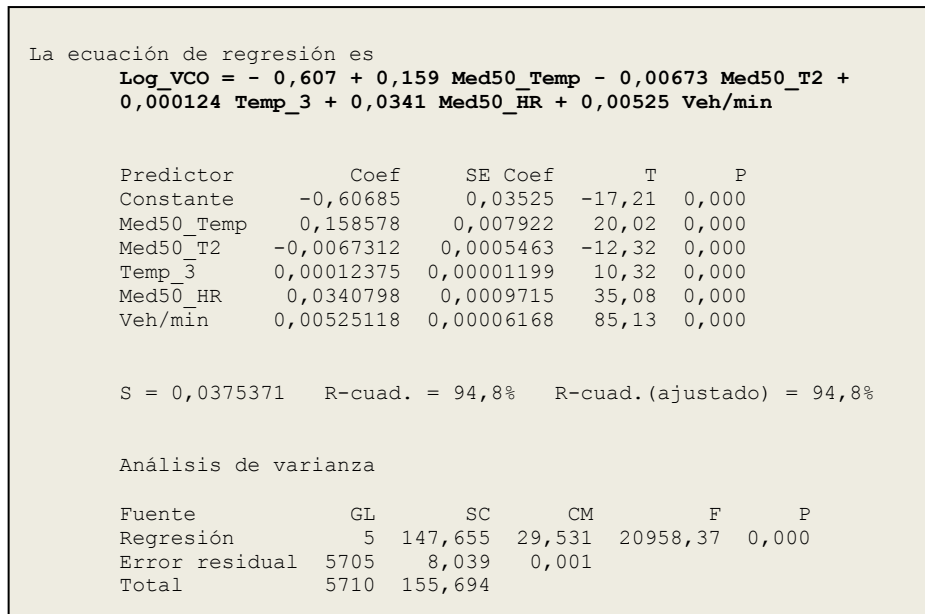


Figura 112: Salida del tercer ajuste del modelo multivariante para el análisis estadístico

Si se observa la gráfica de valores ajustados frente a valores medidos (*Figura 113*), se denota la buena correlación entre ambas variables. Así mismo, la desviación típica asociada a la media obtenida con la ecuación encontrada será de 0,037 según los valores del modelo obtenido.

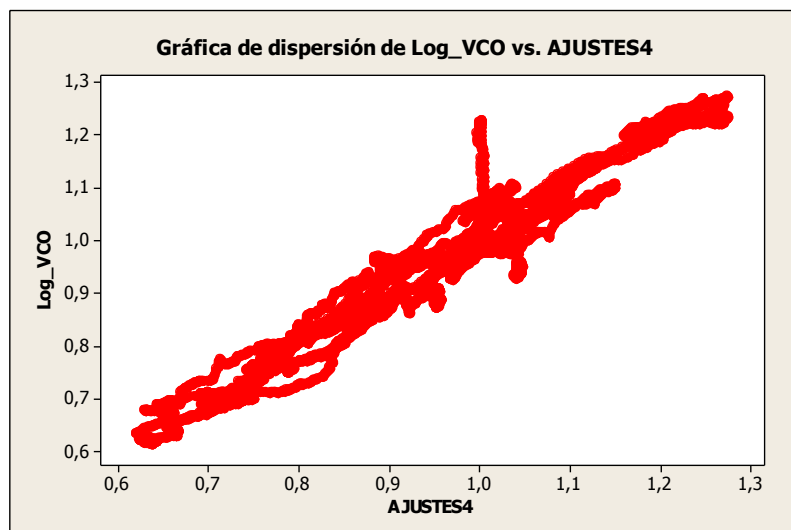


Figura 113: Comparación entre los datos ajustados y las medidas realizadas

Para la validación del modelo, se emplea la ecuación obtenida para predecir los valores de VCO junto con algunas medidas del resto de variables que conforman el arreglo matemático. Para ello se emplean los datos del jueves 24 de noviembre, entre las 5:10 y las 23:59, obteniendo una relación que se grafica en la *Figura 114*, una comparación temporal que se observa en la *Figura 115*.

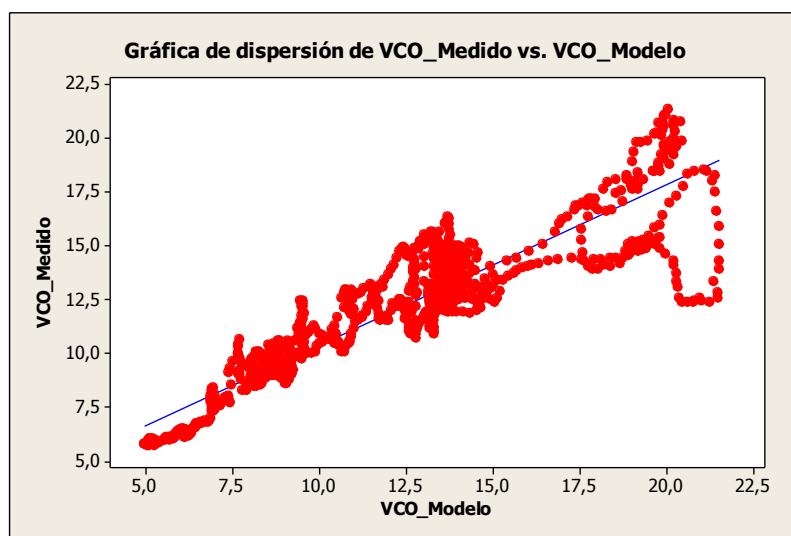


Figura 114: Dispersión de VCO medido frente al VCO arrojado por la ecuación del modelo

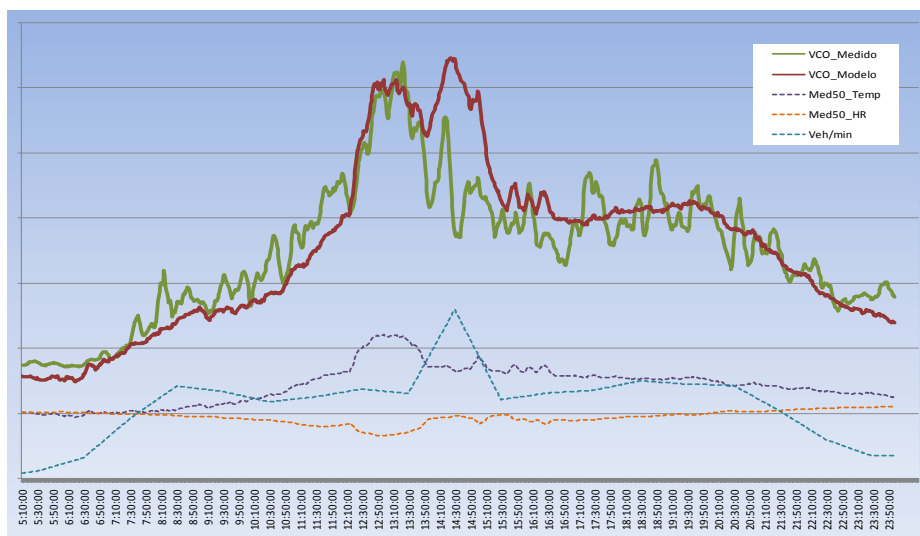


Figura 115: Relación temporal entre los datos medidos de VCO [ppm] y los datos entregados por el modelo

Se observa como el modelo se ajusta bien a los valores medidos por el sensor, aunque presenta algunas desviaciones sobre todo en los valores máximos, aumentando los picos máximos debidos a la influencia del tráfico. No obstante, el ajuste puede ser válido para mantener un cierto control de los niveles de contaminación conociendo el tráfico y las variables climáticas de la zona.

En el análisis del presente apartado, el modelo planteado corresponde a una situación experimental donde se han monitorizado además del tráfico y el VCO, las variables climáticas. Una situación más acorde con la realidad es que se conozcan las variables climáticas a través de alguna estación meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología o de alguna otra fuente, y los datos de tráfico de las estaciones de aforo del Ayuntamiento. En este contexto el cuestionamiento a plantearse es sobre la factibilidad de determinar los niveles esperados de VCO en una zona concreta. Para ello se realiza un nuevo modelo de regresión, introduciendo los valores meteorológicos de la estación climática de Viveros en lugar de los datos suministrados por los nodos ubicados *in situ*.

En la *Figura 116* se observan los valores con un periodo de muestreo de 10 minutos, obtenidos en Viveros para el periodo de tiempo considerado (la HR se divide por diez para representarla conjuntamente con la temperatura). Se observan valores sensiblemente parecidos a los señalados por los sensores en Colón.

La primera opción a analizar es introducir las medidas de Viveros en la ecuación obtenida anteriormente, con el objetivo de estimar los valores de VCO del día 24/11 y comprobar los límites de validez del ajuste. En este caso se sustituye las medidas de Temp_50 y HR_50 por los valores suministrados por Viveros, ya que la media móvil 50 representa aproximadamente los valores correspondientes a 10 minutos, por lo que a priori el modelo resulta homogéneo en cuanto a significación de unidades. Teniendo en cuenta las anteriores premisas, se obtiene las curvas de la *Figura 117*.

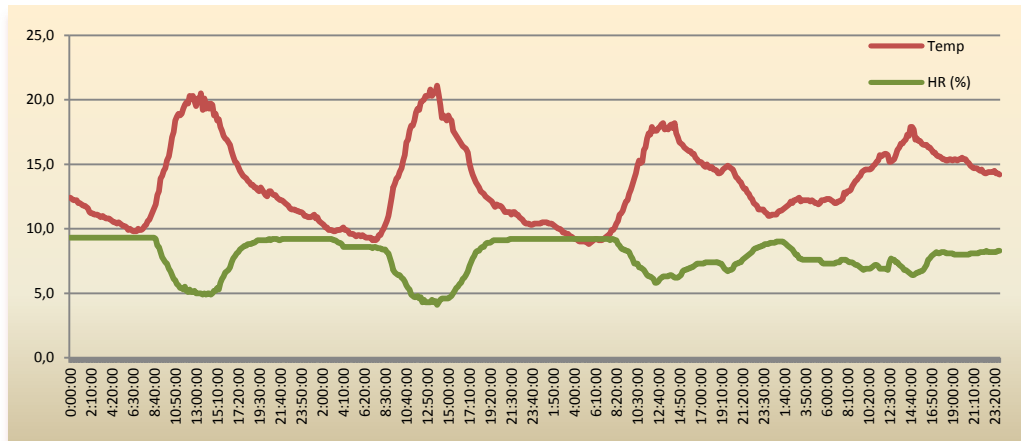


Figura 116: Medidas obtenidas de la estación climática de Viveros por la Agencia Estatal de Meteorología

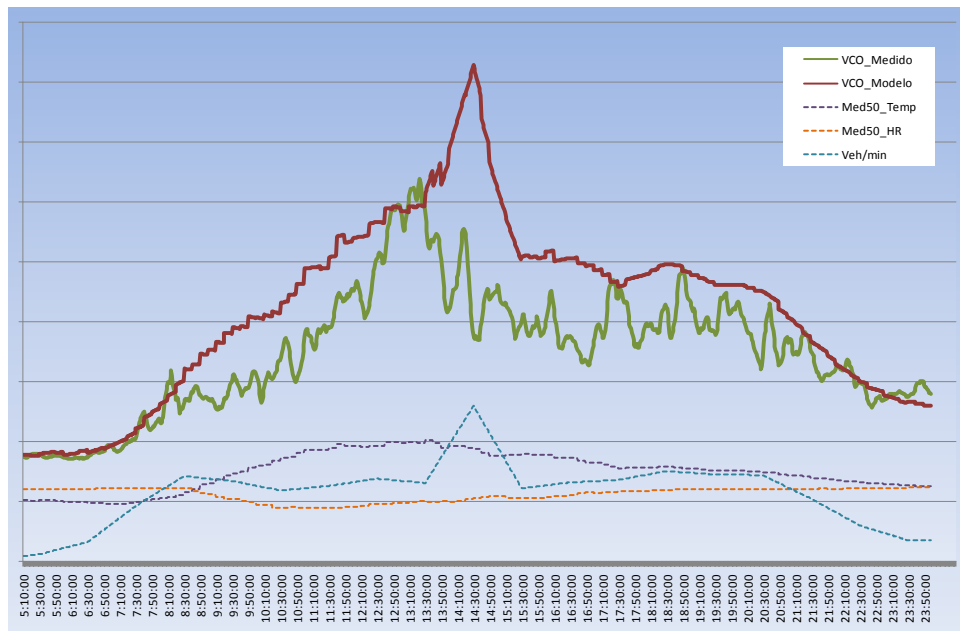


Figura 117: Resultado del modelo al introducir nuevos valores en la variable Med50_Temp y Med50_HR

Se observa que el modelo reproduce aceptablemente lo que ocurre con el VCO aunque con valores elevados, presentando así divergencias importantes. En otras palabras, la ecuación obtenida sólo es válida en las condiciones locales del área de estudio, con lo cual es apto para predecir los niveles de VCO en función el tráfico en el radio en que ubicaron los nodos de la WSN.

Con los datos existentes de los días 25 al 29 de noviembre, empleados para el ajuste del primer modelo, se desarrolla otro análisis para intentar mejorar el ajuste cuando se emplean los datos de la estación de Viveros. Así, se obtiene una nueva ecuación que relacione concentración de VCO en la C/ Colón, con intensidad de tráfico en Colón y valores climáticos generales de la ciudad (estación de Viveros). Los datos a usar en la nueva búsqueda de un modelo se representan en la Figura 118. Al analizar la distribución de valores de VCO se evidencia que no siguen una distribución normal, y además existen algunos valores anómalos hacia el lado derecho del histograma (Figura 119, izq.).

Si se amplía el diagrama Box-Whisker (Figura 119, der.), se visualiza la presencia de algunos datos anómalos, especialmente dos puntos que se alejan bastante de la región entre los cuartiles. El primer valor anómalo corresponde al valor de las 17:30 del viernes que presenta un valor de 2,3 frente al 1,4 del periodo anterior. Lógicamente esta variación tan grande de la magnitud; responde a un

comportamiento anómalo del sensor, por lo que se sustituye este dato por la media entre el valor inmediatamente anterior y posterior.

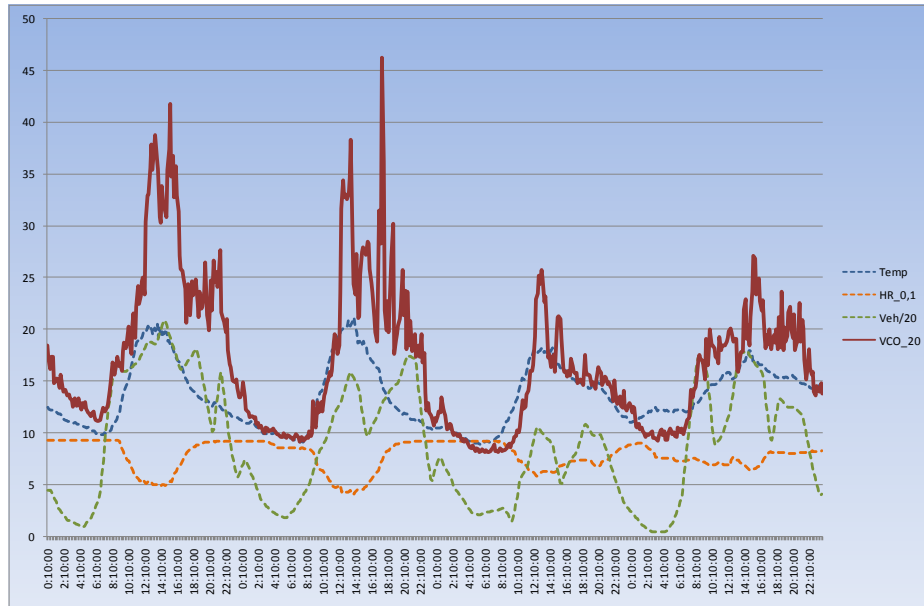


Figura 118: Curvas de datos a usar para el modelo que dependa solo de las variables climáticas de la estación

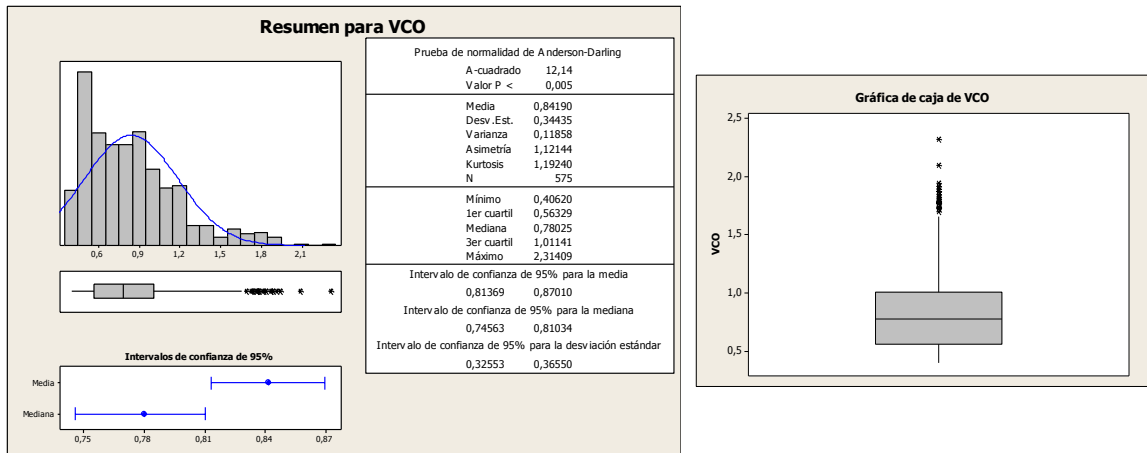


Figura 119: Resumen de estadísticos para las medidas de VCO (izq.) y diagrama de caja o Box-Whisker para las medidas del VCO (der.)

Se procede a continuación a arreglar los valores del VCO para dejarlos en una escala logarítmica (base 10). Luego se inicia el análisis de regresión con las variables definidas como variables de entrada del modelo. Al igual que en el modelo anterior, el primer ajuste probado corresponde a la relación entre VCO y la temperatura, con el cual se observa como la correlación es mucho menor (asegurando la eliminación de efectos locales y puntuales) y además, el factor de la temperatura al cuadrado no resulta significativo, contrario a lo que sucedió con el modelo anterior. Pese a ello se obtiene un coeficiente de correlación del 63%. Se agrega posteriormente el factor de la humedad relativa, el cual termina incrementando más el nivel de explicación en el modelo en desarrollo que en el anterior hallado.

Al igual que ocurría en el caso anterior, la introducción de la variable tráfico es muy significativa, elevando el nivel de explicación del modelo por encima del 83%. La ecuación y resultados obtenidos es la que aparece en la Figura 120. En las gráficas de residuos (Figura 121), se observa que éstos siguen aproximadamente una distribución normal (es decir, la variabilidad es aleatoria y no

responde a ningún efecto enmascarado). No obstante, es notorio que los valores extremos se distancian en mayor medida, por lo cual se procede a refinar el modelo introduciendo variables que explican interacción entre los factores.

El análisis de interacciones revela que existe una ligera interacción entre la HR y los otros dos factores (vehículos y temperatura), si bien dado el ligero incremento que produce en el coeficiente R² (84%) no se considera propicio aumentar la complejidad del modelo con factores cuyo aporte es escueto. El gráfico de dispersión final se plasma en la *Figura 122*:

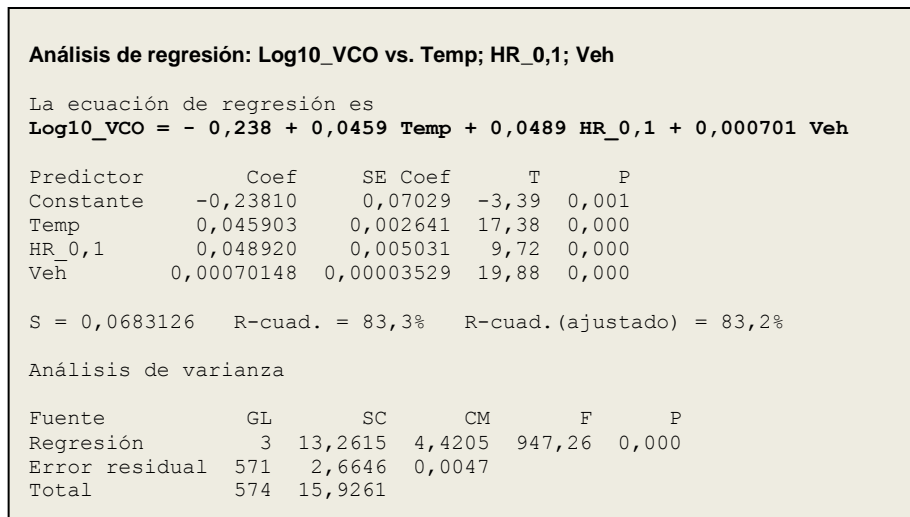


Figura 120: Obtención de la ecuación del nuevo modelo desde el programa estadístico

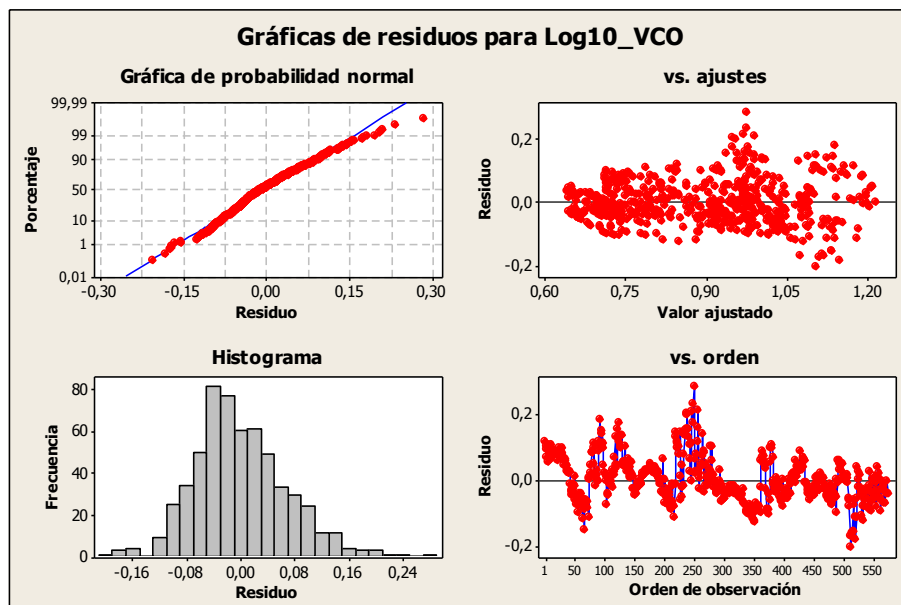


Figura 121: Análisis gráfico de los residuos del modelo

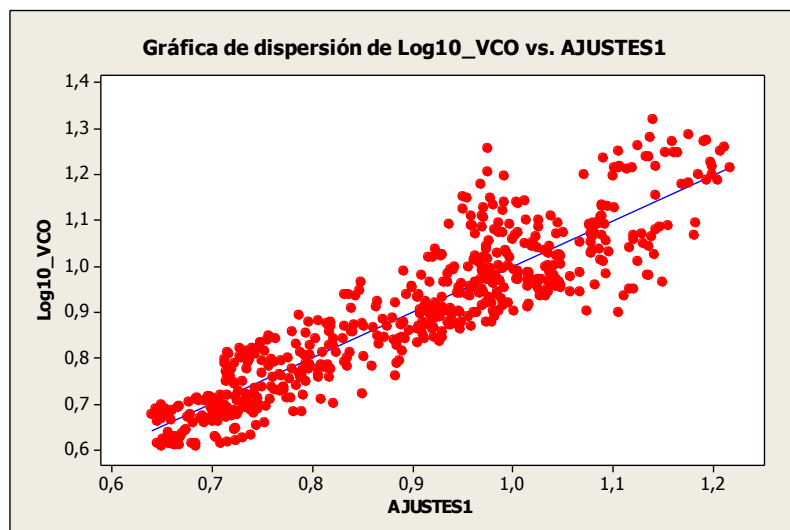


Figura 122: Análisis de dispersión entre los valores modelados del VCO y los factores del ajuste

Al representar nuevamente los valores calculados frente a los valores medidos, se obtiene la *Figura 123*. Puede verse como el modelo se ajusta considerablemente bien, excepto en los valores máximos, reproduciendo bastante bien la evolución y el comportamiento de la variable estudiada.

Para terminar la validación del modelo, se estiman los valores del VCO en el área de estudio para el día 24 de noviembre entre las 5:10 y las 23:59, gracias a los datos de tráfico del Ayuntamiento y las mediciones de la estación de Viveros (*Figura 124*).

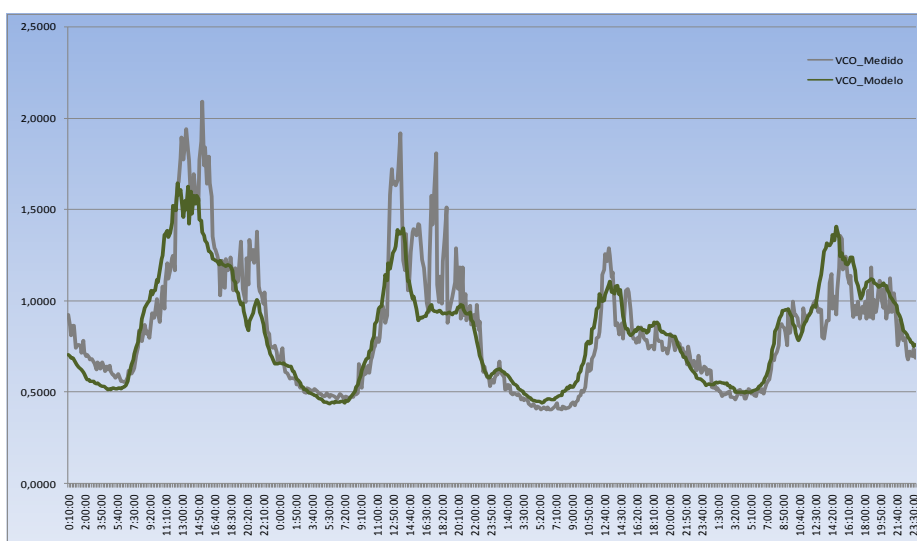


Figura 123: Comparación temporal entre los datos medidos y los calculados mediante el modelo

La conclusión fundamental a extraer es que el efecto de la temperatura y humedad relativa es muy importante frente al valor de VCO, en la mayor parte de los casos, cuando no existen picos de tráfico importantes. Sin embargo, a partir de cierto valor de tráfico los modelos estudiados no son capaces de representar adecuadamente lo que sucede, porque sacrifican estas situaciones frente a un buen valor del coeficiente de correlación para las situaciones de tráfico menores. No obstante, a nivel cualitativo sí que se visualiza que es posible usar el modelo para detectar y predecir niveles elevados de contaminación por VCO en entornos urbanos, especialmente cuando se tratase de la validación de otros modelos más complejos, como lo son los obtenidos con técnicas CFD.

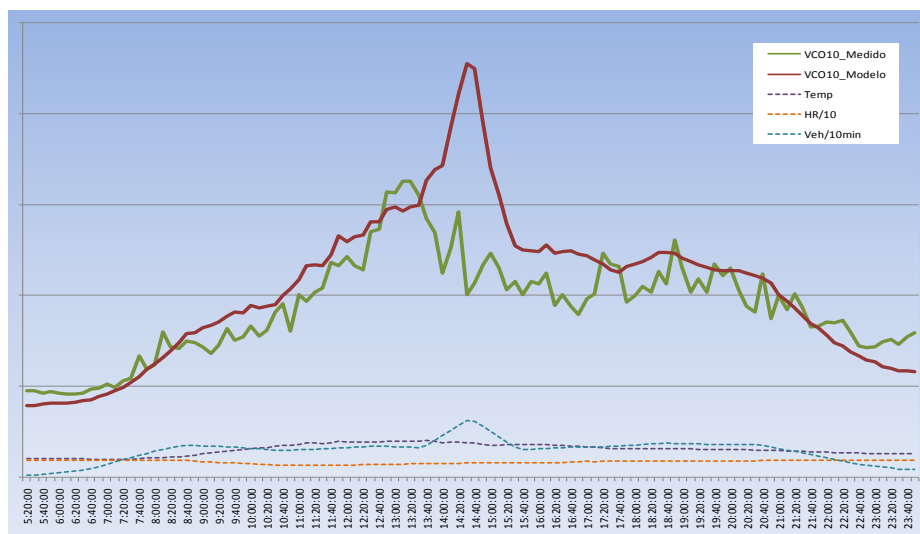


Figura 124: Resultado del modelo con un banco de datos para su validación

B.3.5. Desarrollo del modelo por medio de CFD

Tras un análisis de la contaminación en el área de estudio, la caracterización del mismo espacio, la especificación de los materiales y métodos para la medición de las variables de interés, y el análisis estadístico del banco de datos generado, se procede entonces al desarrollo del modelo matemático en CFD.

En el presente sub-apartado se plasmarán algunos detalles del software seleccionado para la simulación, seguido de algunos conceptos adicionales para el desarrollo del modelo, luego los datos y valores relevantes para la simulación y finalmente desarrollo y simulación de los diferentes casos.

B.3.5.1. Software para la simulación y el pos-procesado

Las simulaciones son realizadas en el software STAR-CCM+ (CD-Adapco Inc.), instalado en un ordenador de 4 procesadores en paralelo del Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria de la Universidad Politécnica de Valencia.

STAR-CCM+ es un software interactivo destinado a la simulación de procesos físicos en ingeniería (fluidos o sólidos). Esta plataforma es una interface interactiva que lleva implementados diversos modelos y algoritmos permitiendo, dentro de un entorno relativamente amigable, desarrollar modelos computacionales a partir de modelos conceptuales preconcebidos.

Pese a que la propia aplicación permite discretizar el modelo computacional o lo que es igual a generar los volúmenes finitos, ejecutar las simulaciones y llevar a cabo el trabajo de análisis de datos, en este caso de estudio se ha complementado el paquete informático de STAR-CCM+ con un editor de mallas como es ICEM-CFD y otros programas de pos-procesado como Tecplot y Matlab, con el fin éstos últimos de extraer mayor información de los resultados arrojados en las simulaciones.

El código empleado está basado en Métodos de Volúmenes Finitos (FVM) para resolver las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes en un mallado curvilíneo. Para los términos advectivos y difusivos se emplea una discretización de las ecuaciones de volumen finito con diferencias centrales de segundo orden. El FVM trata de combinar lo mejor del método de elementos finitos (FEM), como la flexibilidad geométrica, con lo mejor del método de diferencia finita (FDM), como la flexibilidad al definir el campo de flujo discreto (valores discretos de variables dependientes y sus flujos asociados). Es, en particular, la combinación de la formulación de un problema de un flujo en

unos volúmenes control - lo que supone el camino más físico para obtener la discretización -, con la flexibilidad geométrica en la elección de la malla y la flexibilidad al definir las variables del flujo, lo que hace el método de volumen finito atractivo para aplicaciones en ingeniería. Las ecuaciones lineares obtenidas son entonces resueltas con un solver algebraico multimalla.

Con el fin de cumplir la condición de conservación de la masa se usa un algoritmo de corrección de presión estándar (SIMPLE). De forma similar para resolver la ecuación de Poisson para la corrección de la variable presión se usa el algoritmo SIP (Strongly Implicit Procedure) de Stone (1968). Finalmente el método de interpolación de momento de Rhie y Chow (1983) se aplica para evitar desfase de presión y velocidad en la malla generada.

B.3.5.2. Técnicas de modelado

Para llevar a cabo las simulaciones, la ruta de trabajo consistió en ejecutar las simulaciones del flujo medio (RANS) de los modelos computacionales, para las que se obtenían unos resultados sin la variable tiempo (media temporal de las propiedades). Las simulaciones del flujo partían de unos valores de cero para todas las variables, iniciándose el proceso iterativo de cálculo hasta que los residuos de todas las variables mostraban unas oscilaciones inferiores al 5% dentro de un rango de 100 iteraciones, lo cual se considera adecuado en la práctica.

Para la solución de las ecuaciones diferenciales parciales mediante RANS algunas aproximaciones (modelos) han sido aplicadas. En los siguientes apartados se expone un breve resumen y justificación de las técnicas de modelado usadas.

Modelo de lámina libre: Para simular el flujo de la calle con una superficie libre de aire, se ha usado la aproximación de pared rígida sin rozamiento. Inicialmente, se realizaron experimentos numéricos probando con un modelo de simetría para modelar la lámina libre, esto es, la velocidad normal a la superficie y el gradiente de velocidad paralelo a la superficie se hacen cero, no habiéndose encontrado diferencias aparentes en cuanto a resultados ni estabilidad de cálculo.

Modelo de capa límite: En flujos próximos a la pared existe una zona llamada capa límite, que juega un importante papel, produciendo un gran impacto en el comportamiento del flujo. En esta zona se concentran los efectos de la viscosidad y, por lo tanto, será donde se produzcan las mayores pérdidas por rozamiento. Se asume que los modelos de turbulencia no son válidos dentro de la subcapa laminar de la capa límite, donde los efectos de la viscosidad son determinantes. En este trabajo se ha empleado un modelo conocido como “doble capa de altos y bajos y^+ ” (*Two-Layer All y^+ Wall Treatment*) siendo y^+ el número de Reynolds turbulento. Este modelo combina la formulación de los modelos “Altos y^+ ” y “Bajos y^+ ”, pero contiene una condición de capa límite para el término ε que tiene en cuenta una formulación de doble capa. Esta formulación, aunque la más costosa en términos de esfuerzo computacional, da resultados similares al modelo de “Bajos y^+ ” cuando $y^+ \rightarrow 0$ y resultados similares al modelo “Altos y^+ ” para $y^+ > 30$. Es el modelo más recomendado para mallas en las que existe una gran anisotropía en la estructura del flujo, de modo que existen zonas en las que la primera celda de la malla puede caer en zonas de la capa límite, y otras en una zona diferente, tal como fue comprobado en casos desarrollados.

Modelo de escalar pasivo: Para simular la inyección de contaminante (representado en el presente caso de estudio como el gas VCO) se emplea un modelo de escalar pasivo, cuya ecuación del transporte para un componente escalar cualquiera, ϕ_j , es:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathcal{V}} \rho \chi \phi_j d\mathcal{V} + \oint_A \rho \phi_j (v - v_g) \cdot da = \oint_A \left[\left(\frac{\mu}{\sigma} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla \phi_j \right] \cdot da + \int_{\mathcal{V}} S_{\phi_j} d\mathcal{V}$$

Donde S_ϕ representa una fuente adicional del escalar (no siendo empleado en el modelo planteado), σ es el número de Schmidt molecular y σ_t es el número de Schmidt turbulento.

El número de Schmidt molecular es función del propio escalar, mientras que el número de Schmidt turbulento se asume, en principio, que toma un valor de 0.9, correspondiéndose con el número turbulento de Prandtl empleado para la energía. Esto último implica que la parte del escalar que se mueve por advección lo hace íntegramente motivado por el modelo de turbulencia. En nuestro caso:

$$\sigma = \nu / D_m$$

donde ν es la viscosidad cinemática, D_m es la difusividad molecular del VCO ($D_{m, \text{VCO}} = 1,185 \text{ cm}^2/\text{s}$), y

$$\sigma_t = \nu_t / D_t$$

ν_t es la viscosidad cinemática turbulenta (modelada) y D_t es la difusividad turbulenta del VCO.

La inyección del escalar procedente de los vehículos en el dominio se realizó asumiendo una aproximación. Dicha aproximación consistía en indicarle al modelo que la emisión se producía en una serie de celdas que dibujaban los carriles de las calles por los que pasan los vehículos. Esta aproximación se consiguió mediante una rutina que se desarrolló y se implementó en el software STAR-CCM+ para tal efecto.

Modelos de turbulencia: El modelo de turbulencia empleado en nuestros modelos computacionales es el modelo de dos ecuaciones k - ϵ .

Para lanzar las simulaciones, es preciso especificar parámetros de turbulencia en las condiciones de contorno. Estos parámetros son la "intensidad turbulenta" y el "ratio de viscosidades", ambas en la condición de contorno de "entrada" al dominio hidráulico. La intensidad turbulenta se define como el ratio entre la raíz cuadrada media de las fluctuaciones de velocidad (u') y la velocidad media del flujo; esta propiedad puede ser estimada en el caso de flujos turbulentos completamente desarrollados como

$$I_t = \frac{\langle u' \rangle}{\langle u \rangle} = 0.16 \cdot \text{Re}^{(-1/8)}$$

(0.01 en el caso actual). Del mismo modo, el ratio de viscosidad es una cantidad física que relaciona la viscosidad dinámica turbulenta (modelada) con la resuelta en flujos turbulentos y puede ser estimada como μ_t / μ (10 en la simulación a realizar).

B.3.5.3. Experiencias de campo y casos hipotéticos

La investigación de CFD comienza con el desarrollo de un modelo computacional planteado a partir de una descripción del problema ajustado a un dominio concreto y a unas condiciones dadas. A partir de esta descripción del problema y de los datos de campo, se idea un modelo conceptual, el cual es la base teórica para el diseño del modelo computacional. El siguiente paso consiste en la discretización del dominio donde se calcularán las ecuaciones planteadas (generación del dominio computacional) y la implementación de los modelos elegidos mediante el uso del software STAR-CCM+ (CD-adapco Inc.).

En el presente trabajo ha sido simulado el flujo en una sección de la C/ Colón en el cruce con C/ Pizarro, tal como puede verse en la *Figura 125*, y que fue definido en la sección B.3.1. De entre los casos de campo, se seleccionaron seis casos representativos de diferentes situaciones de tráfico y condiciones aerodinámicas. De entre los sensores instalados en la zona, se tomó un sensor situado en un punto determinado como punto de control y a su vez gracias a la instalación del anemómetro se tuvo un punto de control del campo de velocidad y dirección del viento.

Una vez desarrollado el modelo validado, se lleva a cabo un estudio a fondo de los resultados numéricos (explicación de los procesos de mezcla) a partir de los cuales se plantean nuevos casos hipotéticos (velocidad del viento, dirección y nivel de emisión de contaminación), para lo cual se desarrollan nuevos modelos computacionales y simulaciones, planteando y evaluando indicadores de mezcla. Lo que se pretende es estudiar aerodinámicamente el espacio simulado, así como los procesos de mezcla y transporte de un contaminante emitido por los coches.

En referencia a las condiciones aerodinámicas de los casos de campo, los cuales son la base de los modelos computacionales, es posible consultar los datos relevantes desde la *Tabla 61* a la *Tabla 66*. La duración del registro de cada caso es de una hora, dividida en intervalos de tiempo de 10 minutos. Para cada dato se incluye:

- Fecha
- Hora inicio/ hora final: hora de inicio y final de las medidas
- Temperatura [°C]: media de 10 minutos de la temperatura en el sensor
- Vehículos: N° de vehículos que atraviesan el tramo estudiado en diez minutos
- Velocidad media [m/s]: velocidad media del viento en el periodo de 10 minutos considerado en el punto de control
- Dirección. media [°]: Dirección media del viento (en grados sexagesimales respecto al Norte) en el periodo de 10 minutos considerado en el punto de control. (p.ej. 90 significa que el viento en esos diez minutos ha soplado en dirección oeste, procedente del este)
- VCO [ppm]: Concentración de VCO en partes por millón en aire en términos de volumen [ppm]

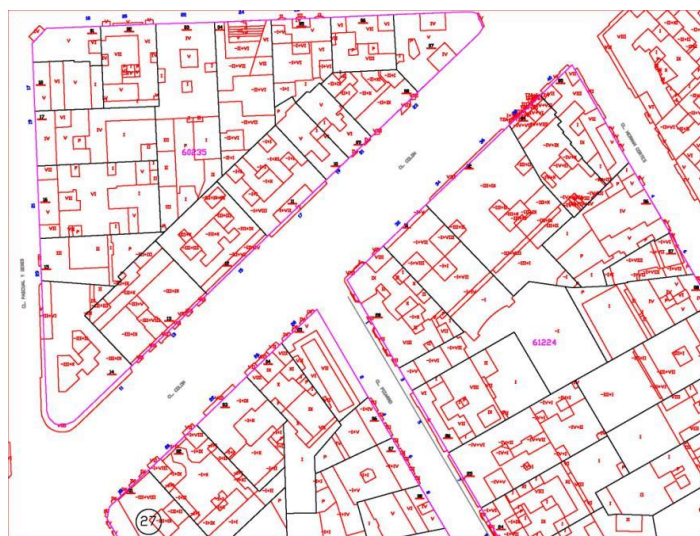


Figura 125: Plano del área de estudio, correspondiente con la C/ Colón en el cruce con la C/ Pizarro (Valencia, España)

Para cada caso se incluyen también los valores medios en toda la hora, excepto para el tráfico que es el valor de los vehículos que han circulado por el tramo en toda la hora.

Tabla 61: Condiciones aerodinámicas y registro de concentración de VCO en el punto de control para el caso de campo cv1

<i>Caso de campo cv1</i>								
<i>Día</i>	<i>Fecha</i>	<i>Hora inicio</i>	<i>Hora final</i>	<i>Temp. [°C]</i>	<i>Vehículos</i>	<i>Vel. Med. Viento [m/s]</i>	<i>Dir. Med. Viento [°]</i>	<i>VCO [ppm]</i>
Viernes	21/10/2011	13:01:00	13:10:00	21,19	373,79	0,8	89	1,72
Viernes	21/10/2011	13:11:00	13:20:00	21,54	372,65	0,6	110	1,76
Viernes	21/10/2011	13:21:00	13:30:00	21,86	371,51	0,6	87	1,82
Viernes	21/10/2011	13:31:00	13:40:00	21,88	375,61	0,5	33	1,87
Viernes	21/10/2011	13:41:00	13:50:00	21,51	384,00	1,5	122	1,84
Viernes	21/10/2011	13:51:00	14:00:00	20,85	392,39	0,5	134	1,80
Promedio		13:01:00	14:00:00	21.47	2.269,96	0,75	96	1,80

Tabla 62: Condiciones aerodinámicas y registro de concentración de VCO en el punto de control para el caso de campo cv2

<i>Caso de campo cv2</i>								
<i>Día</i>	<i>Fecha</i>	<i>Hora inicio</i>	<i>Hora final</i>	<i>Temp. [°C]</i>	<i>Vehículos</i>	<i>Vel. Med. Viento [m/s]</i>	<i>Dir. Med. Viento [°]</i>	<i>VCO [ppm]</i>
Viernes	21/10/2011	18:01:00	18:10:00	15,09	354,76	0,4	356	1,14

Tabla 62: Condiciones aerodinámicas y registro de concentración de VCO en el punto de control para el caso de campo cv2 (Continuación)

Viernes	21/10/2011	18:11:00	18:20:00	15,00	358,87	0,8	10	1,15
Viernes	21/10/2011	18:21:00	18:30:00	14,92	362,98	0,7	5	1,17
Viernes	21/10/2011	18:31:00	18:40:00	14,82	357,04	1,0	21	1,19
Viernes	21/10/2011	18:41:00	18:50:00	14,71	342,88	0,9	13	1,18
Viernes	21/10/2011	18:51:00	19:00:00	14,57	328,71	1,0	19	1,16
Promedio		18:01:00	19:00:00	14.85	2.105,24	0,80	12	1,16

Tabla 63: Condiciones aerodinámicas y registro de concentración de VCO en el punto de control para el caso de campo cv3

<i>Caso de campo cv3</i>								
<i>Día</i>	<i>Fecha</i>	<i>Hora inicio</i>	<i>Hora final</i>	<i>Temp. [°C]</i>	<i>Vehículos</i>	<i>Vel. Med. Viento [m/s]</i>	<i>Dir. Med. Viento [°]</i>	<i>VCO [ppm]</i>
Sábado	22/10/2011	5:01:00	5:10:00	9,37	37,72	1,3	261	0,49
Sábado	22/10/2011	5:11:00	5:20:00	9,31	36,74	1,4	272	0,49
Sábado	22/10/2011	5:21:00	5:30:00	9,37	35,77	0,8	258	0,49

Sábado	22/10/2011	5:31:00	5:40:00	9,42	36,74	1,3	262	0,49
Sábado	22/10/2011	5:41:00	5:50:00	9,47	39,29	1,8	265	0,49
Sábado	26/11/2011	5:51:00	6:00:00	9,47	41,85	1,5	257	0,49
Promedio		5:01:00	6:00:00	9,40	228,11	1,35	263	0,49

Tabla 64: Condiciones aerodinámicas y registro de concentración de VCO en el punto de control para el caso de campo cv4

<i>Caso de campo cv4</i>								
<i>Día</i>	<i>Fecha</i>	<i>Hora inicio</i>	<i>Hora final</i>	<i>Temp. [°C]</i>	<i>Vehículos</i>	<i>Vel. Med. Viento [m/s]</i>	<i>Dir. Med. Viento [°]</i>	<i>VCO [ppm]</i>
Domingo	23/10/2011	13:01:00	13:10:00	18,90	201,73	1,2	23	1,20
Domingo	23/10/2011	13:11:00	13:20:00	19,36	198,51	0,8	25	1,23
Domingo	23/10/2011	13:21:00	13:30:00	19,34	195,28	0,6	69	1,23
Domingo	23/10/2011	13:31:00	13:40:00	19,31	192,43	0,8	50	1,22
Domingo	23/10/2011	13:41:00	13:50:00	18,94	189,87	1,5	23	1,18
Domingo	23/10/2011	13:51:00	14:00:00	17,88	187,32	1,6	37	1,11
Promedio		13:01:00	14:00:00	18,95	1.165,13	1,08	38	1,19

Tabla 65: Condiciones aerodinámicas y registro de concentración de VCO en el punto de control para el caso de campo cv5

<i>Caso de campo cv5</i>								
<i>Día</i>	<i>Fecha</i>	<i>Hora inicio</i>	<i>Hora final</i>	<i>Temp. [°C]</i>	<i>Vehículos</i>	<i>Vel. Med. Viento [m/s]</i>	<i>Dir. Med. Viento [°]</i>	<i>VCO [ppm]</i>
Lunes	24/10/2011	9:01:00	9:10:00	11,66	335,28	1,4	348	0,85
Lunes	24/10/2011	9:11:00	9:20:00	11,66	330,34	1,2	356	0,85
Lunes	24/10/2011	9:21:00	9:30:00	11,76	325,39	1,6	345	0,84
Lunes	24/10/2011	9:31:00	9:40:00	11,85	309,46	2,1	341	0,85
Lunes	24/10/2011	9:41:00	9:50:00	11,88	284,55	1,8	349	0,85
Lunes	24/10/2011	9:51:00	10:00:00	12,05	259,63	1,7	351	0,87
Promedio		9:01:00	10:00:00	11,81	1.844,65	1,63	348	0,85

Tabla 66: Condiciones aerodinámicas y registro de concentración de VCO en el punto de control para el caso de campo cv6

<i>Caso de campo cv6</i>								
<i>Día</i>	<i>Fecha</i>	<i>Hora inicio</i>	<i>Hora final</i>	<i>Temp. [°C]</i>	<i>Vehículos</i>	<i>Vel. Med. Viento [m/s]</i>	<i>Dir. Med. Viento [°]</i>	<i>VCO [ppm]</i>
Lunes	24/10/2011	14:01:00	14:10:00	13,83	356,35	2,5	18	0,88

Lunes	24/10/2011	14:11:00	14:20:00	13,91	357,30	1,5	14	0,96
Lunes	24/10/2011	14:21:00	14:30:00	14,08	358,24	2,5	11	0,99
Lunes	24/10/2011	14:31:00	14:40:00	14,39	356,41	2,5	11	1,02
Lunes	24/10/2011	14:41:00	14:50:00	14,69	352,29	1,7	16	1,03
Lunes	24/10/2011	14:51:00	15:00:00	15,04	348,18	1,6	18	1,03
Promedio		14:01:00	15:00:00	14.32	2.128,78	2,05	15	0,99

En la *Tabla 67* se incluye las expresiones que se han empleado para la determinación de los factores de emisión de VCO (Ntziachristos & Samaras, 2000). Empleando el número de vehículos que atraviesan la calle en un periodo de tiempo determinado (dato de campo), junto con cada una de las expresiones de estas tipologías de vehículos, obtenemos unas emisiones de VCO (gr/s) en el dominio estudiado. Es posible apreciar que con cada una de las posibilidades que representa a los diferentes vehículos, obtendremos una emisión diferente. Debido a que los datos de campo no nos permitían diferenciar tipologías de vehículos que atravesaron la calle, se decidió trabajar con una emisión calculada como la media de estas expresiones. No obstante, se calculó también la emisión máxima y la mínima ("Motocicletas > cc 2 t" y "Turismos Euro II (91/12/EC) >2,01" respectivamente), es decir, la que se produciría si todos los vehículos que atravesaron la calle fueran "Motocicletas > cc 2 t" o la que se produciría si todos los vehículos fueran Turismos Euro II (91/12/EC) >2,01". Esto último se llevó a cabo con la intención de tener un umbral que nos permitiese comparar datos de las simulaciones con los datos de campo de cara a la validación del modelo.

Tabla 67: Funciones para la determinación de los factores de emisión de VCO [gr VCO/km]

	Tipo de vehículo	Subcategoría	Rango de Velocidad [km/h]	Función/Factor de Emisión	
Turismos de gasolina con catalizador	Catalizador de oxidación	< 1,41	10-130	$17,882-0,377 \cdot V+0,002825 \cdot (V^2)$	
		1,4 - 2,01	10-130	$9,446-0,23012 \cdot V+0,002029 \cdot (V^2)$	
	Catalizador de tres vías	>2,01	-	$2,913-0,085 \cdot V+0,000873 \cdot (V^2)$	
	Euro I (91/441/EEC)	< 1,41	5-130	$9,846-0,2867 \cdot V+0,0022 \cdot (V^2)$	
		1,4 - 2,01	5-130	$9,617-0,245 \cdot V+0,0017285 \cdot (V^2)$	
		>2,01	5-130	$12,826-0,2955 \cdot V+0,002029 \cdot (V^2)$	
	Euro II (91/12/EC)	< 1,41	5-130	68 % del correspondiente Euro I	
		1,4 - 2,01	5-130	68 % del correspondiente Euro I	
		>2,01	5-130	68 % del correspondiente Euro I	
	Turismo diesel	Turismo diesel	Todas	10-130	$5,4130 \cdot (V^{-0,574})$
	Motocicletas	Motocicletas	< 50 cc	-	15 g km-1

Debido a que las simulaciones se realizan en flujo permanente (es decir, se asume que no existen variaciones de entrada de flujo ni de emisión, obteniéndose un campo de flujo medio temporal), se calcularon las condiciones medias de cada uno de los casos de campo. Así, cada uno de los casos representa una situación (calculada en el periodo temporal de una hora) permanente a lo largo del tiempo, esto es, por ejemplo, para el caso *v1*, el caso representa una situación en la que la temperatura del aire se mantiene a 21,47°, el viento es constante a 0,75 m/s y soplando a 96° Norte

y el flujo de vehículos es contante e igual a 2.270 vehículos/hora. Los resultados de emisión para estos casos pueden consultarse en la *Tabla 68*.

Tabla 68: Condiciones de emisión de VCO en el periodo considerado para los casos de campo *cv*

Caso	Vehículos/hora	Hipótesis de emisión en el periodo considerado [gr/s]		
		Promedio	Máximo	Mínimo
cv1	2.270	0,7848	4,3084	0,0690
cv2	2.105	0,7278	3,9957	0,0640
cv3	228	0,0789	0,4330	0,0069
cv4	1.165	0,4028	2,2114	0,0354
cv5	1.845	0,6378	3,5011	0,0561
cv6	2.129	0,7360	4,0404	0,0647

Dentro del marco de la investigación, uno de los objetivos de esta es el estudio de la mezcla del contaminante en función de las condiciones de contorno (concretamente dirección del viento e intensidad). El procedimiento habitual consiste en plantear casos hipotéticos que pudieran aportar información, desarrollando nuevos modelos numéricos a partir de un modelo ya validado. Lo que se plantea con este procedimiento es aprovechar la potencia y alta resolución de la CFD, empleando el modelo computacional como un laboratorio virtual. Así, estos nuevos modelos numéricos servirán para obtener información bajo hipotéticas condiciones. De este modo, una vez analizados los resultados numéricamente, se procedió a la propuesta, elaboración y análisis de nuevos modelos a partir del modelo validado.

Se plantearon hasta doce casos hipotéticos diferentes, los cuales representan doce situaciones de dirección y velocidad de viento, manteniendo el resto de condiciones y emisión de VCO iguales al caso de campo *cv1*. Así pues, se muestra en la tabla 9 las condiciones aerodinámicas y de emisión de VCO para cada uno de los doce casos propuestos.

Tabla 69: Condiciones aerodinámicas y de emisión de VCO en el periodo considerado para los casos hipotéticos *hv*

Caso	Vehículos/hora	Velocidad Media Viento [m/s]	Dirección Media del Viento [°]	Hipótesis de emisión en el periodo considerado [gr/s]
				Promedio
hv11	2.270	2	46	0,7848
hv21	2.270	1,5	46	0,7848
hv31	2.270	1	46	0,7848
hv41	2.270	0,5	46	0,7848
hv12	2.270	2	226	0,7848
hv22	2.270	1,5	226	0,7848
hv32	2.270	1	226	0,7848
hv42	2.270	0,5	226	0,7848
hv13	2.270	2	149	0,7848
hv23	2.270	1,5	149	0,7848

hv33	2.270	1	149	0,7848
hv43	2.270	0,5	149	0,7848

B.3.5.4. Desarrollo del modelo

En relación a la discretización del dominio, las simulaciones para los distintos casos han sido realizadas con un dominio computacional $L_X \times L_Y \times L_Z$: L_X en la dirección longitudinal de la coordenada X (coordenadas UTM), L_Y en la dirección Y (UTM) y L_Z en la vertical Z (UTM), empleándose dicho sistema global de coordenadas para los cálculos y análisis de resultados. Las dimensiones para la zona de estudio son $L_X \times L_Y \times L_Z = 77,6 \times 219,8 \times 50 \text{ m}^3$.

En la *Figura 126* es posible observar el dominio computacional desarrollado para los modelos, así como una vista superior de dicho dominio en la que podemos apreciar la inyección en carriles del escalár en la *Figura 127*.

Las mallas presentan un crecimiento en el tamaño de celdas para conseguir una mejor resolución cerca de la pared. A su vez, las mallas presentan un mayor refinamiento en aquellas zonas donde se preveía que iba a existir mayor turbulencia y gradiente de velocidad. El ratio de crecimiento de las celdas no excede en ningún caso del 4%. En la *Tabla 70* puede consultarse el tamaño de la malla, así como los tamaños máximos y mínimos de las celdas.

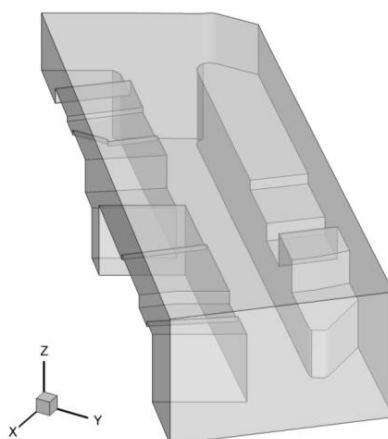


Figura 126: Vista en perspectiva del dominio computacional empleado en las simulaciones

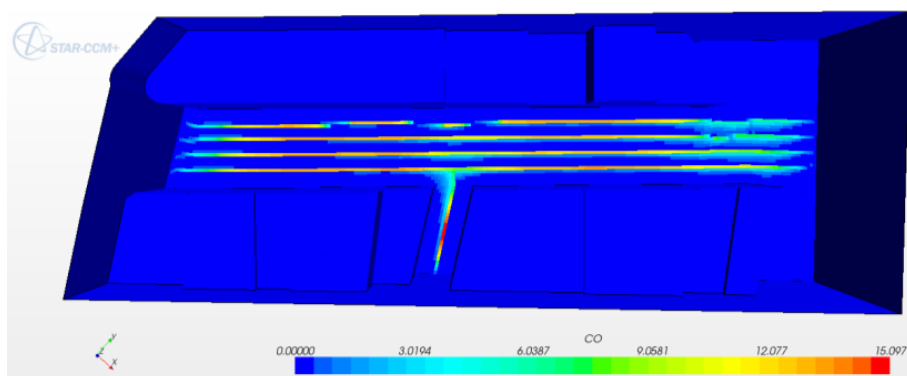


Figura 127: Vista superior del dominio computacional del modelo en la que se puede apreciar la inyección en carriles como solución a la emisión del escalár (VCO).

Tabla 70: Modelo computacional empleado para las simulaciones

<i>Caso</i>	<i>Dominio computacional [m]</i> $X \times Y \times Z$	<i>Mallas empleadas:</i> <i>Nº celdas en x-, y-, z-</i>	<i>Número total de celdas</i>
(Malla estructurada)	77,6 x 219,8 x 50	213x74x80	749.727
<i>Dirección</i>	<i>Nº de celdas</i>	<i>Longitud mínima [m]</i>	<i>Longitud máxima [m]</i>
X	213	0,38	2,90
Y	74	0,75	1,25
Z	80	0,10	1,00

A modo de ejemplo, se muestran algunas figuras en las es posible observar con más detalle algunas vistas del mallado empleado en las simulaciones. En la *Figura 128* se visualiza una sección horizontal del mallado a una altura media central del dominio computacional.

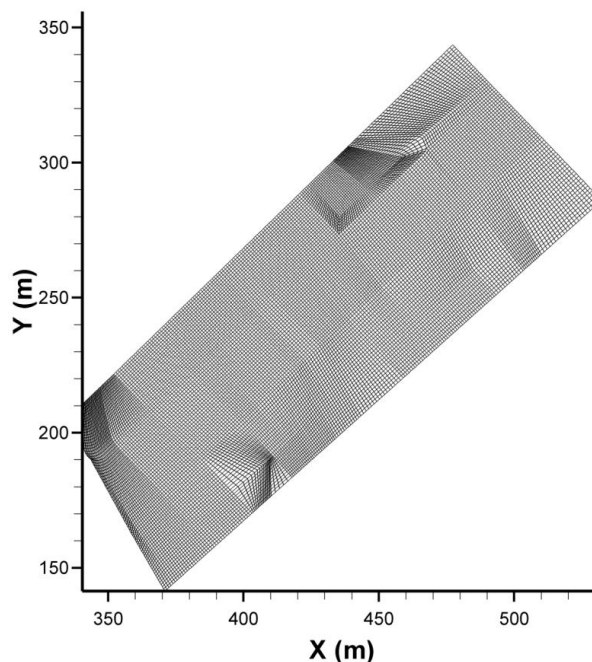


Figura 128: Sección horizontal del mallado en su zona central

El mallado computacional para todos los casos se ha elaborado con el software generador de mallas ICEM-CFD. Se empleó en este caso la tipología de malla "estructurada" como la tipología de malla para el modelo de la calle. Las mallas estructuradas suelen ser mucho más difíciles de elaborar conforme aumenta la complejidad de la geometría pero se obtienen resultados más fiables, siendo además el cálculo más estable. Las mallas desestructuradas se caracterizan por ser relativamente fáciles de elaborar y consiguen una ventajosa adaptación a geometrías complejas, aunque suelen dar resultados menos fiables. Se realizaron mallados basándose tanto en la experiencia, como en el conocimiento hidrodinámico del flujo y de conceptos de mecánica de fluidos. El número y tamaño de celdas de las mallas se determinó, finalmente, después de haber realizado experimentos numéricos previos en los que se examinaba el tiempo computacional necesario, estabilidad de cálculo y la coherencia de los resultados.

En la *Figura 129* se plasma una sección vertical del mallado en su zona central en la que se puede apreciar el crecimiento establecido de las celdas desde el suelo hacia el contorno superior.

Finalmente, en las *Figura 130* y *Figura 131* se muestran dos vistas en diferente perspectiva de diferentes zonas de la malla. Los datos geométricos del mallado fueron obtenidos con equipos de topografía clásica, así como por técnicas fotogramétricas de transformación.

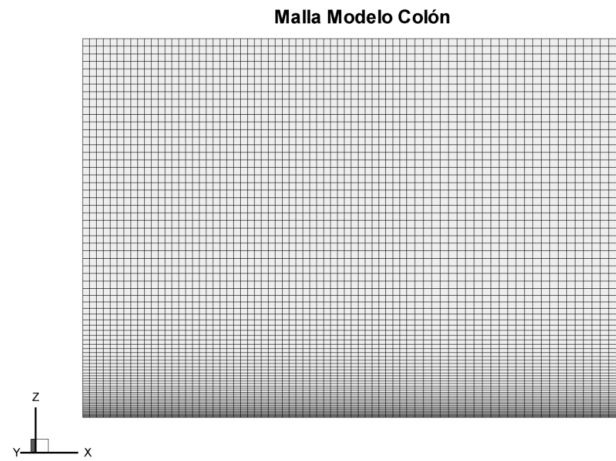


Figura 129: Sección vertical del mallado en su zona central

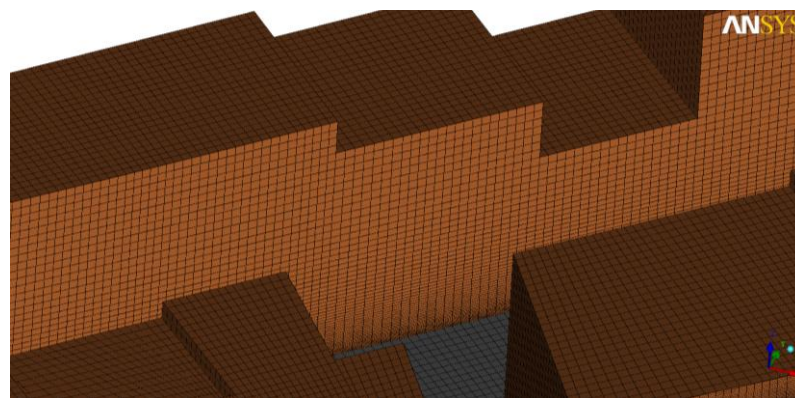


Figura 130: Vista en perspectiva del mallado en la zona central del cruce de C/ Colón con C/ Pizarro



Figura 131: Vista en perspectiva del mallado del dominio computacional

B.3.6. Validación de resultados

B.3.6.1. Punto de control

En la *Figura 132* se puede observar que el punto de control utilizado en las simulaciones para validar los resultados se encuentra en la confluencia de las C/ Pizarro y Colón en las que se producen los fenómenos más complejos relacionados con el proceso de mezcla y transporte del contaminante emitido por los coches que circulan por ambas travesías. La comparación del valor de la concentración de VCO en ese punto entre las simulaciones y el valor medido por el sensor colocado en el semáforo de la C/ Colón para los 6 casos experimentales seleccionados en el estudio (*Tabla 71*). Los resultados muestran una buena correlación entre las simulaciones y las medidas del sensor ya que en todos los casos estudiados el valor medido en las condiciones reales de tráfico y viento se encuentra entre los límites máximo y mínimo obtenido en los resultados numéricos. Por lo tanto se puede concluir que las simulaciones están representando de manera correcta los procesos de mezcla en el espacio simulado en la zona de unión entre las dos calles antes mencionadas.

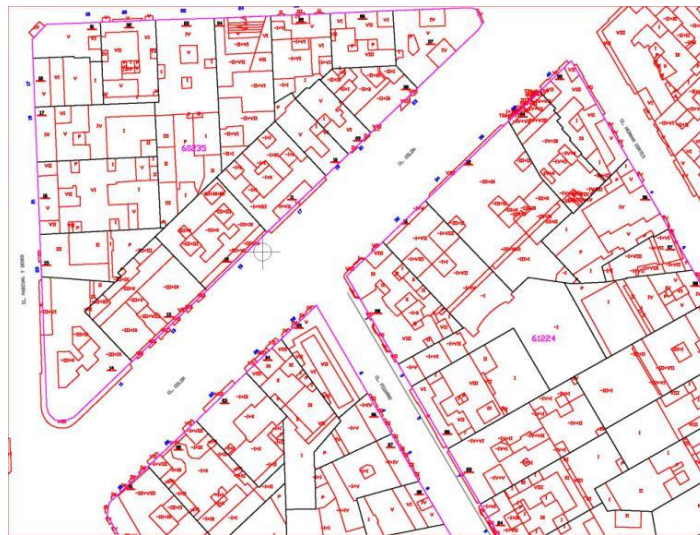
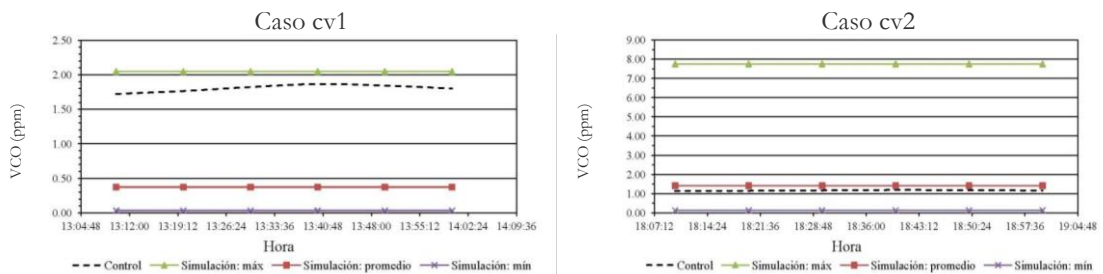
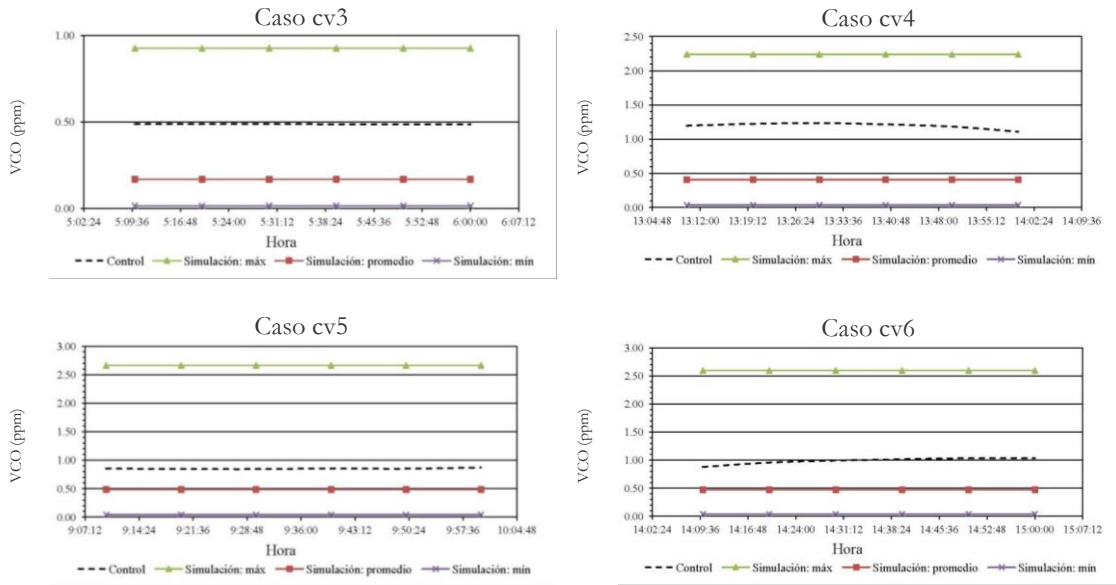


Figura 132: Vista en planta de la ubicación del punto de control (marcado con una aspa redondeada) empleado para la validación del modelo. Sensor colocado en semáforo con coordenadas (X; Y; Z)=(403,8272; 238,9944; 3,0000)

Tabla 71: Concentración de VCO en el punto de control empleado para la validación del modelo del caso cv1 al cv6





B.3.6.2. Análisis de casos experimentales

Tanto en el presente apartado como en la siguiente, se desea analizar cómo se produce el proceso de mezcla y transporte en los diferentes casos estudiados. Para ello, se ha analizado en 4 planos a alturas de 0,25, 1, 1,5 y 3 metros la velocidad media, las líneas de corriente y la concentración de VCO. En el primer bloque se presentan los 6 casos escogidos de las muestras experimentales obtenidas con el sensor instalado en la calle Colón y el segundo bloque se muestran 12 casos hipotéticos en los que se pretende establecer un análisis de sensibilidad a la dirección y la velocidad del viento que afecta a la zona de estudio.

En la *Tabla 72*, se puede observar un resumen de las figuras presentadas en la presente sección.

Tabla 72: Guía para las figuras presentadas en la presente sección

<i>Caso</i>	<i>Figuras</i>
cv1	Figura 133, Figura 171 - Figura 173
cv2	Figura 134, Figura 174 - Figura 176
cv3	Figura 135, Figura 177 - Figura 179
cv4	Figura 136, Figura 180 - Figura 182
cv5	Figura 137, Figura 183 - Figura 185
cv6	Figura 138, Figura 186 - Figura 188

En primer lugar cabe destacar las grandes diferencias que existen en el comportamiento aerodinámico y de mezcla en función de las características del caso. La velocidad del viento, la dirección y el nivel de tráfico se muestran como las variables más importantes a tener en cuenta en el estudio. Así se pueden distinguir diferencias significativas en los 6 casos analizados (se reportan sólo los cortes a una altura de 1,50m. Los cortes restantes se adjuntan en el *ANEXO III*):

- *CV1* (Figura 133, Figura 171 - Figura 173): en este caso la dirección del viento es 96° (es decir entre las C/ Pizarro y Colón en el sentido del tránsito de vehículos) y la velocidad es de 0,75 m/s. Por otro lado circulan durante la hora de análisis 2270 vehículos. En los

diferentes planos de concentración de VCO se puede observar como aparecen mayores valores en la acera derecha de la C/ Colón, mientras que la C/ Pizarro los valores son menores. Se puede observar también la relación existente entre los contornos de velocidad y las líneas de corriente y los valores de concentración a las diferentes alturas mostradas. Se puede observar que las mayores velocidades suponen en la mayoría de los casos una menor concentración de VCO. Es interesante a su vez mostrar cómo el contaminante se va difundiéndose a medida que aumenta la altura con menores valores de concentración de VCO, pero que todavía son muy elevados a 1,5 metros de altura (valores que llegan a las 6 ppm).

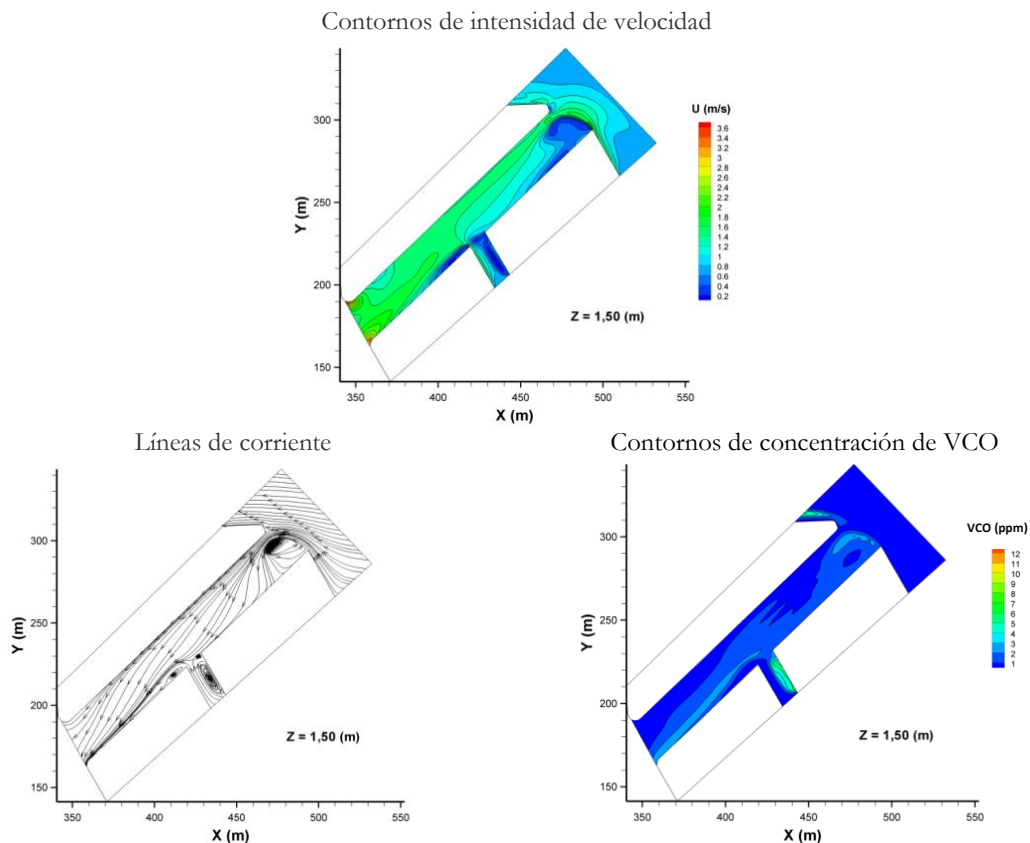


Figura 133: Simulación caso *cv1*: sección $z=1,50m$

- *CV2* (Figura 134, Figura 174 - Figura 176): En este caso la dirección del viento es de 12° (prácticamente perpendicular a la entrada de los vehículos por la C/ Colón) y la velocidad del viento es de $0,8$ m/s. El número de vehículos que transitaban durante esta hora la zona de estudio es de 2106. Se puede observar cómo varían los contornos de concentración de VCO debido a que las velocidades en la entrada de la C/ Colón sirven de barrido del contaminante. Desaparecen las recirculaciones en la C/ Pizarro y Colón y se produce una aceleración del flujo en la calle que permite que los valores de concentración sean menores que en el caso *cv1* aun con el mismo número de vehículos. Por otro lado se puede observar cómo las mayores concentraciones se producen en el centro de la calle y no en los lados cómo ocurría anteriormente. Esto se debe al hecho de la mayor aceleración del flujo por la concordancia entre la dirección del viento y la entrada de la C/ Colón. En la mayoría de las zonas estudiadas en este caso los valores de VCO son relativamente bajos, inferiores a 1 ppm.
- *CV3* (Figura 135, Figura 177 - Figura 179): El caso *cv3* es muy diferente a los dos anteriormente comentados. Por un lado, el caso representa un momento entre las 5 y las 6

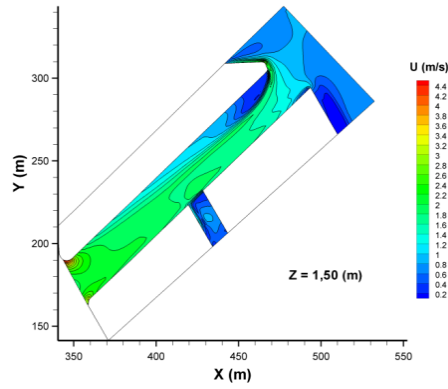
de la mañana con un nivel de tránsito muy limitado (228 vehículos). Además la velocidad del viento es mayor ($v=1,35$ m/s) y su dirección es de 263° , es decir desde la zona izquierda del plano (más o menos desde la zona del ayuntamiento de Valencia) en contrasentido a la C/ Pizarro. Por lo tanto se puede observar como las líneas de corriente son muy homogéneas en la C/ Colón, haciéndose el flujo más complejo en la zona de entrada de la calle y en la misma C/ Pizarro. Eso afecta claramente a la distribución de VCO en la zona y en las diferentes alturas analizadas. Por una parte, los valores de concentración son mucho más bajos también debido a que circulan muchos menos vehículos, pero independientemente del bajo nivel de concentración se puede observar una mayor difusión y mezcla del contaminante que en los casos anteriores más afectados por las recirculaciones y el flujo complejo en la zonas de entrada de las C/ Colón y Pizarro.

- CV4 (Figura 136, Figura 180 - Figura 182): El caso *cv4* corresponde a un momento intermedio en el que el número de vehículos es de 1165, ni tan alto como en los casos *cv1* y *cv2* ni tan bajo como en el caso *cv3*. La dirección del viento es de 38° (misma dirección y sentido de los vehículos que transitan por la C/ Colón) y la velocidad es de 1,08 m/s. En este caso es interesante resaltar las diferencias con el caso *cv2*, muy similar en la dirección, pero con una velocidad del viento ligeramente superior y con un número de vehículos prácticamente la mitad. En primer lugar se puede observar, que el flujo es bastante homogéneo en la C/ Colón pero aparecen una recirculación en la acera de la derecha debida al aumento de la velocidad y el esfuerzo cortante producido en la zona de contracción del flujo. Por otro lado ese flujo más complejo afecta a toda la primera parte del dominio pero es cierto que a partir de la confluencia con la C/ Pizarro el flujo es bastante regular y parecido al caso *cv2*. En cuanto a la concentración de VCO aparece claramente que el máximo se encuentra en el centro de la calle como en el caso *cv2* pero con la diferencia que los valores son muy inferiores debido a una mayor velocidad y un menor número de vehículos.
- CV5 (Figura 137, Figura 183 - Figura 185): En este caso, la dirección del viento es de 348° , que supone una entrada oblicua a la C/ Colón escorada al Este. Por otro lado la velocidad del viento es de 1,63 m/s (muy superior a los casos anteriores). El nivel de tránsito de vehículos es elevado, llegando a los 1845 vehículos. Es interesante comparar este caso con los anteriores por la dirección del viento que provoca una recirculación muy grande en la acera derecha de la entrada de la C/ Colón que afecta al comportamiento aerodinámico de la primera parte del dominio. De esta manera se puede observar cómo los niveles más altos de concentración de VCO se observan en este caso en la acera izquierda afectados por esa recirculación antes mencionada que empuja las líneas de corriente hacia esa zona de la calle. Por otro lado, se puede observar que la mayor velocidad del viento supone una mayor mezcla y un mayor transporte del contaminante de manera que se producen niveles más bajos que en los casos *cv1* y *cv2*, aun con los mismos niveles de tránsito de vehículos.
- CV6 (Figura 138, Figura 186 - Figura 188): Este caso igual que en el *cv2* y en el *cv4*, la dirección del viento es prácticamente la misma del sentido de tránsito de vehículos en la C/ Colón. La diferencia principal es que la velocidad del viento es muy superior con una media de 2,05 m/s. A su vez el número de vehículos es de 2128 similar al caso *cv2*. En este caso, se puede observar como de nuevo se produce un esfuerzo cortante muy significativo en la entrada de la calle en la parte de la acera derecha con unas velocidades que pueden llegar a superar los 5-6 m/s. Esto va a afectar en todo el dominio a los procesos de mezcla y de transporte del contaminante. En este caso, de nuevo los valores más altos de concentración se producen en el centro de la C/ Colón con el valor máximo un poco más desplazado hacia el cruce con la C/ Pizarro debido a una velocidad más alta en el interior de la calle.

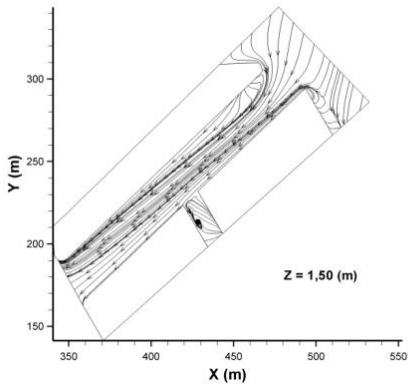
Se puede concluir de este análisis en las condiciones reales y experimentales estudiadas que la velocidad y la dirección del viento afecta claramente el comportamiento de mezcla y transporte del contaminante (VCO) tanto en la C/ Colón como en la C/ Pizarro. Por ello, se procedió a analizar

el comportamiento en condiciones ideales y controladas de velocidad y dirección del flujo de aire de entrada al dominio. Este estudio se discutirá en el siguiente apartado.

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

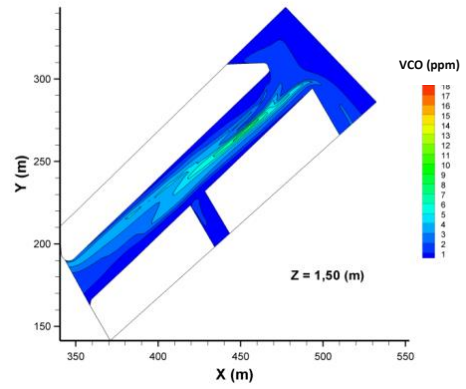
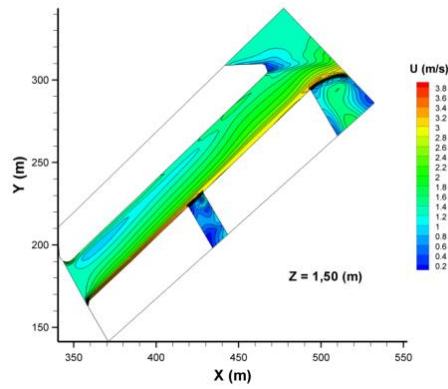
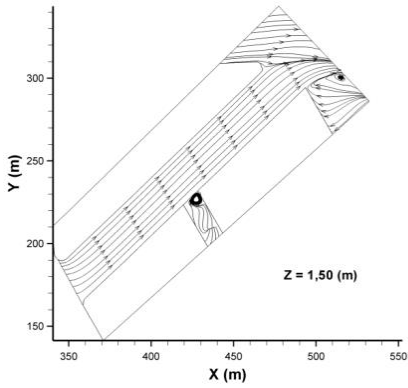


Figura 134: Simulación caso cv2: sección $z=1,50m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

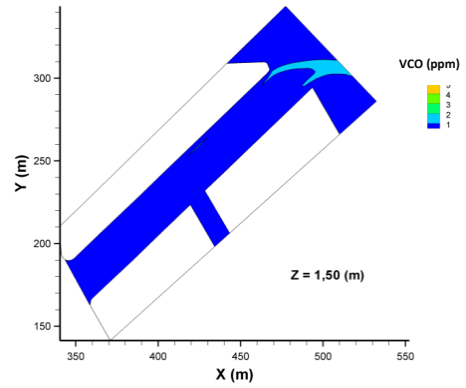
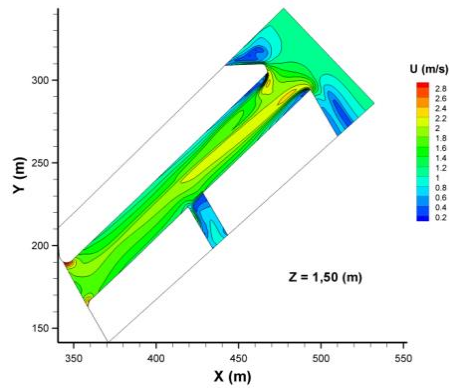
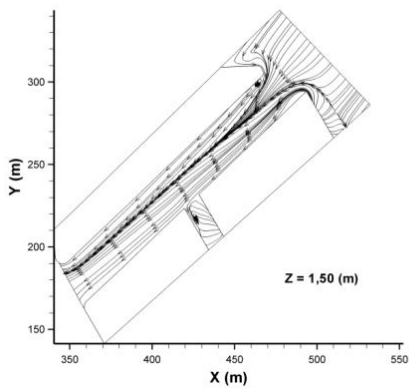


Figura 135: Simulación caso cv3: sección $z=1,50m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

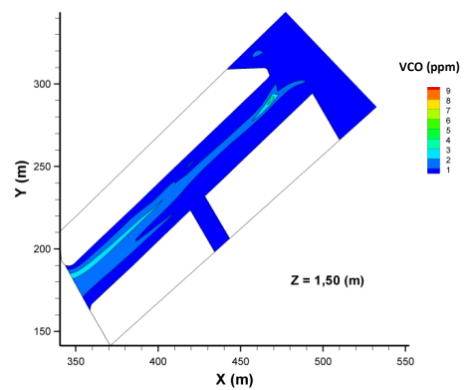
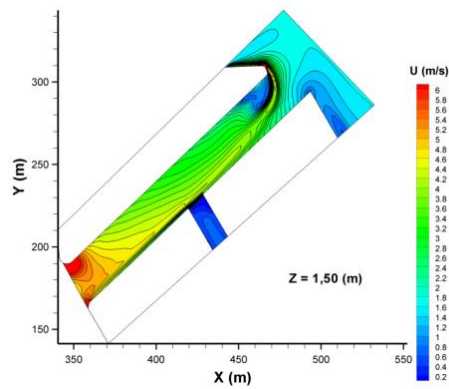
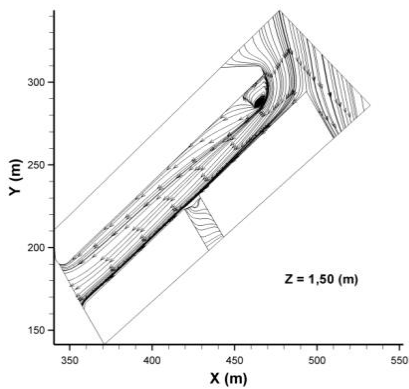


Figura 136: Simulación caso cv4: sección $z=1,50m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

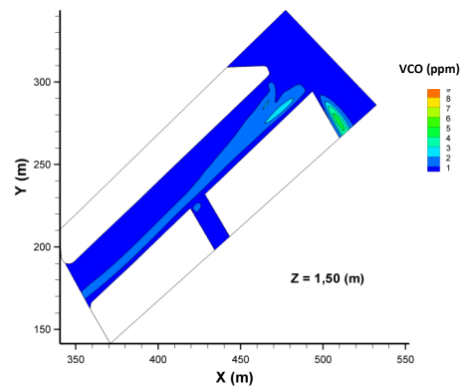


Figura 137: Simulación caso cv5: sección $z=1,50m$

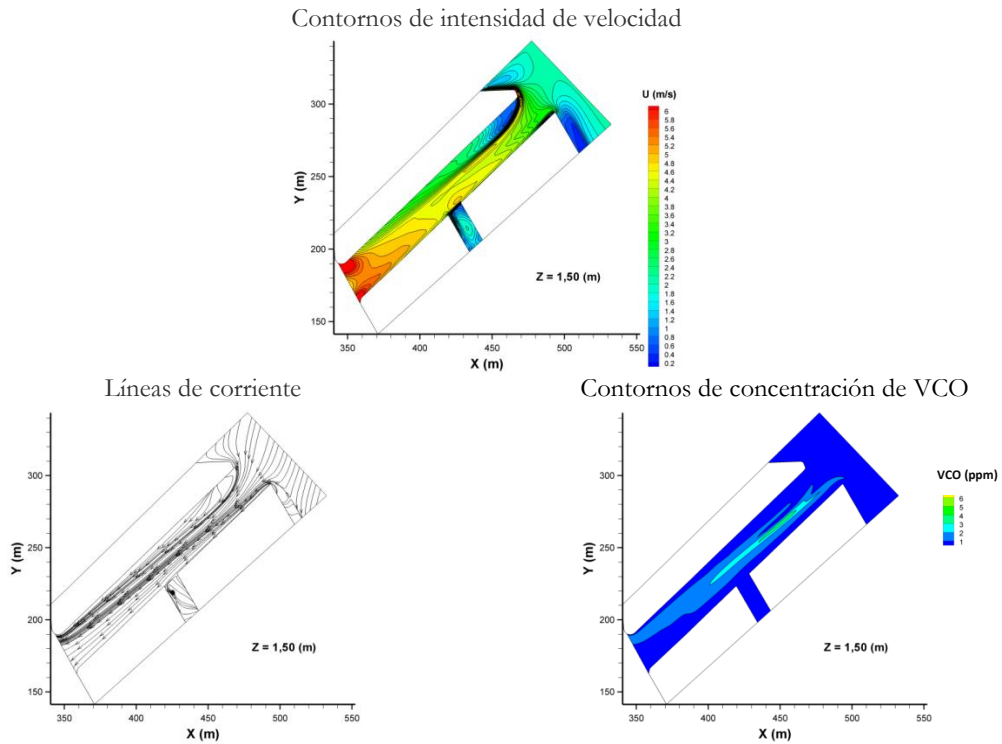


Figura 138: Simulación caso cv6: sección $z=1,50m$

B.3.6.3. Análisis de casos ideales (hipotéticos)

Como en el anterior apartado, las figuras que se utilizarán serán planos de velocidad, líneas de corriente y concentración de VCO en ppm en 4 alturas diferentes 0,25, 1, 1,5 y 3 metros. En la *Tabla 73* se muestra un resumen de las figuras obtenidas en este bloque para una mejor comprensión y manejo del documento.

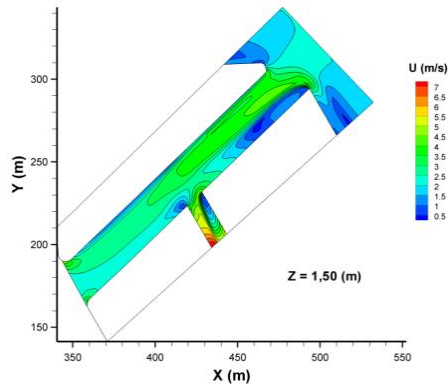
Tabla 73: Resumen de las figuras presentadas para cada caso hipotético estudiado

<i>Caso</i>	<i>Figuras</i>
hv11	Figura 139, Figura 189 - Figura 191
hv21	Figura 140, Figura 192 - Figura 194
hv31	Figura 141, Figura 195 - Figura 197
hv41	Figura 142, Figura 198 - Figura 200
hv12	Figura 143, Figura 201 - Figura 203
hv22	Figura 144, Figura 204 - Figura 206
hv32	Figura 145, Figura 207 - Figura 209
hv42	Figura 146, Figura 210 - Figura 212
hv13	Figura 147, Figura 213 - Figura 215
hv23	Figura 148, Figura 216 - Figura 218
hv33	Figura 149, Figura 219 - Figura 221
hv43	Figura 150, Figura 222 - Figura 224

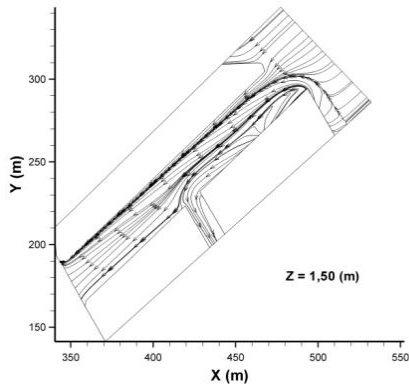
Para una mejor comprensión del análisis de sensibilidad realizado se procederá a la discusión de las dos variables que se desea estudiar: la dirección y velocidad del viento.

- Dirección: Las tres direcciones que se estudiaron fueran las perpendiculares a las entradas y salidas de las calles de la zona de estudio. Así se tienen los casos *bx1* cuya dirección es perpendicular a la cara de entrada de la C/ Colón, los casos *bx2* perpendiculares a la salida de la C/ Colón y los *bx3* perpendiculares a la entrada de vehículos en la C/e Pizarro. Las diferencias entre los tres casos son enormes, debido a la diferencia en los procesos de transporte que están muy relacionados con la velocidad del aire en el dominio. De esta forma es posible observar que en el primer caso (*bx1*) las mayores concentraciones se producen en la C/ Colón en la zona de la acera derecha (dónde se encuentra situado el sensor de control de los casos experimentales) y en la zona de la C/ Pizarro porque las velocidades son muy bajas produciéndose una concentración de los gases emitidos por los vehículos que circulan en esa zona. Por otro lado, en los casos (*bx2*), se produce un efecto muy diferente ya que el aire va en contra del sentido de los vehículos de manera que se produce una mayor concentración hacia el centro del C/ Colón y se concentra en el cruce con la C/ Pizarro, siendo este el caso más desfavorable como se verá posteriormente en el análisis de los parámetros estadísticos. Por último, el caso (*bx3*) es el más diferente de los tres ya que la dirección del viento proviene de la entrada de la C/ Pizarro. En este último caso, las concentraciones más altas se producen también en el cruce entre las dos calles pero con la peculiaridad que el flujo es mucho más complejo de manera que las zonas de máximas concentraciones se producen en las recirculaciones que aparecen en el dominio que suponen zonas muertas de baja velocidad que hacen que el proceso de mezcla sea menor.
- Velocidad: En cuanto a la velocidad, su influencia en el proceso es mucho más directa y más clara. En cada una de las tres direcciones se han estudiado 4 intensidades de velocidad desde 2 a 0,5 m/s con intervalos de 0,5 m/s, especificadas en la nomenclatura del estudio como (*bv1* al *4j*). La influencia en el proceso de mezcla se traduce en que se produce una mayor mezcla en todos los casos. Sin embargo, de manera más específica para cada caso se puede comentar que en la dirección 1 el aumento de la velocidad supone que los valores máximos de concentración se desplazan hacia el final de la C/ Colón. Sin embargo en la dirección 2 el efecto es el contrario ya que al aumentar la velocidad del flujo los valores máximos se desplazan hacia el inicio de la C/ Colón debido al empuje ejercido por el flujo que concentra el VCO en contra del sentido de circulación de los vehículos. En los casos de la dirección 3 del flujo, el efecto de nuevo es más complejo de observar y es menos importante. De nuevo, como se observaba en el apartado anterior, la concentración está muy correlacionada con las recirculaciones que se producen en la zona de confluencia entre las C/ Pizarro y Colón. Es cierto, sin embargo, que con mayor velocidad las recirculaciones se agrandan y aumentan su velocidad, lo que favorece el proceso de mezcla del VCO.

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

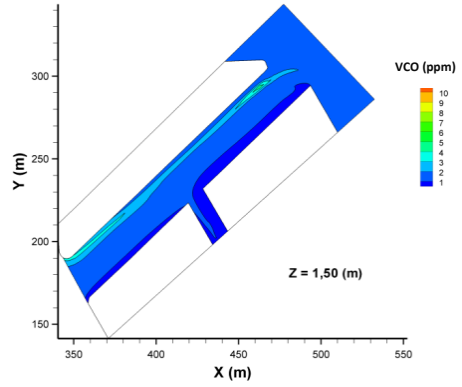
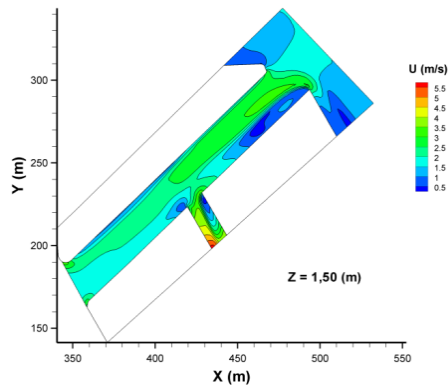
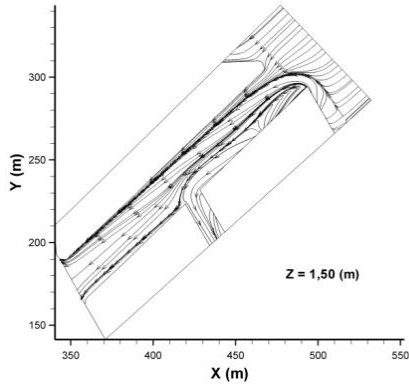


Figura 139: Simulación caso bv11: sección $z=1,50m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

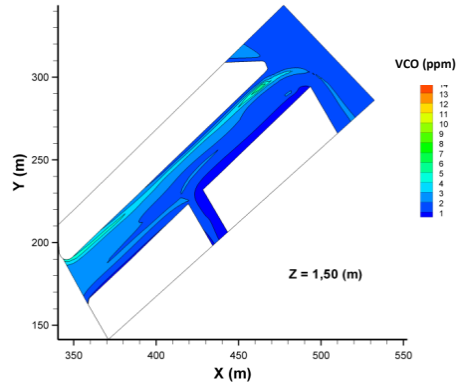
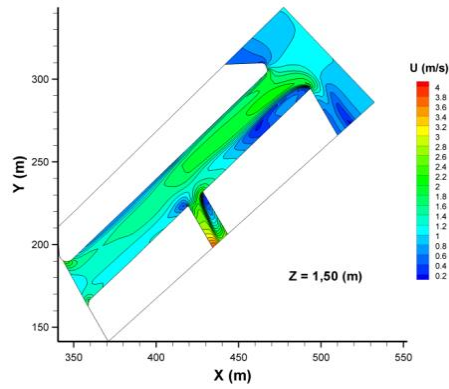
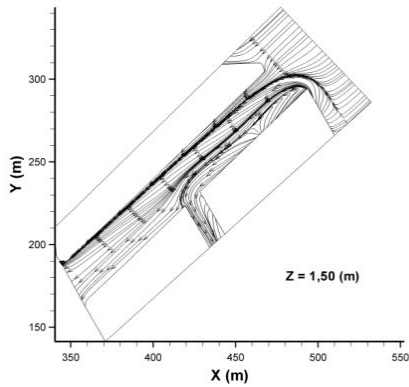


Figura 140: Simulación caso bv21: sección $z=1,50m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

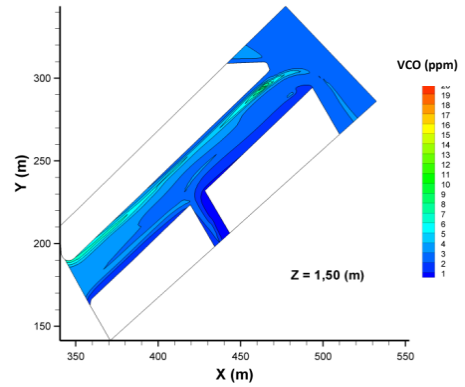
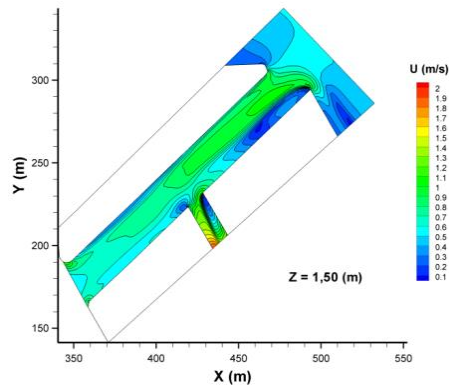
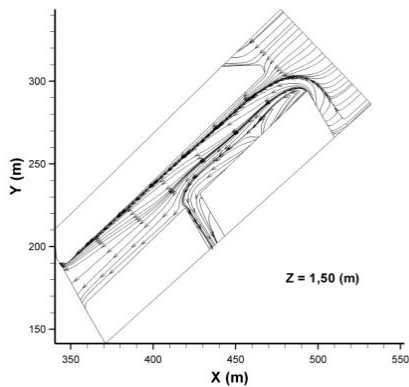


Figura 141: Simulación caso bv31: sección $z=1,50m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

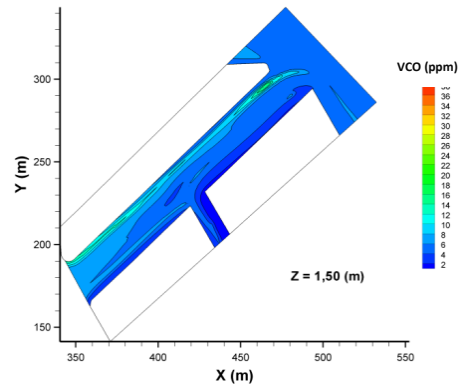
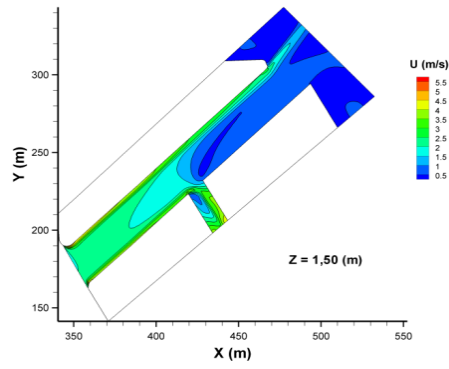
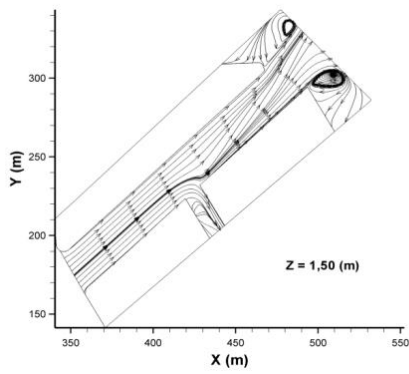


Figura 142: Simulación caso bv41: sección $z=1,50m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

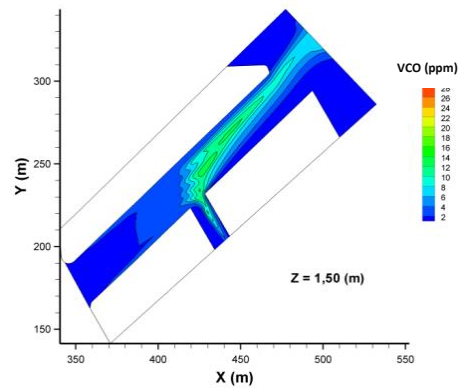
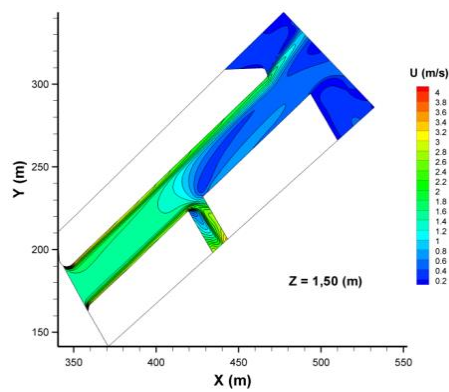
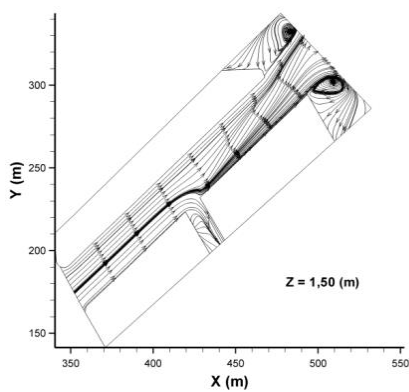


Figura 143: Simulación caso bv12: sección $z=1,50m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

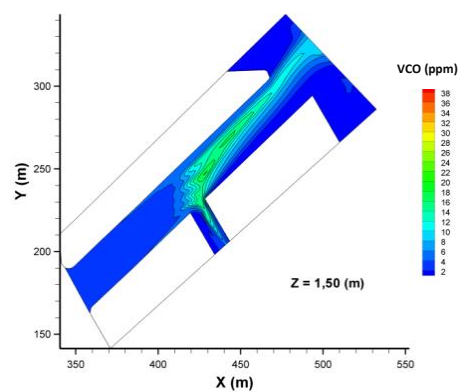
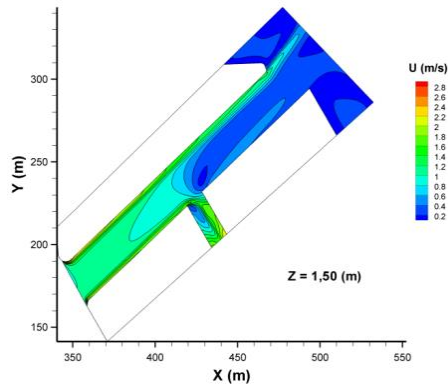
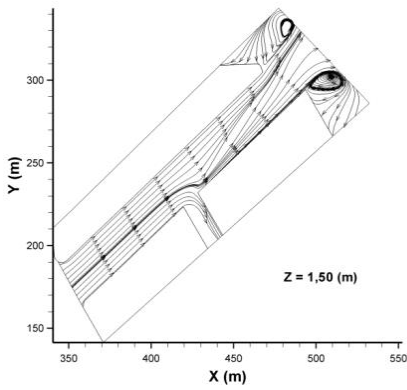


Figura 144: Simulación caso bv22: sección $z=1,50m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

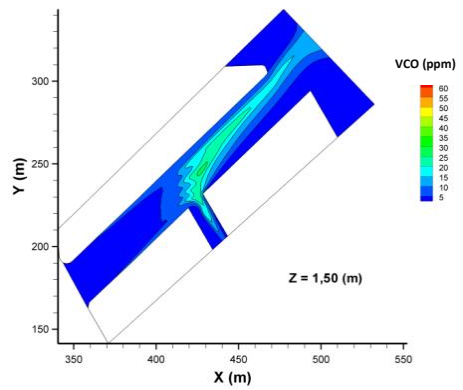
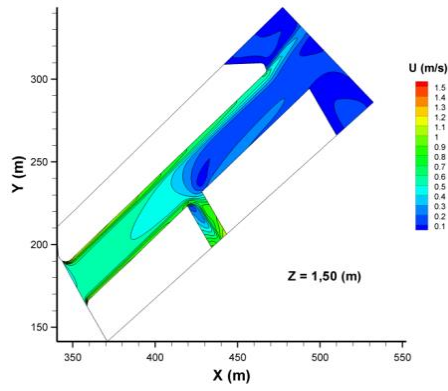
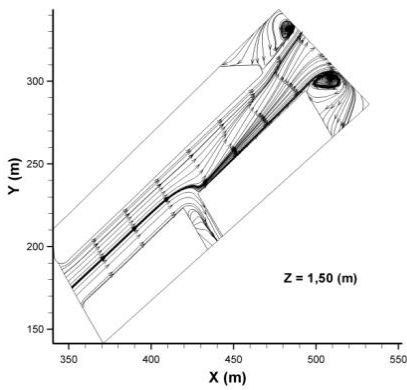


Figura 145: Simulación caso bv32: sección $z=1,50m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

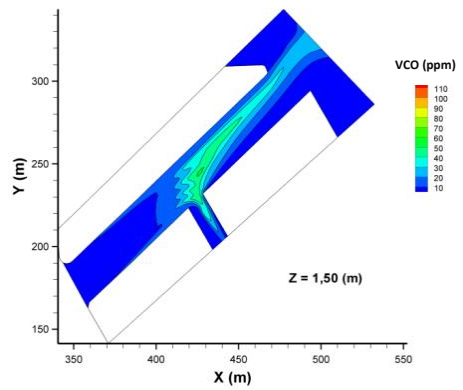
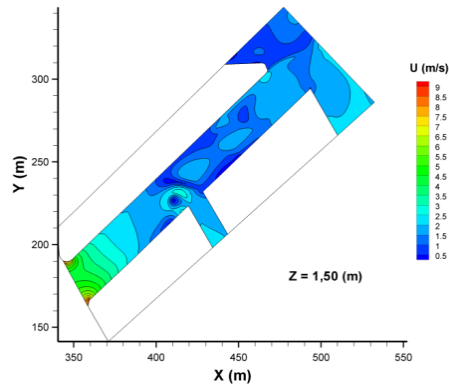
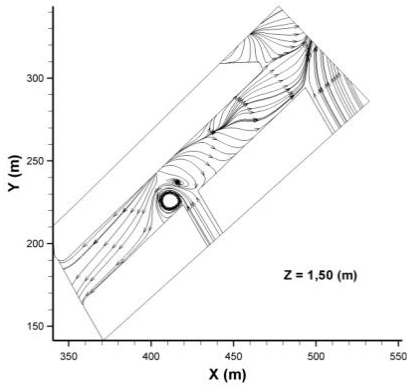


Figura 146: Simulación caso bv42: sección $z=1,50m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

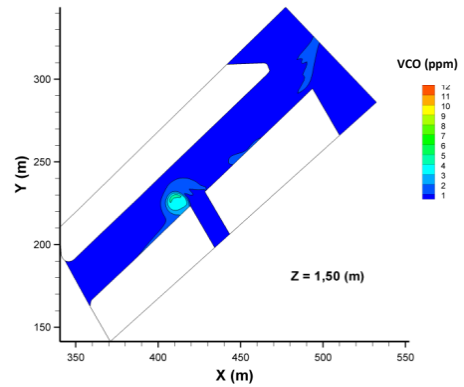
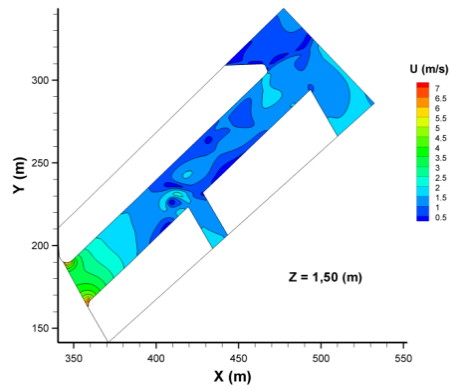
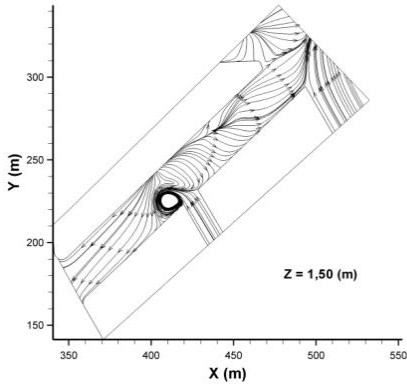


Figura 147: Simulación caso hv13: sección $z=1,50m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

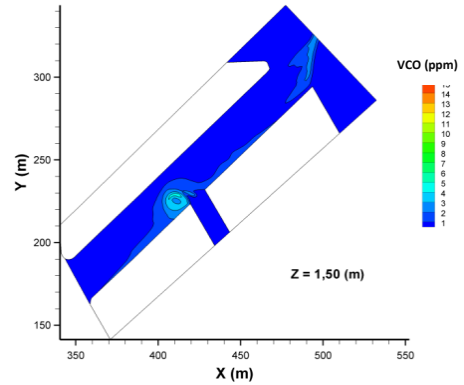
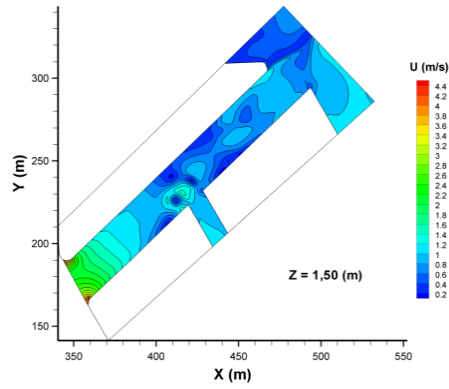
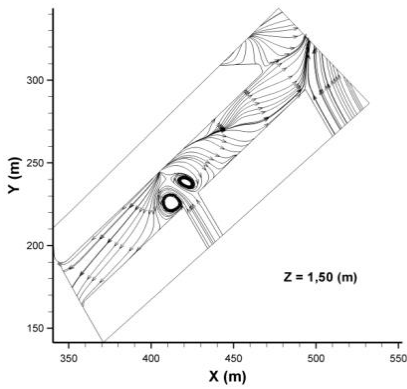


Figura 148: Simulación caso hv23: sección $z=1,50m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

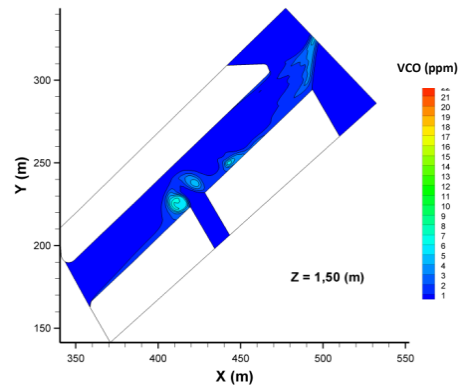
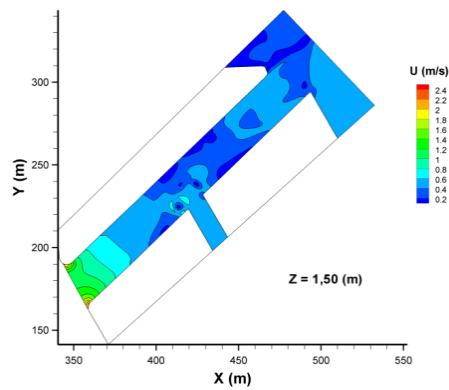
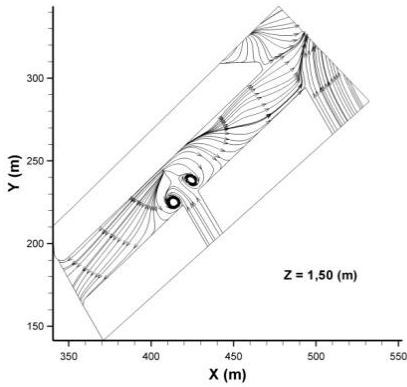


Figura 149: Simulación caso bv33: sección $z=1,50m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

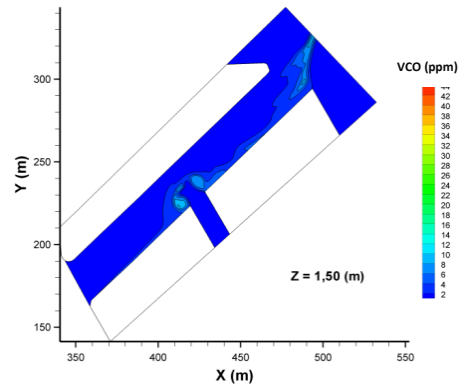


Figura 150: Simulación caso bv43: sección $z=1,50m$

B.3.6.4. Parámetros estadísticos

En las *Tabla 74* y *Tabla 75*, se resumen los valores estadísticos más importantes relacionados con las simulaciones realizadas. De nuevo es importante, separar los casos *cv1* al *6* que proceden de casos experimentales, de los casos *hv* que provienen de un análisis de sensibilidad realizado para observar la influencia de la dirección y la velocidad del viento.

Del primer grupo (*cv1* al *6*) es importante observar que en los primeros tres metros se producen valores muy altos de concentración de VCO (cercano a las 30 ppm) dado que está la propia fuente de emisión localizada de los tubos de escape de los vehículos. Se puede observar cómo no sólo el número de vehículos afecta a esos valores máximos sino que las características climáticas, en el caso de estudio la velocidad y la dirección del viento, son muy importantes en los procesos de mezcla y transporte del contaminante.

Esta discusión se confirma en el análisis de sensibilidad en el que se visualiza cómo al aumentar la velocidad (casos *hv1,y*) la concentración máxima es menor que en los casos con velocidad baja (*hv4,y*). Esto ocurre en los tres supuestos de dirección de la velocidad aunque bien es cierto que es más acusado en el primer caso donde el flujo está orientado en el mismo sentido de circulación que la circulación de vehículos en la C/ Colón. Por otro lado, se puede observar cómo los valores máximos de concentración se producen con la dirección del aire proveniente de la dirección 2 (desde el final de la C/ Colón en contra del sentido de circulación)

Tabla 74: Parámetros estadísticos para la variable VCO [ppm] en los tres primeros metros de las simulaciones de los casos de campo

Caso	[VCO]		Parámetros de Dispersión		Parámetros de Asimetría
	máx	mín	Recorrido	Desv. Típica	C.A.
	ppm	ppm	ppm	ppm	
cv1	26.6533	0.1162	26.5371	8.22E-06	3.5452
cv2	29.3659	0.0833	29.2826	1.30E-05	2.0746
cv3	6.4034	0.0142	6.3892	4.57E-06	1.5581
cv4	19.9206	0.0825	19.8380	5.38E-06	3.6287
cv5	11.1502	0.1423	11.0078	6.29E-06	3.2928
cv6	11.2716	0.0408	11.2308	5.62E-06	2.0829

Tabla 75: Parámetros estadísticos para la variable VCO [ppm] en los tres primeros metros de las simulaciones de los casos hipotéticos

Caso	[VCO]		Parámetros de Dispersión		Parámetros de Asimetría
	máx	mín	Recorrido	Desv. Típica	C.A.
	ppm	ppm	ppm	ppm	
hv11	20.6749	0.1513	20.5236	5.44E-06	2.1350
hv21	26.9304	0.1996	26.7307	7.19E-06	2.1121
hv31	39.1623	0.2954	38.8669	1.07E-05	2.0756

Tabla 75: Parámetros estadísticos para la variable VCO [ppm] en los tres primeros metros de las simulaciones de los casos hipotéticos (Continuación)

hv41	74.6130	0.5695	74.0435	2.11E-05	2.1695
hv12	45.1448	0.0093	45.1355	2.94E-05	1.5883
hv22	59.3957	0.0154	59.3803	3.86E-05	1.5881
hv32	87.3975	0.0221	87.3754	5.67E-05	1.5874
hv42	169.5814	0.0640	169.5174	1.09E-04	1.5845
hv13	30.7839	0.0001	30.7838	5.12E-06	6.7328
hv23	38.9100	0.0006	38.9094	6.06E-06	6.8909
hv33	57.7966	0.0005	57.7961	1.03E-05	5.9876
hv43	109.5437	0.0001	109.5436	2.05E-05	6.1379

B.3.6.5. Perfil VCO doble-promediado

Las gráficas que se presentan en esta sección permiten analizar de manera resumida lo que ocurre en los diferentes casos presentados en el estudio. Por un lado, en la *Figura 151* se presenta el perfil doble promediado en todo el dominio para los seis casos escogidos de los datos experimentales. Se puede observar que los dos casos más diferentes son el *cv1* (valores máximos) y el *cv3* (valores mínimos). Dado que el caso *cv1* está relacionado con una entrada de aire en la dirección del sentido de circulación de la C/ Pizarro, le confiere a este mismo unas particularidades especiales en su comportamiento aerodinámico. Por otro lado, el caso *cv3* corresponde al caso con menos tráfico por lo que tiene sentido que su curva presente los menores valores obtenidos. El resto de los casos se comporta de manera similar aunque con ciertas diferencias siempre relacionadas con la dirección del viento, velocidad del viento y número de vehículos.

De la *Figura 152* a la *Figura 154*, se presentan los casos hipotéticos separados en las tres direcciones del viento analizadas. Se puede observar cómo es muy clara la influencia de la velocidad del viento de manera que va disminuyendo los valores de VCO en el dominio. Es interesante observar cómo en el caso de la dirección 1 (entrada de la C/ Colón) las curvas se comportan de manera logarítmica, parecido al comportamiento de la velocidad cerca de las paredes, mientras que en los casos de las direcciones 2 y 3, se produce un cambio de comportamiento a una altura cercana a la parte superior de los edificios que indica una mayor acumulación en estos casos de VCO en el interior de las C/ Colón y Pizarro, similar a lo observado en el caso experimental *cv1*.

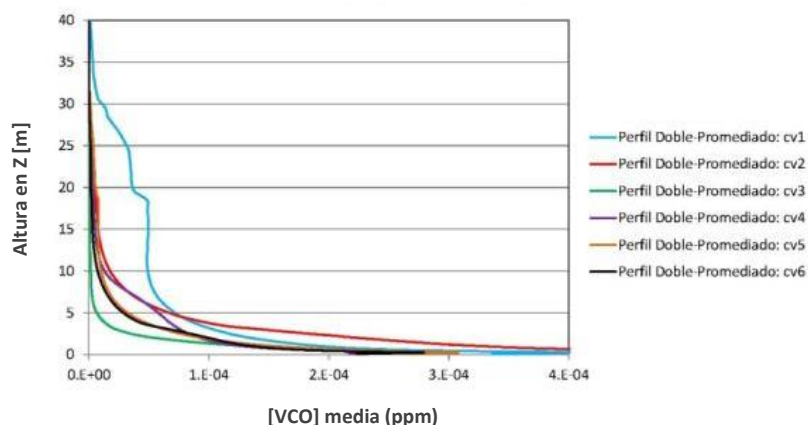


Figura 151: Perfil doble-promediado (en tiempo y en altura) de VCO [ppm] para las simulaciones de los casos de campo

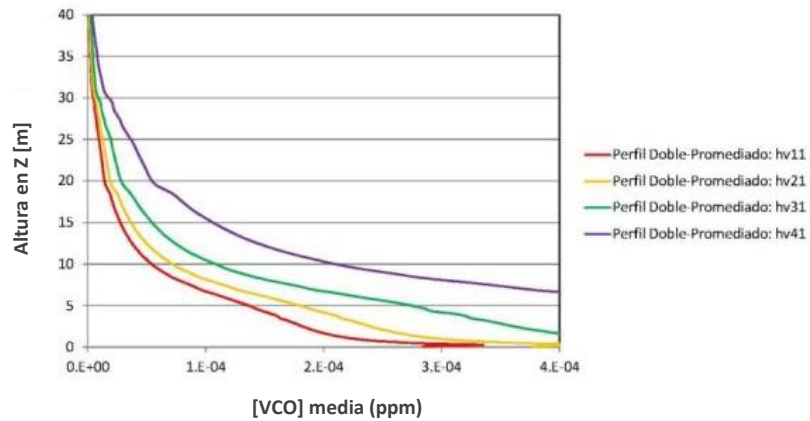


Figura 152: Perfil doble-promediado (en tiempo y en altura) de VCO [ppm] para las simulaciones de los casos hipotéticos. Dirección de viento: 46° N

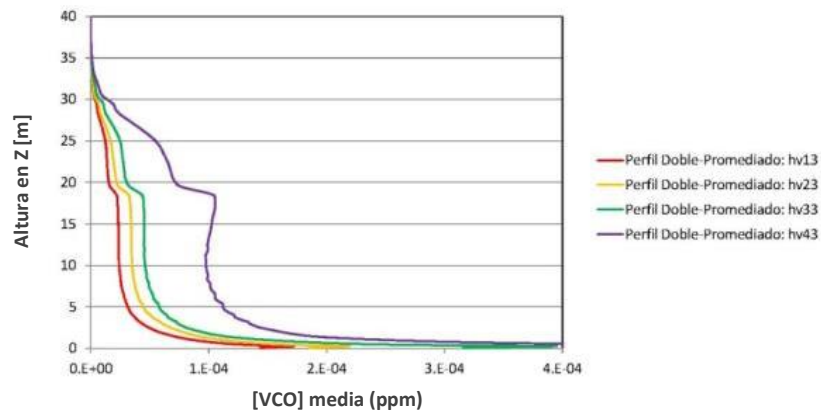


Figura 153: Perfil doble-promediado (en tiempo y en altura) de VCO [ppm] para las simulaciones de los casos hipotéticos. Dirección de viento: 149° N

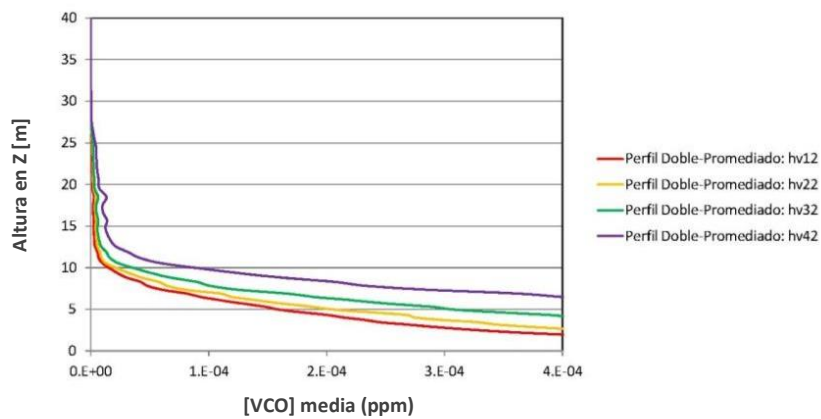


Figura 154: Perfil doble-promediado (en tiempo y en altura) de VCO [ppm] para las simulaciones de los casos hipotéticos. Dirección de viento: 226° N

B.3.6.6. Evolución de VCO para diferentes niveles de emisión

Finalmente se presentan los valores de las isosuperficies de VCO con diferentes niveles de circulación de vehículos por las C/ Colón y Pizarro para el caso *hv4,1* que corresponde a una velocidad de 0,5 m/s y la dirección 1 (entrada de C/ Colón). Se puede observar la clara influencia

del número de vehículos en las zonas afectadas por altas concentraciones de VCO en el dominio y cómo esas zonas van aumentando a medida que aumenta el tráfico en la zona.

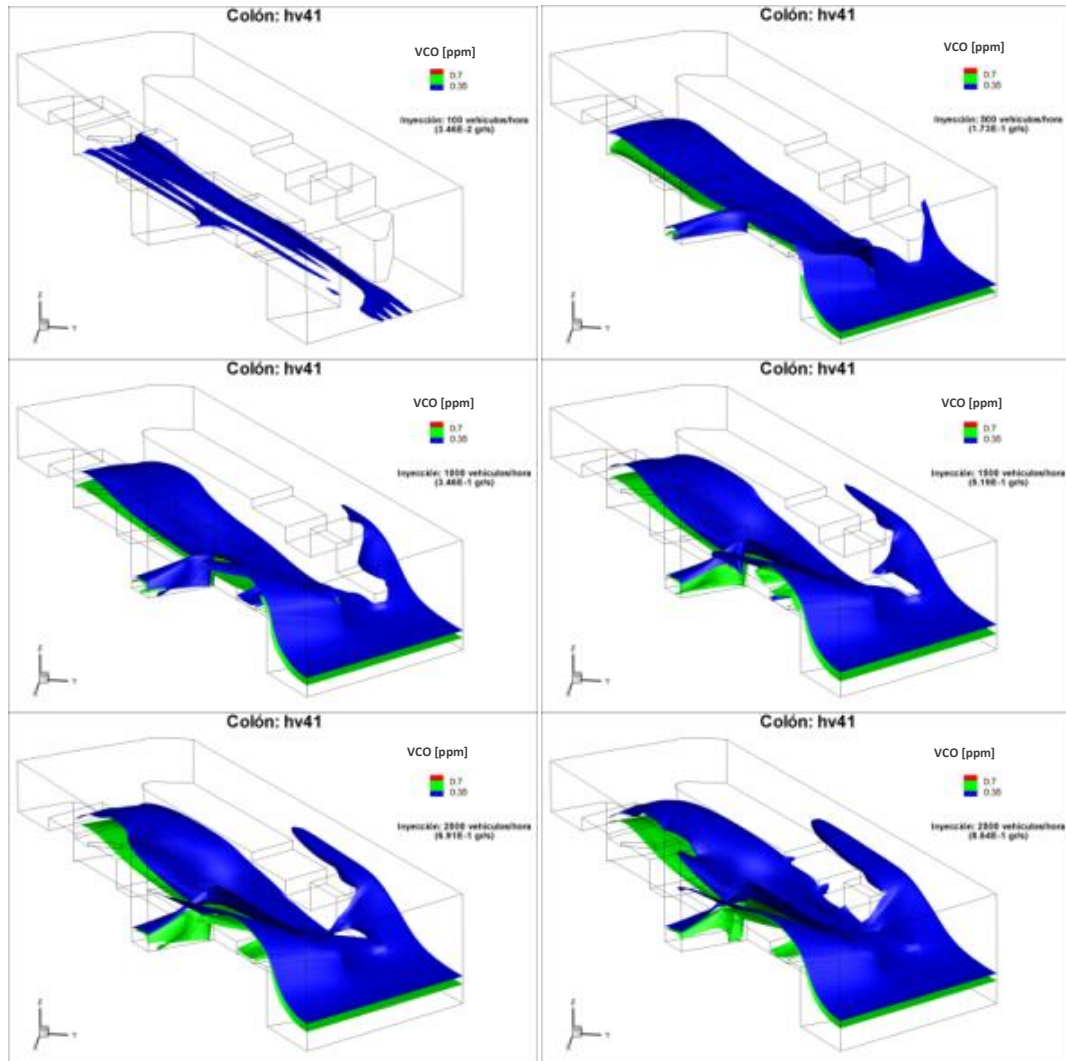


Figura 155: Perfil Simulación del caso hipotético hv41 (dirección del viento de 46°N y velocidad de 0,5 m/s) con una inyección estimada de 100 y 500 (fila superior), 1000 y 1500 (fila intermedia), 2000 y 2500 (fila inferior) vehículos/hora (respectivamente 3,46E-2, 1,73E-1, 3,46E-1, 5,19E-1, 6,91E-1 y 8,64E-1 gr/s emitidos en el dominio): vista en perspectiva de isosuperficies de concentración de VCO [ppm]: azul: 0,35 ppm; verde: 0,7 ppm.

B.3.7. Conclusiones del caso

Con miras a la obtención de los valores que permiten alimentar las variables de contorno que se presentan en el modelo con CFD, se realiza con éxito el estudio, la selección y puesta en funcionamiento de un sistema DAS basado en una WSN. Permitió entonces la adquisición de datos en ubicaciones puntuales de la humedad, la temperatura, y un gas, que en el presente caso correspondió a VCO. Aunque la distancia de transmisión podía alcanzar los 500m línea a vista y en un día con baja humedad relativa media, la separación entre los nodos no superó los 50m entre los nodos. El consumo energético de los dispositivos fue adecuado, llegando a una autonomía con una batería de baja capacidad (1500mAh) de una semana. Sin embargo, para una aplicación final se percibe corta la duración en funcionamiento de los nodos. Es importante entonces insistir en técnicas de ahorro de energía o de generación de energía (*Energy Harvesting*), en las cuales además de plantear una fuente natural de generación junto con unos dispositivos de almacenamiento idóneos, es además importante un diseño óptimo de los equipos. Gracias al trabajo realizado se puede

concluir por ejemplo, que es necesario encontrar transductores de gases que no requieran un precalentamiento y cuya calibración posea una menor dificultad.

Variables de gran importancia como es la velocidad y dirección del viento que fueron tomadas con sensores no instalados dentro de la WSN, se mostraron idóneos para la realización del modelo matemático final y su validación. No obstante, el trabajo de caracterización estadística y el mismo modelo estadístico hallado por medio de variables ambientales y de tráfico, enseñaron una buena explicación del comportamiento del VCO en la zona de estudio. Se logra un coeficiente de ajuste del 94,8%, lo que supone un factor muy elevado respecto a los niveles alcanzados en otros trabajos, donde no se superaba el 70% de explicación. Efectivamente, la realización del estudio en una zona tan localizada y con un número de datos notable, hace que el número de efectos “descontrolados” se minimice a un 5% aproximadamente. Se observó fundamental la caracterización y la inclusión de la variable de tráfico en el estudio realizado, y lo que da pie a la creación de un modelo matemático tan delimitado y con las variables de contorno seleccionadas.

En lo que respecta al modelo numérico, la principal conclusión es que se ha demostrado la utilidad de las técnicas de mecánica de fluidos computacional para el análisis de la contaminación en una zona de Valencia (C/ Colón y Pizarro) y cómo esta herramienta puede servir para tomar decisiones para limitar los niveles de concentración por VCO u otros gases contaminantes. A su vez, se ha observado que los factores que más influyen en los niveles de contaminación son los climáticos como la velocidad y la dirección del viento y los aspectos relacionados con los vehículos que circulan por la zona, tanto en número como en tipología. De manera específica se puede concluir con el estudio del modelo numérico:

- Los procesos de mezcla y transporte de un contaminante atmosférico están muy relacionados con las estructuras de velocidad y turbulencia que se producen en el fluido, en nuestro caso aire. Así recirculaciones y estructuras turbulentas que se producen en las entradas a las calles o en la parte superior de los edificios afecta a los niveles de contaminación de manera muy importante. Este hecho justifica la necesidad de modelos tridimensionales para analizar este tipo de caso tan complejo y con interacciones tan complicadas.
- A medida que la velocidad del viento aumenta los niveles de concentración son más bajos en todos los casos estudiados. Este aspecto se ha observado tanto en los casos reales analizados como en los casos hipotéticos planteados.
- Además la dirección del viento es muy importante. En nuestro caso se ha analizado la sensibilidad del modelo a tres direcciones principales: entrada C/ Colón, salida C/ Colón y entrada C/ Pizarro. El caso más desfavorable es el de una dirección del viento desde la salida de la C/ Colón que provoca concentraciones elevadas en la parte central del dominio, mientras que el caso más favorable es el de una dirección proveniente de la entrada de la C/ Colón que provoca una mayor mezcla y transporte del contaminante limitando los valores que afectan a los peatones de la zona.
- Por último, también se ha observado la gran influencia del número de vehículos y de su tipología en los resultados obtenidos. Es obvio y así lo demuestran las simulaciones que un número menor de vehículos consigue menores niveles de contaminación, pero también se ha observado que el tipo de vehículos que circulan por la zona afecta de manera considerable a los resultados de las simulaciones.

Como conclusiones generales del caso partiendo ya del análisis estadístico donde se obtuvo un modelo multivariante y del modelo con CFD, se extrae:

- El análisis estadístico ha demostrado la gran influencia de las variables climáticas frente a los niveles de contaminación. Adicionalmente la intensidad de tráfico se manifiesta como un factor fundamental para la delimitación de los niveles de contaminación. Lógicamente,

la consideración y el uso de estos modelos sin la suficiente cautela podría dar lugar a aseveraciones erróneas.

- Se debe partir de la base que la zona de estudio no es un área cerrada, lo que explica que a pesar de la inexistencia de tráfico se pueden apreciar unos niveles de contaminación, independientes de los fenómenos que ocurren en la propia zona. Dichos niveles de contaminación son generalizados en la ciudad o incluso en región del planeta en la que se encuentra Valencia, los cuales reaccionan química y físicamente, produciendo con ello variaciones en su concentración. a los cambios en la climatología de la zona, por ello las concentraciones de contaminantes presentan una correlación tan acusada con las variables climáticas estudiadas. No obstante, es muy significativo que se producen variaciones de la concentración acompañadas a la intensidad de tráfico puntual de la zona de estudio, lo que indica la gran importancia de la regulación del tráfico sobre los niveles de contaminación y por tanto válida y justifica todo el trabajo que se está realizando en esta materia.
- Es muy complejo desligar impactos ambientales propios de la zona de estudio e impactos externos, aunque obteniendo series de datos en diferentes puntos de la ciudad sería posible obtener una serie de valores de contaminación de fondo, para aislar únicamente las variaciones particulares de la zona debidas al tráfico. Por otro lado, también debería complementarse el análisis con el estudio paralelo de zonas adyacentes para analizar qué grado de efecto geográfico producen altos niveles puntuales de emisión en un entorno urbano. No obstante, el modelo estadístico desarrollado en la C/ Colón presenta unas expectativas importantes de éxito en la línea de trabajo de los modelos estadísticos.
- Tras la aplicación de los métodos y simulación numérica se concluye que estas técnicas constituyen una herramienta fundamental para poder predecir y controlar los niveles de contaminación en zonas urbanas, ya que finalmente éste puede abordarse como un problema de mecánica de fluidos en la que se estudia el flujo de sustancias a través de un entorno como son las diferentes calles.
- La gran utilidad de los modelos trabajados, además de permitir un mejor conocimiento de la contaminación localizada, proporcionaría una herramienta para reducir los puntos de toma de datos en tiempo real, optimizando el coste de la red de control de contaminación sin disminuir la precisión de la determinación y conocimiento de los valores de contaminación. La dificultad y problemática es que estos modelos dependen básicamente del entorno en que se resuelve y por consiguiente, son difícilmente extrapolables de unas zonas a otras.

CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO FUTURO

CONCLUSIONES GENERALES

En el documento desarrollado se ha presentado la utilidad e innumerables ventajas de los modelos en CFD. Se ha realizado un amplio estado del arte en donde se denota además la acogida que ha tenido dicha técnica en diferentes campos relacionados con el sector ambiental. Sin embargo, las simulaciones de los modelos en CFD requieren de unos valores correctos para introducir a las variables de contorno, y de un banco de datos que permita la validación. Tras seguir las propuestas metodológicas publicadas por algunos autores para tal validación, se logran con éxito obtener un modelo en CFD para un ambiente interior como lo fue un recinto con ventilación controlada, y un modelo mucho más complejo para un ambiente exterior, es decir en un área urbana delimitada.

Sin embargo, uno de los principales obstáculos en el estudio de los fenómenos ambientales es la resolución espacial y la misma tecnología que posee el DAS. Se incrementa el impedimento cuando se intenta comprender el comportamiento tridimensional de un fluido o la estratificación de una variable ambiental en una zona de estudio. Un primer acercamiento se plasmó en el caso justificativo, donde se logra un DAS con tecnología cableada. Tras usar tecnologías de buses de campo como lo son PROFIBUS y RS-485, y técnicas de programación estructurada, se alcanza la integración de instrumentación con diferentes características de comunicación, siendo entonces una propuesta inicial al sistema requerido para la captación de los fenómenos en recintos de gran dimensión y con notables comportamientos dinámicos. No obstante, el DAS desarrollado para un invernadero demuestra la necesidad y la flexibilidad que puede aportar la concepción de una WSN en éste tipo de estudios.

Es en el segundo caso de estudio, y tras lograr un estado del arte de las principales características técnicas que debe poseer una WSN, que se logra usar un DAS basado en tecnología inalámbrica. Éste permite después de su calibración proveer la flexibilidad y la poca invasión o intervención en los fenómenos ocurridos con el fluido en el recinto, capturar los niveles de CO₂. Se logra con los datos capturados por los transductores electroquímicos instalados en las tarjetas electrónicas que conforman los nodos de la WSN, alimentar las variables de contorno con las cuales el código de CFD, con el modelo para la resolución de turbulencias RANS y el modelo de viscosidad $k - \epsilon$ realizable seleccionados, puede ejecutar las simulaciones. Así mismo, con otro banco de datos fue posible llevar a término la validación.

Haciendo uso de algunos estadísticos, se logró concluir que en una medida significativa el modelo, para el recinto del segundo caso de estudio, 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 de unos ciertos resultados presentados en una de las zonas del recinto, y comentado en el mismo apartado, 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 generado por un amplio rango de parámetros computacionales, algunos numéricos o no-numéricos (es decir, 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.

En cuanto a la experiencia en un área de estudio urbana, se concluye que la red de estaciones ambientales instaladas por el Ayuntamiento de Valencia por ejemplo, aporta correctamente unos valores de contaminación ambiental de fondo. Sin embargo, en el caso que se desee saber la

contaminación puntual de una zona, es necesario tomar un método como es el AHP de comparación por pares para lograr una aproximación. Esta información es muy útil para definir estrategias globales de disminución de la contaminación, pero no ofrece información relevante para poder acometer medidas de disminución locales. Además, los valores aproximados obtenidos, ponen de manifiesto que episodios concretos de contaminación excesiva en zonas del centro del casco urbano, no serían detectados con las estaciones actuales, no pudiendo plantear actuaciones de emergencia. En este contexto, es cuando los modelos en CFD junto con un DAS basado en una WSN se muestra de gran utilidad. Se podría plantear este tipo de técnicas y tecnologías por ejemplo para zonas neurálgicas de una ciudad, donde la salubridad y el confort humano.

De proponerse un sistema permanente basado en una WSN, por la experiencia del caso de estudio, se concluye que es necesario ahondar en los temas de *Energy Harvesting* y del tipo de transductor usado, pues una WSN debe garantizar una autonomía, fiabilidad y perdurabilidad para que los modelos planteados puedan ser de utilidad. Tal y como se comentó en la conclusión del tercer caso, se puede generar una herramienta de interés gubernamental si se logra optimizar el engranaje entre el DAS y el modelo con su respectiva simulación.

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

- Abbasi, A. Z., Islam, N., & Shaikh, Z. A. (2014). A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces*, 36(2), 263-270.
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). A survey on sensor networks. *Communications magazine, IEEE*, 40(8), 102-114.
- Al-Ali, A. R., Zualkernan, I., & Aloul, F. (2010). A mobile GPRS-sensors array for air pollution monitoring. *Sensors Journal, IEEE*, 10(10), 1666-1671.
- Albarakati, A. J. (2015). An Overview of Wireless Sensor Networks (WSN's). *International Journal of Computer Applications*, 118(5).
- Anderson, J. D., & Wendt, J. (1995). *Computational fluid dynamics* (Vol. 206). New York: McGraw-Hill.
- Ansys 12.1. Ansys Inc; 2009.
- Anta Álvarez, J. (2009). Caracterización hidrodinámica del arrastre del molusco *C. edule* con la metodología del doble promediado: estudio en modelo físico con tecnología PIV.
- Arora, A., Dutta, P., Bapat, S., Kulathumani, V., Zhang, H., Naik, V., et al. (2004). A line in the sand: A wireless sensor network for target detection, classification, and tracking. *Computer Networks*, 46(5), 605-634.
- Ataz, E. M., & de Mera Morales, Y. D. (2004). *Contaminación atmosférica* (Vol. 45). Univ de Castilla La Mancha.
- Balczó, M., Gromke, C., & Ruck, B. (2009). Numerical modeling of flow and pollutant dispersion in street canyons with tree planting. *Meteorologische Zeitschrift*, 18(2), 197-206.
- Baggio, A. (2005). Wireless sensor networks in precision agriculture. In *ACM Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks (REALWSN 2005)*, Stockholm, Sweden.
- 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.
- Beckwith, R., Teibel, D., & Bowen, P. (2004). Report from the field: results from an agricultural wireless sensor network. In *Local Computer Networks, 2004. 29th Annual IEEE International Conference on* (pp. 471-478). IEEE.
- Beeby, S., & White, N. (2014). *Energy harvesting for autonomous systems*. Artech House.
- Belcalzar Ceron, L. C., 2009. *Alternative Techniques to Assess Road Traffic Emissions*. Tesis doctoral, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Betz, T., Cabac, L., Duvigneau, M., Wagner, T., & Wester-Ebbinghaus, M. (2014). Software Engineering with Petri Nets: A Web Service and Agent Perspective. In *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency IX* (pp. 41-61). Springer Berlin Heidelberg.

- Bhaskaran, R. & Collins, L. (2003). Introduction to CFD basis. 2 Drexel University (Internet) (Acceso el 01/05/2013). Disponible en: <http://enve.coe.drexel.edu/outbreaks/walkerton.htm>
- Blocken, B., & Carmeliet, J. (2002). Spatial and temporal distribution of driving rain on a low-rise building. *Wind and Structures*, 5(5), 441-462.
- Blocken, B., Roels, S., & Carmeliet, J. (2004). Modification of pedestrian wind comfort in the Silvertop Tower passages by an automatic control system. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92(10), 849-873.
- Blocken, B., & Carmeliet, J. (2006). The influence of the wind-blocking effect by a building on its wind-driven rain exposure. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94(2), 101-127.
- Blocken, B., Stathopoulos, T., & Carmeliet, J. (2007). CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric environment*, 41(2), 238-252.
- Blocken, B., Stathopoulos, T., Saathoff, P., & Wang, X. (2008). Numerical evaluation of pollutant dispersion in the built environment: comparisons between models and experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10), 1817-1831.
- Blocken, B., & Persoon, J. (2009). Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new Dutch wind nuisance standard. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97(5), 255-270.
- Blocken, B., Dezsö, G., van Beeck, J. P. A. J., & Carmeliet, J. (2010). Comparison of calculation models for wind-driven rain deposition on building facades. *Atmospheric environment*, 44(14), 1714-1725.
- Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., & Hensen, J. L. (2011). Application of computational fluid dynamics in building performance simulation for the outdoor environment: an overview. *Journal of Building Performance Simulation*, 4(2), 157-184.
- 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. *Environmental Modelling & Software*, 30, 15-34.
- Blocken, B., & 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). SE—Structures and Environment: Convective and Ventilation Transfers in Greenhouses, Part 2: Determination of the Distributed Greenhouse Climate. *Biosystems Engineering*, 83(2), 129-147.
- Boulard, T., & Wang, S. (2002). Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. *Computers and Electronics in agriculture*, 34(1), 173-190.
- Briggen, P. M., Blocken, B., & Schellen, H. L. (2009). Wind-driven rain on the facade of a monumental tower: numerical simulation, full-scale validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 44(8), 1675-1690.
- Bucklin, R. A., Henley, R. W., & McConnell, D. B. (1993). Fan and pad greenhouse evaporative cooling systems. Circular (Florida Cooperative Extension Service)(USA).

- 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., & 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 Politécnica de Catalunya.
- Canepa, E. (2004). An overview about the study of downwash effects on dispersion of airborne pollutants. *Environmental Modelling & Software*, 19(12), 1077-1087.
- Cansever, G., & Kucukdemiral, I. B. (2006). A new approach to supervisor design with sequential control Petri-net using minimization technique for discrete event system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(11-12), 1267-1277.
- Carrara, M., Catania, P., Pipitone, F., Vallone, M., Piraino, S., Salvia, M., & Paolino, C. (2008). Temperature and Relative Humidity Distribution inside a Greenhouse Using Wireless Sensors. *International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys 2007, Acta Hort*, 801(1), 595-599.
- Causone, F., Corgnati, S. P., Filippi, M., & Olesen, B. W. (2009). Experimental evaluation of heat transfer coefficients between radiant ceiling and room. *Energy and buildings*, 41(6), 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
- Chandrakasan, A., Min, R., Bhardwaj, M., Cho, S. H., & Wang, A. (2002, September). Power aware wireless microsensor systems. In *Solid-State Circuits Conference, 2002. ESSCIRC 2002. Proceedings of the 28th European* (pp. 47-54). IEEE.
- Chehri, A., Fortier, P., & Tardif, P. M. (2009). UWB-based sensor networks for localization in mining environments. *Ad Hoc Networks*, 7(5), 987-1000.
- Chen, J., Xu, F., Tan, D., Shen, Z., Zhang, L., & Ai, Q. (2015). A control method for agricultural greenhouses heating based on computational fluid dynamics and energy prediction model. *Applied Energy*, 141, 106-118.
- Chen, Q. (2009). Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. *Building and Environment*, 44(4), 848-858.
- Chintalapudi, K., Fu, T., Paek, J., Kothari, N., Rangwala, S., Caffrey, J., et al. (2006). Monitoring civil structures with a wireless sensor network. *Internet Computing, IEEE*, 10(2), 26-34.
- Chong, C. Y., & Kumar, S. P. (2003). Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges. *Proceedings of the IEEE*, 91(8), 1247-1256.
- Cushman-Roisin, B., Gualtieri, C., & Mihailovic, D. T. (2008). Environmental fluid mechanics: Current issues and future outlook. *Fluid Mechanics of Environmental Interfaces*, Taylor & Francis, Leiden, 1-16.
- Dam, N., & Austerlitz, H. P. (2003). U.S. Patent No. 6,631,639. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

- Damasceno, F. A., Saraz, J. A. O., Mendes, L. B., Martin, S., & Martins, M. A. (2014). Evaluation of a Heating System in Poultry Houses Using a CFD Model. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín*, 67(2), 7355-7363.
- Dargie, W. W., & Poellabauer, C. (2010). *Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice*. John Wiley & Sons.
- David, R. (1995). Grafset: A powerful tool for specification of logic controllers. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 3(3), 253-268.
- de la Edificación, C. T. (2006). DB-HS: Salubridad. Real Decreto, 314
- Defraeye, T., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2010). CFD analysis of convective heat transfer at the surfaces of a cube immersed in a turbulent boundary layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1), 297-308.
- Defraeye, T., & Carmeliet, J. (2010). A methodology to assess the influence of local wind conditions and building orientation on the convective heat transfer at building surfaces. *Environmental Modelling & Software*, 25(12), 1813-1824.
- Defraeye, T., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2011). Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 512-522.
- Díaz, M. S. E. (2010). A generic software architecture for portable applications in heterogeneous wireless sensor networks. Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid.
- Díaz, S. E., Pérez, J. C., Mateos, A. C., Marinescu, M. C., & Guerra, B. B. (2011). A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2), 252-265.
- Dishongh, T. J., McGrath, M., & Kuris, B. (2014). *Wireless sensor networks for healthcare applications*. Artech House.
- Du, K. M., & Han, H. F. (2007, October). Development and application of a web-based telemonitor for greenhouse environments. In *International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys2007* 801 (pp. 501-506).
- Duffy, N. W., Baldsing, W., & Pandolfo, A. G. (2008). The nickel-carbon asymmetric supercapacitor—performance, energy density and electrode mass ratios. *Electrochimica Acta*, 54(2), 535-539.
- Epstein, A. H. (2004). Millimeter-scale, micro-electro-mechanical systems gas turbine engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 126(2), 205-226.
- ESCODA, C. T. S. (2009). *Manual práctico de Ventilación*.
- Etyemezian, V., Davidson, C. I., Zufalla, M., Daia, W., Finger, S., & Striegel, M. (2000). Impingement of rain drops on a tall building. *Atmospheric Environment*, 34(15), 2399-2412.
- Evers, L., Bijl, M. J., Marin-Perianu, M., Marin-Perianu, R., & Havinga, P. J. (2005). *Wireless sensor networks and beyond: A case study on transport and logistics*.
- Fatnassi, H., Boulard, T., Poncet, C., Bartzanas, T., Katsoulas, N., & Kacira, M. (2013). CFD Modeling of Microclimate in the Leaf Boundary Layer, Ecological Niche of Pests. In

International Symposium on New Technologies for Environment Control, Energy-Saving and Crop Production in Greenhouse and Plant 1037 (pp. 1027-1034).

Fluent, A. (2009). 12.0 User's Guide. Ansys Inc.

Frey, G. (2000). Automatic implementation of Petri net based control algorithms on PLC. In American Control Conference, 2000. Proceedings of the 2000 (Vol. 4, pp. 2819-2823). IEEE.

Frey, G., & Litz, L. (1998). Verification and validation of control algorithms by coupling of interpreted Petri nets. In Systems, Man, and Cybernetics. IEEE International Conference on (Vol. 1, pp. 7-12). IEEE.

Gaderer, G., Loschmidt, P., & Mahmood, A. (2008). A novel approach for flexible wireless automation in real-time environments. In Factory Communication Systems, 2008. WFCS 2008. IEEE International Workshop on (pp. 81-84). IEEE.

Gilani, S., Montazeri, H., & Blocken, B. (2016). CFD simulation of stratified indoor environment in displacement ventilation: Validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 95, 299-313.

Gao, M., Zhang, F., & Tian, J. (2008). Environmental monitoring system with wireless mesh network based on embedded system. In *Embedded Computing, 2008. SEC'08. Fifth IEEE International Symposium on* (pp. 174-179). IEEE.

García-Hernández, C. F., Iburguengoytia-Gonzalez, P. H., García-Hernández, J., & Pérez-Díaz, J. A. (2007). Wireless sensor networks and applications: a survey. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 7(3), 264-273.

García Moreno, E. (2001). *Automatización de procesos industriales*. México: Alfaomega grupo editorial.

Gaura, E., Girod, L., Brusey, J., Allen, M., & Challen, G. (Eds.). (2010). *Wireless sensor networks: Deployments and design frameworks*. Springer Science & Business Media.

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

Gieling, T. H. (1995). Sensors and measurement, a review. In *II International Symposium On Sensors in Horticulture* 421 (pp. 19-36).

Gonda, L., & Cugnasca, C. E. (2006). A proposal of greenhouse control using wireless sensor networks. In *Proceedings of 4thWorld Congress Conference on Computers in Agriculture and Natural Resources*, Orlando, Florida, USA.

Gousseau, P., Blocken, B., Stathopoulos, T., & Van Heijst, G. J. F. (2011). CFD simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: a case study by LES and RANS for a building group in downtown Montreal. *Atmospheric Environment*, 45(2), 428-438.

Gromke, C., Buccolieri, R., Di Sabatino, S., & Ruck, B. (2008). Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations—evaluation of CFD data with experimental data. *Atmospheric Environment*, 42(37), 8640-8650.

Gromke, C., & Blocken, B. (2015). Influence of avenue-trees on air quality at the urban neighborhood scale. Part I: Quality assurance studies and turbulent Schmidt number analysis for RANS CFD simulations. *Environmental Pollution*, 196, 214-223.

- Gutierrez, J., Naeve, M., Callaway, E., Bourgeois, M., Mitter, V., & Heile, B. (2001). IEEE 802.15.4: a developing standard for low-power low-cost wireless personal area networks. *network, IEEE*, 15(5), 12-19.
- Hajdukiewicz, M., Geron, M., & Keane, M. M. (2013). Formal calibration methodology for CFD models of naturally ventilated indoor environments. *Building and Environment*, 59, 290-302.
- Hanan, J. J. (1997). *Greenhouses: advanced technology for protected horticulture*. CRC press.
- Hanna, S. R., Brown, M. J., Camelli, F. E., Chan, S. T., Coirier, W. J., Kim, S., & Reynolds, R. M. (2006). Detailed simulations of atmospheric flow and dispersion in downtown Manhattan: An application of five computational fluid dynamics models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(12), 1713-1726.
- Hasenfratz, D., Saukh, O., & Thiele, L. (2012). On-the-fly calibration of low-cost gas sensors. In *Wireless Sensor Networks* (pp. 228-244). Springer Berlin Heidelberg.
- Heiner, M., Herajy, M., Liu, F., Rohr, C., & Schwarick, M. (2012). Snoopy—a unifying Petri net tool. In *Application and Theory of Petri Nets* (pp. 398-407). Springer Berlin Heidelberg.
- Heiselberg, P., Li, Y., Andersen, A., Bjerre, M., & Chen, Z. (2004). Experimental and CFD evidence of multiple solutions in a naturally ventilated building. *Indoor Air*, 14(1), 43-54.
- Higuera, A. G. (2005). *El control automático en la industria* (Vol. 48). Univ de Castilla La Mancha.
- Higuera, J., & Polo, J. (2012). Autonomous and interoperable smart sensors for environmental monitoring applications. In *Smart Sensing Technology for Agriculture and Environmental Monitoring* (pp. 323-359). Springer Berlin Heidelberg.
- Ho, S., Koushanfar, F., Kosterev, A., & Tittel, F. (2007, April). LaserSPECKs: laser spectroscopic trace-gas sensor networks—sensor integration and application. In *6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, Cambridge, Massachusetts, USA (pp. 226-235).
- Hong-wu, T., Wen-ai, Z., Xiao-jun, Q., Cheng, W. (2007). Network Type Greenhouse Environmental Information Collecting and Controlling System. *Journal of Agricultural Mechanization Research*. 2007-06.
- Hussein, A. S., & El-Shishiny, H. (2009). Influences of wind flow over heritage sites: A case study of the wind environment over the Giza Plateau in Egypt. *Environmental Modelling & Software*, 24(3), 389-410.
- IEEE 802.15.4 (2007). *Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low rate wireless personal area networks (lr-wpans)*.
- 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*
- Jiang, Y., & Chen, Q. (2002). Effect of fluctuating wind direction on cross natural ventilation in buildings from large eddy simulation. *Building and Environment*, 37(4), 379-386.
- Jiang, Y., Alexander, D., Jenkins, H., Arthur, R., & Chen, Q. (2003). Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(3), 331-353.

- John, K. H., & Tiegelkamp, M. (2010). IEC 61131-3: programming industrial automation systems: concepts and programming languages, requirements for programming systems, decision-making aids. Springer Science & Business Media.
- Juang, P., Oki, H., Wang, Y., Martonosi, M., Peh, L. S., & Rubenstein, D. (2002). Energy-efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with ZebraNet. *ACM Sigplan Notices*, 37(10), 96-107.
- Jung, Y. J., Lee, Y. K., Lee, D. G., Ryu, K. H., & Nittel, S. (2008, July). Air pollution monitoring system based on geosensor network. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International (Vol. 3, pp. III-1370)*. IEEE.
- Kahn, J. M., Katz, R. H., & Pister, K. S. (1999, August). Next century challenges: mobile networking for "Smart Dust". In *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking (pp. 271-278)*. ACM.
- Karava, P., Stathopoulos, T., & Athienitis, A. K. (2011). Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable façade elements. *Building and Environment*, 46(1), 266-279.
- Karl, H., & Willig, A. (2007). *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. John Wiley & Sons.
- Khedo, K. K., Perseedoss, R., & Mungur, A. (2010). A wireless sensor network air pollution monitoring system. *arXiv preprint arXiv:1005.1737*.
- Khemnar, D., Kasar, A. R., & Tembhurnikar, N. P. (2013). *WSN Based Air Pollution Monitoring System*.
- Kim, S., Pakzad, S., Culler, D., Demmel, J., Fennes, G., Glaser, S., & Turon, M. (2007, April). Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks. In *Information Processing in Sensor Networks, 2007. IPSN 2007. 6th International Symposium on (pp. 254-263)*. IEEE.
- Kim, Y., Bae, J. N., & Kim, J. Y. (2011). Performance of power line communication systems with noise reduction scheme for smart grid applications. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 57(1), 46-52.
- Knaian, A. N. (2000). *A wireless sensor network for smart roadbeds and intelligent transportation systems (Doctoral dissertation, MIT Media Lab)*.
- Knight, C., Davidson, J., & Behrens, S. (2008). Energy options for wireless sensor nodes. *Sensors*, 8(12), 8037-8066.
- Kolmogorov, A. N. (1941). The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. In *Dokl. Akad. Nauk SSSR (Vol. 30, No. 4, pp. 299-303)*.
- Kummer, O., Wienberg, F., Duvigneau, M., Schumacher, J., Köhler, M., Moldt, D., ... & Valk, R. (2004). An extensible editor and simulation engine for Petri nets: Renew. In *Applications and Theory of Petri Nets 2004 (pp. 484-493)*. Springer Berlin Heidelberg.
- Lal, A., & Blanchard, J. (2004). Daintiest dynamos [nuclear microbatteries]. *Spectrum, IEEE*, 41(9), 36-41.
- Lea Cox, J.D., Ristvey, A.G., Arguedas, F., Ross, D., Anhalt, J., & Kantor, G. (2008). *A Low-Cost Multihop Wireless Sensor Network, Enabling Real-Time Management Environmental Data for*

the Greenhouse and Nursery Industry. International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys 2007, Acta Hort 801 (1), 523-529.

- Lee, G. B., Zandong, H., & Lee, J. S. (2004a). Automatic generation of ladder diagram with control Petri net. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 15(2), 245-252.
- Lee, J. S., & Hsu, P. L. (2004b). An improved evaluation of ladder logic diagrams and Petri nets for the sequence controller design in manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 24(3-4), 279-287.
- Leitl, B. M., Kastner-Klein, P., Rau, M., & Meroney, R. N. (1997). Concentration and flow distributions in the vicinity of U-shaped buildings: wind-tunnel and computational data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67, 745-755.
- Li, F., Liu, J., Pei, J., Lin, C. H., & Chen, Q. (2014). Experimental study of gaseous and particulate contaminants distribution in an aircraft cabin. *Atmospheric Environment*, 85, 223-233.
- 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
- Li, Y. (2010). Computational fluid dynamics technology and its application in wind environment analysis. *Journal of Urban Technology*, 17(3), 67-81.
- Lorincz, K., Chen, B. R., Challen, G. W., Chowdhury, A. R., Patel, S., Bonato, P., & Welsh, M. (2009, November). Mercury: a wearable sensor network platform for high-fidelity motion analysis. In *SenSys* (Vol. 9, pp. 183-196).
- Lucas, M. R., & Tilbury, D. M. (2005). Methods of measuring the size and complexity of PLC programs in different logic control design methodologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(5-6), 436-447.
- Ma, Y., Richards, M., Ghanem, M., Guo, Y., & Hassard, J. (2008). Air pollution monitoring and mining based on sensor grid in London. *Sensors*, 8(6), 3601-3623.
- MAGRAMA. Plan Nacional de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera: Plan AIRE. (Internet). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (Acceso el 28/02/2014). Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/Plan_Aire.aspx.
- Mainwaring, A., Culler, D., Polastre, J., Szewczyk, R., & Anderson, J. (2002). Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications* (pp. 88-97). ACM.
- Majdoubi, H., Boulard, T., Fatnassi, H., & Bourden, L. (2009). Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: an experimental and CFD assisted study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(6), 1050-1062.
- Malan, D., Fulford-Jones, T., Welsh, M., & Moulton, S. (2004). Codeblue: An ad hoc sensor network infrastructure for emergency medical care. In *International workshop on wearable and implantable body sensor networks* (Vol. 5).
- Martínez, D. C. (2008). Aplicaciones de redes de sensores y actuadores inalámbricas en los sectores médico, medioambiental, agrícola e industrial. Tesis de máster, Universidad Politécnica de Valencia.

- Matese, A. D. G. S. F., Di Gennaro, S. F., Zaldei, A., Genesio, L., & Vaccari, F. P. (2009). A wireless sensor network for precision viticulture: The NAV system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 69(1), 51-58.
- Meroney, R. N., Leidl, B. M., Rafailidis, S., & Schatzmann, M. (1999). Wind-tunnel and numerical modeling of flow and dispersion about several building shapes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81(1), 333-345.
- Meroney, R. N. (2004). Wind tunnel and numerical simulation of pollution dispersion: a hybrid approach. *Simulation*. Hong Kong, 60.
- Mignot, E., Barthelemy, E., & Hurther, D. (2009). Double-averaging analysis and local flow characterization of near-bed turbulence in gravel-bed channel flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 618, 279-303.
- Milashuk, S., & Crane, W. A. (2011). Wind speed prediction accuracy and expected errors of RANS equations in low relief inland terrain for wind resource assessment purposes. *Environmental Modelling & Software*, 26(4), 429-433.
- Mirabella, O., & Brischetto, M. (2010). Hybrid networking infrastructure for greenhouse management system. In *Robotic and Sensors Environments, 2009. ROSE 2009. IEEE International Workshop on* (pp. 58-63). IEEE.
- MIT Technology Review, 2003. 10 Emerging Technologies that Will Change the World
- Mochida, A., & Lun, I. Y. (2008). Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10), 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
- Moon, I. (1994). Modeling programmable logic controllers for logic verification. *Control Systems, IEEE*, 14(2), 53-59.
- Moonen, P., Dorer, V., & Carmeliet, J. (2011). Evaluation of the ventilation potential of courtyards and urban street canyons using RANS and LES. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(4), 414-423.
- Moyne, J. R., & Tilbury, D. M. (2007). The emergence of industrial control networks for manufacturing control, diagnostics, and safety data. *Proceedings of the IEEE*, 95(1), 29-47.
- Mukhopadhyay, S. C. (2012). *Smart sensing technology for agriculture and environmental monitoring*. Springer.
- Murata, T. (1989). Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4), 541-580.
- Neofytou, P., Venetsanos, A. G., Rafailidis, S., & Bartzis, J. G. (2006a). Numerical investigation of the pollution dispersion in an urban street canyon. *Environmental Modelling & Software*, 21(4), 525-531.
- Neofytou, P., Venetsanos, A. G., Vlachogiannis, D., Bartzis, J. G., & Scaperdas, A. (2006b). CFD simulations of the wind environment around an airport terminal building. *Environmental Modelling & Software*, 21(4), 520-524.

- Nakano, S., Goto, Y., Yokosawa, K., & Tsukada, K. (2005). Hydrogen gas detection system prototype with wireless sensor networks. In *Sensors, 2005 IEEE* (pp. 4-pp). IEEE.
- Neto, A. J. S., Zolnier, S., & de Carvalho Lopes, D. (2014). Development and evaluation of an automated system for fertigation control in soilless tomato production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 103, 17-25.
- Ng, W. Y., & Chau, C. K. (2014). A modeling investigation of the impact of street and building configurations on personal air pollutant exposure in isolated deep urban canyons. *Science of the Total Environment*, 468, 429-448.
- Nikora, V., McEwan, I., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D., & Walters, R. (2007). Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical background. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Nikora, V. I., & Rowiński, P. M. (2008). Rough-bed flows in geophysical, environmental, and engineering systems: Double-Averaging Approach and its applications. *Acta Geophysica*, 56(3), 529-533.
- 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.
- Norton, T., Grant, J., Fallon, R., & Sun, D. W. (2009). Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 103(1), 78-99.
- Nozu, T., Tamura, T., Okuda, Y., & Sanada, S. (2008). LES of the flow and building wall pressures in the center of Tokyo. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10), 1762-1773.
- Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2000). COPERT III: Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport – Methodology and Emission Factors. European Topic Centre on Air Emissions, EEA, Copenhagen, Denmark.
- Oberkampf, W. L., Sindir, M. M., & Conlisk, A. T. (1998). Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations. Am. Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Oliveira, L. M., & Rodrigues, J. J. (2011). Wireless sensor networks: a survey on environmental monitoring. *Journal of communications*, 6(2), 143-151.
- Othman, M. F., & Shazali, K. (2012). Wireless sensor network applications: A study in environment monitoring system. *Procedia Engineering*, 41, 1204-1210.
- Panchard, J., Prabhakar, T. V., Hubaux, J. P., & Jamadagni, H. S. (2007). Commonsense net: A wireless sensor network for resource-poor agriculture in the semiarid areas of developing countries. *Information Technologies & International Development*, 4(1), pp-51.
- Park, J., & Mackay, S. (2003). Practical data acquisition for instrumentation and control systems. Newnes.
- Parsons, D. R., Wiggs, G. F., Walker, I. J., Ferguson, R. I., & Garvey, B. G. (2004). Numerical modelling of airflow over an idealised transverse dune. *Environmental Modelling & Software*, 19(2), 153-162.

- Penin, A. R. (2011). *Sistemas Scada*. Marcombo.
- Pérez, E. M., Acevedo, J. M., & Silva, C. F. (2009). *Autómatas programables y sistemas de automatización*. Marcombo.
- Peterson, J. L. (1981). *Petri net theory and the modeling of systems*.
- Picco, G. P., & Heinzelman, W. (Eds.). (2012). *Wireless Sensor Networks: 9th European Conference, EWSN 2012, Trento, Italy, February 15-17, 2012, Proceedings (Vol. 7158)*. Springer.
- Pierce, F. J., & Elliott, T. V. (2008). Regional and on-farm wireless sensor networks for agricultural systems in Eastern Washington. *Computers and electronics in agriculture*, 61(1), 32-43.
- Pinto, J. (2004). Intelligent sensor networks. *Automation World*, 4(5), 62-63.
- Plaksina, O., & Rausch, T. (2005). Development of a standardized fieldbus-based greenhouse climate control. *IFAC Fieldbus Systems and their Applications*, 6(1).
- Pope, S. B. (2000). *Turbulent flows*. Cambridge university press.
- Postolache, O., Pereira, J. M., Girão, P. S., & Monteiro, A. A. (2012). Greenhouse environment: Air and water monitoring. In *Smart Sensing Technology for Agriculture and Environmental Monitoring* (pp. 81-102). Springer Berlin Heidelberg.
- Potter, M., Wiggert, D., & Ramadan, B. (2011). *Mechanics of Fluids SI Version*. Cengage Learning.
- Powell, J. (2012). *Catching the process fieldbus*. Momentum Press.
- PPM Technology (Internet) (Acceso el 21/05/2015). Disponible en: <http://www.ppm-technology.com>.
- 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
- Rabaey, J. M., Ammer, M. J., da Silva, J. L., Patel, D., & Roundy, S. (2000). PicoRadio supports ad hoc ultra-low power wireless networking. *Computer*, 33(7), 42-48.
- Raghunathan, V., Schurgers, C., Park, S., & Srivastava, M. B. (2002). Energy-aware wireless microsensor networks. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 19(2), 40-50.
- Ramponi, R. R., & Blocken, B. J. E. (2012). A computational study on the influence of urban morphology on wind-induced outdoor ventilation.
- Rauchhaupt, L. (2002). System and device architecture of a radio based fieldbus-the RFieldbus system. In *Factory Communication Systems, 2002. 4th IEEE International Workshop on* (pp. 185-192). IEEE.
- Reichrath, S., Davies, T.W., 2002. Using CFD to model the internal climate of greenhouses: past, present and future. *Agronomie* 22, 3–19
- Reisig, W. (2013). *Elements of distributed algorithms: modeling and analysis with Petri nets*. Springer Science & Business Media.

- Reynolds, O. (1883). An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. *Proceedings of the royal society of London*, 35(224-226), 84-99.
- Rhie, C. M., & Chow, W. L. (1983). Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. *AIAA journal*, 21(11), 1525-1532.
- Richards, P. J., Mallinson, G. D., McMillan, D., & Li, Y. F. (2002). Pedestrian level wind speeds in downtown Auckland. *Wind and Structures*, 5(2_3_4), 151-164.
- Riquelme, J. L., Soto, F., Suardiaz, J., Sánchez, P., Iborra, A., & Vera, J. A. (2009). Wireless sensor networks for precision horticulture in Southern Spain. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(1), 25-35.
- 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., Kittas, C., & Wang, S. (2002). PA—Precision Agriculture: convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 1: the greenhouse considered as a perfectly stirred tank. *Biosystems Engineering*, 83(1), 1-20.
- Roy, J. C., & Boulard, T. (2005). CFD prediction of the natural ventilation in a tunnel-type greenhouse: influence of wind direction and sensibility to turbulence models. *Acta Horticulturae* 691, 457–464.
- Römer, K., & Mattern, F. (2004). The design space of wireless sensor networks. *Wireless Communications, IEEE*, 11(6), 54-61.
- Roundy, S., Steingart, D., Frechette, L., Wright, P., & Rabaey, J. (2004). Power sources for wireless sensor networks. In *Wireless sensor networks* (pp. 1-17). Springer Berlin Heidelberg.
- Rui, Q., Lin-lin, X., Mei-sheng, WU G., SUN D. (2005). The design and application of a greenhouse control system based on CAN. *Industrial Instrumentation & Automation*. 2005-03.
- Saaty, T. L. (1988). What is the analytic hierarchy process? (pp. 109-121). Springer Berlin Heidelberg.
- Sangiovanni-Vincentelli, A. (2007). Quo vadis, SLD? reasoning about the trends and challenges of system level design. *Proceedings of the IEEE*, 95(3), 467-506.
- Santiago del Rio, J. L. (2006). Numerical and experimental study of atmospheric flows and pollutant dispersion in urban. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid
- Schwiebert, L., Gupta, S. K., & Weinmann, J. (2001). Research challenges in wireless networks of biomedical sensors. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking* (pp. 151-165). ACM.
- Selvam, R. P. (1997). Computation of pressures on Texas Tech University building using large eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67, 647-657.
- Solazzo, E., Cai, X., & Vardoulakis, S. (2009). Improved parameterisation for the numerical modelling of air pollution within an urban street canyon. *Environmental Modelling & Software*, 24(3), 381-388.

- Somov, A., Baranov, A., Savkin, A., Ivanov, M., Calliari, L., Passerone, R., ... & Suchkov, A. (2012). Energy-aware gas sensing using wireless sensor networks. In *Wireless Sensor Networks* (pp. 245-260). Springer Berlin Heidelberg.
- Soriano, V., Zaera, M., Esteve, M. & Palau, C. (2000) *Comunicaciones industriales – Programación de PLC's y PROFIBUS* (1ra. ed.). Editorial de la UPV, Valencia.
- Speetjens, S. L., Janssen, H. J. J., Van Straten, G., Gieling, T. H., & Stigter, J. D. (2008). Methodic design of a measurement and control system for climate control in horticulture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 64(2), 162-172.
- Stathopoulos, T., & Baskaran, A. (1990). Boundary treatment for the computation of three-dimensional wind flow conditions around a building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 35, 177-200.
- Stathopoulos, T. (1997). Computational wind engineering: Past achievements and future challenges. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67, 509-532.
- Stavrakakis, G. M., Zervas, P. L., Sarimveis, H., & Markatos, N. C. (2012). Optimization of window-openings design for thermal comfort in naturally ventilated buildings. *Applied Mathematical Modelling*, 36(1), 193-211.
- Stoianov, I., Nachman, L., Madden, S., Tokmouline, T., & Csail, M. (2007, April). PIPENET: A wireless sensor network for pipeline monitoring. In *Information Processing in Sensor Networks, 2007. IPSN 2007. 6th International Symposium on* (pp. 264-273). IEEE.
- Stone, H. L. (1968). Iterative solution of implicit approximations of multidimensional partial differential equations. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 5(3), 530-558.
- Subils, M. J. B., and Domínguez, F. B. NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior.
- Sustainable Bridges (Internet) (Acceso el 15/05/2015). Disponible en: <http://www.sustainablebridges.net>
- 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.
- Taheriazad, L., Portillo-Quintero, C., & Sanchez-Azofeifa, A. (2014). Application of Wireless Sensor Networks (WSNs) to Oil Sands Environmental Monitoring.
- Tamura, T., Kawai, H., Kawamoto, S., Nozawa, K., Sakamoto, S., & Ohkuma, T. (1997). Numerical prediction of wind loading on buildings and structures—Activities of AIJ cooperative project on CFD. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 67, 671-685.
- Tamura, T., Nozawa, K., & Kondo, K. (2008). AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10), 1974-1984.
- Tamura, T., Kawai, H., Bale, R., Onishi, K., Tsubokura, M., Kondo, K., & Nozu, T. (2015). LES for wind turbulence in canopy layer at large urban area. *Bulletin of the American Physical Society*, 60.

- Tang, W., & Davidson, C. I. (2004). Erosion of limestone building surfaces caused by wind-driven rain: 2. Numerical modeling. *Atmospheric Environment*, 38(33), 5601-5609.
- Tarrío, P., 2011. Efficient localization methods for wireless sensor networks based on received signal strength measurements. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid
- Teitel, M., Atias, M., & Barak, M. (2010). Gradients of temperature, humidity and CO₂ along a fan-ventilated greenhouse. *biosystems engineering*, 106(2), 166-174.
- Temam, R. (2001). Navier-Stokes equations: theory and numerical analysis (Vol. 343). American Mathematical Soc..
- 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. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67, 827-841.
- Tominaga, Y., & Mochida, A. (1999). CFD prediction of flowfield and snowdrift around a building complex in a snowy region. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81(1), 273-282.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Murakami, S., & Sawaki, S. (2008a). Comparison of various revised $k-\epsilon$ models and LES applied to flow around a high-rise building model with 1: 1: 2 shape placed within the surface boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 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. (2010). Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: model evaluation of RANS and LES. *Building and Environment*, 45(10), 2231-2239.
- Tominaga, Y., & Stathopoulos, T. (2011). CFD modeling of pollution dispersion in a street canyon: Comparison between LES and RANS. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 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. *Building and environment*, 46(4), 899-910.
- Tominaga, Y., & Blocken, B. (2015). Wind tunnel experiments on cross-ventilation flow of a generic building with contaminant dispersion in unsheltered and sheltered conditions. *Building and Environment*.
- Toparlar, Y., Blocken, B., Vos, P., van Heijst, G. J. F., Janssen, W. D., van Hooff, T., & Timmermans, H. J. P. (2015). CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam. *Building and Environment*, 83, 79-90.

- Tytgat, L., Yaron, O., Pollin, S., Moerman, I., & Demeester, P. (2015). Analysis and experimental verification of frequency-based interference avoidance mechanisms in IEEE 802.15. 4. Networking, *IEEE/ACM Transactions on*, 23(2), 369-382.
- Uzam, M., & Jones, A. H. (1998). Discrete event control system design using automation Petri nets and their ladder diagram implementation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14(10), 716-728.
- van Hooff, T., & Blocken, B. (2010a). Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: A case study for the Amsterdam ArenA stadium. *Environmental Modelling & Software*, 25(1), 51-65.
- van Hooff, T., & Blocken, B. (2010b). On the effect of wind direction and urban surroundings on natural ventilation of a large semi-enclosed stadium. *Computers & Fluids*, 39(7), 1146-1155.
- van Hooff, T., Blocken, B., Aanen, L., & Bronsema, B. (2011). A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations. *Building and Environment*, 46(9), 1797-1807.
- van Mook, F. J. (2002). Driving rain on building envelopes. Techn. Univ., Fac. Bouwkunde.
- van Tuijl, B., van Os, E., & van Henten, E. (2008). Wireless sensor networks: state of the art and future perspective. In *International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys2007* 801 (pp. 547-554).
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E., Pericleous, K., & Gonzalez-Flesca, N. (2003). Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric environment*, 37(2), 155-182.
- Vassberg, J. C., DeHaan, M. A., Rivers, S. M., & Wahls, R. A. (2008). Development of a common research model for applied CFD validation studies. *AIAA paper*, 6919, 2008.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson Education.
- Völgyesi, P., Nádas, A., Koutsoukos, X., & Lédeczi, Á. (2008). Air quality monitoring with sensormap. In *Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks* (pp. 529-530). IEEE Computer Society.
- Vullers, R., Schaijk, R., Visser, H., Penders, J., & Hoof, C. (2010). Energy harvesting for autonomous wireless sensor networks. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 2(2), 29-38.
- Vyatkin, V. (2013). Software engineering in industrial automation: State-of-the-art review. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 9(3), 1234-1249.
- Wakes, S. J., Maegli, T., Dickinson, K. J., & Hilton, M. J. (2010). Numerical modelling of wind flow over a complex topography. *Environmental Modelling & Software*, 25(2), 237-247.
- Watteyne, T., Vilajosana, X., Kerkez, B., Chraim, F., Weekly, K., Wang, Q., & Pister, K. (2012). OpenWSN: a standards-based low-power wireless development environment. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 23(5), 480-493.
- Weaver, J. A. (2003). A wearable health monitor to aid parkinson disease treatment (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

- Werner-Allen, G., Lorincz, K., Ruiz, M., Marcillo, O., Johnson, J., Lees, J., & Welsh, M. (2006). Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *Internet Computing, IEEE*, 10(2), 18-25.
- Willig, A., Matheus, K., & Wolisz, A. (2005). Wireless technology in industrial networks. *Proceedings of the IEEE*, 93(6), 1130-1151..
- Willig, A. (2008). Recent and emerging topics in wireless industrial communications: A selection. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 4(2), 102-124.
- Witrant, E., D'Innocenzo, A., Isaksson, A. J., Di Benedetto, M. D., Johansson, K. H., Santucci, F., & Strand, M. (2008). Mining ventilation control: a new industrial case for wireless automation. In *IEEE CASE*, Washington DC, USA. IEEE.
- Wobscholl, D. (2006). A wireless gas monitor with IEEE 1451 protocol. In *The IEEE Sensors Application Symposium*, Houston, Texas, USA (pp. 162-164).
- Wright, N. G., & Hargreaves, D. M. (2006). Unsteady CFD simulations for natural ventilation. *International journal of ventilation*, 5(1), 13-20.
- Xiaoqiang, Z., & Zuhou, Z. (2010, March). Development of remote waste gas monitor system. In *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2010 International Conference on* (Vol. 1, pp. 1105-1108). IEEE.
- Xu, N., Rangwala, S., Chintalapudi, K. K., Ganesan, D., Broad, A., Govindan, R., et al. (2004). A wireless sensor network for structural monitoring. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems* (pp. 13-24). ACM.
- Yang, Y., & Shao, Y. (2008). Numerical simulations of flow and pollution dispersion in urban atmospheric boundary layers. *Environmental Modelling & Software*, 23(7), 906-921.
- Yan, W., Zhang, Y., Sun, Y., & Li, D. (2009). Experimental and CFD study of unsteady airborne pollutant transport within an aircraft cabin mock-up. *Building and Environment*, 44(1), 34-43.
- Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Computer networks*, 52(12), 2292-2330.
- Yiming, Z., Xianglong, Y., Xishan, G., Mingang, Z., & Liren, W. (2007, September). A design of greenhouse monitoring & control system based on ZigBee wireless sensor network. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007. WiCom 2007. International Conference on* (pp. 2563-2567). IEEE.
- 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. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(9), 1551-1578.
- Yu-feng, W., Yan-hua, J., Dong-sheng, LV. (2006). Temperature measurement distributed system based on Lonworks field bus. *Journal of Liaoning Technical University*. 2006-01.
- Zárate, E., Belalcazar, L. C., Clappier, A., Manzi, V., & Van den Bergh, H. (2007). Air quality modelling over Bogota, Colombia: Combined techniques to estimate and evaluate emission inventories. *Atmospheric Environment*, 41(29), 6302-6318.
- Zhao, Y., Teitel, M., & Barak, M. (2001). Vertical temperature and humidity gradients in a naturally ventilated greenhouse. *Journal of agricultural engineering research*, 78(4), 431-436.

- Zheng, J., & Lee, M. J. (2004). A comprehensive performance study of IEEE 802.15. 4.
- Zhongjun, C. (2008). Design of the CAN Bus Communication Adapter Card for Intelligent Greenhouse. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 36(9), 3922.
- Zhen-ming, H., Zhong-ping, Y., Ling, F., Deng-gui, W., Hong-jun, L. (2007). The Design of a Greenhouse Measuring-controlling System Based on CAN and MCU. *Journal of Agricultural Mechanization Research*. 2007-04.
- Zhou, M. (2012). *Petri nets in flexible and agile automation* (Vol. 310). Springer Science & Business Media.

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.

EH (*Energy Harvesting* – Captación o recolección de energía) Técnicas y procesos por medio de los cuales es capturada y almacenada la energía que se genera con fuentes no convencionales o tradicionales para la alimentación generalmente de equipos electrónicos.

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.

Smart City: (Ciudad Inteligente). Concepto emergente que se refiere a un tipo de desarrollo urbano basado en la sostenibilidad que es capaz de responder adecuadamente a las necesidades básicas de instituciones, empresas, y de los propios habitantes, tanto en el plano económico, como en los aspectos operativos, sociales y ambientales.

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.

ASCII (*American Standard Code for Information Interchange* – Código estadounidense estándar para intercambio de información). Código que representa caracteres de texto en ordenadores, equipos de comunicación, y otros dispositivos que utilicen texto.

AS-i (*Actuator Sensor Interface* – Interface para actuadores y sensors). Es un protocolo de red industrial usado en sistemas de automatización basada en PLC's, DCS's, y ordenadores embebidos.

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.

CP (*Communication Processor* – Procesador de comunicaciones). Módulo de las CPU que poseen los PLC's dedicados exclusivamente a realizar las tareas de transmisión de información y a conectar una estación a un sistema de transmisión de datos.

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.

GSD (*Gerätestammdaten* – Dispositivo maestro). Es un archivo con la base de datos de un equipo (también conocido como "*device datasheet*" – hoja de datos del dispositivo) que soporte una comunicación con el protocolo PROFIBUS, donde aparece la configuración abierta con la información del dispositivo y las características fundamentales para la transmisión de datos. Es proporcionado por el fabricante del dispositivo.

Pasarela de Protocolos (*Gateway* – Puerta de enlace). Dispositivo que permite interconectar redes con protocolos y arquitecturas diferentes a todos los niveles de comunicación. Su propósito es traducir la información del protocolo utilizado en una red al protocolo usado en la red de destino. A diferencia de un Puente (*Bridge*), las aplicaciones las aplicaciones, o la capa siete del modelo OSI puede comunicarse a través de él.

PLC (*Programmable Logic Control* – Control lógico programable).

PN (*Petri Net* – Redes de Petri). Es uno de alguno de los lenguajes de modelado matemático para la descripción de los sistemas distribuidos. Está dirigido a los gráficos bipartidos en el cual se encuentran lugares y transiciones para la evolución de una rutina.

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.

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.

ANEXO I

Estación UPV

Como se observa la *Figura 156* y en la *Figura 157*, se trata de una estación periurbana, situada próxima al mar. La morfología a nivel micro de la zona de ubicación se corresponde con una zona ajardinada del interior de la Univeridad Politécnica de Valencia (área de tráfico restringido). En el esquema de Intensidad de Tráfico (correspondiente al mes de Mayo de 2011) (*Figura 157*) se ubica la estación en referencia a las principales vías circundantes.



Figura 156: Imágenes aéreas obtenidas con Google Maps con la ubicación de la estación de UPV

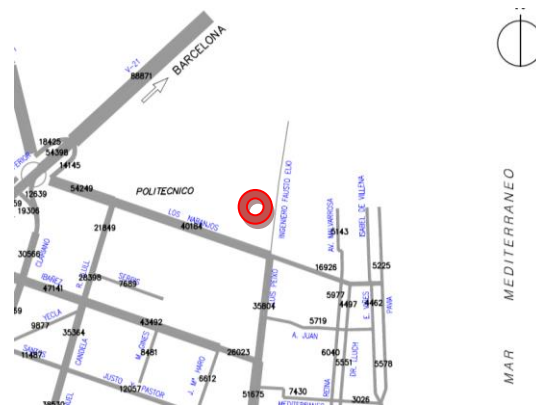


Figura 157: Plano de la intensidad del tráfico en inmediaciones a la estación de UPV

Pese a su posición aislada, se va a tomar como referencia de vía de circulación influyente la Avenida de los Naranjos para la caracterización de la estación en relación a este parámetro y para considerar la posible influencia de la variación del tráfico en las medidas de contaminantes atmosféricos tomadas por la estación para el mismo periodo.

En la *Figura 158* se observa la dimensión media del valor de tráfico (Alto: entorno a los 40000 vehículos medios diarios) con un máximo en el mes de julio y un mínimo en el de agosto (correspondiendo con un patrón particular de comportamiento que se interpreta como resultado de dos fenómenos sociológicos: la operación salida en julio y el periodo vacacional en agosto). Los periodos entre septiembre y octubre, y entre mayo y junio también se identifican como máximos relativos.

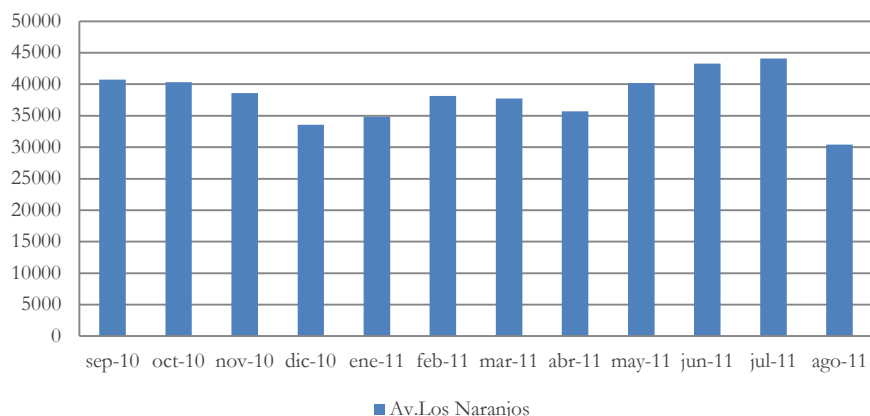


Figura 158: Intensidad media del tráfico alrededor de la estación de UPV (Elaboración propia a partir de los datos de la estación del Ayuntamiento de Valencia)

Estación Molí de Sol

Como se aprecia en la *Figura 159* y en la *Figura 160*, se trata de una estación periurbana, situada próxima al límite de la ciudad de Valencia, vecina a las huertas. La morfología a nivel micro de la zona de ubicación se corresponde con un área no urbanizada, de entorno de descampados y áreas de cultivo abandonadas. En cuanto al análisis del tráfico circundante, en el esquema de intensidad de tráfico, (Ayuntamiento de Valencia, mayo de 2011) (*Figura 160*) se localiza la estación de medición de contaminación atmosférica con un marcador rojo.



Figura 159: Imágenes aéreas obtenidas con Google Maps con la ubicación de la estación de Molí de Sol

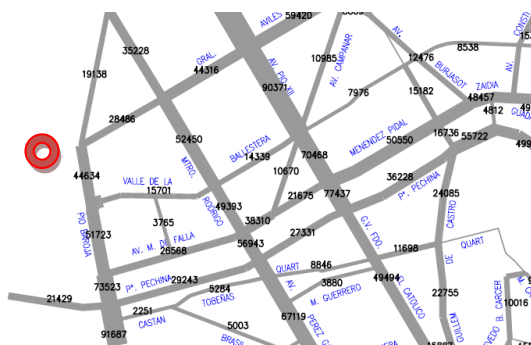


Figura 160: Plano de la intensidad del tráfico en inmediaciones a la estación de Molí de Sol

Habiendo observado la localización de la estación, se consideran para el análisis de la evolución anual de la intensidad de tráfico y su posterior relación con las mediciones de las emisiones, las vías de Pío Baroja y General Avilés (*Figura 161*). Ambas vías se pueden considerar de Alta intensidad de tráfico (Pío Baroja en torno a los 40.000 y General Avilés en torno a los 30.000, vehículos diarios de media) lo que considerando la cercanía de la estación de medida y aún teniendo en cuenta la

amplitud de la morfología del entorno, crea un escenario de una influencia alta del tráfico en las emisiones.

En la *Figura 161* se observa, de nuevo, un mínimo coincidente y significativo en el mes de agosto. A parte de esto, existen dos máximos en Pio Baroja en los meses de septiembre y junio, y en General Avilés coincidente sólo en parte, en los meses de octubre y junio. También son picos altos los meses de marzo, mayo y junio. Diciembre y enero serían meses de menor intensidad después del mínimo comentado en agosto.

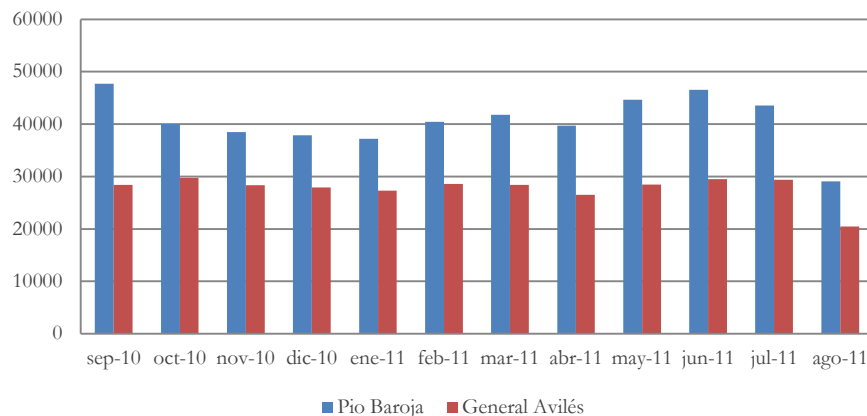


Figura 161: Intensidad media del tráfico alrededor de la estación de Moli de Sol (Elaboración propia a partir de los datos de la estación del Ayuntamiento de Valencia)

Estación Boulevard Sud

Como se observa en la *Figura 162*, ésta estación está situada muy cercana a una vía de comunicación de Alta intensidad (Avenida. Tres Cruces), pero con una morfología circundante abierta. Además, la cercanía de la amplia área del cementerio, con tráfico restringido, puede aminorar este efecto. En una escala más amplia, como puede observarse en el plano de localización de estaciones (*Figura 163*), su posición es periférica respecto al núcleo de Valencia, tratándose de nuevo de una estación de posición periurbana, alejada de la influencia marítima (y de la zona de estudio).

Puede valorarse la influencia del crematorio del cementerio en la recolección de datos de emisiones, incrementando quizás el valor de las PM10 por partículas en suspensión.

En la *Figura 163* que es el esquema de intensidades de tráfico (Ayuntamiento de Valencia, Mayo de 2011), se localiza la estación y se consideran como vías de referencia y principal influencia en el análisis del tráfico circundante de la zona el cruce de la C/ Gaspar Aguilar con la Av. Tres Cruces.



Figura 162: Imágenes aéreas obtenidas con Google Maps con la ubicación de la estación de Boulevard Sud



Figura 163: Plano de la intensidad del tráfico en inmediaciones a la estación de Boulevard Sud

La magnitud del tráfico en ambos tramos es aproximadamente el doble en Avenida Tres Cruces que en Gaspar Aguilar, siendo Alta la 1ª (alrededor de una media de 40.000 vehículos/día) y Media-Alta la 2ª (en torno a los 20.000) (Figura 164). El máximo de la Avenida Tres Cruces se da en el mes de junio (siendo también altos entre mayo y junio y entre septiembre, octubre y noviembre), y en Gaspar Aguilar en el mes de octubre (siendo muy altos también los meses de noviembre y el periodo comprendido entre mayo y julio).

Esto, en conjunto y por proximidad de las vías a la estación, supone un escenario de alta concentración de emisiones de tráfico.

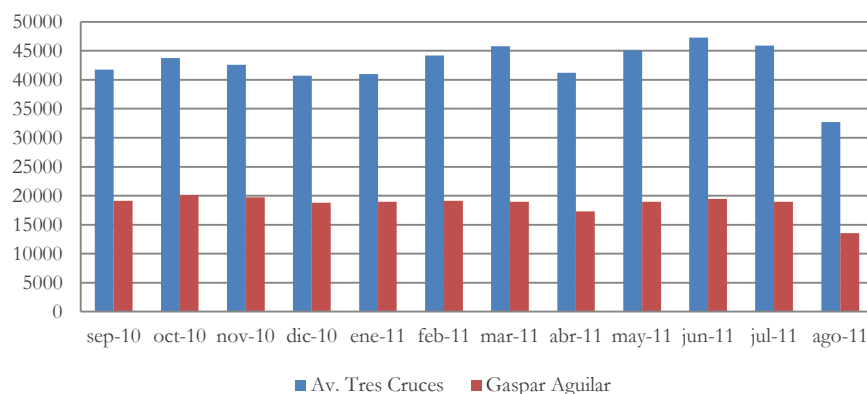


Figura 164: Intensidad media del tráfico alrededor de la estación de Boulevard Sud (Elaboración propia a partir de los datos de la estación del Ayuntamiento de Valencia)

Estación Pista de Silla

La Estación Pista de Silla, según se observa la Figura 165, es junto con la de Viveros la que se sitúa más céntrica en el marco de la ciudad de Valencia y por tanto, más directamente sometida a la atmósfera urbana.

Su localización particular en cambio, también presenta anomalías respecto al escenario cerrado de comparación, que cabe destacar en este estudio. Por ejemplo, debe notarse la cercanía al gran vial de la estación de Ferrocarriles de Valencia, lo que supone un corredor verde en cuanto a emisiones y una salida de flujo limpio, los campos circundantes o la propia amplitud de la vía (Avenida Filipinas) donde está situada la estación. Estas circunstancias se alejan de la densidad cerrada de un escenario puro de urbe y tráfico, como el del modelo de estudio.

Para la caracterización del tráfico de la zona se analiza el cruce de la Avenida Filipinas con la C/Centelles, ambas muy próximas a la estación tal y como puede observarse en la *Figura 166* o el esquema de intensidad de tráfico.



Figura 165: Imágenes aéreas obtenidas con Google Maps con la ubicación de la estación de Pista de Silla

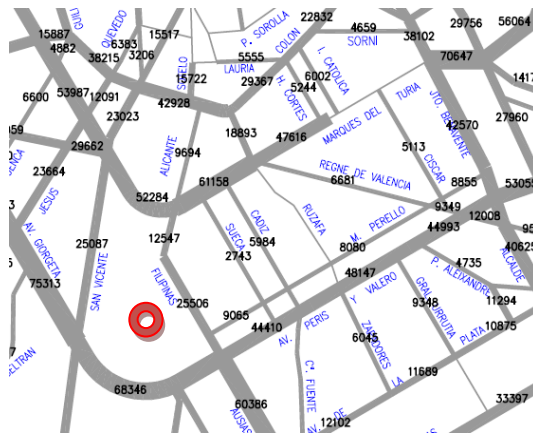


Figura 166: Plano de la intensidad del tráfico en inmediaciones a la estación de Pista de Silla

La intensidad media de tráfico de la zona puede considerarse Alta para la Avenida Filipinas (más de 25.000 vehículos diarios de media) y Media para la C/ Centelles (con 10.000) (*Figura 167*). El máximo coincidente se alcanza en ambas en el mes de octubre, siguiéndolo los meses de septiembre a noviembre. El segundo periodo de intensidad alta tras estos máximos sería en junio a julio, repitiéndose también aquí el fenómeno del mínimo en agosto.

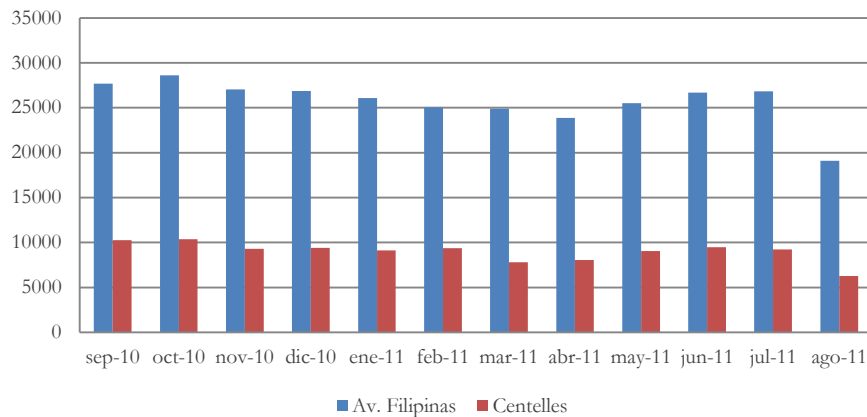


Figura 167: Intensidad media del tráfico alrededor de la estación de Pista de Silla (Elaboración propia a partir de los datos de la estación del Ayuntamiento de Valencia)

Estación Francia

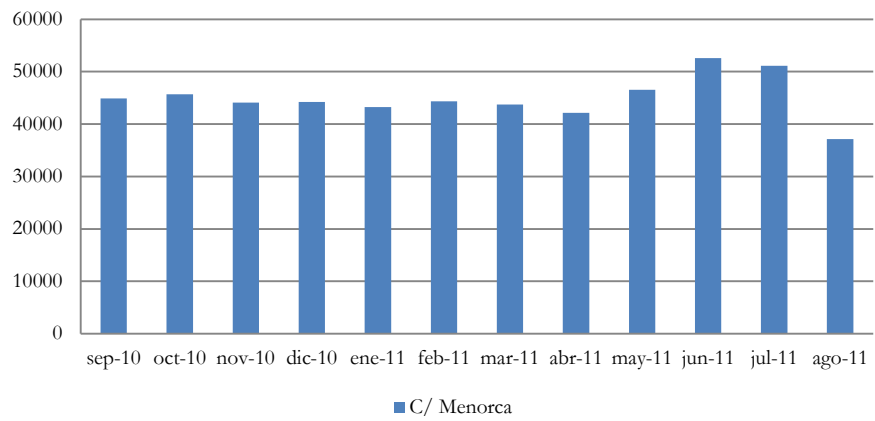





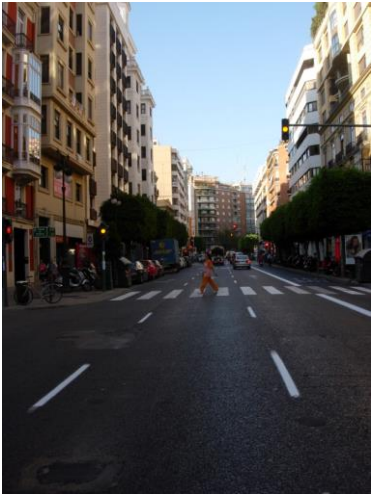


Figura 170: Intensidad media del tráfico alrededor de la estación de Francia (Elaboración propia a partir de los datos de la estación del Ayuntamiento de Valencia)




ANEXO II




Tabla 76: Análisis visual y extracción de características de la zona de la C/ Colón y alrededores




<i>Zona: C/ Colón y alrededores.</i>		
<i>Nº</i>	<i>Imagen</i>	<i>Descripción</i>
1		<p>C/ Colón Nº 60. Tesorería General de la Seguridad Social. Edificio público con posibilidad de acceso previa solicitud de los permisos oportunos, para colocación de sensores a distintas alturas verticales.</p> <p>Se trata de un edificio de 9 plantas situado frente a la plaza de los Pinazo, centro neurálgico de la zona comercial de Colón.</p> <p>Cruce de gran intensidad de tráfico tanto peatonal como rodado.</p>
2		<p>Vista de la C/ Colón desde el punto anterior, cruce con C/ Jorge Juan.</p> <p>Se observa en la vista en perspectiva la homogeneidad en alturas de los edificios circundantes de la C/ Colón.</p>
3		<p>Edificio comercial en la C/ Colón (EL Corte Inglés).</p> <p>Se identifica la posibilidad de colocación de sensores en altura, solicitando los permisos oportunos a la entidad.</p>



4		<p>En el nº 32 de la C/ Colón, aproximadamente situada a la mitad de la zona de estudio planteada, se localiza la sede de la Conselleria d' Economia Indústria i Comerç, donde se considera poder solicitar permiso para situar los sensores a distintas alturas verticales.</p>
5		<p>Vista de la sede de la Conselleria d' Economia Indústria i Comerç.</p> <p>El edificio mantiene las características arquitectónicas y de altura de la zona, con un número de 7 -8 plantas.</p> <p>Por su situación específica a mitad del trazado de la zona de estudio, se considera un punto óptimo de observación, al que además, se puede solicitar el acceso y que garantizaría la seguridad de los elementos sensores instalados.</p>
6		<p>Homogeneidad de alturas de los bloques circundantes de la C/ Colón, característica importante para la simplicidad geométrica del modelo que facilita su representación y el análisis del comportamiento del flujo.</p>
7		<p>Vista en perspectiva de la C/ Colón (enfoque en el sentido hacia la Porta de la Mar).</p> <p>La C/ Colón es una arteria importante de la ciudad de Valencia con una alta densidad de circulación (rápida además), como se observa: Vía de 3 carriles y carril-bus. Vehículos aparcados sólo a un lado de la vía.</p>

8		<p>Vista en perspectiva de la C/ Colón (enfoque complementario al anterior, en el sentido contrario, hacia el inicio de la calle).</p> <p>En cuanto al arbolado urbano en la C/ Colón, elemento característico a analizar por su influencia posible en el modelo, se observa una presencia moderada, con ejemplares de poco tamaño y con una influencia leve en el marco morfológico general.</p> <p>En este sentido, no se considera un factor que pueda producir descarte de la zona por desviaciones excesivas en la consideración de las emisiones del modelo.</p>
9		<p>Se mantiene la homogeneidad de alturas de los bloques circundantes de la C/ Colón (ver ficha 6).</p>
10		<p>C/ Colón N° 2.</p> <p>Tesorería General de la Seguridad Social. (Ministerio de Trabajo e Inmigración).</p> <p>Como entidad pública, se identifica como lugar de interés y posible colaborador en la cesión del espacio para la colocación de los sensores, solicitando los permisos oportunos.</p>

11		<p>Vista ampliada de la imagen anterior. Se trata de un edificio de 9 plantas de propiedad pública, haciendo chaflán y situado, como puede observarse en el croquis de campo, al final del trazado del área de estudio.</p> <p>Como factor negativo del pto de análisis, se observa que el volumen aéreo de la zona se irregulariza en este punto por la existencia de chaflanes circulares, confluencia de vías de distintos anchos y trazado curvo de la C/ Colón, lo que puede complicar la definición geométrica del modelo o la fidelidad de los resultados respecto a la simplificación aceptada.</p>
12		<p>Vista de la C/ Colón desde el mismo punto de las imágenes anteriores.</p> <p>El punto objeto de análisis, en cambio, se trata de un cruce de vías importantes (C/ Ruzafa, C/ Colón y continuación a C/ Xátiva) regulado por un semáforo, con el particular interés que esto supone desde el punto de vista del análisis de las emisiones por tráfico.</p>
13		<p>Vista de la C/ Ruzafa (cruce con C/ Colón y C/ Xátiva). Circulación de tráfico denso.</p>



16		<p>C/ Cirilo Amorós.</p> <p>Zona residencial y comercial de densidad alta.</p> <p>Vehículos estacionados a ambos lados de la vía, de un solo carril.</p>
17		<p>Se detecta cierta irregularidad vertical en las alturas de los edificios de la C/ Cirilo Amorós alternándose 4 plantas, 6 plantas, 8 plantas.</p>
18		<p>C/ Félix Pizcueta (desde el cruce con C/ Cirilo Amorós).</p> <p>Las vías secundarias transversales a la C/ Colón tienen un tráfico denso, aunque evidentemente inferior a la de la arteria principal, tratándose de vías de 1 solo carril.</p> <p>En general de características similares: sin arbolado urbano, vehículos aparcados sólo a 1 lado (excepto, Pizarro a los 2) y cruces sin regulación con semáforos lo que produce una circulación de vehículos más lenta con cesión de paso en cada encrucijada.</p>
19		<p>Vista de la C/ Pizarro (desde el cruce con C/ Cirilo Amorós).</p> <p>Toda la cuadrícula adyacente a la calle Colón se caracteriza por un trazado muy regular, como se puede observar en la representación en planta de la morfología de la zona (ver cartografía o esquema cuaderno de campo pág. 3) lo que, una vez más, simplifica la ejecución de la representación geométrica del modelo, facilitando la aproximación a la realidad y por tanto incrementando la fiabilidad de los resultados.</p>





20		<p>C/ Cirilo Amorós (vista con sentido hacia la calle Ruzafa).</p> <p>Continúa con las características descritas. Se valora la existencia del arbolado urbano de, en el conjunto, una relativa importancia.</p>
21		<p>C/ Hernán Cortés (vista desde el cruce con C/ Cirilo Amorós).</p>
22		<p>C/ Cirilo Amorós (vista en dirección al Mercado de Jorge Juan).</p> <p>Se mantienen las características comentadas.</p> <p>El tráfico, puede ser considerado de densidad media con fluidez constante pero bajas velocidades (obligadas por las características de los cruces no regulados por señales luminosas).</p> <p>En este tramo los edificios colindantes presentan características arquitectónicas homogéneas e igualdad de alturas, en torno a las 6 plantas.</p>

23		<p>Nº 25, C/ Isabel la Católica.</p> <p>Colegio Dominicos, edificio de 6 plantas donde se considera, al tratarse de un centro educativo, se podría solicitar la colaboración para situar los sensores a distintas alturas verticales y obtener una medida periférica del sistema que podría ser de interés.</p>
24		<p>C/ Isabel la Católica (vista desde el cruce con C/ Cirilo Amorós).</p> <p>Mantiene las características descritas para las transversales de la cuadrícula analizada, cuyo eje principal, al fondo, es la C/ Colón.</p>
25		<p>C/ Cirilo Amorós (desde el cruce con C/ Jorge Juan).</p> <p>Se observa la fuerte irregularidad en los edificios de la margen izquierda, producida por la Basílica de San Vicent (a la altura del nº 57).</p> <p>Presencia importante del arbolado urbano en este tramo.</p>
		<p>El volumen de aire de la zona, y por tanto las láminas del flujo a diferentes estratos se verán afectados por la irregularidad de estos contornos (en el extremo opuesto de la homogeneidad morfológica que hemos comentado en general en otros puntos de la zona de análisis y que nos acerca a mejorar la aproximación a la realidad por un modelo sencillo.)</p>

26		<p>El Mercado de Jorge Juan, situado en el cruce de la C/ Jorge Juan con Cirilo Amorós también tendrá unas características morfológicas irregulares que se considera deben evitarse.</p>
27		<p>Plaza de los Pinazo.</p> <p>Cerrando el recorrido, se vuelve un análisis al núcleo de intenso uso público de la zona, la Plaza de los Pinazo.</p> <p>En este punto, se sitúa el edificio comercial de la imagen (El Corte Inglés) donde también se considera que se podría solicitar colaboración para colocar sensores en altura.</p>



Tabla 77: Tabla con la descripción de las señales luminosas en el cruce C/ Colón con C/ Jorge Juan (Plaza de los Pinazo)





<i>Croquis de campo.</i>	<i>Vista aérea.</i>	
		
<p><u>Descripción general:</u> Se trata de un cruce con 5 semáforos distribuidos según el esquema. Dos de ellos son de tipo A (altos) y 3 de tipo B (bajos). De estos, sólo uno de ellos es B3, (el de peatones con tres lámparas o contador de segundos), situado en la posición 5 según esquema (en el centro de la isleta). Los otros dos bajos son tipo B2 (situados en las posiciones 1 y 3).</p>		
<i>Nº fot. / Tipo</i>	<i>Imagen</i>	<i>Descripción</i>

1 (B2)		<p>Semáforo de tipo bajo con 3 lámparas para la regulación del tráfico rodado y 2 para los peatones.</p>
2 (A)		<p>Semáforo de tipo alto con 3 lámparas en su extremo superior y otras 2 triples a altura normal para regulación del tráfico rodado. La de peatones, de dos lámparas.</p> <p>Acoplada señal circular.</p>
3 (B2)		<p>Semáforo de tipo bajo.</p> <p>Señales circulares acopladas.</p>
4 (A)		<p>Semáforo de tipo alto.</p> <p>(Vista de la C/ Colón desde la plaza de los Pinazo, inicio de la zona de estudio.)</p>

5 (B3)		<p>Semáforo de tipo bajo, B3 (3 lámparas para peatones o contador de segundos).</p> <p>Con señales circulares acopladas.</p>
Detalle		<p>Detalle del núcleo central del semáforo tipo alto de la imagen 2.</p>

Tabla 78: Tabla con la descripción de las señales luminosas en el cruce C/ Colón con C/ Isabel la Católica y C/ Pérez Bayer

<i>Croquis de campo.</i>	<i>Vista aérea.</i>	
		
<p><u>Descripción general:</u> Cruce con 8 semáforos, 2 A y 6 B. De estos, cuatro son B3 y dos son B2. 4 pasos de peatones que se generan entre 4 esquinas (superior izquierda: 72, superior derecha fot. 77, inferior derecha: fot. 75 e inferior izquierda: fot. 73). En cada esquina dos, y correspondiendo con los extremos de cada paso de peatones, se sitúan los 8 semáforos.</p>		
<i>Nº fot. / Tipo</i>	<i>Imagen</i>	<i>Descripción</i>

<p>72 / Dos: uno A, otro B.</p>		<p>Esquina superior izquierda, según croquis.</p> <p>Dos semáforos en la imagen, uno alto y otro bajo (B3).</p>
<p>74 / Foto detalle</p>		<p>Detalle del núcleo central del semáforo alto de la imagen anterior.</p> <p>Incluye señales circulares acopladas y lámparas en distintas orientaciones.</p>
<p>73 / Dos: ambos B3</p>		<p>Esquina inferior izquierda, según croquis.</p> <p>Dos semáforos bajos, uno a cada extremo de los pasos de peatones que confluyen en esa esquina.</p>
<p>75 / Dos: uno B3, otro B2</p>		<p>Vista de la esquina inferior derecha, según croquis.</p> <p>Dos semáforos bajos. El de la derecha B3 (enfocado a la C/ Colón), el de la izquierda B2.</p>





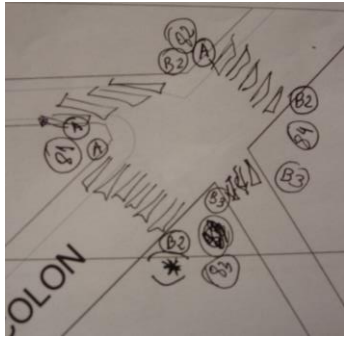
76 / Detalle		Detalle de semáforo tipo B3.
77 / Dos: Uno A, otro B2		Esquina superior derecha. Dos semáforos, uno alto enfocado a la C/ Colón y otro bajo enfocado a C/ Isabel la Católica.
79 / Detalle		Detalle de semáforo tipo B2 en este cruce (a ambos lados de la C/ Isabel la Católica). Ambos con señales circulares acopladas.
80 / Detalle		Detalle de semáforo B3 (de la imagen 73, esquina inferior izquierda del croquis), pto marcado en el croquis con un asterisco. Incluye pequeña señal acoplada: “permitido estacionar en el carril EMT de 22h a 8h”.



Tabla 79: Tabla con la descripción de las señales luminosas en el cruce C/ Colón con C/ Hernán Cortés y C/ Roger de Lauria

<i>Croquis de campo.</i>	<i>Vista aérea.</i>
--------------------------	---------------------



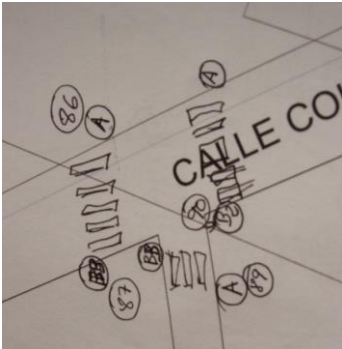


Descripción general:

Es un cruce regulado por un total de 8 semáforos, de los cuales 3 son altos y 5 bajos. De los 5 bajos, 3 son tipo B2 y 2 son tipo B3.

<i>Nº fot. / Tipo</i>	<i>Imagen</i>	<i>Descripción</i>
81 / Dos: ambos A		<p>Esquina inferior izquierda del croquis. Dos semáforos de tipo A (altos). Iguales en lámparas, uno con señales circulares acopladas en su núcleo central, otro sin nada.</p>
82 / Dos: uno A, otro B2		<p>Esquina superior izquierda del croquis. Dos semáforos. Uno alto, enfocado a la C/ Colón y con señales circulares acopladas, y el otro bajo tipo B2.</p>
83 / Dos: uno B3, otro B2		<p>Esquina inferior derecha del croquis. Dos semáforos, ambos bajos. Uno tipo B2 y el otro tipo B3.</p>

84 / Dos: uno B2, otro B3		<p>Esquina superior derecha del croquis.</p> <p>Dos semáforos, ambos bajos. Uno tipo B2 y el otro tipo B3.</p>
85 / Detalle		<p>Detalle del semáforo B2 de la imagen 83, esquina inferior derecha (marcado con asterisco en el croquis).</p>

Tabla 80: Tabla con la descripción de las señales luminosas en el cruce C/ Colón con C/ Pizarro

<i>Croquis de campo.</i>	<i>Vista aérea.</i>	
		
<p><u>Descripción general:</u> Se trata de un cruce con 3 pasos de peatones y regulado por 6 semáforos. De estos son 3 altos y 3 bajos. De los 3 bajos, 2 son tipo B3 y uno B2.</p>		
<i>Nº fot. / Tipo</i>	<i>Imagen</i>	<i>Descripción</i>
86 / Uno tipo A		<p>Semáforo alto, enfocado a la C/Colón (en la esquina superior izquierda del croquis).</p>




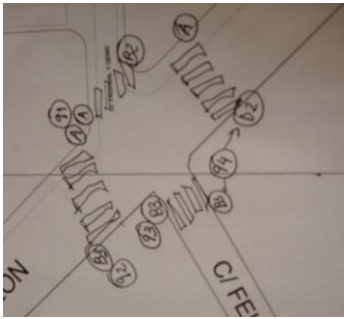




<p>87 / Dos: ambos tipo B3</p>		<p>Esquina inferior izquierda.</p> <p>Dos semáforos bajos, ambos de tipo B3.</p>
<p>89 / Uno: A</p>		<p>Semáforo alto, situado a la entrada de la C/ Pizarro y enfocado a esta.</p> <p>Con señales circulares acopladas.</p> <p>Todas las lámparas en grupos triples.</p>
<p>90 / Uno: B2</p>		<p>Vista del paso de peatones en la C/ Colón, anterior a la entrada de la C/ Pizarro.</p> <p>Se observa el semáforo bajo tipo B2 y el alto, enfocado a la c/ Colón del extremo de enfrente del paso de peatones.</p> <p>Ambos con señales acopladas.</p>

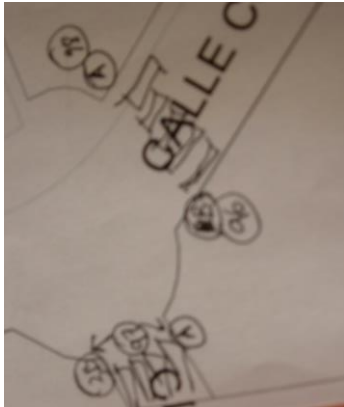


Tabla 81: Tabla con la descripción de las señales luminosas en el cruce C/ Colón con C/Felix Pizcueta y C/ Pascual y Genís




<p><i>Croquis de campo.</i></p>	<p><i>Vista aérea.</i></p>	
		
<p><u>Descripción general:</u> Cruce con 4 pasos de peatones regulado por un total de 8 semáforos, de los cuales 3 son altos y 5 bajos. De estos, 3 son de tipo B3 y 2 de tipo B2.</p>		
<p>Nº fot. / Tipo</p>	<p>Imagen</p>	<p>Descripción</p>

<p>91 / Dos tipo A</p>		<p>Esquina C/Colón con C/ Pascual y Genís, lado inferior (ver croquis).</p> <p>Dos semáforos altos. El enfocad a la C/ Pascual y Genís, con señales circulares acopladas. El otro, enfocado a la C/ Colón, sólo una pequeña rectangular.</p>
<p>92 / Uno: tipo B3</p>		<p>Detalle semáforo tipo B3 situado en la esquina inferior (croquis).</p>
<p>93 / Uno: tipo B3</p>		<p>Detalle tipo B3, de espaldas. Misma esquina de la imagen anterior.</p>
<p>94 / Dos: uno tipo B3, el otro tipo B2</p>		<p>Esquina derecha (croquis).</p> <p>Dos semáforos: uno B3, el otro B2, a la izquierda de la imagen, con señal circular acoplada.</p>

<p>95 / Dos: uno tipo A, otro tipo B2</p>		<p>Esquina superior del croquis.</p> <p>Dos semáforos: uno alto, otro bajo tipo B2.</p> <p>Ambos con señales circulares.</p>
---	---	--

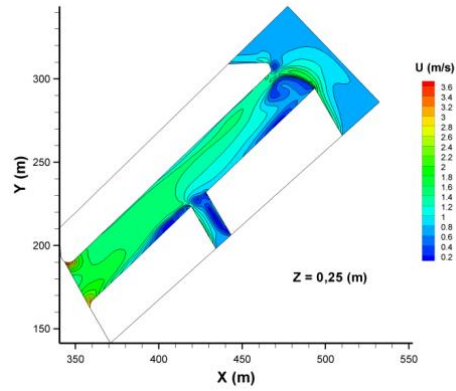
Tabla 82: Tabla con la descripción de las señales luminosas en el cruce C/ Colón con C/Ruzafa

<i>Croquis de campo.</i>	<i>Vista aérea.</i>	
		
<p><u>Descripción general:</u> Se trata de un cruce con 2 pasos de peatones y regulado por 4 semáforos, dos altos y dos bajos. Los bajos, ambos B3.</p>		
<i>Nº fot. / Tipo</i>	<i>Imagen</i>	<i>Descripción</i>
<p>96 / Uno: tipo B3</p>		<p>Detalle del semáforo bajo tipo B3, enfocado a los peatones para el cruce de la C/ Colón. Situado junto al edificio de la Tesorería de la Seguridad Social.</p>

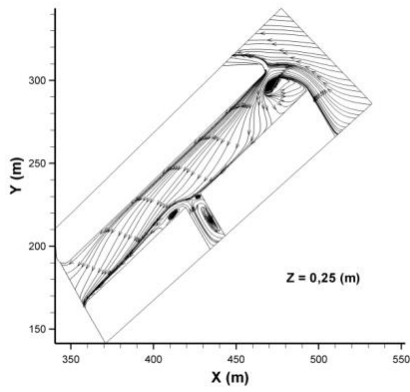
<p>97 / Dos: Uno A, otro B2</p>		<p>Paso de peatones de la c/ Ruzafa. (Parte inferior del croquis.).</p> <p>Dos semáforos, uno alto, enfocado a la C/ Ruzafa, otro enfrente, bajo.</p>
<p>98 / Uno: A</p>		<p>Semáforo alto, enfocado a la C/ Colón.</p>
<p>99 / Detalle</p>		<p>Detalle semáforo alto del paso de peatones de la C/ Ruzafa (imagen 97). Se observa la presencia de señales circulares acopladas y cámara de grabación para el seguimiento de la intensidad del tráfico.</p>

ANEXO III

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

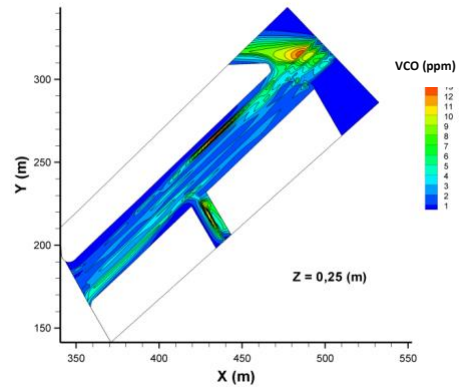
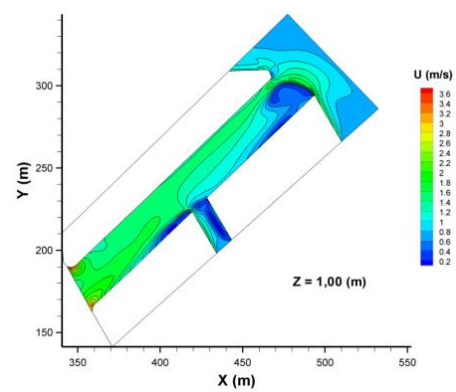


Figura 171: Simulación caso cv1: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente

Contornos de concentración de VCO

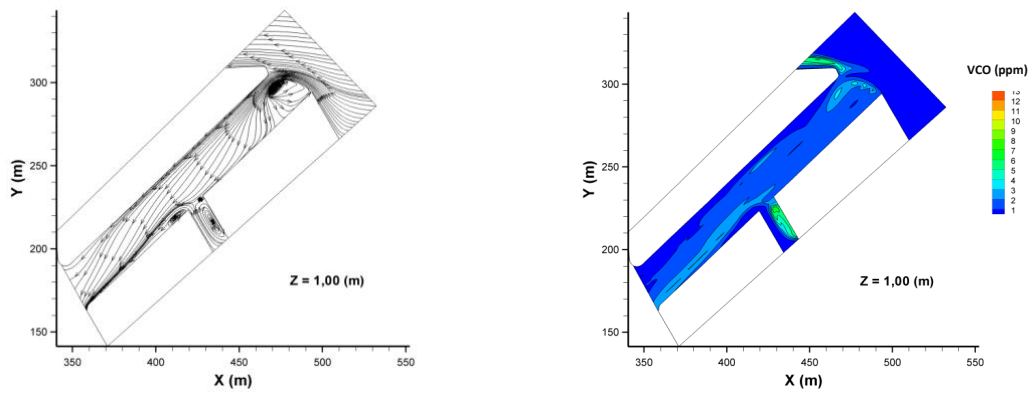


Figura 172: Simulación caso cv1: sección $z=1,00\text{m}$

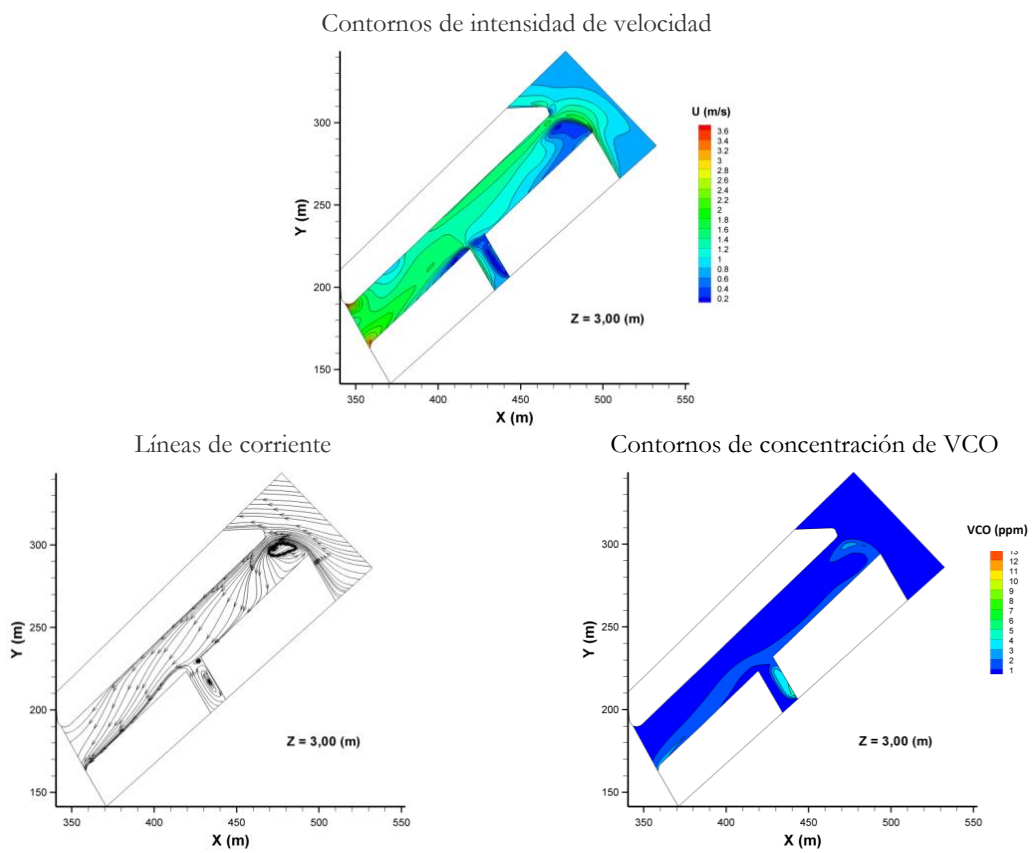
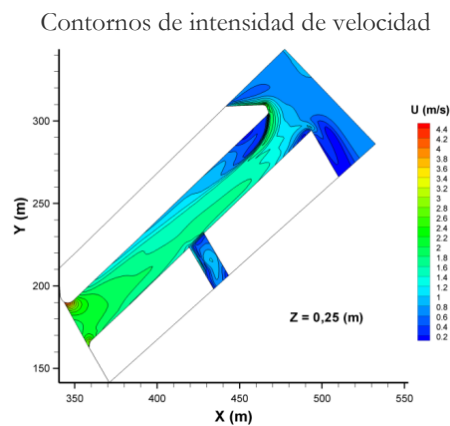


Figura 173: Simulación caso cv1: sección $z=3,00\text{m}$



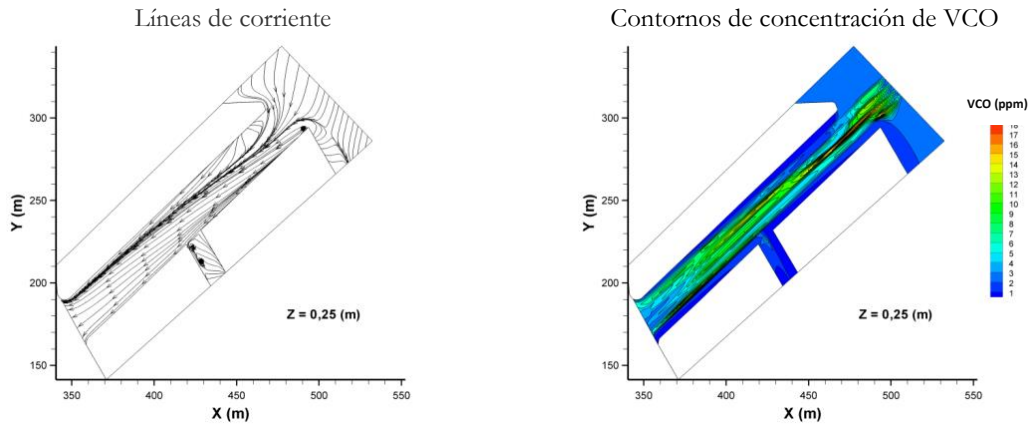


Figura 174: Simulación caso cv2: sección $z=0,25$ m

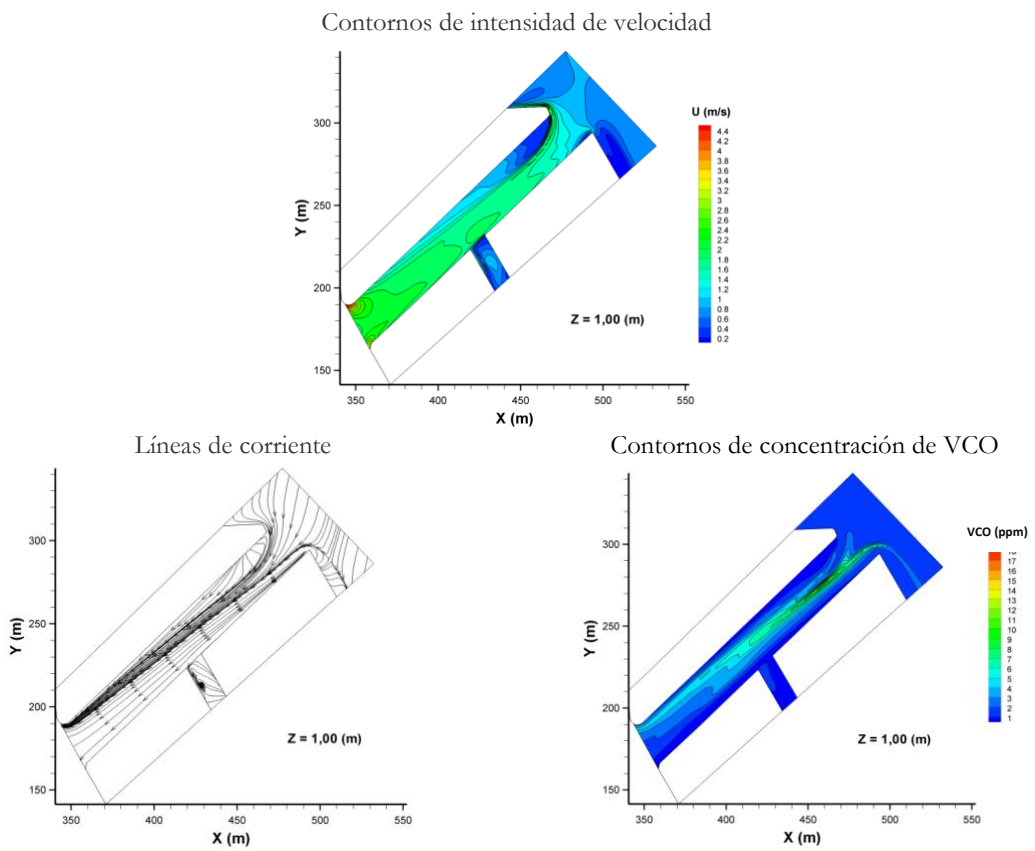
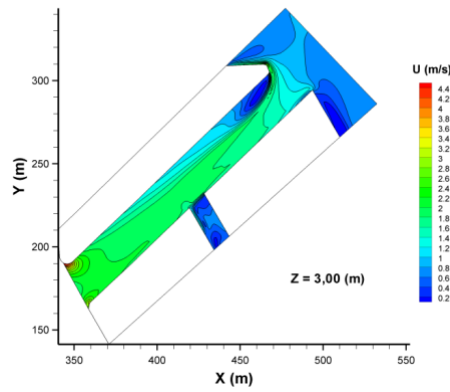
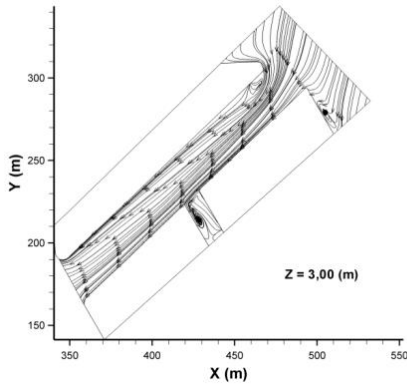


Figura 175: Simulación caso cv2: sección $z=1,00$ m

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

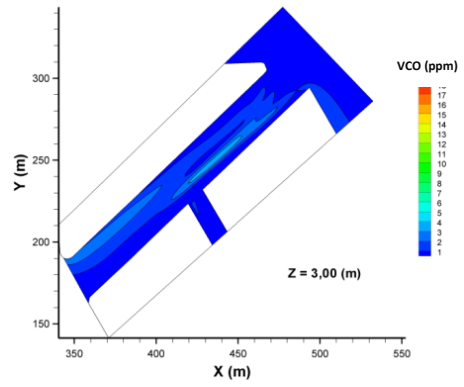
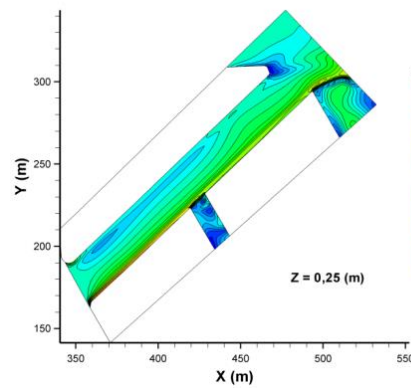
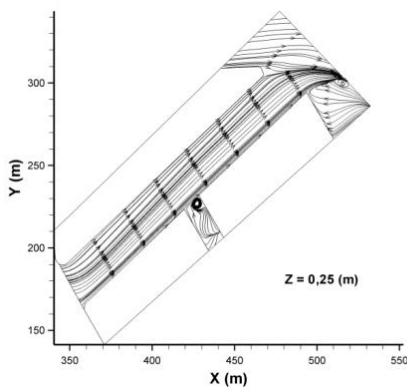


Figura 176: Simulación caso cv2: sección $z=3,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

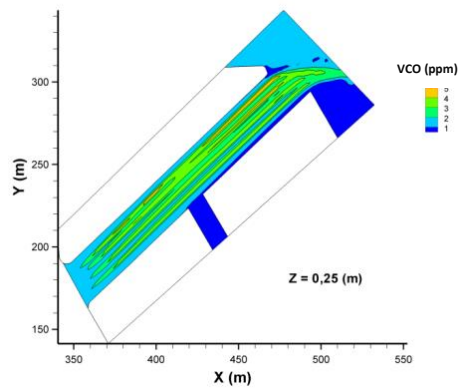
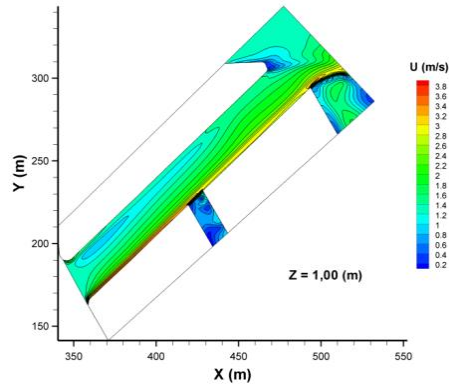
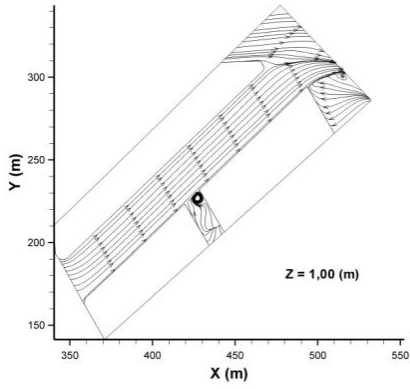


Figura 177: Simulación caso cv3: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

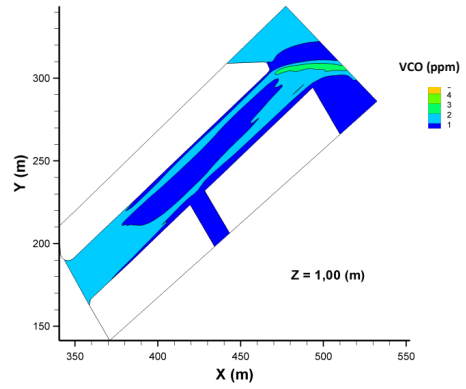
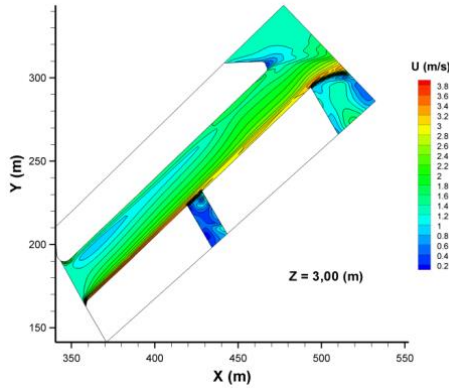
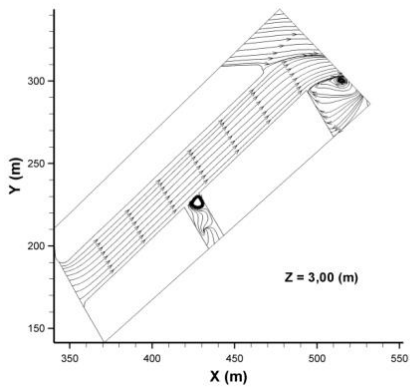


Figura 178: Simulación caso cv3: sección $z=1,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

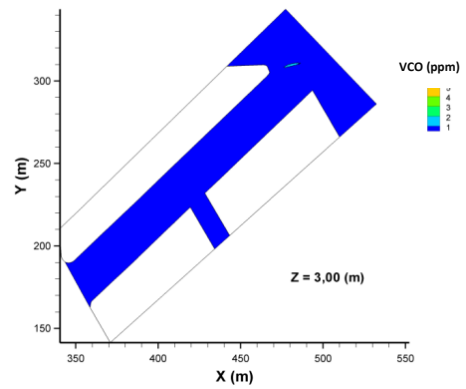
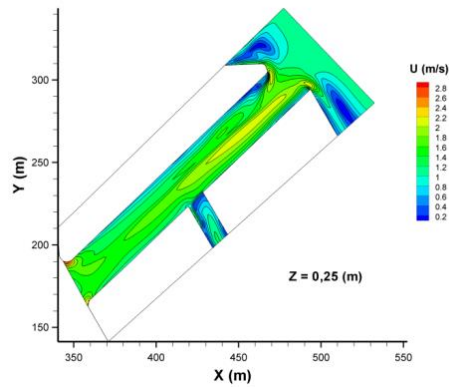
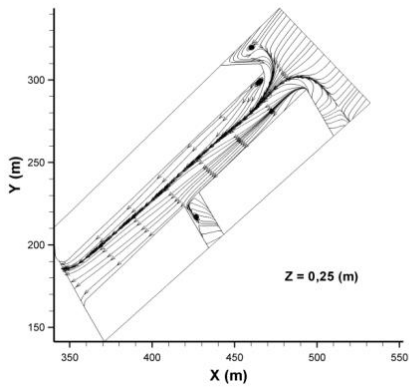


Figura 179: Simulación caso cv3: sección $z=3,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

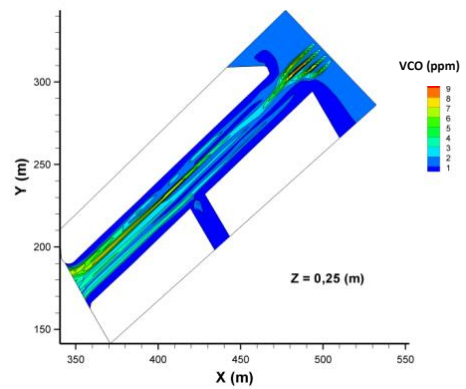
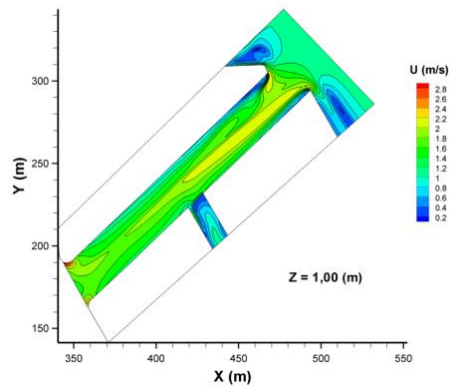
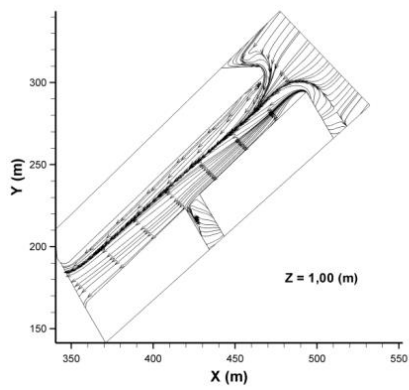


Figura 180: Simulación caso cv4: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

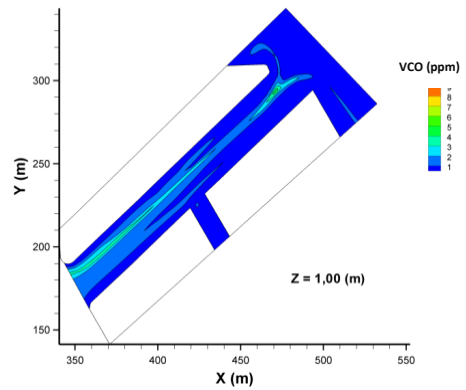
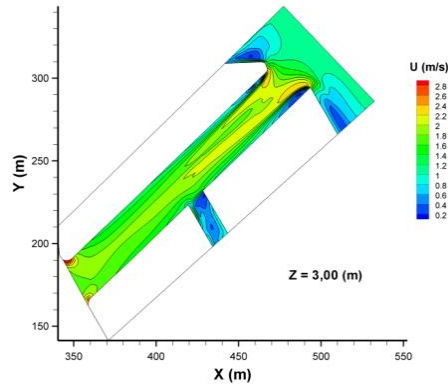
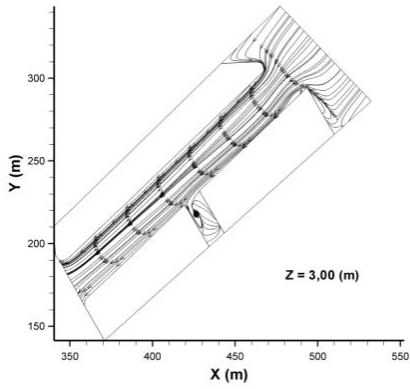


Figura 181: Simulación caso cv4: sección $z=1,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

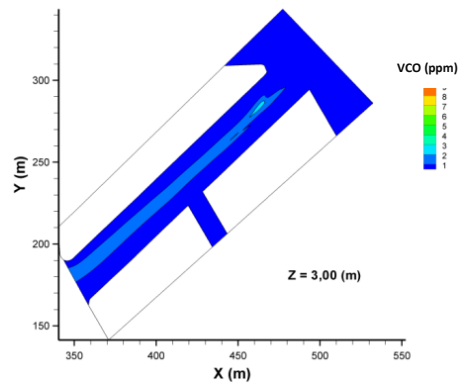
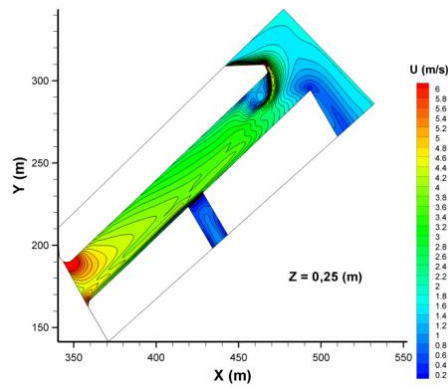
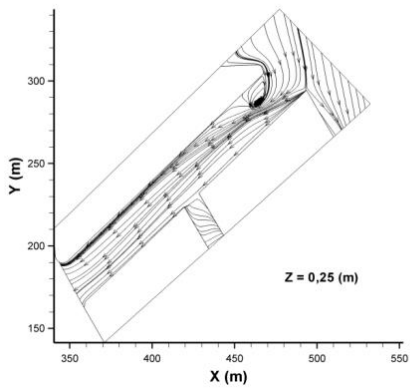


Figura 182: Simulación caso cv4: sección $z=3,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

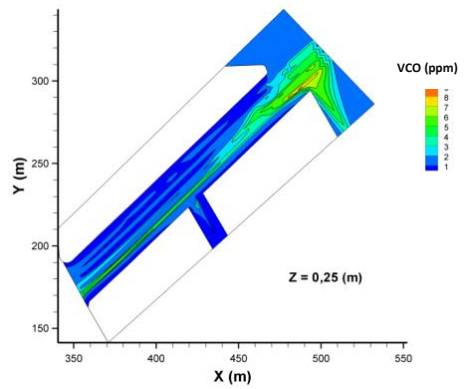
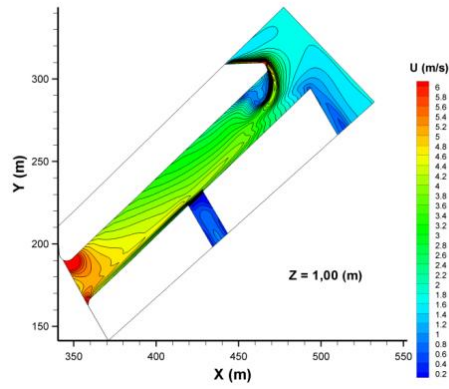
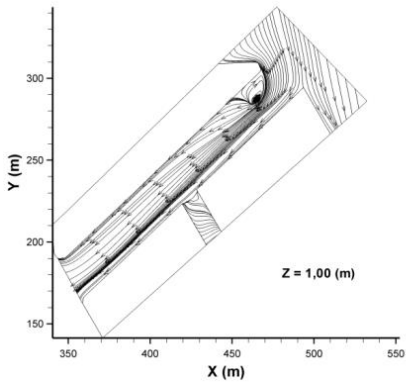


Figura 183: Simulación caso cv5: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

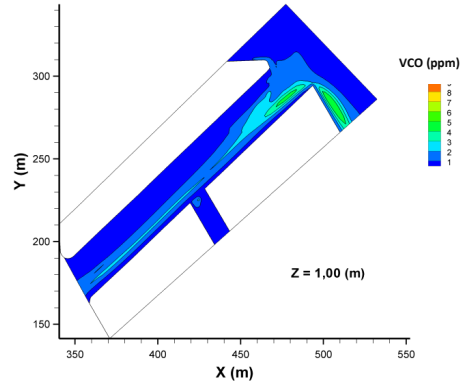
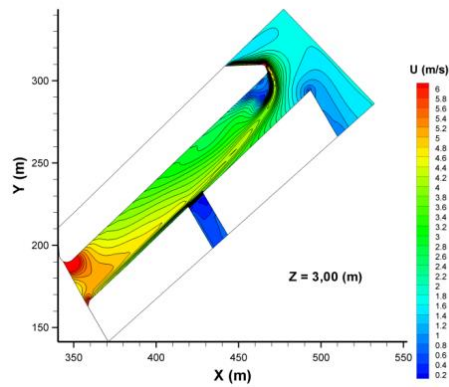
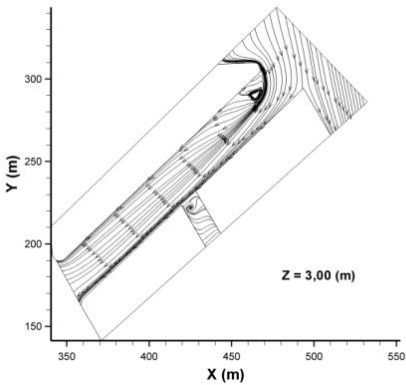


Figura 184: Simulación caso cv5: sección $z=1,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

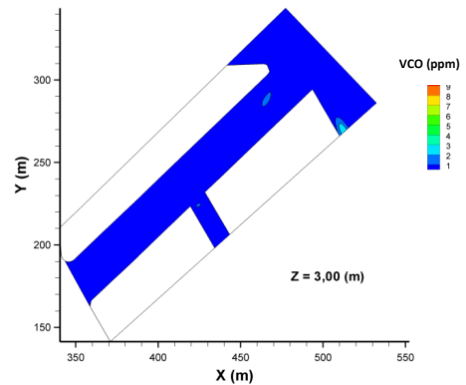
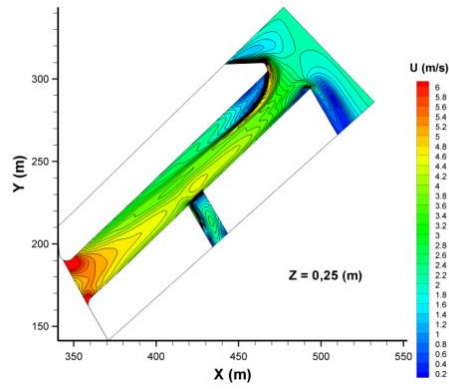
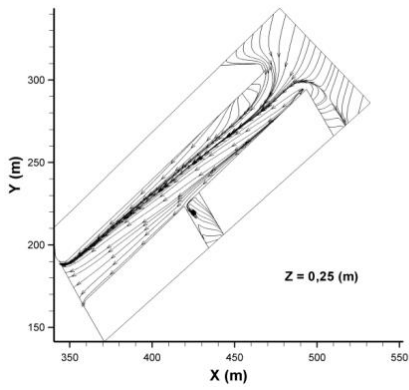


Figura 185: Simulación caso cv5: sección $z=3,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

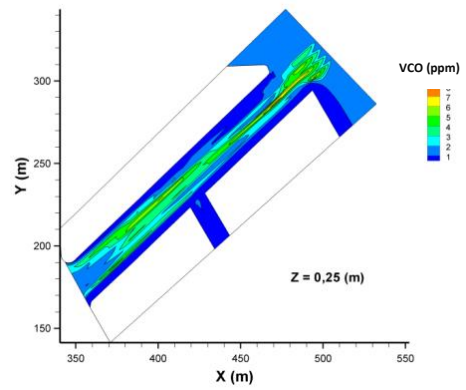
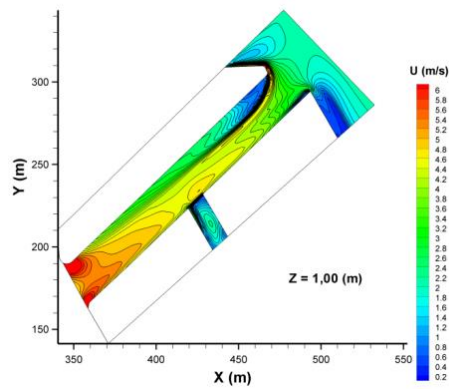
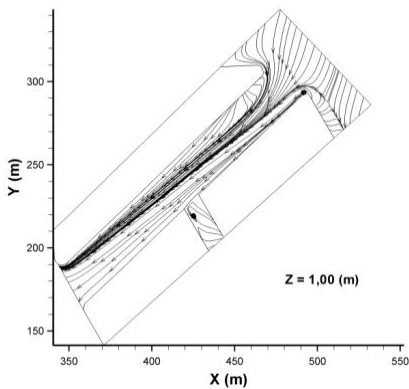


Figura 186: Simulación caso cv6: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

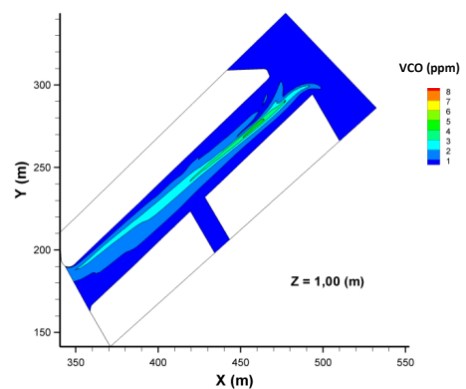
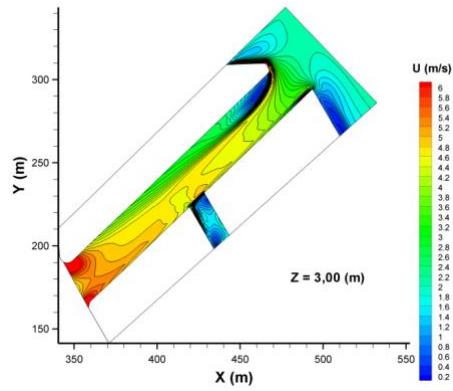
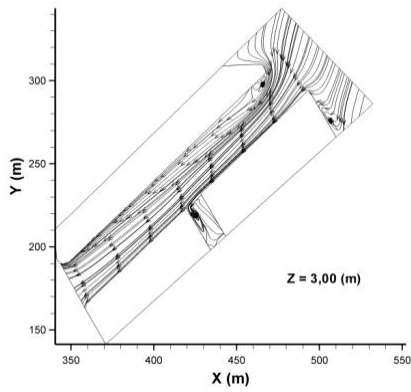


Figura 187: Simulación caso cv6: sección $z=1,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

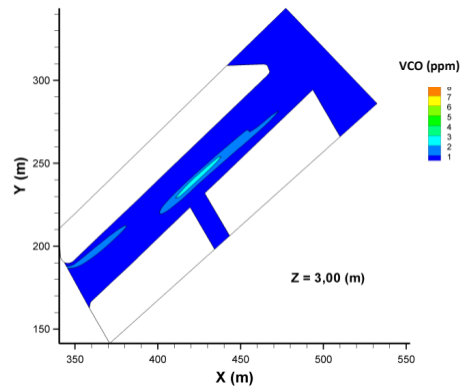
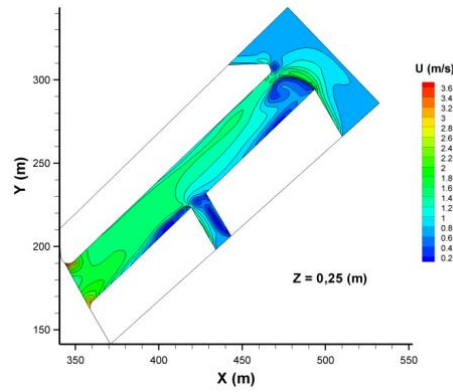
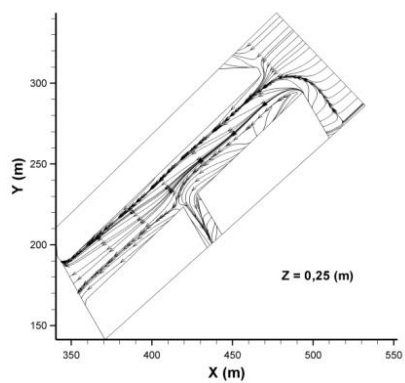


Figura 188: Simulación caso cv6: sección $z=3,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

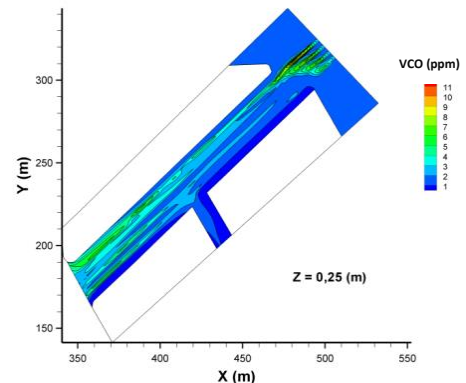
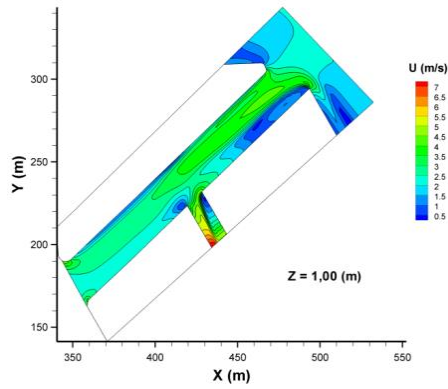
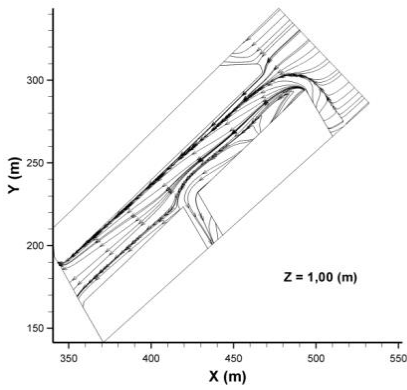


Figura 189: Simulación caso hv11: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

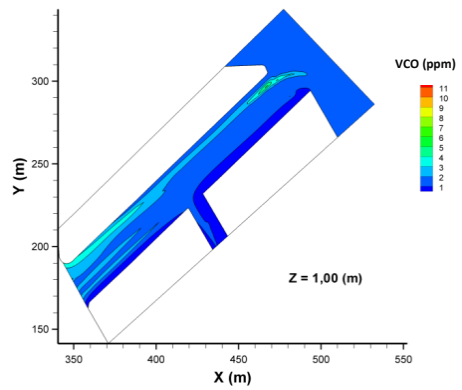
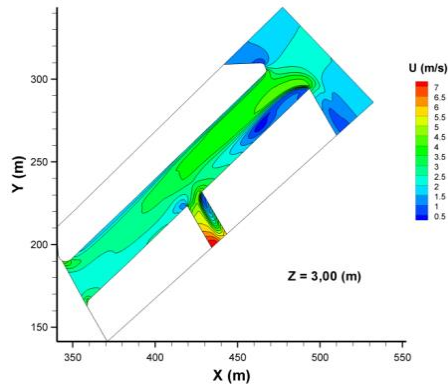
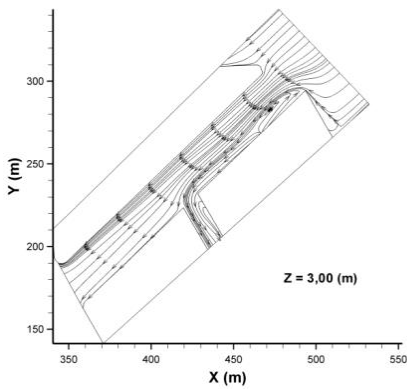


Figura 190: Simulación caso bv11: sección $z=1,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

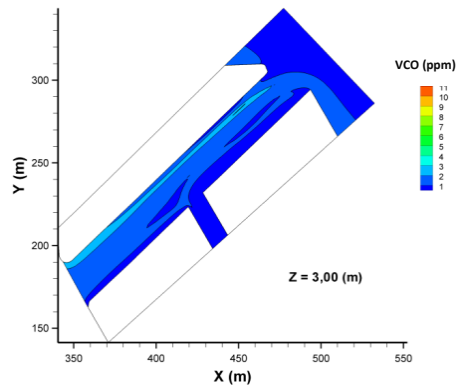
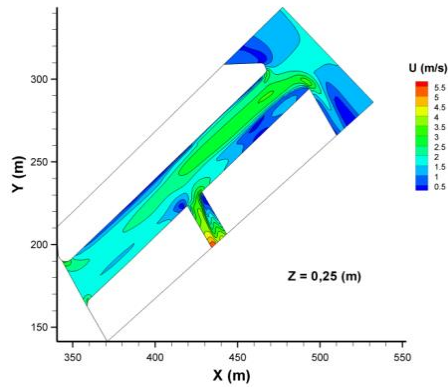
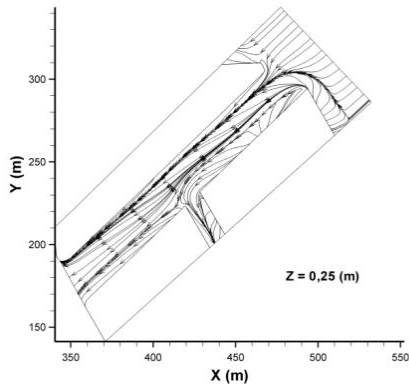


Figura 191: Simulación caso bv11: sección $z=3,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

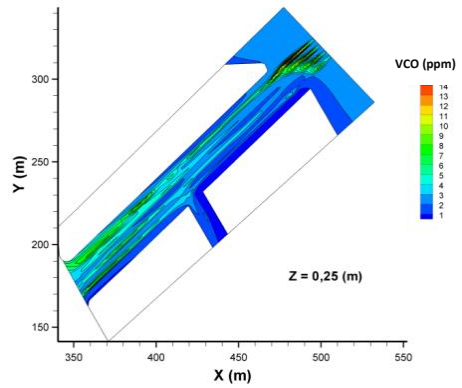
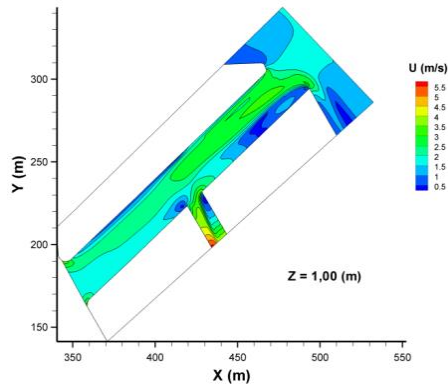
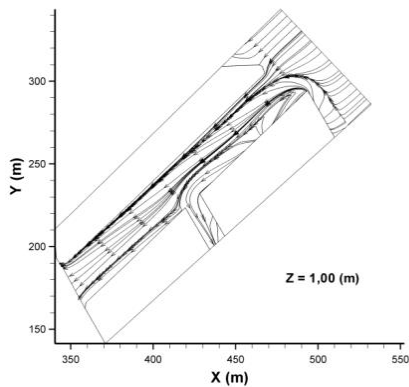


Figura 192: Simulación caso bv21: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

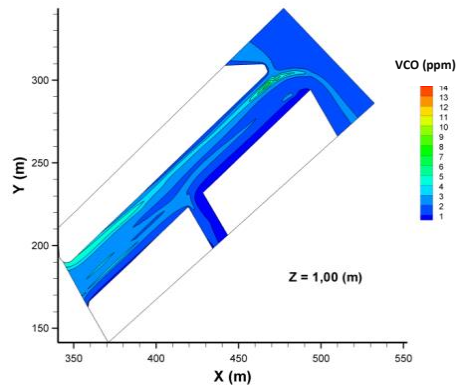
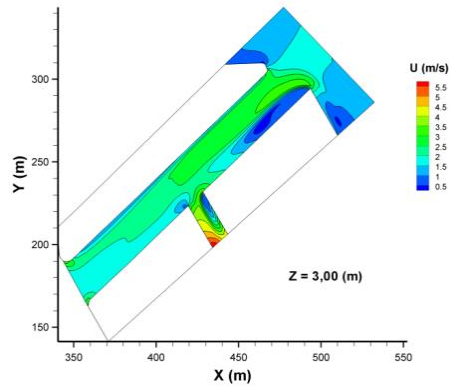
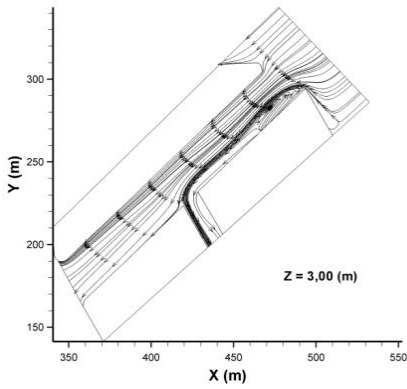


Figura 193: Simulación caso bv21: sección $z=1,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

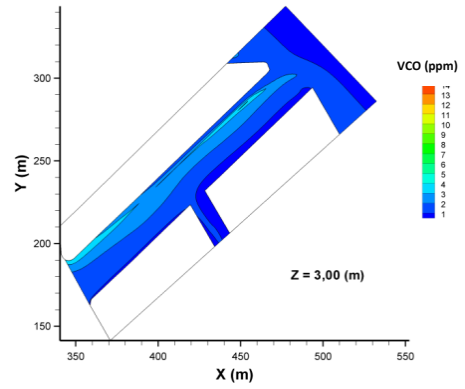
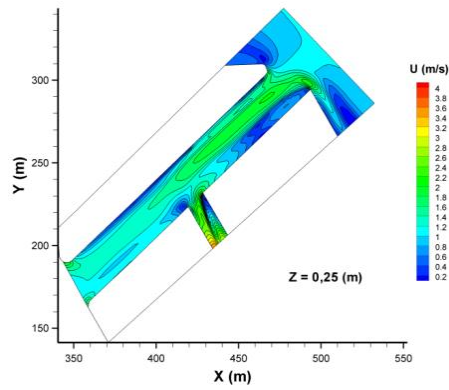
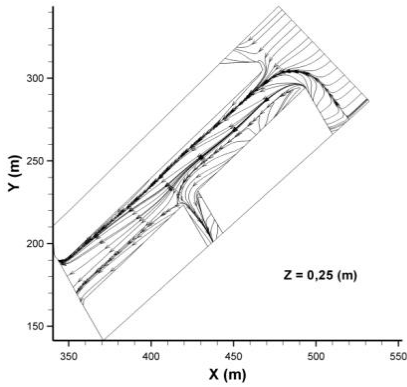


Figura 194: Simulación caso hv21: sección $z=3,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

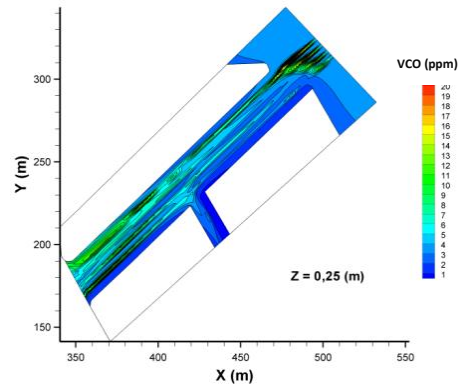
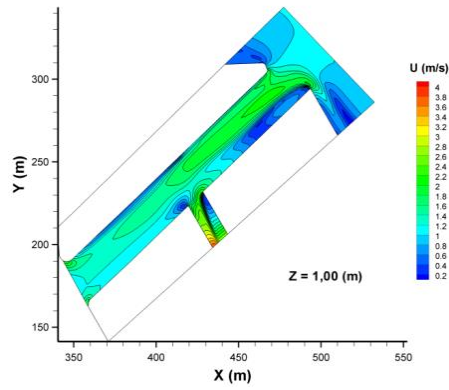
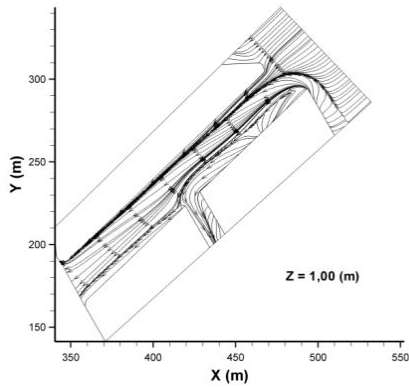


Figura 195: Simulación caso hv31: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

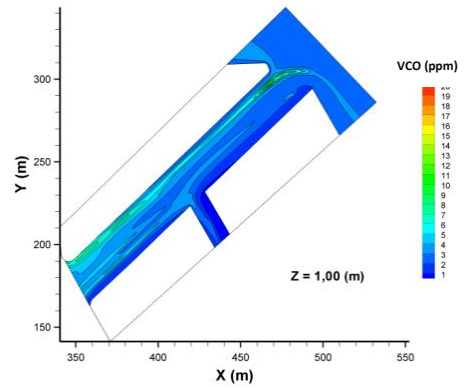
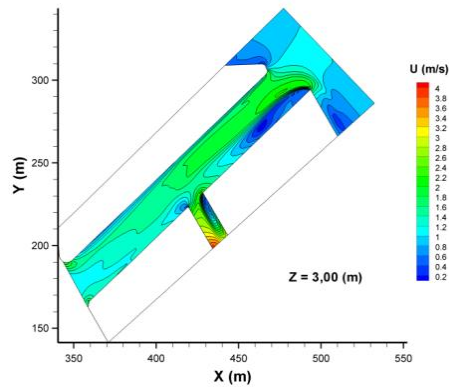
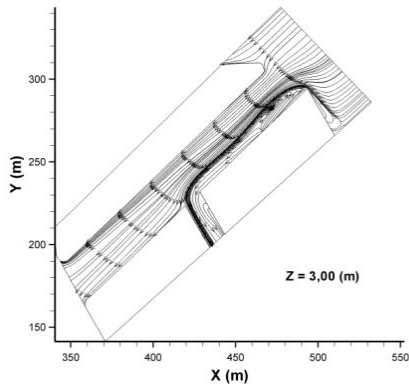


Figura 196: Simulación caso hv31: sección $z=1,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

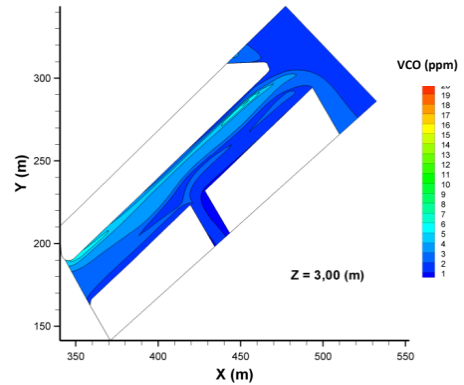
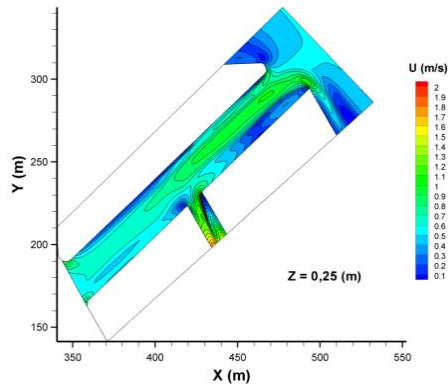
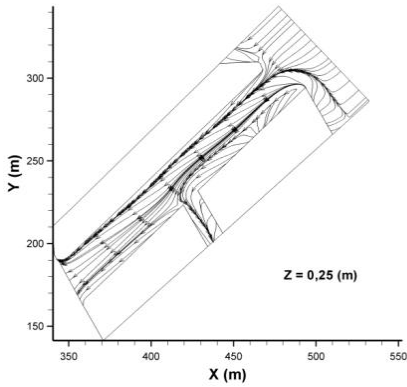


Figura 197: Simulación caso hv31: sección $z=3,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

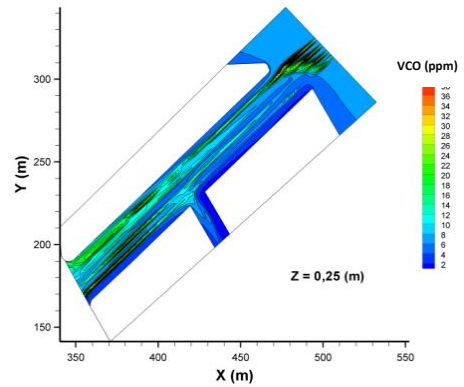
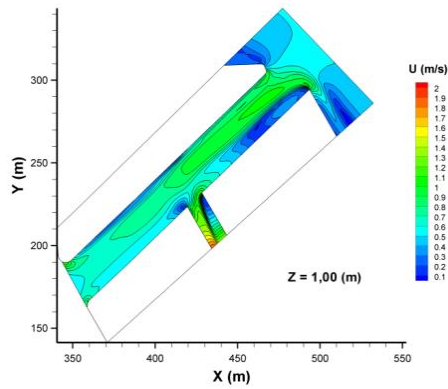
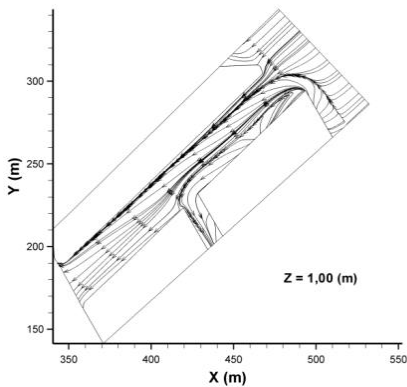


Figura 198: Simulación caso bv41: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

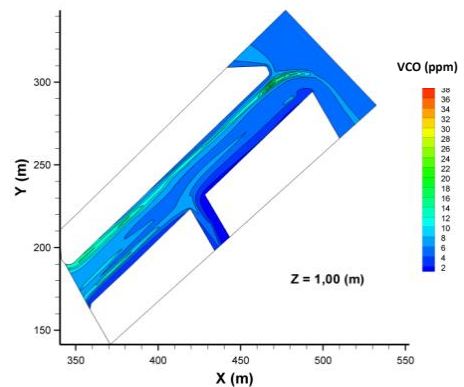
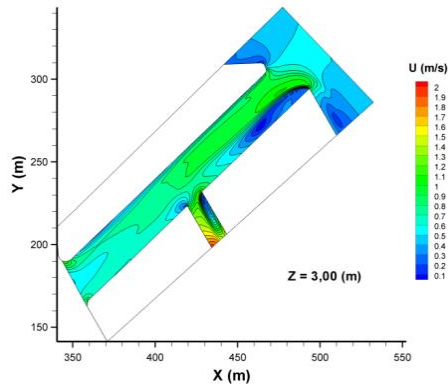
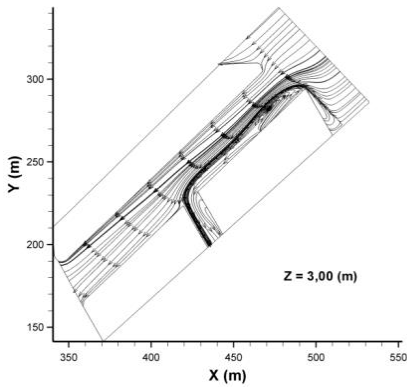


Figura 199: Simulación caso bv41: sección $z=1,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

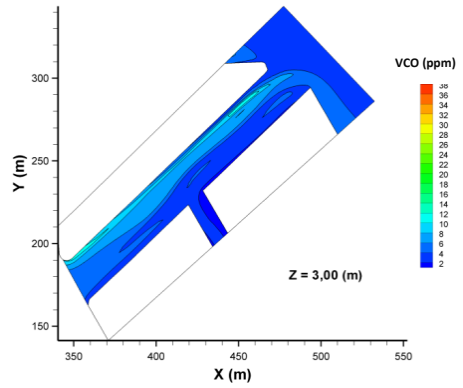
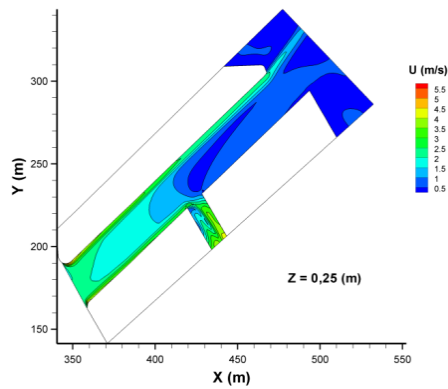
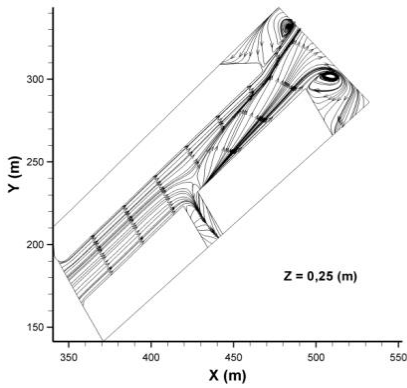


Figura 200: Simulación caso bv41: sección $z=3,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

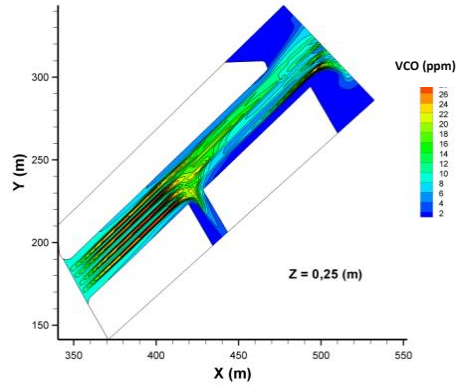
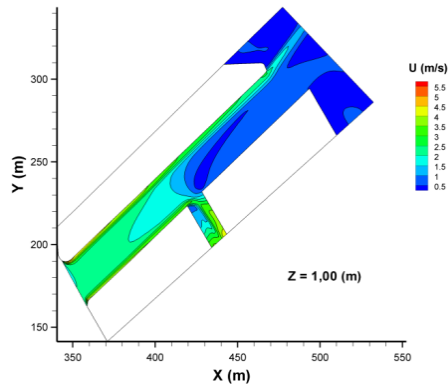
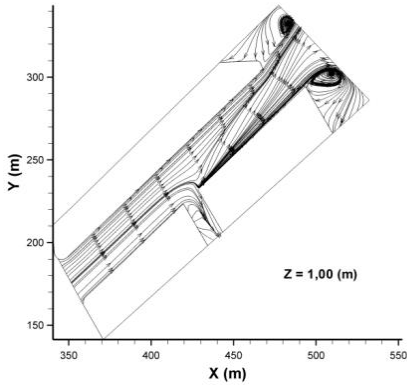


Figura 201: Simulación caso bv12: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

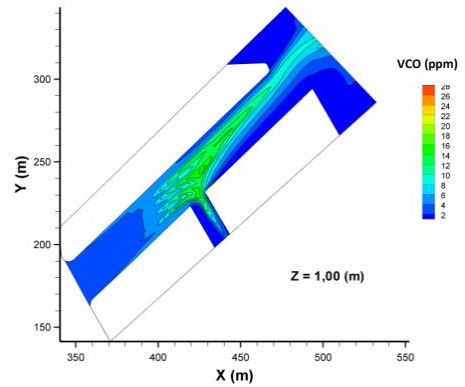
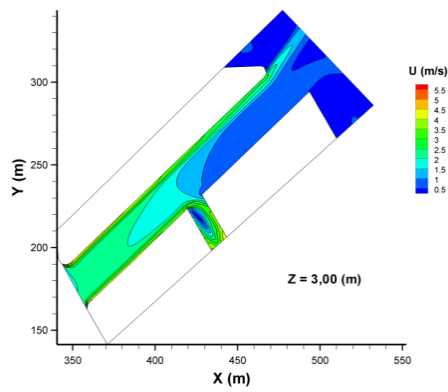
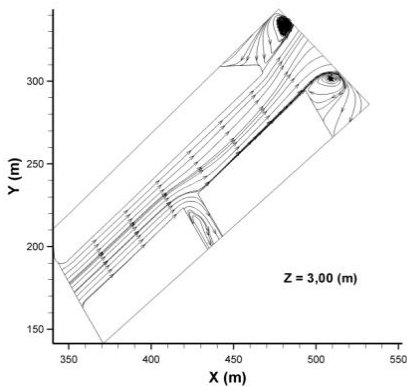


Figura 202: Simulación caso hv12: sección $z=1,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

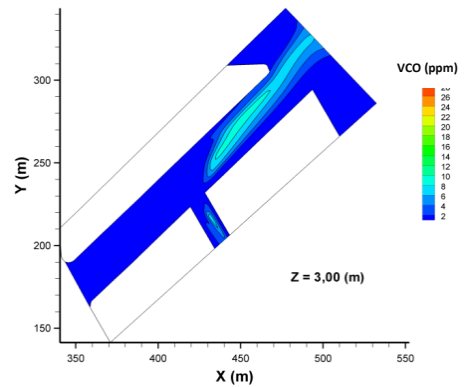
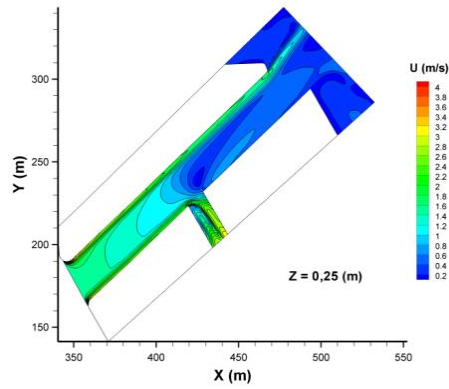
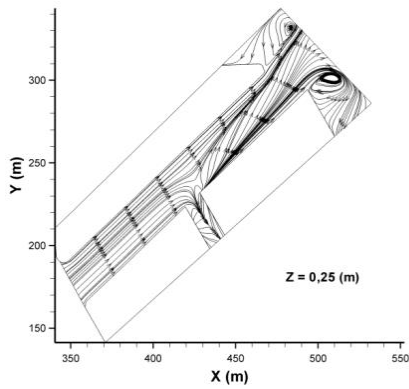


Figura 203: Simulación caso hv12: sección $z=3,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

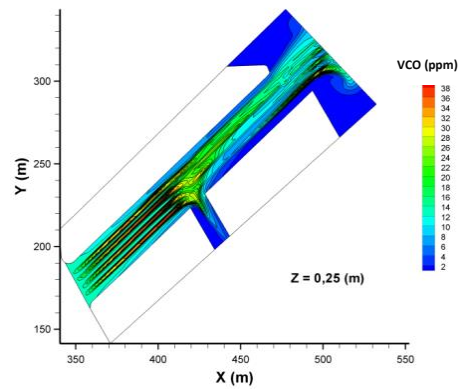
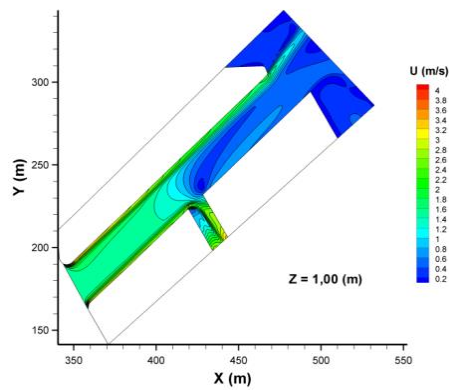
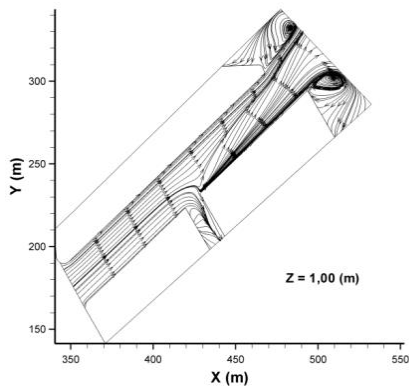


Figura 204: Simulación caso hv22: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

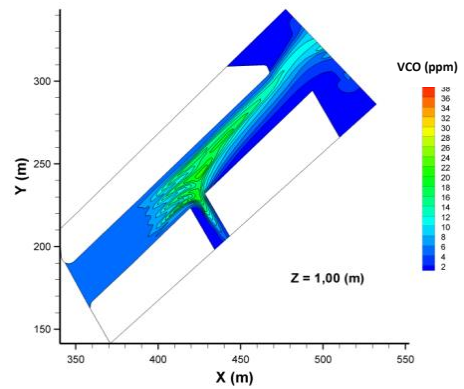
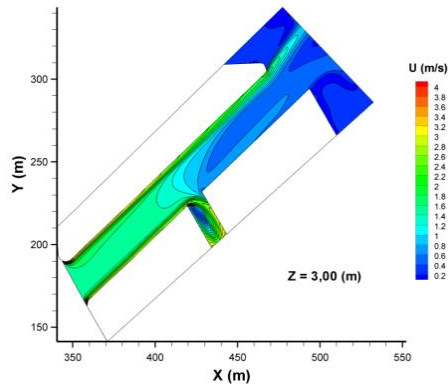
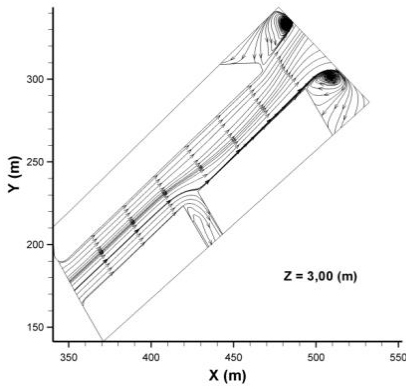


Figura 205: Simulación caso hv22: sección $z=1,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

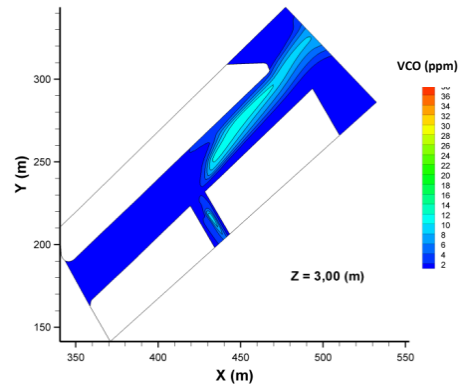
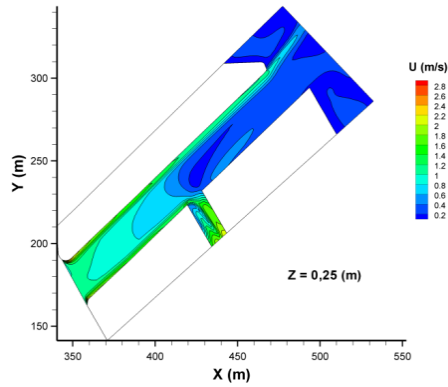
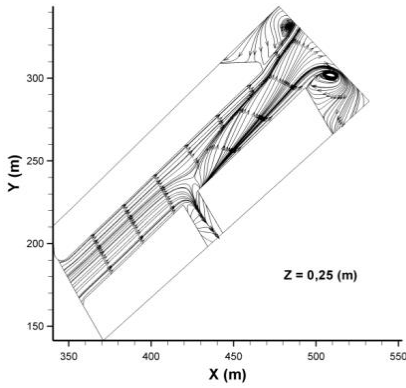


Figura 206: Simulación caso hv22: sección $z=3,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

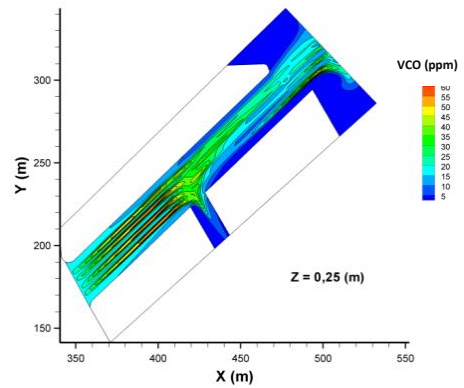
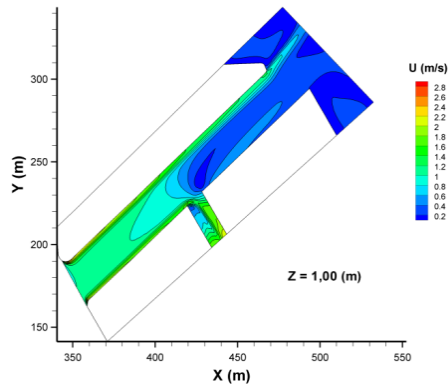
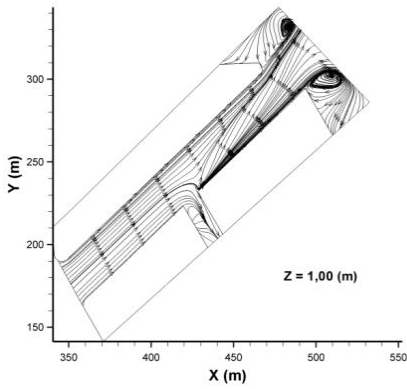


Figura 207: Simulación caso hv32: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

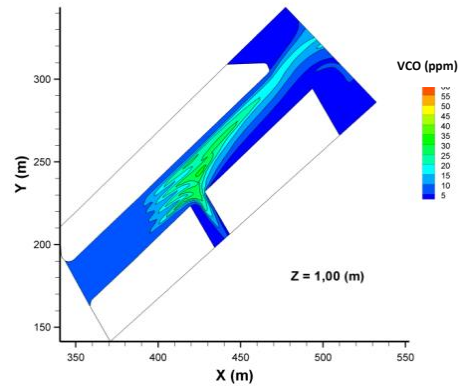
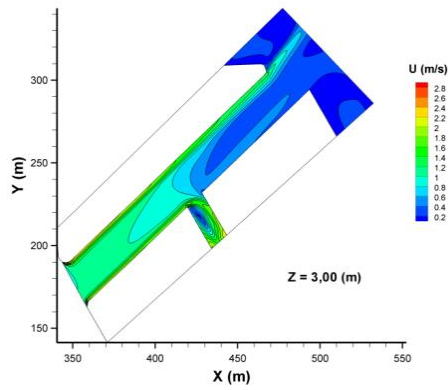
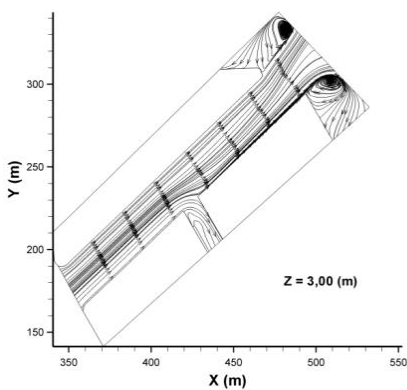


Figura 208: Simulación caso hv32: sección $z=1,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

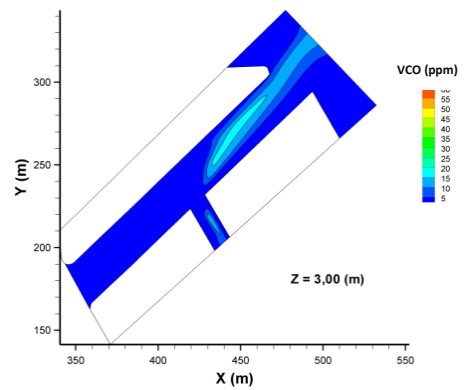
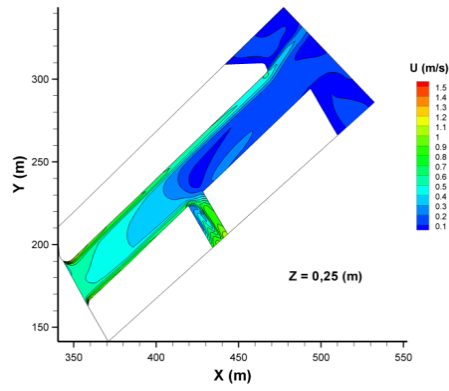
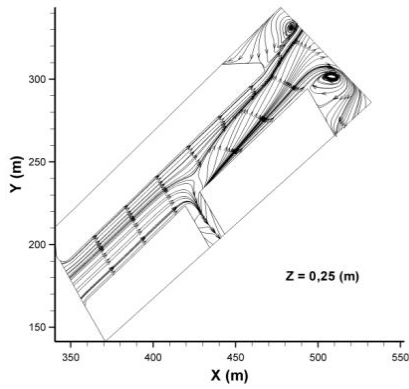


Figura 209: Simulación caso hv32: sección $z=3,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

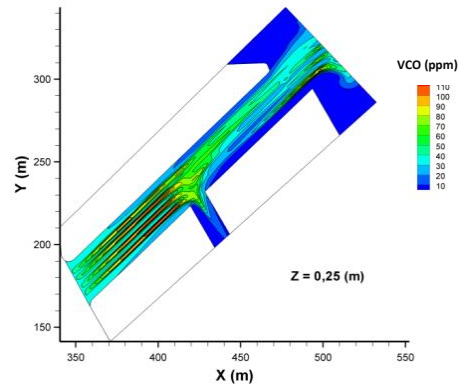
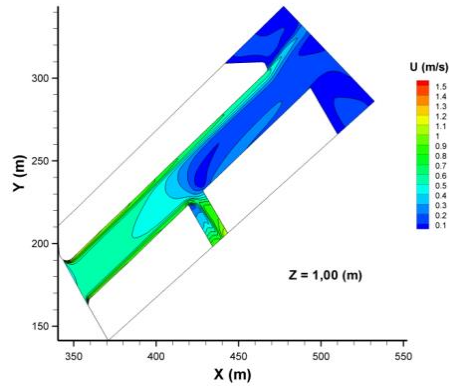
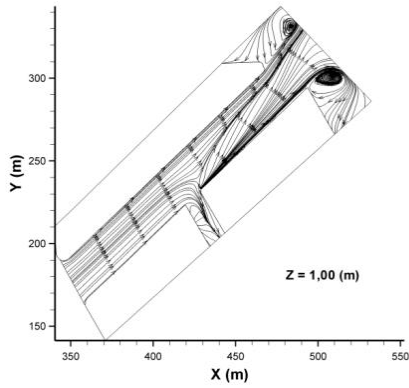


Figura 210: Simulación caso hv42: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

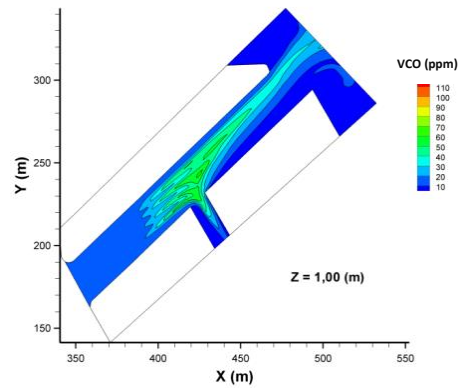
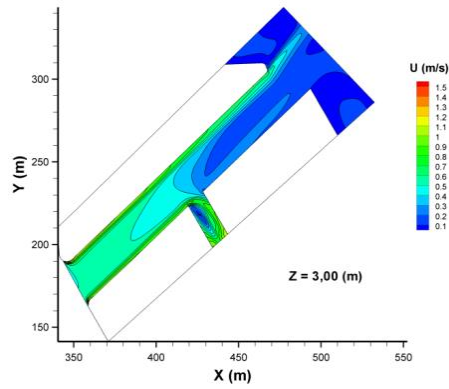
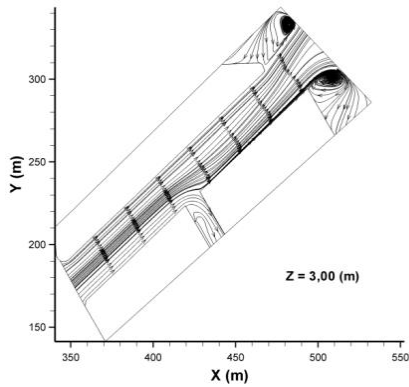


Figura 211: Simulación caso hv42: sección $z=1,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

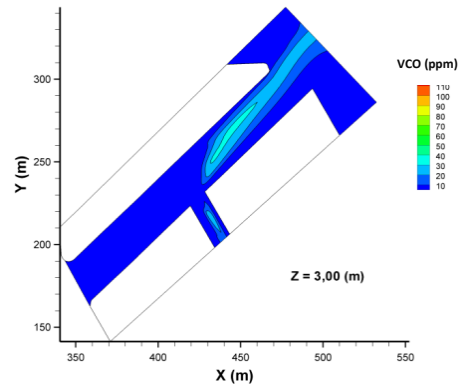
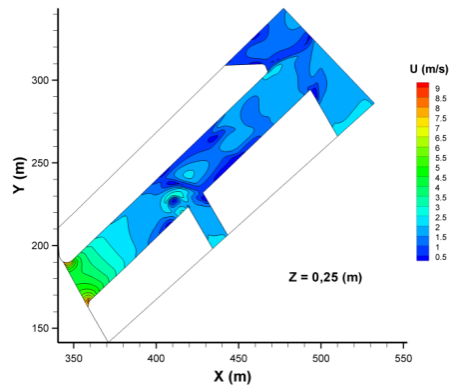
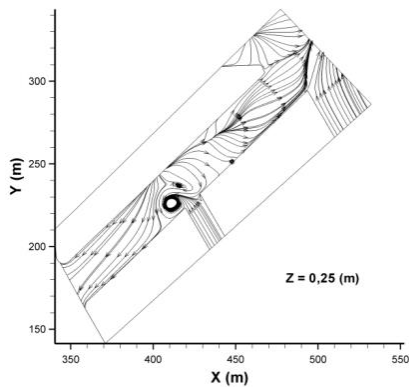


Figura 212: Simulación caso hv42: sección $z=3,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

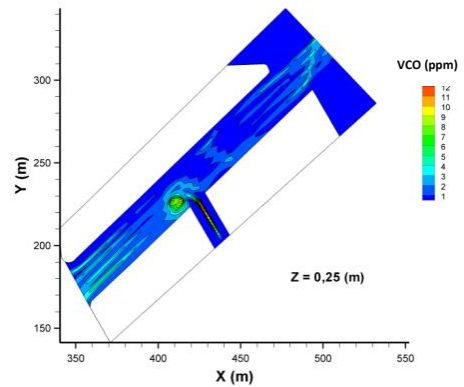
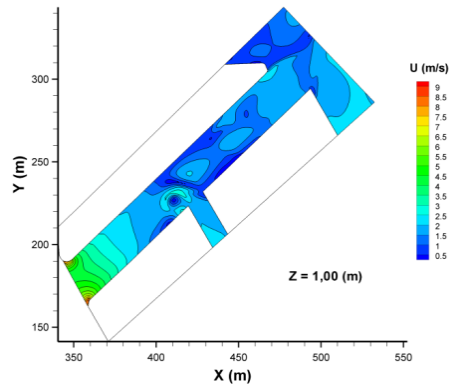
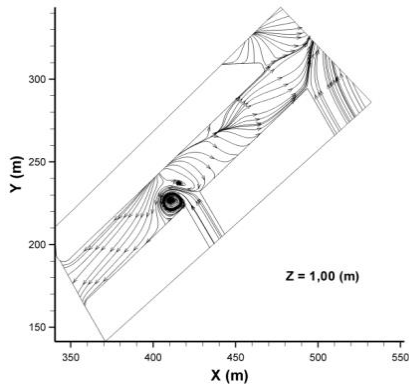


Figura 213: Simulación caso hv13: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

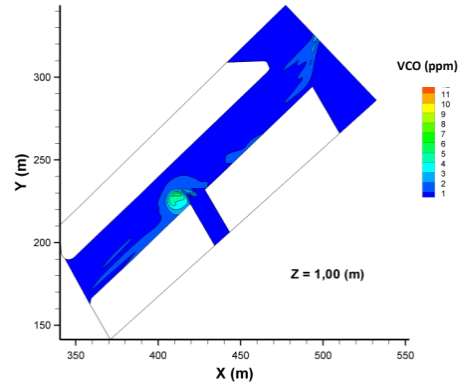
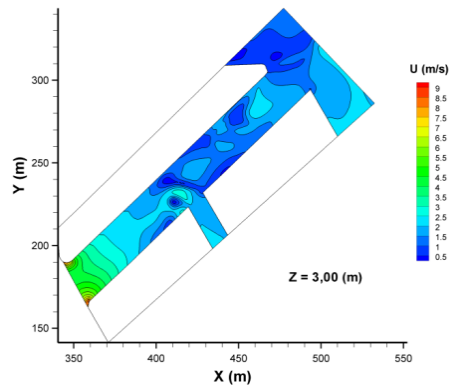
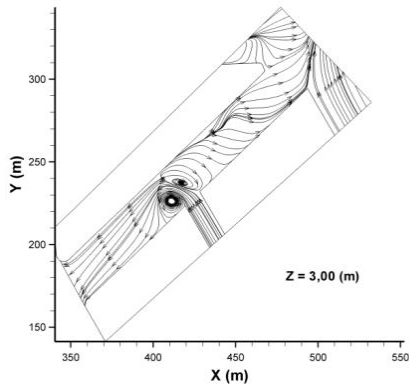


Figura 214: Simulación caso hv13: sección $z=1,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

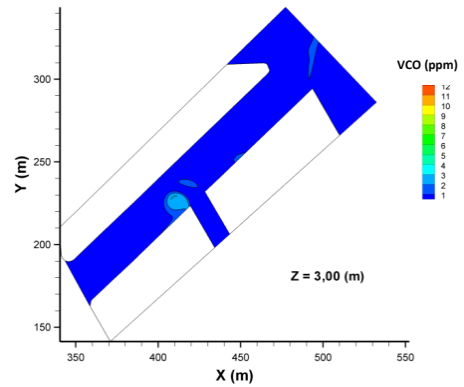
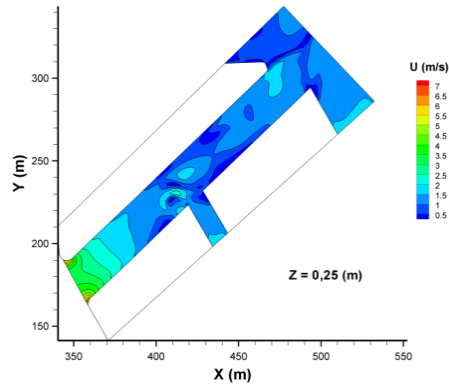
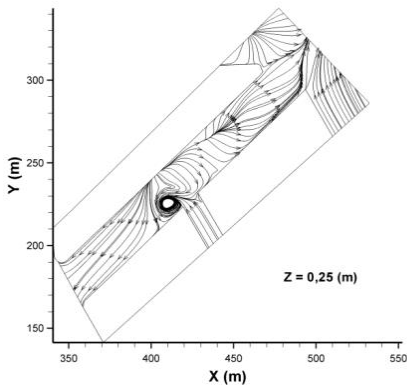


Figura 215: Simulación caso hv13: sección $z=3,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

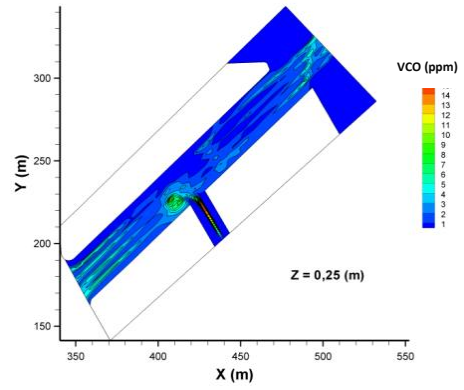
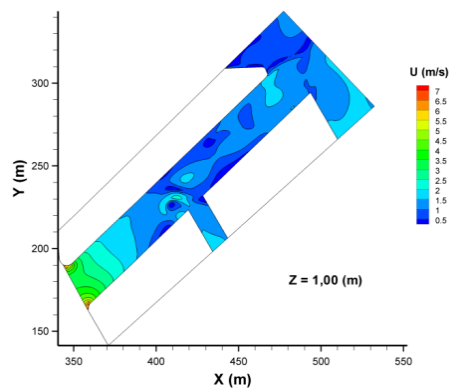
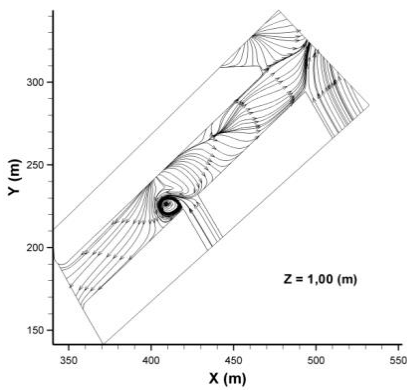


Figura 216: Simulación caso hv23: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

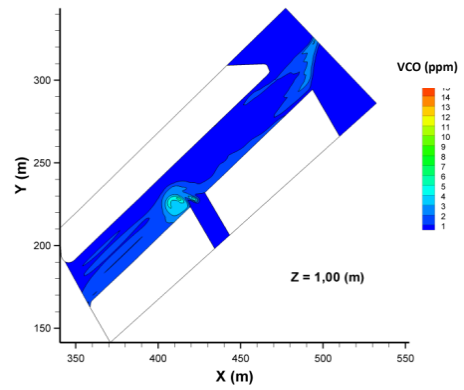
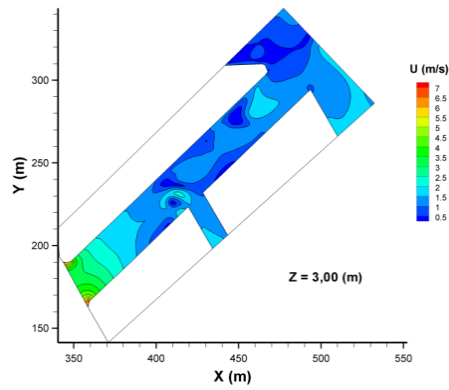
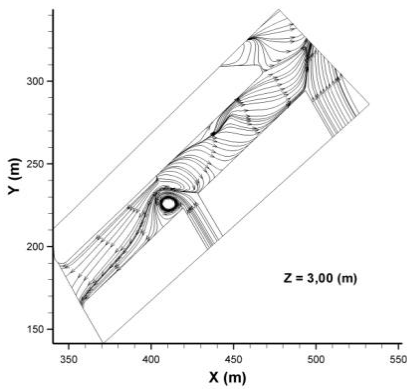


Figura 217: Simulación caso hv23: sección $z=1,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

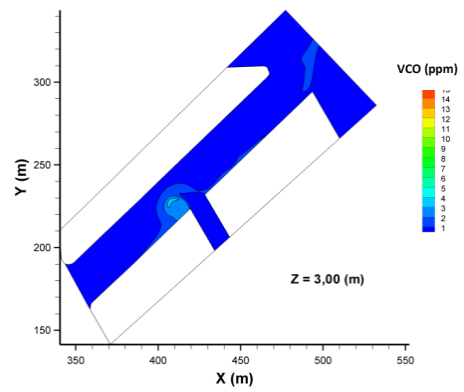
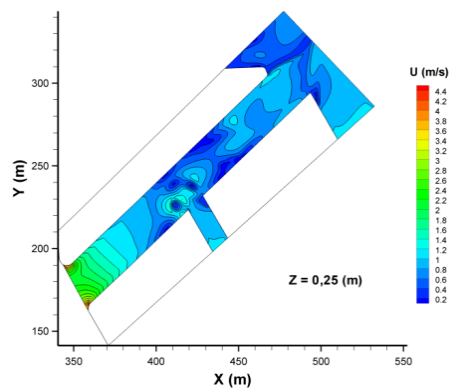
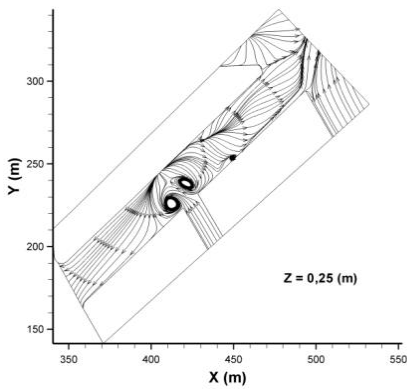


Figura 218: Simulación caso hv23: sección $z=3,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

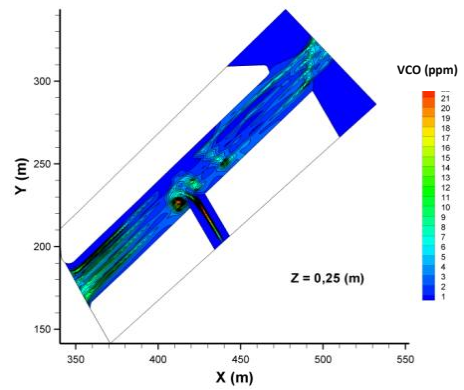
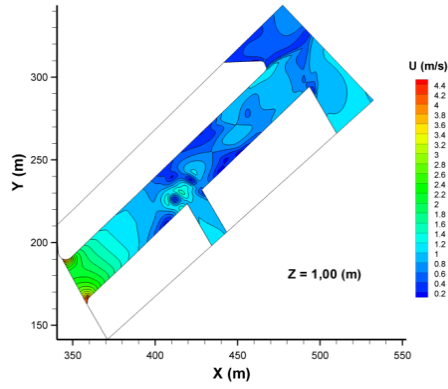
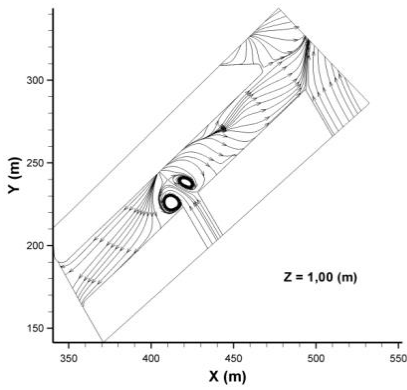


Figura 219: Simulación caso hv33: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

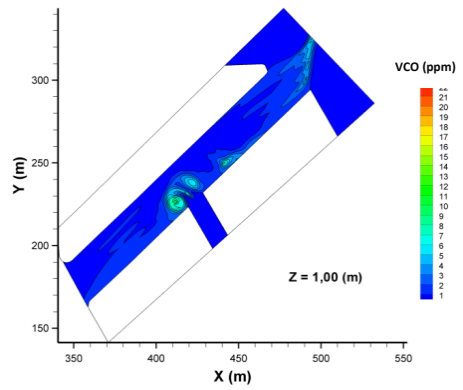
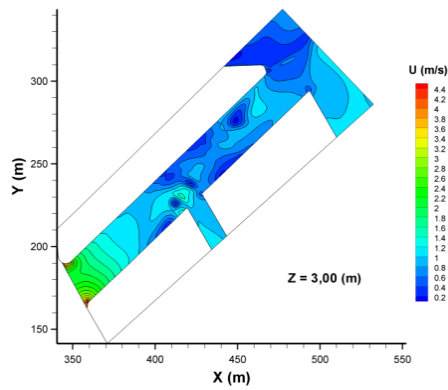
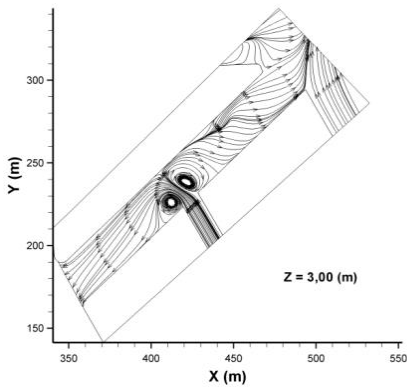


Figura 220: Simulación caso hv33: sección $z=1,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

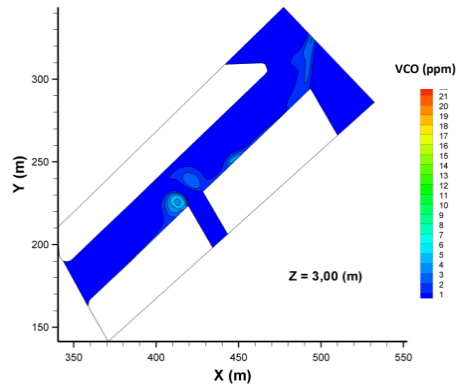
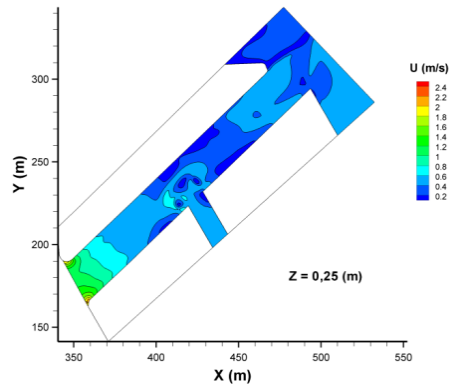
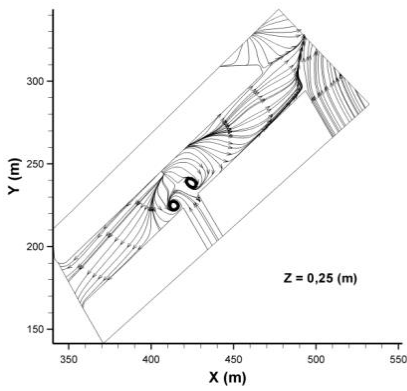


Figura 221: Simulación caso hv33: sección $z=3,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

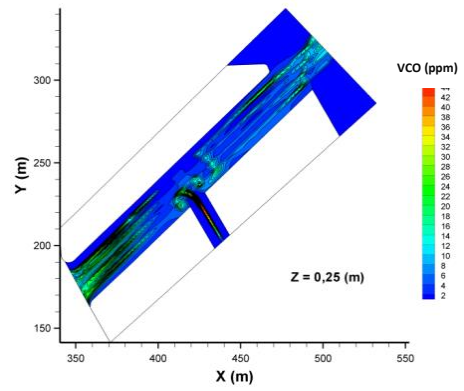
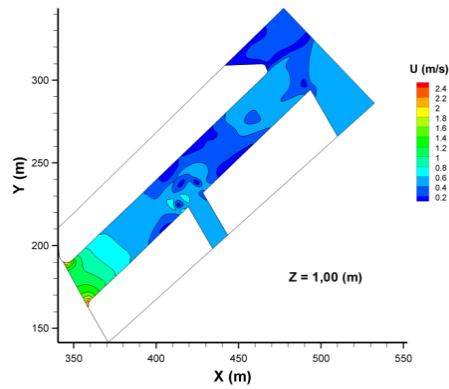
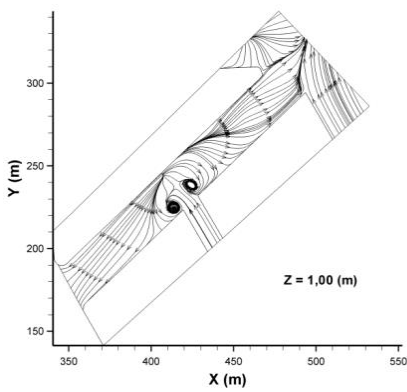


Figura 222: Simulación caso hv43: sección $z=0,25m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

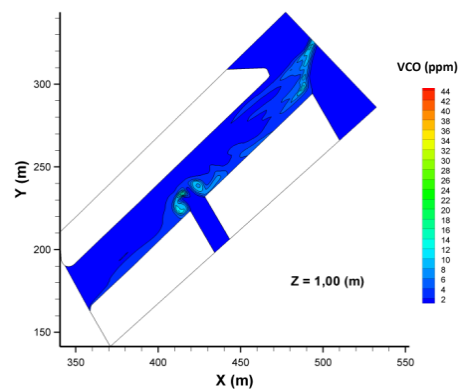
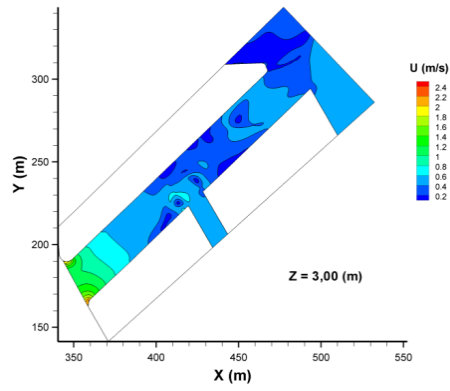
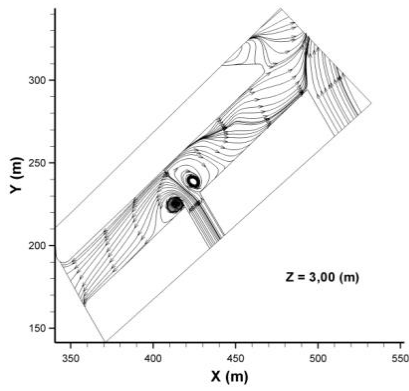


Figura 223: Simulación caso hv43: sección $z=1,00m$

Contornos de intensidad de velocidad



Líneas de corriente



Contornos de concentración de VCO

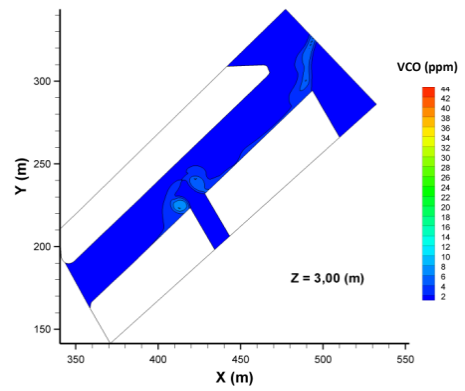


Figura 224: Simulación caso bv43: sección $z=3,00m$