

DOCUMENTO DE TRABAJO

Teledetección y Sensores Ambientales

COMITÉ TÉCNICO CT-56



CONAMA 2020
CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

RESUMEN DE CONTENIDO

En teledetección, se tratará del uso combinado de drones y redes celulares para previsión de catástrofes naturales, del posible efecto en la atmósfera de la alteración brusca en las fuentes antropogénicas de algunos tipos de aerosoles y gases traza por la pandemia COVID-19 y de las tecnologías de observación de La Tierra desde el espacio, que facilitan un mayor conocimiento de los recursos de nuestro planeta y su medio ambiente.

En el apartado GIS, se describe una propuesta de la Universidad Charles Darwin (Australia) enfocada a mejorar la eficiencia en el consumo de recursos hídricos y que ha sido probada por el Ministerio para la Transición Ecológica en dos zonas piloto: Valladolid-río Duero y Canarias. Otro trabajo plantea el uso de las plataformas WEB-GIS, utilizadas en agricultura de precisión, con el fin de relanzar el sector agrario y tratar de asentar población en entornos rurales.

En otra de las ponencias se aborda la elaboración de proyectos de iluminación basados en el uso de LED que suponen una oportunidad para crear la base tecnológica de conectividad con un importante impacto en la sostenibilidad energética de los núcleos urbanos y creando la capa que dará soporte a otras aplicaciones.

Finalmente, se estudian las características ambientales de las normas de comunicaciones V2X relacionadas con los sensores a bordo de automóviles e Internet de los Vehículos (IoV). Además, se analiza el coche de hidrógeno y la necesidad de verificar sus parámetros de funcionamiento mediante una red de sensores para conseguir un vehículo seguro y fiable.

Edita: Fundación Conama

Año: 2020/21

Autores del presente informe:

José Antonio Delgado Penín

Doctor Ingeniero de Telecomunicación. Catedrático Emérito de la Universidad Politécnica de Cataluña. Grupo de Trabajo de Defensa y Seguridad del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación.

Adolfo Comerón Tejero

Michaël Sicard

Universidad Politécnica de Cataluña

Victoriano Moreno Burgos

Colegio de Oficial de Físicos

Nicanor Prendes Rubiera

Oficina Española del Cambio Climático. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

M^a Carmen Ángel Martínez

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Centro de Estudios Hidrográficos. (CEDEX-CEH). Ministerio de Fomento

Sandra Villacorta Chambí

Charles Darwin University; Northern Territory 0909 Australia

Jorge del Valle Arias

Smart City Solutions and SW Business Development Manager Spain en Itron

Pedro Oñorbe de Torre

Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid (COIIM)

Eduardo Martínez de Rioja del Nido

Universidad Rey Juan Carlos

José Daniel Martínez de Rioja del Nido

Universidad Politécnica de Madrid

José Javier Martínez Vázquez

Coordinador

RESEÑA PROFESIONAL DE LOS MIEMBROS DEL GRUPO.

Adolfo Comerón i Tejero. Ingeniero de Telecomunicación de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Barcelona, doctorado en la Universidad Paris-XI (Orsay, Francia). Catedrático del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Cataluña. Actividad de investigación actual: teledetección atmosférica mediante lidar y comunicaciones ópticas no guiadas.

José Antonio Delgado. Catedrático de Universidad del Área de Sistemas de Telecomunicación de la UPC-Barcelona.TECH durante más de treinta años, en 2013 es nombrado Catedrático Emérito de la UPC-Barcelona.TECH. Ingeniero de Telecomunicación (1968) y Doctor Ingeniero de Telecomunicación (1973) por la E.T.S.I.T. de la Universidad Politécnica de Madrid. Ha realizado estancias en Holanda en Philips Gloenlampen N.V (1967) y durante tres años realizó estudios de postgrado en el Politécnico de Turín (1968-1971). Fue uno de los fundadores de la E.T.S.E.T. de Barcelona. Desde el año 2000 está trabajando en temas relacionados con el uso de la tecnología UAS (Unmanned Aircraft Systems). Ha participado en programas europeos relacionados con el uso de HAPs (UAS para uso civil): Helinet, Capanina y varias Acciones COST sobre este tema. Ha publicado el primer libro en el mundo sobre HAPs (2008), traducido al chino con alguna puesta al día (2014). Es autor de diversas publicaciones sobre estos temas en revistas de ámbito internacional. En el año 2000 fue distinguido con la *IEEE Milenium Medal*.

Victoriano Moreno Burgos. Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid. Más de **40 años** de experiencia desarrollando actividades de Observación de la Tierra desde el Espacio. Ha trabajado en **INTA** y en **INDRA** donde ha desempeñado el cargo de **Director de la Unidad de Negocio de Sistemas de Observación de la Tierra**. Posteriormente, ha sido **Asesor Senior** en **HISDESAT** para temas de Observación de la Tierra dentro de la **Misión del Satélite Español PAZ** en la **Dirección de Desarrollo de Negocio** de dicha empresa.

Michaël Sicard (BE'95, PhD'00) is an Associate Professor at the Department of Signal Theory and Communications from the Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) in Barcelona, Spain. He obtained his PhD degree in the field of "physical methods for remote sensing" at the Service d'Aéronomie from the Institut Pierre-Simon-Laplace in Paris, France. After a short stay in 2001 at the Centre d'Applications et de Recherches en Télédétection from the University of Sherbrooke in Sherbrooke, Canada, he joined the UPC with a European Space Agency external fellowship grant in 2002 and followed on with a Ramón-y-Cajal Spanish contract in 2004. His main research interests are twofold: (i) on a technical point of view, the development of lidar techniques and instruments in all their aspects for aerosol observations, and (ii) the characterization of aerosol properties and of their impact on the atmospheric radiative budget. The latter includes aerosol optical and microphysical characterization, and aerosol typing thanks to data fusion (in-situ,

remote sensing, satellite) and modeling. He is coordinator of the Spanish/Portuguese lidar network, SPALINET, and the Spanish contact point of the international project ChArMEX (Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment). He has published more than 65 papers in peer-reviewed journals and made more than 120 international conference presentations/posters.

Jorge del Valle Arias. Ingeniero de Telecomunicación por la ETS de Ingenieros de Telecomunicación de la UPM y con 25 años de experiencia en proyectos y despliegues de redes móviles y soluciones M2M/IoT. Ha sido fundador de Galtel, una ingeniería especializada en sistemas de monitorización y control con tecnologías inalámbricas aplicadas al sector agrícola y medioambiental, con especial enfoque en el uso de nuevas tecnologías para optimización del uso de los recursos e insumos. Actualmente, trabaja en el campo de las Smart Cities en la División de Proyectos de ITRON España.

Nicanor Prendes Rubiera es geólogo (1982) por la universidad de Oviedo, Asturias, (España), donde obtuvo –también– su suficiencia investigadora con el estudio sobre “Seguimiento, por Técnicas Digitales de Imágenes, del Acetato de Uraniilo, en la Determinación de la Patologías del Hormigón” que fue el trabajo base para preparar su tesis de licenciatura y, en la misma universidad, desarrolla su doctorado bajo la dirección del profesor Dr. M. Montoto San Miguel, sobre “Determinación de Parámetros Petrográficos en Cementos y Hormigones mediante Técnicas de Tratamiento y Procesado Digital de Imágenes”. Asimismo, se Diploma en Análisis de Materiales: Emisión de Rayos X, Electrones e Iones. CSIC (Instituto de Ciencias de Materiales de Sevilla). Universidad. 1995.

Funcionario de Carrera desde 1992 como Técnico Facultativo Superior de OO. AA del MOPU, adscrito al CEDEX-Ministerio de Fomento, con responsabilidades Técnicas y Dirección de proyectos (Carreteras, Puertos, Dragados, Impactos Ambientales, Huellas acústicas, etc.), incluyendo trabajos en el departamento de Medio Ambiente e Isótopos Radiactivos (trazadores de Deuterio y Tritio). Director del Programa de Medio Marino en el Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX), centrado en la gestión de Dragados Portuarios y Sistemas de Información Geográfica asociados. Desde el 2016 se integra en la Subdirección General de *Adaptación a las Acciones frente al Cambio Climático* (Oficina Española de Cambio Climático) del actual Ministerio para la Transición Ecológica.

Es docente, universitario, en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid; Profesor en el CSIC (Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja”) donde imparte cursos sobre *Sostenibilidad, Eficiencia Energética, Evaluación de Edificios y Estructuras*. Adquiere la membresía en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, como evaluador del CINDOC para la supervisión y valoración de trabajos de Investigación (I+D+i), desde 2000, tanto en el ministerio de Ciencia y Tecnología, como en las universidades de Asturias, Madrid y Valencia,

en España; y miembro del Comité Científico de la Revista “Ingeniería Solidaria” de Bogotá (Colombia).

Da clases de formación, como profesor, en el COEX (Conservación y explotación de carreteras) en el programa del Ministerio de Fomento (“Áridos para Carreteras y Puentes”. CEDEX. 1996). Colaborador en proyectos de investigación (Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja”, IBERDROLA, etc.), relacionadas con la obra pública, infraestructuras y Medio Ambiente. Pertenece a los grupos de trabajo sobre Normalización, (Comité de *Áridos para Hormigón -SC-10 de RAA –Reacción Alkali-Árido-* en *Asociación Española de NORMALIZACIÓN, AENOR*). Al Comité *INSPIRE para la gestión de Datos geográficos (IGN-AEMET)*, y el de *Inundaciones (Ministerio de Medio Ambiente)*, así como a *SPANDCOLD (Presas y Embalses)*. Debido a la especialidad y desarrollo del trabajo de su tesis doctoral es requerido como Perito experto en el juicio del Prestige para el análisis digital de las imágenes térmicas del siniestro del buque. Así mismo, es invitado a Perú por la Sociedad Geológica, el INGEMET y el ANA (Autoridad Nacional del Agua) a unas charlas sobre peligros geológicos y Cambio Climático (2013).

M^{ra} Carmen Ángel Martínez. Es geóloga (1986). Licenciada por la universidad Complutense de Madrid se especializó en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Funcionaria de Carrera desde 1994, es Coordinadora de Área de Hidrología y Sistemas de Información y Modelización Hídrica en el CEDEX-CEH (Centro de Estudios Hidrográficos). Es autora del libro de Teledetección, Superficies de agua y Sistemas de Información Geográfica. Representante del CEDEX en la comisión de Teledetección del IGN y experta en gestión y análisis y tratamiento de los recursos hídricos y la red hidrográfica fluvial nacional. Directora de varios cursos de formación de GIS, Teledetección y Técnicas de Análisis del Territorio, impartidos en el CEDEX. Es autora de varios trabajos de investigación sobre caracterización de los acuíferos del páramo castellano.

Sandra Villacorta Chambí. Es Geóloga por la universidad de Lima (Perú). Investigadora del INGEMET y del ANA (Autoridad Nacional del Agua, Perú). Se ha Doctorado, por la UPM, en Investigación, Modelización y Análisis de Riesgos Ambientales; MsC en “Uso Sostenible de Recursos Minerales” y “BSc en Ingeniería Geológica”. Actualmente es Investigador adjunto en la Facultad de Ingeniería, Tecnologías de Información y Medio Ambiente de la Universidad Charles Darwin (Australia), donde desarrolla las líneas de investigación de Evaluación de Peligros Geológicos, Geomorfología, Tecnología Natural para la Prevención de Deslizamientos, Inundaciones y Flujos de Detritos y Redes Nodales del Agua. Coordinadora del Congreso Internacional de Peligros Geológico, Arequipa (Perú). 2013.

Pedro Oñorbe de Torre es Ingeniero Industrial por la ETSII-UPM y miembro de la Asociación Española de Teledetección (AET). Ha trabajado durante muchos años en proyectos de tratamientos de aguas y de basuras por tecnologías de bajo coste, tanto en su puesto de jefe

de tratamientos de residuos urbanos en diversas empresas del INI como en asesorías a empresas de servicios. Es especialista en proyectos de teledetección para uso en aplicaciones de ingeniería civil sobre todo en agricultura de precisión y en aplicaciones medioambientales en minería y limnología. Lleva directamente el desarrollo de tecnologías de aplicaciones de teledetección para empresas del Centro de Investigaciones Aeroportadas de Rozas (CIAR) en Lugo.

Colaborador habitual en el Colegio de Ingenieros Industriales de Madrid (COIIM) donde es Vocal de la Comisión de Medio Ambiente y dirige el Grupo de Trabajo de “teledetección y drones”. Coordina por el COIIM la participación en proyectos de innovación con la Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial (F2I2), organismo que agrupa los distintos Laboratorios de Investigación de la Escuela ETSII-UPM. También, desarrolla asesoría a colegiados en proyectos medioambientales y de desarrollo rural en Latinoamérica.

Eduardo Martínez de Rioja del Nido. Doctor Ingeniero de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid. Se licenció en 2014 con honores y se doctoró en 2018 con premio extraordinario. Es autor de publicaciones y comunicaciones a congresos sobre antenas reflectoras en tecnología impresa. Premio Investigador Joven en el Congreso de la Unión Internacional de Radio Científica URSI 2018 celebrado en Granada. En la actualidad es Profesor Ayudante Doctor del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones en la Universidad Rey Juan Carlos (Campus de Fuenlabrada). Eduardo Martínez de Rioja del Nido *is member of the IEEE* y participa en el Congreso Nacional del Medio Ambiente desde el año 2014.

José Daniel Martínez de Rioja del Nido. Doctor Ingeniero de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid. Se graduó en *Tecnologías y Servicios de Telecomunicación* en 2016 y obtuvo el *Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación* en 2018. En junio de 2021, defendió su tesis doctoral que obtuvo la calificación de *Sobresaliente Cum Laude*. Es autor de diversas publicaciones y comunicaciones a congresos sobre reflectarrays y transmitarrays. Actualmente, cursa estudios de posdoctorado en el Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones de la UPM, bajo la dirección del Profesor José A. Encinar Garcinuño. Premio Investigador Joven en el Congreso de la Unión Internacional de Radio Científica URSI 2019 celebrado en Sevilla. José Daniel Martínez de Rioja del Nido *is member of the IEEE* y participa en el Congreso Nacional del Medio Ambiente desde el año 2016.

José Javier Martínez Vázquez. En 1996 comienza su participación en el Congreso Nacional del Medio Ambiente y desde el año 2000 coordina este Comité de Trabajo sobre Teledetección y Sensores Medioambientales. Dr. Martínez Vázquez *is life senior member of the IEEE*.

Índice

<i>Reseña profesional de los miembros del grupo.</i>	2
1. Introducción: Sensores en la próxima revolución industrial.	14
<i>José Javier Martínez Vázquez. Coordinador. C.T. nº 56: Teledetección y sensores.</i>	14
2. Drones y Redes terrestres celulares para el control / previsión de catástrofes naturales. Aspectos Técnicos.....	15
<i>Prof. José A. Delgado-Penín. Dr. Ingeniero de Telecomunicación. Catedrático Emérito UPC. Grupo GTDS del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT)</i>	15
2.1. Introducción.	15
2.2. Los Desastres Naturales y su Gestión.....	16
2.3. Requerimientos a Servicios/Redes de Emergencias.	17
2.4. Redes de Comunicaciones 4G para Emergencias. Ejemplos.	18
2.5. Redes de Comunicaciones 5G para Emergencias. Futuro	20
2.6. Redes Cooperativas Basadas en Drones.	22
2.7. Conclusiones.....	22
2.8. Referencias Bibliográficas.....	23
3. ACTRIS-España y sus actividades durante el confinamiento del COVID-19 en 2020. 24	
<i>Prof. Adolfo Comerón (*) en Representación de Actris -España</i>	24
3.1. Introducción.	24
3.2. Observaciones de ACTRIS-España durante el primer confinamiento por COVID-19 en 2020.....	27
3.3. Resultados preliminares de las medidas de aerosoles por teledetección.	28
3.3.1. Resultados del análisis de fotómetros solares.	28
3.3.2. Resultados del análisis de medidas lidar.	30
3.4. Resultados preliminares de las medidas de aerosoles mediante técnicas in situ.	32
3.5. Método de “normalización a la meteorología” aplicado a la concentración de NO ₂ . ..	34
3.6. Conclusiones.....	36
3.7. Referencias bibliográficas.....	37
4. Evolución de la observación de la tierra espacial relacionada con la vigilancia y gestión medioambiental.	38
<i>Victoriano Moreno Burgos. Colegio Oficial de Físicos</i>	38
4.1. Introducción.	38
4.2. Contaminación.	40
4.3. Impacto Ambiental.....	42
4.4. Hidrología y Agricultura.....	43
4.5. Inundación.....	45

4.6. Gestión Forestal.	46
4.7. Urbanismo.	46
4.8. Gestión de Incendios Forestales.	47
4.9. Actividad Volcánica.	48
4.10. Detección de Deslizamientos y/o subsidencias.	49
4.11. Riesgos Tecnológicos.	50
4.11.1. Riesgo químico.	50
4.11.2. Riesgo nuclear.	51
4.12. Conclusiones.	52
5. De la smart city a la ciudad activa: planteamiento, análisis y estructura para ciudades sostenibles.	54
<i>Jorge del Valle Arias.</i>	54
<i>Smart City Solutions and SW Business Development Manager Spain en Itron.</i>	54
5.1. Entornos urbanos en continua evolución	54
5.2. Las Smart Cities	55
5.3. Visión holística de la Smart City	55
5.3.1. Conectividad y Comunicación	56
5.3.2. Plataforma de Gestión Urbana para la Smart City	58
5.3.3. Vertical priorizado por ROI y servicio al ciudadano. Smart Lighting.	59
5.4. Resumen y conclusiones	60
6. Infraestructuras naturales verdes como alternativa a la adaptación al cambio climático en recursos hídricos. Proyecto de Ordenación Territorial “The Green Leave”61	
<i>Nicanor Prendes Rubiera. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. María del Carmen Ángel Martínez (CEDEX-CEH). Sandra Villacorta Chambi (Charles Darwin University; Northern Territory 0909 Australia).</i>	61
6.1. Introducción.	61
6.2. Procedimiento Metodológico.....	62
6.2.1. Caso de Estudio	63
6.2.2. Condicionamientos de Partida	68
6.2.3. Análisis territorial. Teledetección	70
6.3. Conclusión	79
6.4. Bibliografía.....	80
7. Uso de nuevas plataformas web-gis utilizadas en agricultura de precisión y su aplicación al desarrollo rural.	83
<i>Pedro Oñorbe de Torre. Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid.</i>	83
7.1. Teledetección en agricultura de precisión.	83

7.1.1. El espectro electromagnético, los campos aplicados en agricultura	83
7.2. GIS aplicados en agricultura de precisión.	85
7.3. Índices agrarios aplicados en agricultura de precisión.	85
7.4. Transmisión de datos y actuaciones.	85
7.5. Principales actores en promoción rural.	86
7.5.1. Actuaciones de los Grupos de Acción Local (GAL).	86
7.5.2. Agrupaciones de GAL	86
7.6. Actuaciones de GAL y Grupos Operativos.2.....	86
8. Análisis ambiental de los nuevos estándares de comunicaciones para vehículos automóviles.	88
<i>José Daniel Martínez de Rioja del Nido (UPM), Eduardo Martínez de Rioja del Nido (URJC)</i> <i>y José Javier Martínez Vázquez (Coordinador del CT nº 56)</i>	88
8.1. Introducción	88
8.1.1. Breve descripción del sistema GPS	90
8.2. Internet de los vehículos (IoV)	91
8.3. Las comunicaciones V2X y las redes de sensores a bordo	95
8.4. Los nuevos estándares de comunicaciones V2X	102
8.5. Estudio comparativo de ambos sistemas.....	105
8.6. Legislación y normativa aplicable.....	108
8.6.1. Especificaciones de potencia	111
8.6.2. Cálculo de distancias	112
8.7. Conclusiones.....	113
8.8. Bibliografía.....	114
9. La red de sensores a bordo del coche de hidrógeno.....	116
<i>Eduardo Martínez de Rioja (URJC), José Daniel Martínez de Rioja (UPM) y José Javier</i> <i>Martínez Vázquez (Coordinador del CT nº 56)</i>	116
9.1. Introducción.	116
9.2. Características del vehículo con pila de hidrógeno.....	118
9.3. Breve descripción de la pila de hidrógeno.	119
9.4. Flujos de gases reaccionantes y producción de agua.....	123
9.4.1. Consumo de oxígeno	123
9.4.2. Utilización de aire.	124
9.4.3. Consumo de hidrógeno	126
9.4.4. Cantidad generada de agua.	126
9.4.5. Relaciones entre el flujo, el caudal y la presión	127
9.5. Aspectos de interés sobre el funcionamiento de la pila.	128

9.5.1. Comportamiento dinámico.....	130
9.5.2. Compresor.....	132
9.5.3. Influencia de la presión en el rendimiento de la celda.....	133
9.5.4. Gradiente de potencia.	135
9.5.5. Conversor DC/DC.	135
9.5.6. Humidificación.	141
9.5.7. Gestión del agua.	143
9.5.8. Circuito de refrigeración.	145
9.6. Funcionamiento normal de la PEM FC.	146
9.6.1. Sensores para el funcionamiento de la PEM FC.....	148
9.6.2. Circuito de aire.....	151
9.6.3. Circuito de hidrógeno.	153
9.6.4. Controlador de flujo de masa (MFC).	154
9.6.5. Posible implementación de la red de sensores.	156
9.7. Características del hidrógeno.....	159
9.7.1. El almacenamiento del hidrógeno.....	160
9.7.2. El hidrógeno almacenado como un gas comprimido.....	162
9.7.3. Sensores para el almacenamiento.....	163
9.7.4. Sensores para el volumen del vehículo destinado a pasajeros.....	167
9.7.5. El repostaje en las hidrolíneas.	171
9.8. Anexos.....	174
9.8.1. Hoja técnica de una pila de hidrógeno de la empresa Ballard.	174
9.8.2. Nota en el diario ABC de 8 de septiembre de 2020.	175
9.8.3. Apunte sobre artículo en la revista IEEE Spectrum de diciembre 2020.....	176
9.9. Conclusiones.....	177
9.10. Bibliografía.....	178

Índice de figuras

FIGURA 2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS DESASTRES NATURALES SEGÚN LA ONU ^[1]	16
FIGURA 2.2. ARQUITECTURA DE RED AERO-TERRESTRE BASADA EN DRONES Y SERVICIO FIJO POR SATÉLITE.....	19
FIGURA 2.3. SITUACIÓN DE CATÁSTROFE CON DAÑOS EN LA RED DE TELEFONÍA MÓVIL.	19
FIGURA 2.4. CAMIÓN CON NODO LTE Y TERMINAL SATCOM PARA RED AERO-TERRESTRE 4G.	20
FIGURA 2.5. CARACTERÍSTICAS DE RED 5G DE EMERGENCIA ACTUALIZADAS A JUNIO DE 2021.	20
FIGURA 2.6. EJEMPLO DE RED 5G DE EMERGENCIA.	21
FIGURA 2.7. EQUIPAMIENTO PORTÁTIL CLOUD-EDGE PARA SITUACIONES DE EMERGENCIA.	21
FIGURA 2.8. EJEMPLO DE RED COOPERATIVA BASADA EN ENJAMBRES DE UAS.....	22

FIGURA 3.1. INSTALACIONES NACIONALES POTENCIALES DE ACTRIS-España. SOBRE FONDO AMARILLO LA PROPUESTA DE INCLUSIÓN INICIAL EN ACTRIS. IS: IN SITU; RS: REMOTE SENSING (TELEDETECCIÓN); RTG: REACTIVE TRACE GASES; RPA; REMOTELY PILOATED AIRCRAFT (AERONAVE PILOTADA A DISTANCIA); AIS: AEROSOL IN SITU, ARS: AEROSOLS REMOTE SENSING; CIS: CLOUD IN SITU. 26

FIGURA 3.2. ESTACIONES DE ACTRIS España ACTIVAS DURANTE EL PRIMER CONFINAMIENTO DE 2020. LOS PUNTOS ROJOS INDICAN LA LOCALIZACIÓN DE FOTÓMETROS SOLARES DE AERONET, PARTE DEL ECOSISTEMA ACTRIS, QUE TAMBIÉN SE HAN CONSIDERADO EN EL ANÁLISIS. 27

FIGURA 3.3. DIFERENCIAS ENTRE EL ESPESOR ÓPTICO DE LOS AEROSOLES MEDIDO ENTRE EL 1 DE MARZO Y EL 5 DE JULIO DE 2020 Y EL RESULTADO DE PROMEDIAR LOS ESPESORES ÓPTICOS PARA EL MISMO PERÍODO DEL AÑO ENTRE LOS AÑOS 2015 Y 2019. A SU VEZ, LOS DATOS DE ESPESOR ÓPTICO SE HAN PROMEDIADO EN PERÍODOS DE DOS SEMANAS. LA PRIMERA LÍNEA VERTICAL DE COLOR MAGENTA INDICA EL INICIO DEL CONFINAMIENTO; LA LÍNEA ROJA INDICA EL INICIO DEL PERÍODO DE CESE DE ACTIVIDADES NO ESENCIALES EL 30 DE MARZO DE 2020, LA SIGUIENTE LÍNEA MAGENTA EL FINAL DE ESTE PERÍODO, LA LÍNEA CIAN EL INICIO DE LA DESESCALADA Y LA LÍNEA VERDE EL FIN DEL PRIMER ESTADO DE ALARMA. 28

FIGURA 3.4. DIFERENCIA ENTRE LOS PROMEDIOS QUINCENALES DE LAS DIFERENCIAS DE AOD A 440 NM ENTRE UNA ESTACIÓN URBANA Y UNA ESTACIÓN DE FONDO REMOTO RELATIVAMENTE PRÓXIMA (BARCELONA-MONTSEC; SANTA CRUZ DE TENERIFE – IZAÑA; BURJASSOT – ARA DE LOS OLMOS) EN EL PERÍODO COMPRENDIDO ENTRE EL INICIO DE 2020 Y EL INICIO DEL SEGUNDO ESTADO DE ALARMA Y LA MEDIA DE LOS PROMEDIOS QUINCENALES PARA LAS MISMAS SEMANAS DEL AÑO DESDE 2015 A 2019. LOS COLORES DE LAS LÍNEAS VERTICALES TIENEN EL MISMO SIGNIFICADO QUE EN LA FIGURA 3.3. LA TERCERA LÍNEA MAGENTA INDICA EL INICIO DEL SEGUNDO ESTADO DE ALARMA. NÓTESE QUE EL PERÍODO DE TIEMPO QUE ABARCA ESTA GRÁFICA ES MAYOR QUE EL DE LA FIGURA 3.3. 30

FIGURA 3.5. PROMEDIO DE LOS PERFILES DEL COEFICIENTE DE RETRODISPERSIÓN A 532 NM (BACKSCATTER COEFFICIENT) DE LOS AEROSOLES PARA LAS MEDIDAS EFECTUADAS POR EL LIDAR DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA DURANTE LOS MESES DE MARZO DE 2020 (LÍNEA NEGRA DE LA GRÁFICA DE LA IZQUIERDA) Y DE ABRIL DE 2020 (LÍNEA NEGRA DE LA GRÁFICA DE LA DERECHA) COMPARADOS RESPECTIVAMENTE CON EL PROMEDIO DE TODOS LOS PERFILES DE LOS MESES DE MARZO DE 2015 A 2019 (LÍNEA VERDE EN LA GRÁFICA DE LA IZQUIERDA) Y DE TODOS LOS MESES DE ABRIL EN EL MISMO INTERVALOS DE AÑOS (LÍNEA VERDE EN LA GRÁFICA DE LA DERECHA). EL SOMBREADO ROJO INDICA EL INTERVALO ENTRE MENOS Y MÁS UNA DESVIACIÓN TÍPICA ALREDEDOR DEL VALOR PROMEDIO DE LAS MEDIDAS DE MARZO (GRÁFICA DE LA IZQUIERDA) Y ABRIL DE 2020 (GRÁFICA DE LA DERECHA). EL SOMBREADO VERDE CLARO CORRESPONDE AL MISMO TIPO DE INTERVALO PARA EL PROMEDIO DE LAS MEDIDAS DE LOS MESES CORRESPONDIENTES DE 2015 A 2019. LA SUPERPOSICIÓN DE LAS ZONAS SOMBREADAS EN ROJO Y LAS SOMBREADAS EN VERDES DA LUGAR AL SOMBREADO VERDE OSCURO. 31

FIGURA 3.6. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA Y CARACTERÍSTICAS DE LA UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE ACTRIS-España QUE PUDIERON MANTENER MEDIDAS DE AEROSOLES POR TÉCNICAS IN SITU DURANTE EL CONFINAMIENTO. TAMBIÉN SE INDICAN LOS TIPOS DE MEDIDA Y LOS PARÁMETROS EXTRAÍDOS DE ÉSTAS. 32

FIGURA 3.7. CICLO DIURNO DEL EXPONENTE DE ÅNGSTRÖM DE ABSORCIÓN (AAE) PARA VARIAS ESTACIONES DE ACTRIS-España. LA PARTE DE LA IZQUIERDA PRESENTA EL PROMEDIO DE AAE DE LOS DÍAS DE LOS MESES DE MARZO Y ABRIL DE LOS AÑOS 2017 A 2019 Y LA PARTE DE LA DERECHA EL PROMEDIO DE LOS DÍAS DE MARZO Y ABRIL DE 2020. EN LOS CASOS DE MADRID Y EL ARENOSILLO SE DISTINGUE POR TAMAÑO DE PARTÍCULAS (PM₁₀ EN NEGRO Y PM₁ EN ROJO). LOS SOMBREADOS INDICAN EL INTERVALO ENTRE MENOS Y MÁS UNA DESVIACIÓN TÍPICA DE LAS MUESTRAS ALREDEDOR DE LA MEDIA ESTIMADA. 33

FIGURA 3.8. CICLO DIURNO DE LAS CONCENTRACIONES DE CARBONO NEGRO PARA VARIAS ESTACIONES DE ACTRIS-España PARA LOS MESES DE MARZO Y ABRIL. EN LA PARTE DE LA IZQUIERDA DE LAS GRÁFICAS: VALORES PROMEDIO DE LOS DÍAS DE MARZO Y ABRIL ENTRE 2017 Y 2019. EN LA PARTE DERECHA DE LAS GRÁFICAS: VALORES PROMEDIO DE LOS DÍAS DE MARZO Y ABRIL DE 2020. EN NEGRO: CONCENTRACIONES PROCEDENTES DE LA QUEMA DE COMBUSTIBLES FÓSILES (BCFF). EN ROJO: CONCENTRACIONES PROCEDENTES DE LA QUEMA DE BIOMASA. LOS SOMBREADOS CORRESPONDEN AL INTERVALO DE MENOS UNA DESVIACIÓN TÍPICA A MÁS UNA DESVIACIÓN TÍPICA ALREDEDOR DE LA MEDIA. 34

FIGURA 3.9. (EXTRAÍDA DE LA REFERENCIA 9). CONCENTRACIONES DE NO₂ MEDIDAS (PUNTOS AZULES) Y PREDICHAS POR EL MODELO DE “MACHINE LEARNING” (PUNTOS VERDES) EN CUATRO ESTACIONES DE MONITORIZACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE EN MADRID Y EN BARCELONA. PARA CADA ESTACIÓN SE REPRESENTAN LAS MEDIAS DIARIAS (GRÁFICA SUPERIOR) Y UNA MEDIA DESLIZANTE SOBRE 7 DÍAS DE DICHAS MEDIAS DIARIAS (GRÁFICA INFERIOR). SE REPRESENTAN ADEMÁS LOS DATOS PARA EL MISMO PERÍODO DE TIEMPO DE CADA UNO DE LOS AÑOS DE 2017 A 2019 Y LAS MEDIAS MENSUALES SOBRE ESOS AÑOS (LÍNEAS NEGRAS HORIZONTALES). LOS SOMBREADOS REPRESENTAN LAS INCERTIDUMBRES ESTIMADAS DEL MODELO AL NIVEL DE CONFIANZA DEL 90% EN LA ESTIMACIÓN DIARIA (SOMBREADO VERDE CLARO) Y PROMEDIADA SOBRE 7 DÍAS (SOMBREADO VERDE OSCURO). LA LÍNEA VERTICAL NEGRA DE TRAZO CONTINUO INDICA EL INICIO DEL PERÍODO DE

CONFINAMIENTO Y LAS DOS LÍNEAS VERTICALES DE TRAZO DISCONTINUO DELIMITAN EL PERÍODO DE CESE DE ACTIVIDADES NO ESENCIALES.....	35
FIGURA 4.1. IMAGEN SAR DE VERTIDOS DE PETRÓLEO EN EL ESTRECHO DE GIBRALTAR	40
FIGURA 4.2. IMAGEN SAR DE VERTIDOS DE DIFERENTES CONTAMINANTES.....	41
FIGURA 4.3. DISTINTOS TRAZADOS PARA EL TRAMO FERROVIARIO SOTO DEL REAL - SEGOVIA.....	42
FIGURA 4.4. ESTADO DE LA EXPLANACIÓN EN OBRAS DE CONSTRUCCIÓN DE LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD FERROVIARIA.....	43
FIGURA 4.5. CLASIFICACIÓN DE LOS CULTIVOS A PARTIR DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA.....	44
FIGURA 4.6. DELIMITACIÓN DEL ÁREA AFECTADA POR LAS INUNDACIONES Y EFECTOS CAUSADOS POR LA AVENIDA DE LAS AGUAS.	45
FIGURA 4.7. DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS DE UNA PLAGA EN LA MASA FORESTAL.....	46
FIGURA 4.8. UTILIZACIÓN DE IMÁGENES PARA PLANIFICACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS EN ZONAS URBANAS.....	47
FIGURA 4.9. IMAGEN DE UN INCENDIO EN EL ESTADO DE COLORADO (USA).....	48
FIGURA 4.10. ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA: VOLCÁN ARENAS NEGRAS (TENERIFE).....	49
FIGURA 4.11. REALCE DE SUBSIDENCIAS (IZDA) Y REPRESENTACIÓN SOBRE EL MAPA DE LAS SUBSIDENCIAS DETECTADAS.	49
FIGURA 4.12. ZONA INDUSTRIAL DE LA PETROQUÍMICA DE TARRAGONA Y ÁREA URBANA DE INFLUENCIA.	50
FIGURA 4.13. OCUPACIÓN DEL SUELO EN EL ENTORNO DE LA INSTALACIÓN NUCLEAR DE TRILLO.....	51
FIGURA 4.14. CENTRAL NUCLEAR DE TRILLO Y SU ENTORNO MÁS PRÓXIMO.....	52
FIGURA 5.1. ALGUNAS DE LAS INICIATIVAS EN FUNCIONAMIENTO O QUE SE UTILIZARÁN EN BREVE PLAZO DE TIEMPO EN LAS SMART CITIES.	55
FIGURA 5.2. DISTINTAS TIPOLOGÍAS DE RED: RED EN ESTRELLA Y RED MALLADA.	58
FIGURA 5.3. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA PLATAFORMA DE GESTIÓN DE LA ILUMINACIÓN URBANA PARA SMART CITIES (SLV: STREETLIGHT.VISION)	59
FIGURA 6.1. UBICACIÓN DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES DEL CANAL DE CASTRONUÑO ^[16]	64
FIGURA 6.2. PÁRAMO DE LA ZONA DE CASTRONUÑO Y ESTADO DE LOS CAMPOS.	66
FIGURA 6.3. MAPA DE UBICACIÓN DE LA ZONA, DESDE LA PERSPECTIVA PURAMENTE VERTEBRAL DEL TERRITORIO (GOOGLE MAP. ZONA DE CASTRONUÑO). CUENCA DEL DUERO.	71
FIGURA 6.4. MAPA TOPOGRÁFICO, DE POBLACIONES, REDES Y ELEMENTOS TERRITORIALES VINCULADOS A LA ZONA. SE INCLUYE LAS CURVAS DE NIVEL QUE PERMITIRÁN ALGUNOS TRATAMIENTOS DE CARÁCTER PURAMENTE DE ORDENACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE UNIDADES A CONSIDERAR.....	72
FIGURA 6.5. IMAGEN AÉREA, RECTIFICADA, DE LA ZONA DE ESTUDIO. EN ELLA SE PUEDEN VER DIFERENTES UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS, DE INFRAESTRUCTURAS Y EL ESTADO DE LOS CAMPOS Y SU SITUACIÓN Y ESTADO FENOLÓGICO. DESTÁQUESE EL CAMPO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS SOLARES.	73
FIGURA 6.6. RED SUPERFICIAL HIDROLÓGICA DE LA ZONA. MARCARÍA LAS LINEACIONES Y ZONAS DE PROTECCIÓN ASOCIADAS A ZONAS DE RIESGO DE INUNDACIÓN Y ARPSIS LOCALES. EN LA IMAGEN SE HAN CARTOGRAFIADO UNA UNIDAD FOTOVOLTAICA, YA CONSTRUIDA Y OPERATIVA (HACIA EL SW DE CASTRONUÑO) Y UNA DE NUEVA PROPUESTA (NE) COMO ALTERNATIVA DE RECURSO ENERGÉTICO RENOVABLE.	74
FIGURA 6.7. ÁREA DE EXCLUSIÓN DE PROTECCIÓN AMBIENTAL ESPECIAL AMBIENTAL, DE ACUERDO A LA INFORMACIÓN OFICIAL DEL MITERD, COMO BASE CARTOGRÁFICA DEL IGN.....	75
FIGURA 6.8. ZONAS DE MEJORA Y MODERNIZACIÓN DE REGADÍO DEL CANAL DE CASTRONUÑO, RESPECTO A LA RED NATURA 2000 (ZEPa Y ZEC) RESERVA NATURAL Y ZONAS HUMEDAS CARTOGRAFIADAS (BOE....).....	76
FIGURA 6.9. SUPERPOSICIÓN DE LA ALTITUD E IMPACTO SOBRE LA RED HÍDRICA (SE HAN SEGREGADO TRES ALTURAS DE COTA PARA ZONIFICAR LAS ÁREAS DE INTERÉS Y QUE TIENE LA IMPORTANCIA DE ASOCIAR, A CADA SEGMENTO, UN VALOR DE ENERGÍA POTENCIAL QUE PUEDE SER DETERMINANTE DE LA UBICACIÓN DE ESTRUCTURAS DE ALMACENAMIENTO PARA LOS SISTEMAS DE RIEGO.	77
FIGURA 6.10. ZONAS SELECCIONADAS PARA UBICAR LA BALSA DE ALMACENAMIENTO (FRANJA DE COTA MARRÓN). EVIDENTEMENTE DEBEN SEGUIRSE LAS ÁREAS, DENTRO DE ESTA FRANJA QUE ESTÉN A LA SOMBRA DE DIVISORIAS DE AGUA QUE PROTEJAN LAS POBLACIONES.....	78
FIGURA 6.11. ZONA DE MAYOR SEGURIDAD Y RESGUARDO PARA LA UBICACIÓN DE LA BALSA (IZQUIERDA). INFRAESTRUCTURAS DE ENERGÍA (DERECHA).....	79
FIGURA 46. REPRESENTACIÓN DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	84
FIGURA 7.1. DE IZQUIERDA A DERECHA: SENTINEL 2A (IZDA), CÁMARA MULTIESPECTRAL (CENTRO) Y CÁMARA HIPERESPECTRAL (DCHA).	84
FIGURA 7.2. EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DATA LOGGER).....	86

FIGURA 7.3. BUSCADOR DE UBICACIÓN DE GRUPOS GAL (IZDA) Y EJEMPLARES DE LA REVISTA DE LA RED RURAL NACIONAL (DCHA).	87
FIGURA 7.4. PRESENTACIÓN LEADER EN UN GAL (IZDA). PRESENTACIÓN DE UN VIVERO DE EMPRESAS (DCHA).	87
FIGURA 8.1. REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DEL TRÁFICO BASADO EN V2X.	89
FIGURA 8.2. PRINCIPIO DE LA NAVEGACIÓN GPS.	90
FIGURA 8.3. IOV BASADO EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN EDGE (EIS).	92
FIGURA 8.4. ESTRUCTURA DE UN NODO EDGE CON CLOUDLETS.	94
FIGURA 8.5. SISTEMA DE SEGURIDAD BASADO EN GPS Y V2X (I) Y SISTEMA DE SEGURIDAD CONVENCIONAL (D).	95
FIGURA 8.6. REPRESENTACIÓN DE LA DEPENDENCIA DE LAS INDICACIONES DE LAS SEÑALES SEGÚN LAS CARACTERÍSTICAS DEL TRÁFICO.	96
FIGURA 8.7. AVISO DE DISMINUCIÓN BRUSCA DE VELOCIDAD DEL COCHE QUE CIRCULA DELANTE.	96
FIGURA 8.8. INDICACIÓN DEL AVISO EN EL SALPICADERO DEL VEHÍCULO.	97
FIGURA 8.9. REPRESENTACIÓN DE UNA POSIBLE COLISIÓN POR ALCANCE.	97
FIGURA 8.10. AVISO AL CONDUCTOR DE PELIGRO DE COLISIÓN SIN VISIBILIDAD.	97
FIGURA 8.11. EJEMPLO DE VISIÓN COOPERATIVA.	98
FIGURA 8.12. ALERTA AL CONDUCTOR DE UN POSIBLE ADELANTAMIENTO.	98
FIGURA 8.13. ALERTA DE LA PRESENCIA DE UN VEHÍCULO QUE CIRCULA EN SENTIDO CONTRARIO.	99
FIGURA 8.14. INDICACIÓN AL CONDUCTOR DE LA PROXIMIDAD DE UN CRUCE SIN VISIBILIDAD.	99
FIGURA 8.15. EL SISTEMA DA PRIORIDAD A LAS URGENCIAS Y A LOS SERVICIOS PÚBLICOS.	99
FIGURA 8.16. ANUNCIA AL CONDUCTOR QUE EL PASO A NIVEL ESTÁ PROTEGIDO.	100
FIGURA 8.17. EL CONDUCTOR ES ADVERTIDO DE LA PRESENCIA DE PEATONES O CICLISTAS.	100
FIGURA 8.18. INFORMACIÓN EN TIEMPO REAL A LOS VIAJEROS DE UN AUTOBÚS DEL TIEMPO ENTRE PARADAS Y LOS ENLACES CON OTROS SISTEMAS DE TRANSPORTE.	100
FIGURA 8.19. ADVIERTE AL CONDUCTOR DE CUALQUIER PELIGRO EN SU RUTA.	101
FIGURA 8.20. INFORMA DE LA PROXIMIDAD DE UN VEHÍCULO QUE HA COMETIDO UNA INFRACCIÓN.	101
FIGURA 8.21. ALERTA DE LA FALTA DE SEGURIDAD EN LA CIRCULACIÓN EN ALGÚN PUNTO DE LA RUTA.	101
FIGURA 8.22. INFORMA SOBRE PROBLEMAS PARA CIRCULAR EN LA ZONA: NIEBLA, DEFECTOS EN EL FIRME DE LA CALZADA, RIESGO DE NEVADAS, ETC.	102
FIGURA 8.23. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA V2X INSTALADO A BORDO DE UN AUTOMÓVIL.	103
FIGURA 8.24. REPRESENTACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DEL SISTEMA C-V2X.	105
FIGURA 8.25. ESCENARIO DE UNA INFRAESTRUCTURA DE CONJUNTA V2X Y C-V2X.	106
FIGURA 9.1. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL VEHÍCULO CON PILA DE HIDRÓGENO (WWW.BMW.COM)	116
FIGURA 9.2. ILUSTRACIÓN DEL LUNAR CRUISER EN EL DIARIO ABC.	117
FIGURA 9.3. DISPOSICIÓN DE EQUIPOS EN UN TOYOTA MIRAI.	118
FIGURA 9.4. COMPONENTES DE UN VEHÍCULO MOVIDO CON PILA DE HIDRÓGENO.	118
FIGURA 9.5. ELEMENTOS DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE.	119
FIGURA 9.6. CURVA DE POLARIZACIÓN O GRÁFICA TENSIÓN-CORRIENTE DE UNA CELDA.	120
FIGURA 9.7. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA.	120
FIGURA 9.8. ENLACE DEL CARBONO CON ELEMENTOS METÁLICOS.	121
FIGURA 9.9. DETALLE DE LA MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES PEM.	121
FIGURA 9.10. CURVAS DE POLARIZACIÓN PARA ALIMENTACIÓN CON AIRE Y CON OXÍGENO.	125
FIGURA 9.11. DISTRIBUCIÓN DE AGUA DENTRO DE UNA CELDA.	129
FIGURA 9.12. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA PILA DE HIDRÓGENO.	130
FIGURA 9.13. DISTINTAS ZONAS DE TRABAJO EN LA CURVA DE POLARIZACIÓN.	131
FIGURA 9.14. UTILIZACIÓN DE COMPRESOR EN UNA PILA DE COMBUSTIBLE.	132
FIGURA 9.15. INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN LA CURVA DE POLARIZACIÓN.	133
FIGURA 9.16. INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN LA TENSIÓN DE SALIDA.	134
FIGURA 9.17. CURVAS DE POLARIZACIÓN CON DISTINTAS PRESIONES DE ALIMENTACIÓN DE GASES.	134
FIGURA 9.18. PLETINA BIPOLAR CON CANALES DE ALIMENTACIÓN DE GAS.	135
FIGURA 9.19. TOPOLOGÍA DE UN CONVERTOR REDUCTOR.	135
FIGURA 9.20. FORMAS DE ONDA DEL CONVERTOR REDUCTOR.	136
FIGURA 9.21. TOPOLOGÍA DE UN CONVERTOR ELEVADOR.	136
FIGURA 9.22. FORMAS DE ONDA DEL CONVERTOR ELEVADOR EN MODO CONTINUO.	137
FIGURA 9.23. CIRCUITO CONVERTIDOR ELEVADOR INTERCALADO (IBC).	139

FIGURA 9.24. SECUENCIA DE SEÑALES DE ACTIVACIÓN DE FET. A) $D=T/4$. B) $D>T/4$	139
FIGURA 9.25. MEDIDA DE LA CANCELACIÓN DEL RIZADO EN UN IBC.....	140
FIGURA 9.26. MEDIDA DE LA RESPUESTA DE UN IBC FRENTE A) VARIACIONES BRUSCAS EN LA CARGA Y B) CAÍDAS DE LA TENSIÓN EN LA PILA DE HIDRÓGENO.....	140
FIGURA 9.27. HUMIDIFICADOR DE AIRE UTILIZANDO EL AGUA PRODUCIDA POR LA MISMA PILA.....	142
FIGURA 9.28. CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN DE AIRE DE UNA PILA PEM FC.....	142
FIGURA 9.29. EFECTO DEL EXCESO DE AGUA EN LA CURVA DE POLARIZACIÓN DE UNA PEM FC.....	143
FIGURA 9.30. CANALES DE REFRIGERACIÓN DE UNA PEM FC DE UN AUTOMÓVIL.....	145
FIGURA 9.31. CONDUCTOS DE CALOR PARA REFRIGERACIÓN DE UNA PEM FC. A) SISTEMAS DE MUY BAJA POTENCIA. B) SISTEMAS DE BAJA Y MEDIA POTENCIA.....	146
FIGURA 9.32. ESQUEMA DE MONTAJE DE UNA PEM FC DE UN AUTOMÓVIL.....	147
FIGURA 9.33. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL INYECTOR DE HIDRÓGENO EN CONDUCTO DE ALIMENTACIÓN DEL ÁNODO DE LA PILA.....	147
FIGURA 9.34. NUEVA REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE.....	148
FIGURA 9.35. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UNA PEM FC CON UNA VÁLVULA PARA EQUILIBRAR LA PRESIÓN ENTRE LOS CONDUCTOS DE AIRE E HIDRÓGENO.....	149
FIGURA 9.36. PILA DE COMBUSTIBLE PEM FC CON RED DE SENSORES PARA SU FUNCIONAMIENTO.....	150
FIGURA 9.37. DEPÓSITO DE HIDRÓGENO CON VÁLVULA REDUCTORA DE PRESIÓN Y MFC.....	153
FIGURA 9.38. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN MFC.....	154
FIGURA 9.39. DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA EN EL SENSOR DE FLUJO.....	154
FIGURA 9.40. ESTRUCTURA DE UN MFC.....	155
FIGURA 9.41. SENSOR DE PRESIÓN CAPACITIVO EN TECNOLOGÍA MEMS.....	156
FIGURA 9.42. ESTRUCTURA DE DOS TDR CON UN CALENTADOR ENTRE AMBOS Y OTRO POSIBLE MICROSENSOR DE FLUJO.....	156
FIGURA 9.43. PROCESO DE FABRICACIÓN DE MICROSENSORES MEMS E IMPLANTACIÓN DE HUECOS EN LA CAPA DE DIFUSIÓN DE GAS.....	157
FIGURA 9.44. SENSOR DE FLUJO FABRICADO CON IMPRESORA 3-D Y PDMS.....	158
FIGURA 9.45. CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR DE FLUJO.....	158
FIGURA 9.46. ESTADO DEL HIDRÓGENO SEGÚN LAS CONDICIONES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA.....	161
FIGURA 9.47. DEPÓSITO DE HIDRÓGENO A PRESIÓN DE MATERIAL COMPUESTO PARA AUTOMÓVILES.....	164
FIGURA 9.48. DIFERENCIA DE ESPESOR EN LAS PAREDES DEL DEPÓSITO SEGÚN LA PRESIÓN DE ALMACENAMIENTO: 35 Ó 70 MPA.....	164
FIGURA 9.49. DETALLE DE UNA VÁLVULA CON DISCO DE RUPTURA.....	165
FIGURA 9.50. DISPOSICIÓN DE DEPÓSITOS A BORDO DE UN AUTOMÓVIL.....	165
FIGURA 9.51. ESQUEMA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO A BORDO CON DOS TANQUES.....	166
FIGURA 9.52. COMPORTAMIENTO DE UNA ESTRUCTURA A) TFET Y B) CPE-TFET Y C) CARACTERÍSTICA V-I DE UN TFET.....	168
FIGURA 9.53. CLASIFICACIÓN DEL FUEGO DEPENDIENDO DEL TIPO DE MATERIAL EN COMBUSTIÓN.....	168
FIGURA 9.54. CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DE LA LLAMA DE HIDRÓGENO Y DE LA LUZ SOLAR.....	169
FIGURA 9.55. CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR DE LLAMA DE HIDRÓGENO.....	169
FIGURA 9.56. TIPOS DE SENSORES DE HUMO. A) LUZ DISPERSA. B) LUZ BLOQUEADA.....	170
FIGURA 9.57. SENSOR MINIATURIZADO DE HUMO POR DISPERSIÓN DE LUZ ACTUAL.....	170
FIGURA 9.58. RANGO DE UTILIZACIÓN DE UN DEPÓSITO DE 70 MPA DE HIDRÓGENO.....	172
FIGURA 9.59. MÁQUINA DISPENSADORA DE HIDRÓGENO CON SENSORES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA.....	172

1. INTRODUCCIÓN: SENSORES EN LA PRÓXIMA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL.

José Javier Martínez Vázquez. Coordinador. C.T. nº 56: Teledetección y sensores.

Las cadenas de montaje hace años que están preparadas para que los automóviles salgan de fábrica con cámaras, radar, sensores y receptores GPS instalados. Además, poco a poco se han ido incorporando al coche dispositivos con capacidad para el almacenamiento y procesado de datos. Desde principios de 2021, en Estados Unidos ya será obligatorio que los coches vayan provistos de dispositivos de comunicaciones homologados con uno de los dos estándares V2X existentes ya que constituyen una parte esencial del Internet de los Vehículos (IoV), este último muy relacionado con el vehículo autónomo.

Pero la crisis sanitaria ha ralentizado el desarrollo del automóvil sin conductor y también, ha obligado a mostrar algunas de las dificultades por las que atraviesa su diseño. En el ámbito de la denominada visión cooperativa y la visión nocturna, se han producido discusiones entre los responsables de las distintas marcas sobre la idoneidad de utilizar cámaras 3D con gran profundidad de campo o equipos lidar o cámaras 2D con lidar, lo que deja entrever la existencia de cuestiones a resolver en aspectos clave de la conducción autónoma. Por si fuera poco, el sistema GPS tras más de dos décadas en servicio, es posible que no presente las suficientes garantías de fiabilidad que necesita el auto del futuro.

En plena pandemia, algunos fabricantes de vehículos han anunciado que van a permitir el acceso a sus bases de datos a todo aquél que pueda aportar nueva información que facilite el avance en la fabricación del coche autónomo. El nivel 4 de conducción, correspondiente a la automatización del vehículo, de momento sólo se podrá implantar en zonas determinadas: parques empresariales, campus universitarios, aeropuertos, etc. Tiempo después circularían taxis urbanos autónomos. Son recorridos rutinarios en áreas limitadas.

El coche moderno consta de una parte motora y de una vasta colección de sensores para obtener valores de magnitudes que desemboquen en una conducción más segura y una buena gestión del tráfico rodado, con la finalidad de mejorar la siniestralidad vial y el medio ambiente. Aún podríamos afinar un poco más, para decir que la tasa de datos generada por los automóviles va a ser tan elevada y diversa que el Internet de los Vehículos habrá de estar orientado a las tecnologías Big Data y la computación Cloud Edge. Incluso, a pesar de la computación Edge, es probable que haya que asumir latencias elevadas que pondrían en entredicho el funcionamiento en tiempo real de la red.

La revista Proceedings del IEEE explicaba en su número de febrero de 2020, que IoV no tiene relación con IoT ni con el Internet convencional que conocemos. Los escenarios de conexión para un vehículo pueden ser muy diferentes dependiendo de la hora y el lugar en que se encuentre. Es necesaria una nueva arquitectura de red, nuevos protocolos, nuevas aplicaciones. Las futuras tecnologías IoV tendrán un profundo impacto sobre los sectores industriales, incluyendo el transporte, la fabricación de coches, la energía, el software y las tecnologías de la información y las comunicaciones. Como concluía la mencionada publicación, parece que IoV estará en el centro de la próxima revolución industrial.

2. DRONES Y REDES TERRESTRES CELULARES PARA EL CONTROL / PREVISIÓN DE CATÁSTROFES NATURALES. ASPECTOS TÉCNICOS.

Prof. José A. Delgado-Penín. Dr. Ingeniero de Telecomunicación. Catedrático Emérito UPC. Grupo GTDS del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT)

RESUMEN

Los UAVs dentro de las aplicaciones posibles que poseen también pueden ayudar a resolver problemas cuando ocurren catástrofes naturales. En la actualidad el monitoreo de los desastres naturales se realiza mediante satélites artificiales (Teledetección) y estaciones remotas fijas en tierra. Los Drones han venido a ayudar a estas labores y para ello se ha explorado la posibilidad de utilizar las redes móviles celulares terrestres y constituir una red aero-terrestre nueva mediante el uso de drones y en situación de emergencia. En lo que sigue se comentan las ayudas que pueden prestar las redes móviles celulares de las generaciones 4G y futuras 5G, poniendo de manifiesto los aspectos técnicos de ambas redes en relación con las catástrofes y para facilitar redes de comunicaciones electrónicas de emergencia. Se hace un breve comentario sobre redes cooperativas y se esquematiza una solución adoptada en el sudeste asiático en caso de desastre natural mediante red Wifi apoyada en redes 4G.

2.1. Introducción.

El monitoreo de los desastres naturales, mediante satélites artificiales de la tierra (remote sensing) y cámaras remotas fijas presenta algunos problemas relacionados con su alto coste y sus bajas resoluciones temporales y espaciales. La tecnología de los UAVs (Drones) ofrece, por el contrario, el poder incrementar los servicios de información y comunicación sobre desastres sobrevolando las áreas damnificadas.

Los costes de funcionamiento y adquisición de los UAS (Drones y estaciones de control) suelen ser (y son) más bajos que aquellos de los sistemas basados en satélites y, además pueden proveer imágenes con una resolución espacial muy alta con los diversos métodos de obtención de las mismas.

Los UAVs con sensores adecuados pueden utilizarse de forma eficaz para la detección y respuesta a los desastres y un posterior restablecimiento de la situación post-desastre. La madurez de la tecnología UAV y su combinación con otros sistemas de comunicación para emergencias ofrece a los diversos operadores una forma nueva más rápida y conveniente para restablecer la situación que existía antes de un desastre y en las zonas afectadas por el mismo.

Las posibilidades que ofrece la tecnología UAS tiene dos vertientes técnicas: la aeronáutica y la telecomunicación. Ambas son importantes y no se pueden disociar.

En el ciclo de gestión de las emergencias causadas por las catástrofes naturales, las redes de comunicación para emergencias basadas en UAVs pueden utilizar varias tecnologías relacionadas con las comunicaciones electrónicas. Las que aquí se comentan son: Redes aero-terrestres móviles celulares públicas y redes ad-hoc privadas.

En lo que sigue se comentan aspectos técnicos de las redes 4G y 5G móviles celulares terrestres que pueden utilizarse en redes de emergencias terrestres para solventar los problemas provocados por catástrofes naturales.

2.2. Los Desastres Naturales y su Gestión.

Los desastres naturales suelen ser de naturaleza muy diversa; pero en los diversos documentos de las Naciones Unidas (ONU) [1] se plantean un subgrupo tal como se indica en la tabla que sigue:

					
Geophysical	Hydrological	Meteorological	Climatological	Biological	Extra-terrestrial
Earthquake	Flood	Storm	Drought	Animal accident	Impact
Mass Movement (dry)	Landslide	Extreme temperature	Glacial lake outburst	Epidemic	Space weather
Volcanic activity	Wave action	Fog	Wildfire	Insect infestation	

Figura 2.1 Clasificación de los desastres naturales según la ONU [1].

Ante situaciones como las que se indican, una vez más, la ONU se ha planteado [1] de forma sencilla un ciclo de gestión de las emergencias que se pueden producir y resumido aquí:

- 1.-Planificación Antes del desastre que incluye una fase de Preparación de la emergencia.
- 2.-Durante el desastre la fase de Respuesta y Socorro.
- 3.-Después del desastre las fases de Recuperación y Reconstrucción

La Tele-Detección y sus sensores juegan un papel muy importante en el ciclo de gestión para atenuar los efectos de los desastres. La Tecnología basada en sensores facilita:

- a) Imágenes obtenidas de radares de apertura sintética
- b) Imágenes de radares de apertura sintética de interferometría
- c) Imágenes de microondas activas
- d) Altimetría por Radar
- e) Radar de precipitación
- f) Imágenes de microondas pasivas
- g) Imágenes geográficas visuales e infrarrojas
- h) Imágenes ópticas

Al empleo de los satélites artificiales específicos para estos fines se les ha añadido un nuevo instrumento en sus versiones técnicas: los HAPS y los UAVs.

Las características regulatorias de los aspectos técnicos para la finalidad de la Teledetección en el caso de catástrofes están recogidas en la ITU-R-RS 1859 [2].

En el caso de los UAVs (alturas bajas < 150 metros) las alternativas regulatorias están en fase de definición por: ICAO, ITU, EASA, etc y los instrumentos técnicos que se poseen pueden formar parte de las tres fases consideradas anteriormente en la gestión de las catástrofes.

La ayuda importante que pueden facilitar las redes de comunicaciones electrónicas se centra hoy en día en las redes aero-terrestres:

- 1.-Redes Terrestres ad Hoc para facilitar conexiones en redes de poco tamaño
- 2.-Redes Aero-terrestres celulares 4G que usan Drones como nodos de red
- 3.-Posibles Redes Aero-terrestres celulares 5G (conexiones del tipo IoT) que usarán Drones.

2.3. Requerimientos a Servicios/Redes de Emergencias.

Los Servicios de comunicaciones electrónicas para emergencias causadas por catástrofes deben cumplir un conjunto de requerimientos que son:

- *Comunicación vocal:** Debe garantizarse siempre en cualquier situación de catástrofe
- *Video en tiempo real:** Debe garantizarse la transmisión de video de las escenas en tiempo real y procedente de las cámaras instaladas a bordo de los Drones.
- *Mensajes multimedia:** Debe garantizarse la transmisión de dibujos, mapas, etc. de la escena de la catástrofe.
- *Acceso a bases de datos remotas:** Solicitud de información de: materiales de emergencia, información de vehículos, personal necesario/disponible, etc.

***Interconexión: de redes de banda estrecha y ancha respectivamente y con otras redes.**

***Seguimiento y control en exteriores/interiores:** de personal, vehículos y materiales varios.

En el caso de las Redes los requerimientos a satisfacer son:

***Redes de banda ancha para las circunstancias actuales**

***Seguridad y aislamiento**

***Una red ad hoc privada**

***Garantías de prioridad en los servicios**

***Capacidades de interconexión veloz**

***Alta fiabilidad**

***Que posean características unificadas de Mando y Control**

***Portabilidad**

2.4. Redes de Comunicaciones 4G para Emergencias. Ejemplos.

En una arquitectura de red aero-terrestre usando UAVs se pueden considerar tres componentes principales según los diferentes órganos de regulación aeronáutica y de telecomunicación:

- * **La Estación de Control terrestre** que se responsabiliza del control completo de todo el sistema UAS y además debe proveer el interfaz humano con los UAVs en el aire.
- * **Las Redes de Comunicación posibles para transmitir/recibir la información a/desde la Estación de control.**
- * **El o los enjambres de Drones que son la/las plataformas aéreas que facilitan el monitoreo y la comunicación de la información a/desde tierra. Pueden incluirse en estos casos de emergencias, facilidades que controlen la pérdida de señal o el agotamiento de las baterías.**

En el siguiente esquema puede apreciarse una arquitectura de red aero-terrestre basada en drones y servicio fijo por satélite si ha lugar cuando hay una catástrofe.

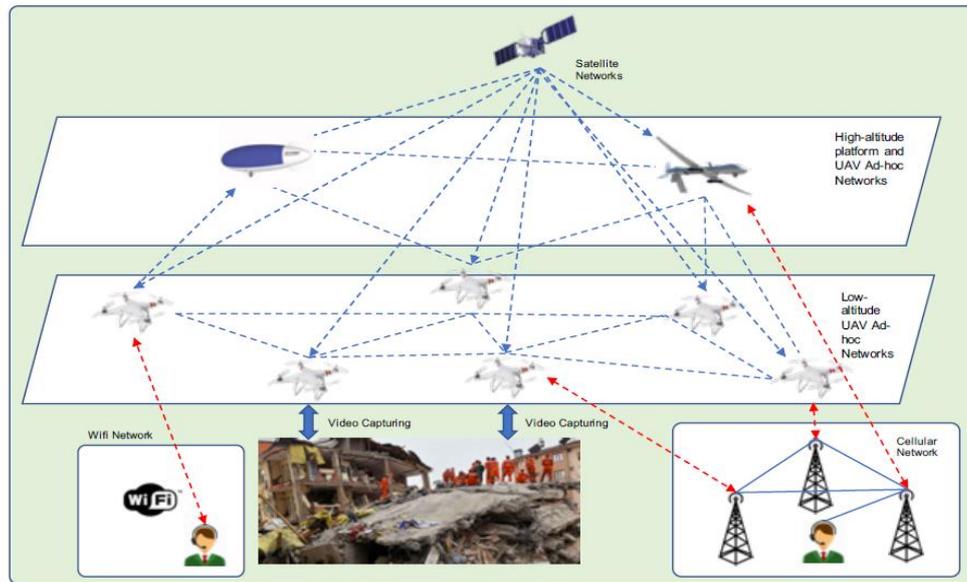


Figura 2.2 Arquitectura de red aero-terrestre basada en drones y servicio fijo por satélite.

Puede ser caso de la situación representada en la figura que sigue para el caso de una red de telefonía móvil terrestre dañada.

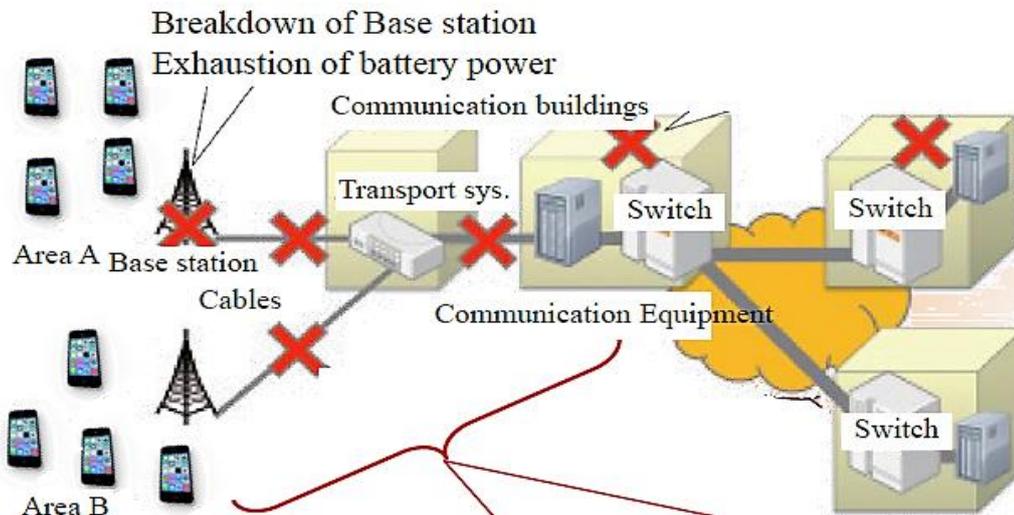


Figura 2.3. Situación de catástrofe con daños en la red de telefonía móvil.

Las propuestas y experiencias utilizando redes 4G para paliar problemas de esta índole datan de 2015 y han sido perfeccionadas por compañías como Nokia, Ericsson y Qualcomm (apoyando a Verizon) en Usa y Japón. Un ejemplo es el del esquema resumen que sigue:

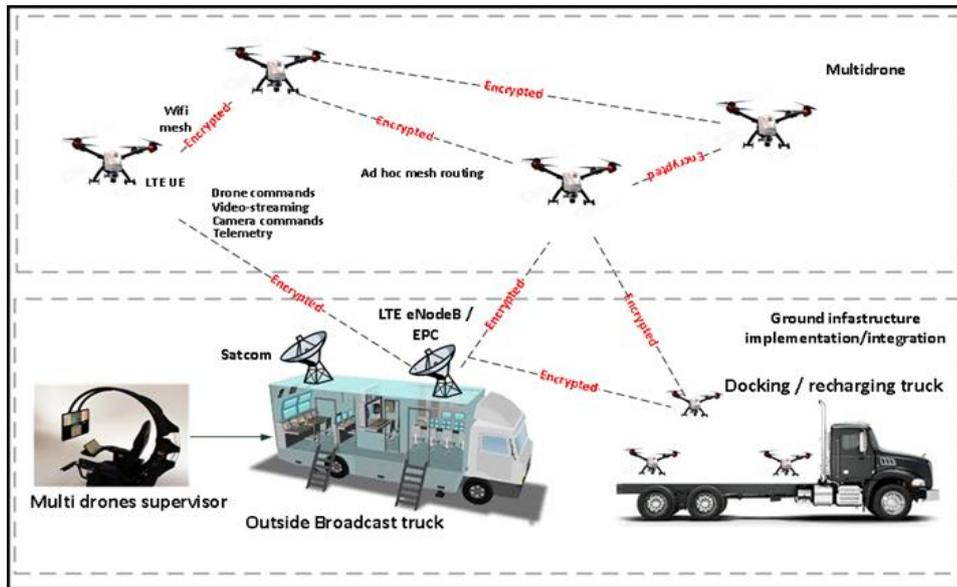


Figura 2.4. Camión con nodo LTE y terminal Satcom para red aero-terrestre 4G.

Aquí puede observarse el empleo de una red 4G (LTE) donde hay un nodo terrestre de red a bordo de un camión y que ofrece la posibilidad de conexión a satélite si ha lugar. La red aero-terrestre utiliza sólo la infraestructura 4G.

2.5. Redes de Comunicaciones 5G para Emergencias. Futuro

Las redes 5G que están apareciendo a fecha de junio de 2021 pueden ser de gran utilidad en estas circunstancias de las que hablamos aquí. Las características que tendrán estas redes pueden resumirse en el esquema auto explicativo que sigue:

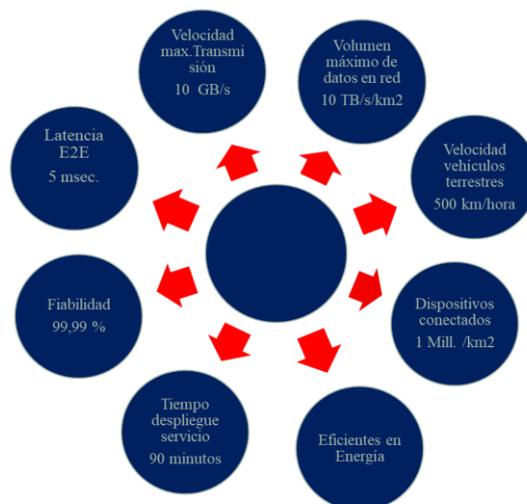


Figura 2.5. Características de red 5G de emergencia actualizadas a junio de 2021.

Una posible red 5G para estas circunstancias puede esquematizarse así:

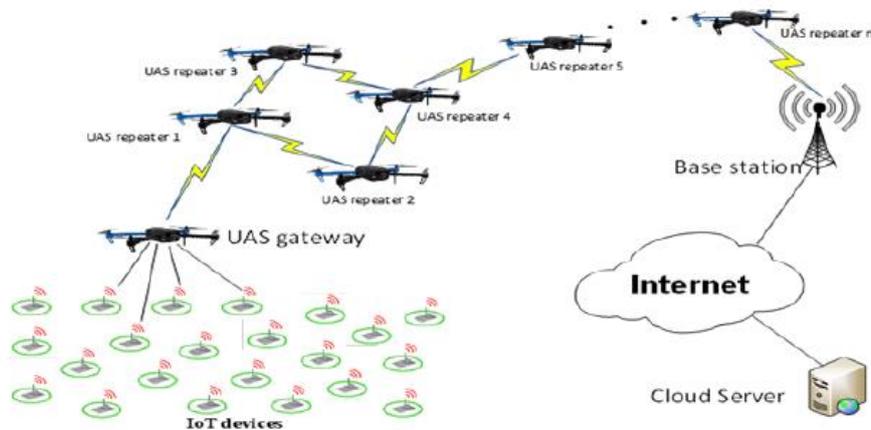


Figura 2.6. Ejemplo de red 5G de emergencia.

En donde hay un conjunto de sensores de diversas clases que se llamarán “cosas” y que pueden ser de cualquier tipo imaginable (pero que genere información a recibir y transmitir).

Un ejemplo ya operativo en algunas situaciones catastróficas en el sudeste asiático es el representado en la figura adjunta y que puede enlazarse con la red arriba representada a través del “Cloud Server”.



Figura 2.7. Equipamiento portátil Cloud-Edge para situaciones de emergencia.

Esta infraestructura móvil incluye todo lo necesario hoy para salvar una emergencia: equipos de telefonía móvil, equipo de red WiFi, un ordenador portátil y una salida “Switch” hacia una red de Internet (si se necesita) exterior al territorio en situación de

catástrofe y, basada en la “nube” como indica el esquema anterior.

2.6. Redes Cooperativas Basadas en Drones.

Otro aspecto importante cuando se necesita ayuda para diversos territorios es el de las redes cooperativas posibles basadas en enjambres de UAVs. El esquema que sigue indica un ejemplo:

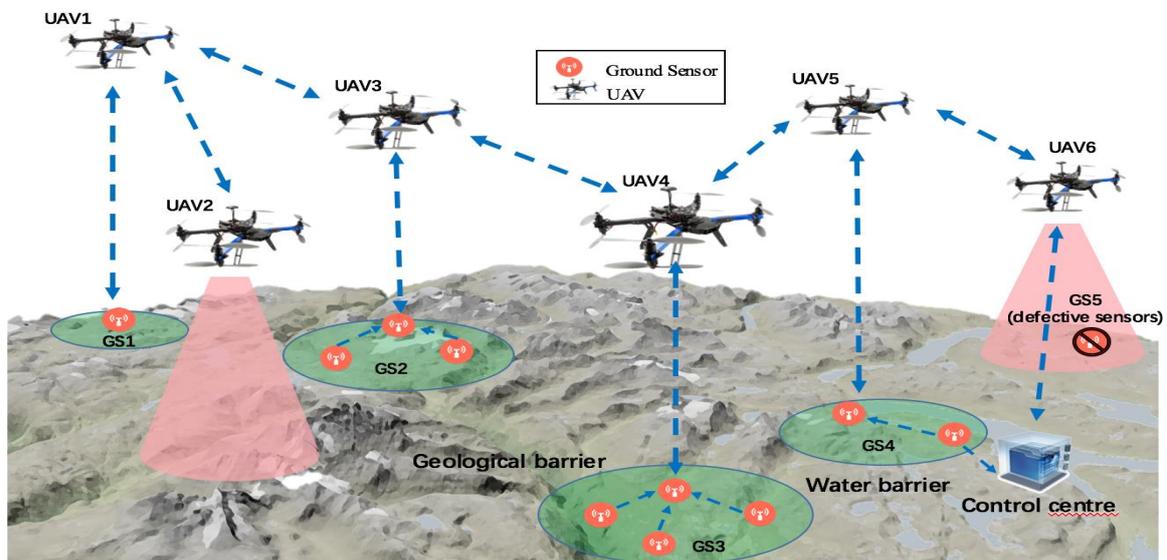


Figura 2.8. Ejemplo de red cooperativa basada en enjambres de UAS.

2.7. Conclusiones.

Las redes de comunicaciones móviles aero-terrestres serán la solución más económica y rápida para implementar redes de emergencia frente a catástrofes naturales.

Además, pueden reforzar las capacidades de las comunicaciones de emergencia en relación con las operaciones de rescate.

La combinación de redes públicas y privadas dará lugar a la creación de redes tridimensionales de comunicaciones de emergencia con garantía en el futuro. Caso 5G.

Las futuras redes 5G (IMT 2020) satisfarán la mayoría de las necesidades de las comunicaciones de emergencia en términos de gran ancho de banda, baja latencia y alta fiabilidad.

2.8.Referencias Bibliográficas.

- [1] ITU-T Focus Group on Disaster Relief Systems, Network Resilience and Recovery. FG-DR&NRR Version 1.0 (05/2014)

- [2] ITU-R.Recomendación RS.1859-1.Utilización de sistemas de teledetección para la recopilación de datos que se emplearán en casos de catástrofe natural y emergencias similares. Diciembre 2018

- [3] World Bank. “Information and Communication Technology for Disaster Risk Management in Japan: How Digital Solutions are Leveraged to Increase Resilience through Improving Early Warnings and Disaster Information Sharing” World Bank, Washington, D.C. 2019

- [4] M. Erdelj, E. Natalizio, K. R. Chowdhury, and I. F. Akyildiz, “Help from the Sky: Leveraging UAVs for Disaster Management”, IEEE Pervasive Computing, vol. 16, no.1. pp. 24-32, 2017.

- [5] J. Zhang et al., “Flooding disaster oriented USV & UAV system development & demonstration”, In IEEE-OCEANS, 2016.

- [6] M. Kakooei et al., “Fusion of satellite, aircraft, and UAV data for automatic disaster damage assessment”, Journal of Remote Sensing, vol. 38, no.8, 2017.

3. ACTRIS-ESPAÑA Y SUS ACTIVIDADES DURANTE EL CONFINAMIENTO DEL COVID-19 EN 2020.

Prof. Adolfo Comerón () en Representación de Actris -España*

(*) RSLab, Commsenslab (Unidad de Excelencia María de Maeztu), Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cataluña. Campus Nord UPC.

Adolfo Comerón¹, Michaël Sicard^{1,2}, Marco Pandolfi³, Roberto Román⁴, Hervé Petetin⁵, Lucas Alados Arboledas⁶, Andrés Alastuey³, Begoña Artíñano⁷, Africa Barreto⁸, Victoria Cachorro⁴, Ramón Castañer Botella⁹, Esther Coz⁷, Javier Crespo⁹, Emilio Cuevas⁸, María Fernández Amado¹⁰, José Luis Gómez Amo¹¹, Juan Luis Guerrero Rascado⁶, Purificación López Mahía¹⁰, Amalia Muñoz¹², Constantino Muñoz Porcar¹, Carlos Pérez García-Pando^{5,13}, María Piñeiro Iglesias¹⁰, Natalia Prats⁸, Manuel Pujadas⁷, Alejandro Rodríguez Gómez¹, Mar Sorribas¹⁴, Gloria Titos⁶, Carlos Toledano⁴, María Pilar Utrillas¹¹, Margarita Yela¹⁴, Jesús Yus-Díez³

¹ CommSensLab, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cataluña

² Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña (IEEC)

³ Instituto de Análisis Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas

⁴ Grupo de Óptica Atmosférica, Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica, Universidad de Valladolid

⁵ Barcelona Supercomputing Center- Centro Nacional de Computación (BSC)

⁶ Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía (IISTA) – Universidad de Granada

⁷ Departamento de Medio Ambiente, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)

⁸ Centro de Investigación Atmosférica de Izaña, Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)

⁹ Laboratorio de Contaminación Atmosférica, Universidad Miguel Hernández

¹⁰ Grupo Química Analítica Aplicada (QANAP), Instituto Universitario de Medio Ambiente (IUMA), Departamento de Química, Universidade da Coruña

¹¹ Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Universidad de Valencia

¹² Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM)

¹³ ICREA

¹⁴ Área de Investigación e Instrumentación Atmosférica – Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)

3.1. Introducción.

ACTRIS (Aerosol, Clouds and Trace gases Reserach Infrastructure, <https://www.actris.eu/>) es una infraestructura distribuida de investigación atmosférica europea de ámbito continental que proporciona datos de calidad, mediante observaciones sistemáticas, campañas específicas de medida y experimentos controlados, sobre las distribuciones de componentes atmosféricos de vida corta (aerosoles, nubes y gases traza reactivos), los procesos en que intervienen y su influencia en la calidad del aire, en los fenómenos meteorológicos y en la evolución del clima.

ACTRIS está en proceso de constituirse como una infraestructura permanente del Espacio de Investigación Europeo bajo la figura jurídica de un Consorcio de Infraestructura de Investigación Europea (ERIC por sus siglas en inglés) y se espera que España sea miembro fundador de éste.

ACTRIS-España reúne a los grupos de investigación españoles que participan en la infraestructura paneuropea y coordina sus actividades en el ámbito nacional. Once instituciones de las que forman ACTRIS-España, formalizando la colaboración que ha existido entre ellas desde hace mucho tiempo, se han constituido como una Unidad Mixta de Investigación (JRU por sus siglas en inglés).

ACTRIS se organiza en Instalaciones Centrales (Central Facilities) e Instalaciones Nacionales (National Facilities). Las instalaciones centrales se subdividen en los grupos de Soporte General, constituido por la Oficina Central y el Centro de Datos, de Centros Temáticos (Topical Centres). La Oficina Central dirige y coordina todas las actividades de ACTRIS. El Centro de Datos organiza los resultados de todas las medidas, sistemáticas o de campañas, obtenidas por las instalaciones nacionales de ACTRIS y los sirve a los usuarios externos gratuitamente y en abierto según los principios FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable).

Los Centros Temáticos, seis en total, uno por cada componente (aerosoles, nubes y gases trazas) objeto de investigación por ACTRIS y por cada uno de los grupos de técnicas de medida (in situ o por teledetección), se encargan de proporcionar soporte de calibración y control de calidad de los instrumentos y datos proporcionados por las Instalaciones Nacionales.

Las Instalaciones Nacionales constituyen la parte de la infraestructura en la que se realizan las medidas de los componentes atmosféricos objeto de la investigación de ACTRIS. Se distingue entre Plataformas de Observación (Observational Platforms) y Plataformas Exploratorias (Exploratory Platforms). Las Plataformas de Observación realizan medidas sistemáticas que permiten poner de manifiesto cambios y tendencias a medio y largo plazo en las variables medidas, participan también en campañas de medidas destinadas al estudio de procesos específicos o eventos singulares y ofrecen acceso físico y remoto a usuarios externos que deseen emplear las instalaciones para experimentos definidos por ellos. Todas las medidas se ponen a disposición de todos los usuarios a través del Centro de Datos. Las Plataformas Exploratorias se dividen a su vez en Cámaras de Simulación Atmosférica y Laboratorios, que permiten realizar experimentos en condiciones controladas, y Plataformas móviles, que permiten desplazar un conjunto de instrumentos a un lugar determinado de interés para llevar a cabo campañas de medidas. Las Instalaciones Nacionales deben satisfacer unos requisitos mínimos en cuanto a su instrumentación y unos exigentes controles de calidad de los datos proporcionados para poder ser consideradas instalaciones con el sello de calidad ACTRIS.

La figura 3.1 muestra la distribución geográfica de las potenciales instalaciones nacionales de ACTRIS-España y las que se proponen como instalaciones nacionales iniciales, que ya llevan tiempo contribuyendo a las bases de datos de ACTRIS.

ACTRIS-España propone inicialmente plataformas de observación de medidas de aerosoles in-situ mediante diversos tipos de instrumento (7), de medidas de aerosoles por teledetección con lidares avanzados y fotómetros solares (3) y de nubes por teledetección mediante radar (1). Propone también la cámara de simulación atmosférica EUPHORE, equipada para medidas de aerosoles y de gases traza reactivos por técnicas in situ, como plataforma exploratoria. Por otra parte, existen potencialidades para incluir en el futuro plataformas adicionales de medidas de aerosoles, nubes y gases traza por técnicas in situ y de teledetección de aerosoles, así como una plataforma exploratoria constituida por aeronaves pilotadas a distancia equipadas con instrumentos de medidas de aerosoles in situ.

Además, ACTRIS-España participa en Instalaciones Centrales de ACTRIS a través de AEMET y de la Universidad de Valladolid, que, mediante sus actividades de calibración de fotómetro solares dentro de AERONET-Europe, son unidades del Centro para Teledetección de Aerosoles (CARS, por sus siglas en inglés) y el Barcelona Supercomputing Center (BSC) que contribuye a la unidad de Localización de Datos, Acceso Virtual y Servicio (DVAS por sus siglas en inglés) del Centro de Datos.

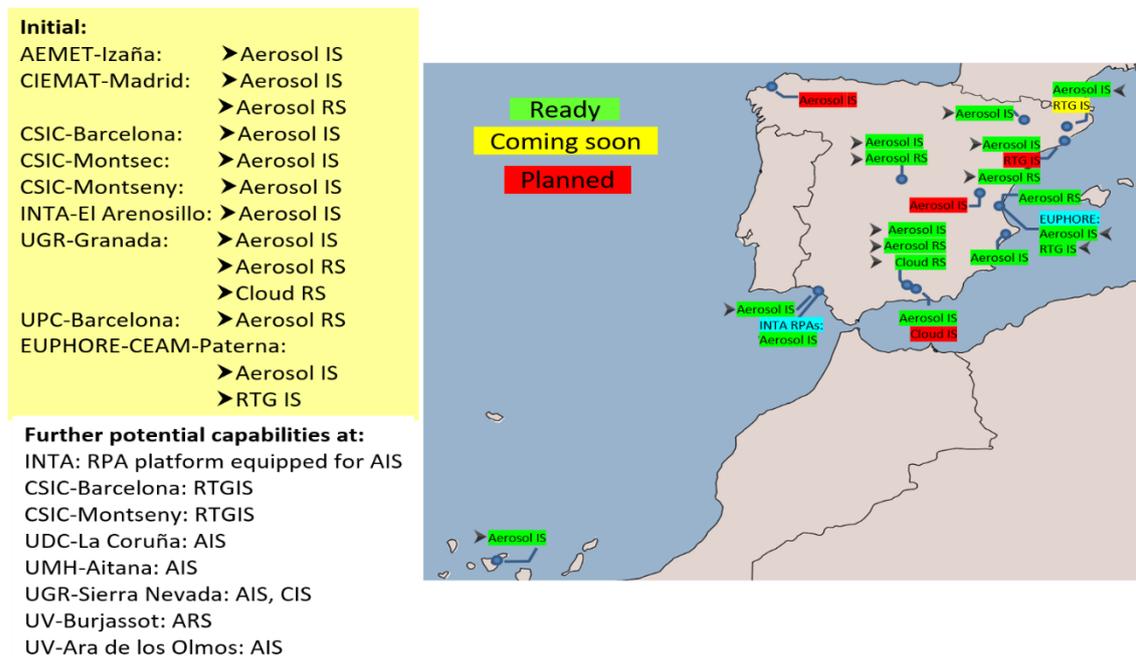


Figura 3.1. Instalaciones nacionales potenciales de ACTRIS-España. Sobre fondo amarillo la propuesta de inclusión inicial en ACTRIS. IS: in situ; RS: remote sensing (teledetección); RTG: reactive trace gases; RPA; remotely piloted aircraft (aeronave pilotada a distancia); AIS: aerosol in situ, ARS: aerosols remote sensing; CIS: cloud in situ.

En las secciones siguientes, se presentan las actividades de ACTRIS durante el primer confinamiento de 2020 debido al COVID-19 y resultados preliminares de una actividad de análisis de los datos obtenidos que, debido a su complejidad, sigue en marcha y dista aún de estar finalizada.

3.2. Observaciones de ACTRIS-España durante el primer confinamiento por COVID-19 en 2020.

El confinamiento, iniciado a mediados de marzo de 2020, a que dieron lugar las medidas sanitarias impuestas para contener la pandemia de COVID-19, supuso una alteración brusca en las fuentes antropogénicas de algunos tipos de aerosoles y gases traza en toda Europa.

Como el resto de actividades humanas, las de ACTRIS-España se vieron afectadas por las restricciones de desplazamiento resultantes del confinamiento. Sin embargo, algunas instalaciones de ACTRIS y de lo que podemos llamar ecosistema de ACTRIS (estaciones de observación o monitorización que no reúnen las condiciones instrumentales o de control de calidad para poder ser instalaciones nacionales, pero que proporcionan valiosos datos sobre variables atmosféricas relevantes para ACTRIS), consiguieron mantenerse activas y, en algunos casos, incrementar incluso el número de observaciones. La figura 3.2 indica las estaciones de ACTRIS-España que permanecieron activas durante el primer confinamiento de 2020, así como los fotómetros solares, algunos coincidentes con estaciones de ACTRIS-España y otros no, pero todos considerados como parte del ecosistema ACTRIS, cuyos datos se han analizado en el estudio preliminar.

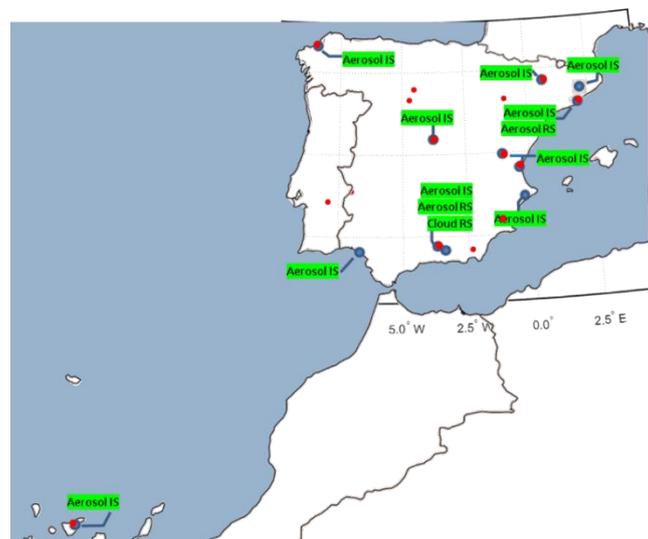


Figura 3.2. Estaciones de ACTRIS España activas durante el primer confinamiento de 2020. Los puntos rojos indican la localización de fotómetros solares de AERONET, parte del ecosistema ACTRIS, que también se han considerado en el análisis.

3.3. Resultados preliminares de las medidas de aerosoles por teledetección.

Se han analizado resultados obtenidos técnicas de teledetección empleando fotómetros solares (técnica pasiva) y lidar (técnica activa). Los fotómetros solares usan la propia luz del sol para obtener información sobre propiedades de los aerosoles integradas sobre la columna atmosférica durante las horas de día. Los lidares utilizan una fuente de luz propia (láser pulsado) para obtener información con resolución en distancia tanto de día como de noche. Aunque existen métodos sinérgicos que combinan medidas de fotómetros solares con medidas de lidar para obtener parámetros microfísicos de los aerosoles resueltos en distancia, en este estudio preliminar no se han considerado.

3.3.1. Resultados del análisis de fotómetros solares.

Uno de los parámetros fundamentales proporcionados por los fotómetros solares es el espesor óptico de los aerosoles (AOD por sus siglas en inglés) que indica, en unidades logarítmicas, la extinción de la radiación solar que produce el aerosol contenido en la columna atmosférica a una cierta longitud de onda [7]. La figura 3.3 muestra, para todos los fotómetros solares indicados en la figura 3.2, las diferencias entre el espesor óptico de los aerosoles a la longitud de onda de 440 nm medido en el período de tiempo que va desde el 1 de marzo de 2020 hasta el 5 de julio de 2020 y los promedios para el mismo período del año obtenidos de las medidas de los años 2015 a 2019. Los datos se han promediado a su vez en intervalos de dos semanas (luego sólo se presenta un dato cada dos semanas) para intentar suavizar la variabilidad de un día a otro. La primera línea vertical magenta indica el inicio del primer estado de alarma, la línea vertical roja el inicio del período de cese de actividades no esenciales, la siguiente línea magenta la finalización de éste, la línea cian el inicio de la desescalada y la línea verde el fin del primer estado de alarma.

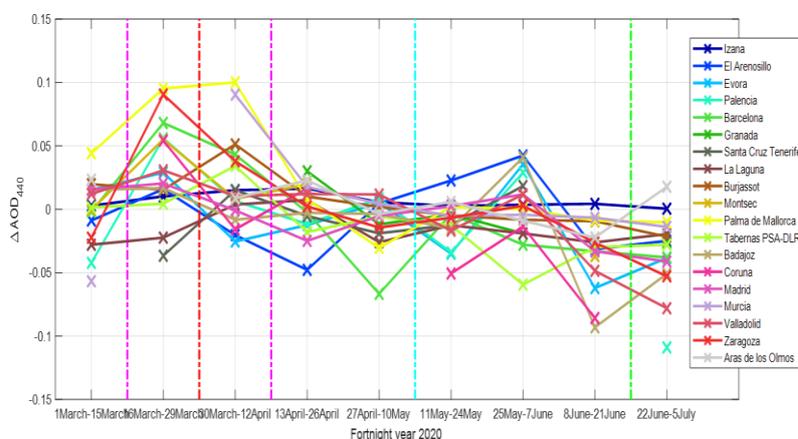


Figura 3.3. Diferencias entre el espesor óptico de los aerosoles medido entre el 1 de marzo y el 5 de julio de 2020 y el resultado de promediar los espesores ópticos para el mismo período del año entre los años 2015 y 2019. A su vez, los datos de espesor óptico

se han promediado en períodos de dos semanas. La primera línea vertical de color magenta indica el inicio del confinamiento; la línea roja indica el inicio del período de cese de actividades no esenciales el 30 de marzo de 2020, la siguiente línea magenta el final de este período, la línea cian el inicio de la desescalada y la línea verde el fin del primer estado de alarma.

Se observa globalmente una tendencia descendente sobre todo el período analizado, que indicaría una disminución del AOD conforme transcurre el tiempo. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que se parte, en las primeras semanas del confinamiento, de una situación en que la mayoría de las estaciones presentan un AOD superior al promedio de los 5 años precedentes. Sólo hacia el final del estado de alarma la mayoría de las estaciones presentan en 2020 un AOD menor que la media de los años precedentes y, aun así, con valores que pueden ser atribuibles a la variabilidad natural.

En la Figura 3.4 se presentan los resultados de un análisis más detallado en el que se consideran pares de fotómetros solares situados en ubicaciones relativamente próximas, una en zona urbana y la otra en zona de fondo remoto, para las que es razonable suponer que las masas de aire por encima de la capa de mezcla son de características parecidas. Para esos pares de estaciones se han calculado las diferencias de los promedios quincenales del AOD a 440 nm entre el inicio del confinamiento y el inicio del segundo estado de alarma y se les han restado, para las mismas quincenas del año, las medias de esas diferencias correspondientes a los 5 años anteriores. Se obtiene así, una “diferencia de diferencias” de AOD en la que cabría esperar valores negativos en caso de que la influencia de los aerosoles antropogénicos en el total del AOD, que debería ser más perceptible en zona urbana que en zona de fondo, fuese importante. Las interrupciones en las series de medidas ponen de manifiesto uno de los problemas que afectan a los sensores de aerosoles por teledetección, a saber, las nubes. Efectivamente, un fotómetro solar no puede funcionar adecuadamente en condiciones de cielo nuboso, de manera que, basta que la ubicación de uno de los dos fotómetros en un par esté afectada por nubes para que no se pueda generar el dato. La serie que presenta menos discontinuidades (la del par Burjassot – Ara de los Olmos) tiene un comportamiento cualitativamente similar al de la Figura 3.3, con valores que tienden a ser negativos (con excepciones) al final del período de relajación progresiva de las medidas de confinamiento, y después de ese período (no mostrado en la Figura 3.3), pero de nuevo, no puede descartarse con alta probabilidad que esa disminución de la diferencia de diferencias de AOD no sea debida a la variabilidad natural de la distribución de aerosoles.

En todo caso, el análisis realizado hasta ahora es muy preliminar y sería necesario introducir en él la situación atmosférica sinóptica para poder extraer conclusiones fiables.

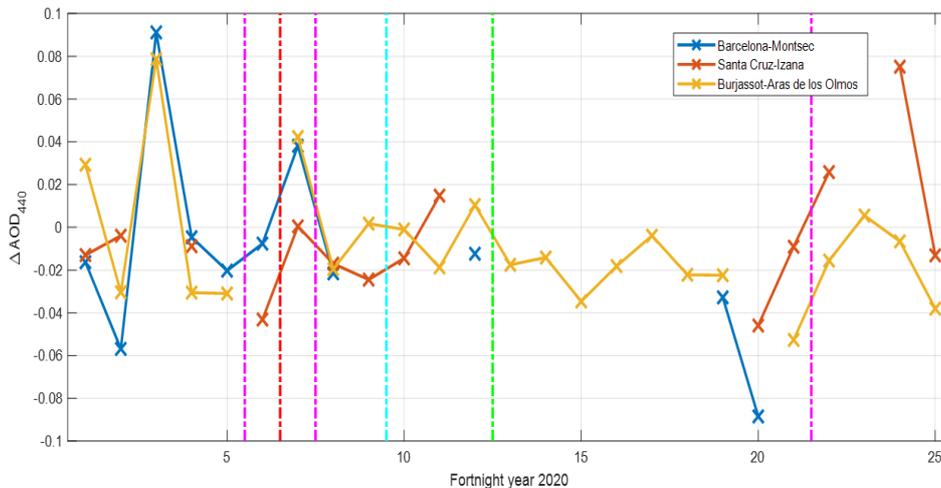


Figura 3.4. Diferencia entre los promedios quincenales de las diferencias de AOD a 440 nm entre una estación urbana y una estación de fondo remoto relativamente próxima (Barcelona-Montsec; Santa Cruz de Tenerife – Izaña; Burjassot – Ara de los Olmos) en el período comprendido entre el inicio de 2020 y el inicio del segundo estado de alarma y la media de los promedios quincenales para las mismas semanas del año desde 2015 a 2019. Los colores de las líneas verticales tienen el mismo significado que en la Figura 3.3. La tercera línea magenta indica el inicio del segundo estado de alarma. Nótese que el período de tiempo que abarca esta gráfica es mayor que el de la Figura 3.3.

3.3.2. Resultados del análisis de medidas lidar.

La Figura 3.5 muestra el promedio de los perfiles en altura del coeficiente de retrodispersión (backscatter) de los aerosoles, una magnitud relacionada con la concentración de aerosoles, a la longitud de onda de 532 nm para las medidas válidas efectuadas por el lidar de la Universidad Politécnica de Cataluña (línea negra) durante los meses de marzo (25 medidas, izquierda) y abril (121 medidas, derecha) de 2020 comparadas con el promedio de los perfiles las 208 medidas efectuadas durante los meses de marzo de 2015 a 2019 (línea verde en la gráfica de la izquierda) y de los perfiles de las 187 llevadas a cabo durante los meses de abril para los mismos años (línea verde en la gráfica de la derecha). El sombreado verde claro corresponde al intervalo entre más y menos una desviación típica alrededor del valor medio del promedio de 2015 a 2019; el sombreado rojo corresponde al mismo tipo de intervalo para el perfil promedio del mes de marzo de 2020. Cuando ambos sombreados se superponen resulta el sombreado verde oscuro. Se observa una tendencia a que el perfil promedio de marzo de 2020 sea superior al del promedio de los meses de marzo de los 5 años anteriores (hasta poco más de 6 km de altura, donde la contaminación por nubes en el promedio de los meses de marzo de 2015 a 2019 es claramente visible) que podría corresponder con la situación de AOD más alto que la media de los años precedentes detectada por muchos fotómetros solares (entre ellos, el de Barcelona) al principio del confinamiento. En los perfiles del mes de

abril se observan valores más altos en el promedio de 2020 que en el promedio de 2015-2019 para alturas por debajo de unos 2 km (nótese que las escalas del eje vertical son distintas en ambas gráficas) y más bajos por encima de esa altura (donde, por otra parte, también se observan valores anormalmente altos para el promedio 2015-2019 debidos a la contaminación por nubes). Sin embargo, es necesario ser muy prudente antes de extraer conclusiones, ya que habría que efectuar un cribado de perfiles contaminados por nubes y evitar posibles sesgos en el promedio 2015-2019 originados por un exceso de medidas en ocasiones especiales, por ejemplo, durante irrupciones de polvo sahariano.

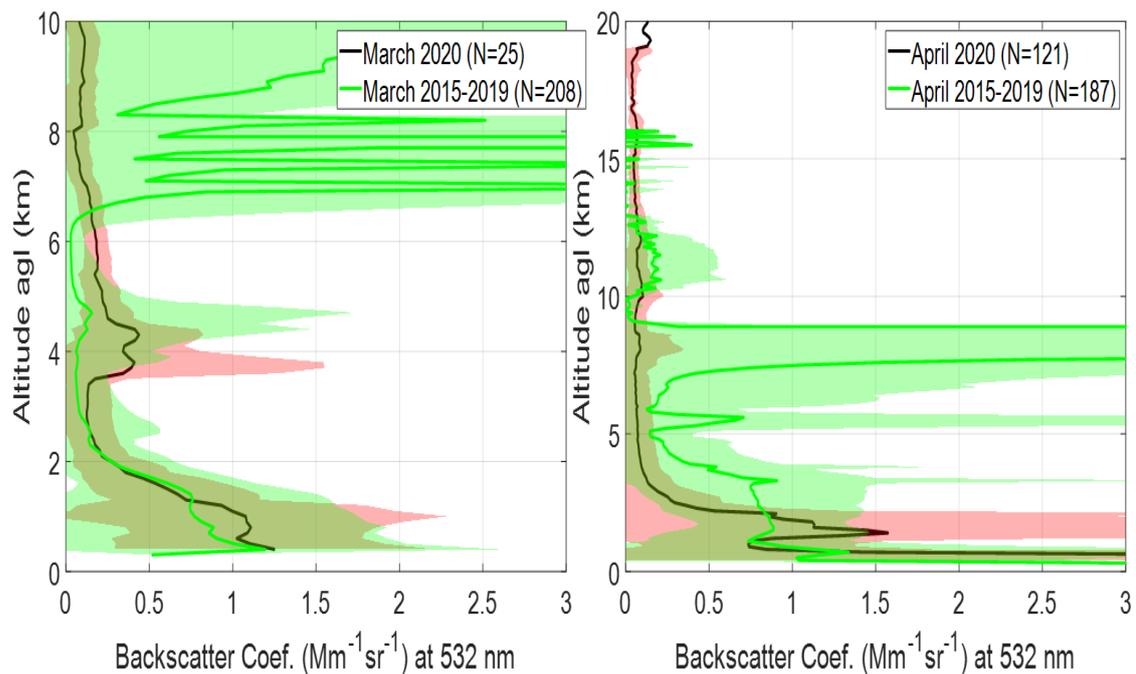


Figura 3.5. Promedio de los perfiles del coeficiente de retrodispersión a 532 nm (backscatter coefficient) de los aerosoles para las medidas efectuadas por el lidar de la Universidad Politécnica de Cataluña durante los meses de marzo de 2020 (línea negra de la gráfica de la izquierda) y de abril de 2020 (línea negra de la gráfica de la derecha) comparados respectivamente con el promedio de todos los perfiles de los meses de marzo de 2015 a 2019 (línea verde en la gráfica de la izquierda) y de todos los meses de abril en el mismo intervalos de años (línea verde en la gráfica de la derecha). El sombreado rojo indica el intervalo entre menos y más una desviación típica alrededor del valor promedio de las medidas de marzo (gráfica de la izquierda) y abril de 2020 (gráfica de la derecha). El sombreado verde claro corresponde al mismo tipo de intervalo para el promedio de las medidas de los meses correspondientes de 2015 a 2019. La superposición de las zonas sombreadas en rojo y las sombreadas en verdes da lugar al sombreado verde oscuro.

3.4. Resultados preliminares de las medidas de aerosoles mediante técnicas in situ.

La Figura 3.6 muestra las características de la ubicación y la distribución geográfica de las estaciones de ACTRIS-España que pudieron mantener medidas mediante instrumentos in situ, a saber, instrumentos que proporcionan información sobre la absorción de la radiación por las partículas (fotómetro de absorción multiangular (MAAP), etalómetro (modelo AE33 de Magee Scientific), fotómetro de absorción continua de luz (CLAP)) y nefelómetros que proporcionan información de la dispersión (scattering) de la radiación producida por las partículas. En este análisis preliminar sólo se presentan resultados (los relativos a los parámetros listados en azul en la Figura 3.6) de absorción de radiación. A pesar de lo preliminar de este análisis, si se observan diferencias significativas en los valores y comportamiento en el ciclo diario de los parámetros estudiados.

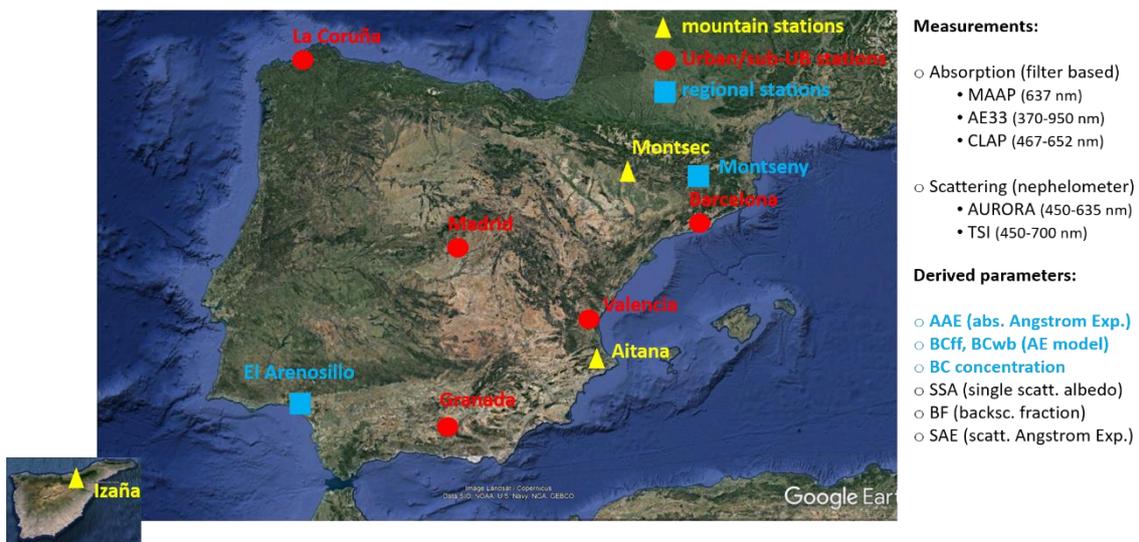


Figura 3.6. Distribución geográfica y características de la ubicación de las estaciones de ACTRIS-España que pudieron mantener medidas de aerosoles por técnicas in situ durante el confinamiento. También se indican los tipos de medida y los parámetros extraídos de éstas.

La Figura 3.7 presenta resultados del ciclo diario del exponente de Ångström de absorción (AAE) medidos en varias de las estaciones de ACTRIS-España. Dicho parámetro es indicativo de la proporción de partículas absorbentes procedentes de quema de biomasa respecto de las procedentes de combustibles fósiles y es tanto más alto cuanto mayor es la fracción del primer tipo de partículas (quema de biomasa) respecto de la fracción de la segunda (quema de combustibles fósiles). Las gráficas insertas en la figura presentan, en la parte de la izquierda, los valores de AAE obtenidos promediando sobre las horas de todos los días de marzo y abril de los años 2017 a 2019, mientras que la parte de la derecha muestra los valores promedio sobre las horas de todos los días de los meses

de marzo y abril de 2020. Se observa claramente un aumento del valor de AAE en casi todas las estaciones, especialmente las urbanas, donde destaca también una alteración del ciclo diurno, indicando un aumento en la proporción de partículas absorbentes procedentes de la quema de biomasa respecto de las producidas por la quema de combustibles fósiles. El efecto se detecta incluso en alguna estación de montaña, como la de Montsec, y es menos evidente en las estaciones de El Arenosillo y de la sierra de Aitana.

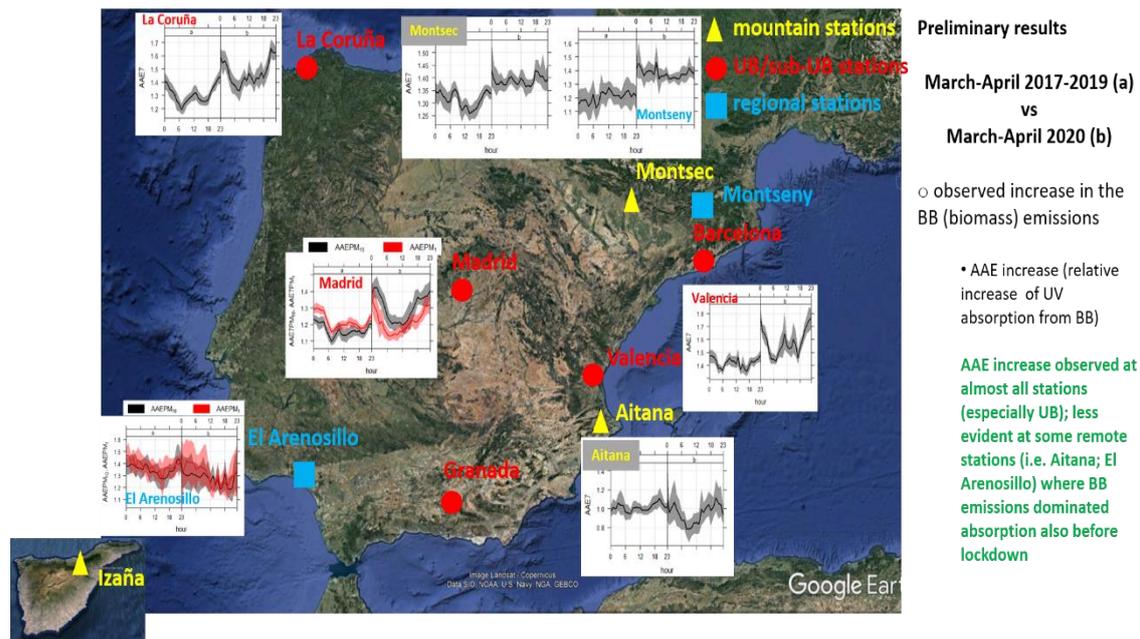


Figura 3.7. Ciclo diurno del exponente de Ångström de absorción (AAE) para varias estaciones de ACTRIS-España. La parte de la izquierda presenta el promedio de AAE de los días de los meses de marzo y abril de los años 2017 a 2019 y la parte de la derecha el promedio de los días de marzo y abril de 2020. En los casos de Madrid y El Arenosillo se distingue por tamaño de partículas (PM₁₀ en negro y PM₁ en rojo). Los sombreados indican el intervalo entre menos y más una desviación típica de las muestras alrededor de la media estimada.

Las gráficas insertas en la Figura 3.8 muestran, en un formato similar a las de la Figura 3.7, las concentraciones de “carbono negro” (black carbon), contenido en partículas resultantes de la combustión incompleta de combustibles carbonosos, que absorbe en una buena parte del espectro de la radiación solar y que son causantes de un efecto de calentamiento [8]. En marzo y abril de 2020 se observa claramente en las estaciones de medida urbanas y suburbanas (Valencia, Madrid, La Coruña) una disminución de la concentración total de carbono negro, así como una alteración del ciclo diurno de la concentración, respecto de los valores de los meses de marzo y abril promediados entre 2017 y 2019, debida principalmente a la reducción de las emisiones de procedentes de la quema de combustibles fósiles (BCff: black carbon fossil fuel); la reducción de la concentración de carbono negro resultante de la quema de combustibles fósiles respecto

de la que procede de la quema de biomasa (BCwb: black carbon wood burning) es consistente con el aumento del exponente de Ångström de absorción mostrado en la Figura 3.7. El efecto es menos claro en la estación de fondo regional del Montnseny. En la estación de montaña del Montsec en cambio, los niveles de carbono negro procedentes de la quema de combustibles fósiles no experimentan un gran cambio tras el confinamiento, mientras que los debidos a la quema de biomasa aumentan ligeramente, resultando en un aumento de la concentración de carbono negro total durante el confinamiento.

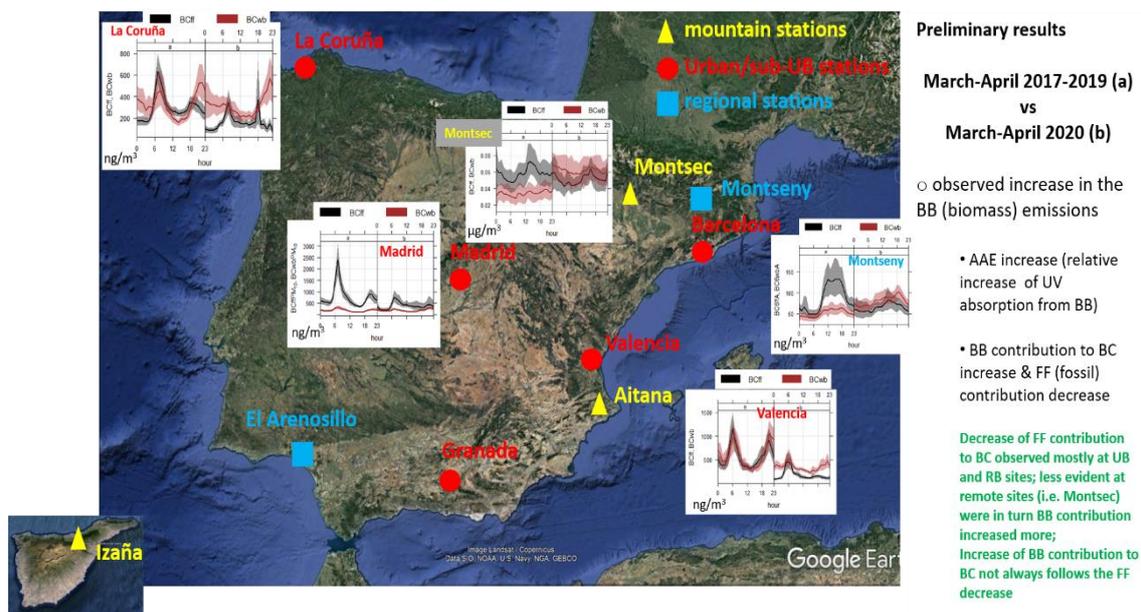


Figura 3.8. Ciclo diario de las concentraciones de carbono negro para varias estaciones de ACTRIS-España para los meses de marzo y abril. En la parte de la izquierda de las gráficas: valores promedio de los días de marzo y abril entre 2017 y 2019. En la parte derecha de las gráficas: valores promedio de los días de marzo y abril de 2020. En negro: concentraciones procedentes de la quema de combustibles fósiles (BCff). En rojo: concentraciones procedentes de la quema de biomasa. Los sombreados corresponden al intervalo de menos una desviación típica a más una desviación típica alrededor de la media.

3.5. Método de “normalización a la meteorología” aplicado a la concentración de NO₂.

Las actividades de ACTRIS durante el confinamiento de 2019 han incluido desarrollo de métodos de modelización para calibrar el efecto de la reducción de emisiones antropogénicas en variables atmosféricas. Como se ha discutido en la sección 3.3.3, una de las dificultades en la evaluación del efecto de la reducción de la actividad humana en

las variables medidas (relativas a los aerosoles en aquel caso) es la variabilidad asociada a la influencia de la situación meteorológica. En el Barcelona Supercomputer Center se ha desarrollado un modelo basado en técnicas de “machine learning” para “descontar” el efecto de la meteorología concreta, que se ha aplicado a los niveles de NO₂ medidos por estaciones de monitorización de la calidad del aire, parte del “ecosistema ACTRIS” mencionado en la sección 3.3.2, repartidas por toda España [9]. El modelo se ha entrenado suministrándole la media de las observaciones diarias de concentraciones de NO₂ durante los años 2017 a 2019 y un conjunto exhaustivo de variables meteorológicas, de radiación solar y de día de la semana simultáneas con las observaciones (para más detalles, consúltese la referencia 9). La Figura 3.9. extraída de dicha referencia, muestra conjuntamente las predicciones del modelo, junto con las medias diarias de las observaciones de las estaciones entre los meses de enero y abril de 2020.

Se observa que, en el período de 2020 previo al inicio del confinamiento, las predicciones del modelo siguen notablemente bien las observaciones. A partir del inicio del confinamiento, las observaciones, sobre todo las correspondientes a estaciones ubicadas en zonas habitualmente de intenso tráfico (Castellana para Madrid, Eixample para Barcelona) caen notablemente, incluso por debajo del intervalo de incertidumbre, respecto de las del modelo, que sigue indicando los niveles que hubiesen sido esperables, para el día de la semana y las condiciones meteorológicas dadas, de no haberse producido la reducción de la actividad humana.

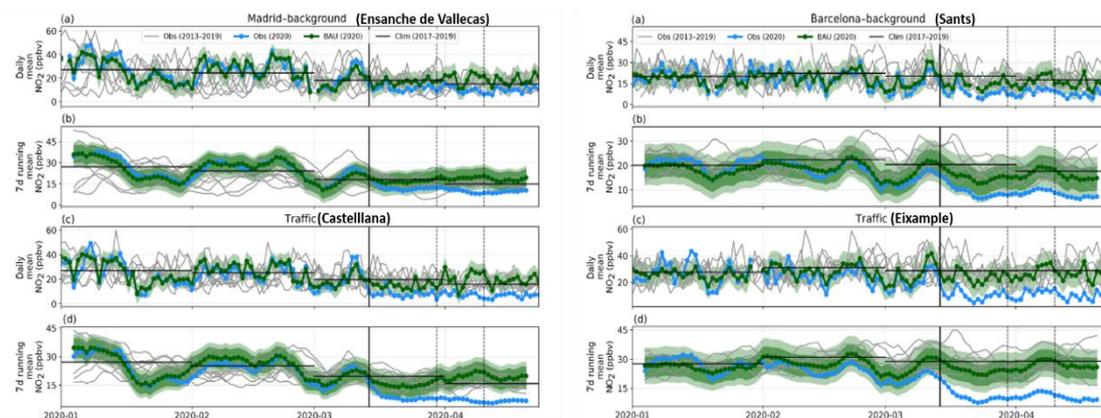


Figura 3.9. (extraída de la referencia 9). Concentraciones de NO₂ medidas (puntos azules) y predichas por el modelo de “machine learning” (puntos verdes) en cuatro estaciones de monitorización de calidad del aire en Madrid y en Barcelona. Para cada estación se representan las medias diarias (gráfica superior) y una media deslizante sobre 7 días de dichas medias diarias (gráfica inferior). Se representan además los datos para el mismo período de tiempo de cada uno de los años de 2017 a 2019 y las medias mensuales sobre esos años (líneas negras horizontales). Los sombreados representan las incertidumbres estimadas del modelo al nivel de confianza del 90% en la estimación diaria (sombreado verde claro) y promediada sobre 7 días (sombreado verde oscuro). La línea vertical negra de trazo continuo indica el inicio del período de confinamiento y

las dos líneas verticales de trazo discontinuo delimitan el período de cese de actividades no esenciales.

3.6. Conclusiones.

A pesar de las restricciones en el desplazamiento de personas impuestas para contener la expansión de la pandemia de COVID-19, ACTRIS-España fue capaz de mantener operativas la mayor parte de sus instalaciones durante el primer y más estricto período de confinamiento.

Los datos obtenidos por las estaciones de medida están disponibles en las bases de datos de ACTRIS (<https://actris.nilu.no/Data/>) y de AERONET (https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/data.html) y son accesibles en abierto de manera gratuita para toda la comunidad científica (y el público en general).

Los resultados preliminares del análisis llevado a cabo por los investigadores de ACTRIS-España muestran un efecto claro de la reducción de la actividad humana en las medidas de aerosoles realizadas mediante sensores de superficie y un efecto menos claro en las medidas por teledetección, tanto en columna (medidas de fotómetros solares) como con resolución en altura (medidas de lidares), probablemente por verse éstas más afectadas por la situación meteorológica sinóptica.

Se ha contribuido asimismo a un progreso metodológico aplicando modelos de “machine learning” a la evaluación del efecto de la reducción de las actividades en las concentraciones de NO₂ que puede extenderse a otras variables de interés, aunque probablemente sea más fácilmente aplicable a medidas por instrumentación in situ, más dependientes de la meteorología local, que a medidas por teledetección, más afectadas por la situación sinóptica.

Agradecimientos

El trabajo presentado ha sido apoyado en parte por los siguientes proyectos e instituciones financiadoras, a las que los autores desean mostrar su agradecimiento: ACTRIS IMP (Proyecto H2020, Grant agreement 871115), GRASP-ACE (Proyecto H2020, Grant agreement 778349), Red de Excelencia ACTRIS-España (Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, ref. CGL2017-90884-REDT), “Sinergia de teledetección pasiva y activa para la investigación de las interacciones aerosoles-nubes RESA-CI” (proyecto AEI ref. PID2019-103886RB-I00), CRISOL (proyecto AEI/FEDER, ref. CGL2017-85344-R), “Tecnologías de Vanguardia para Investigación en Aerosoles y Gases Atmosféricos TIGAS-CM” (Comunidad de Madrid, ref. Y2018/EMT-5177), Programa de Consolidación y Estructuración de Unidades de Investigación Competitivas (Xunta de Galicia, ref. ED431C 2017/28), FEDER-MINECO/Xunta de Galicia (ref. UNLC15-DE-3097), “Biodisponibilidad in-vitro de contaminantes prioritarios en materia particulada atmosférica. Evaluación de

riesgos para la salud y predicción de la toxicidad” (proyecto AEI/FEDER, ref. RTI2018-101116-B-I00), CAIAC (Proyecto I+D+I “Retos Colaboración” PID2019-108990PB-100), “Efecto de la Interacción Aerosoles-Nubes con Medidas de Suelo y Teledetección” (Proyecto MCINN ref. RTI2018-096548-B-I00).

3.7. Referencias bibliográficas.

- [7] C. Toledano et al., “Aerosol optical depth and Ångström exponent climatology at El Arenosillo AERONET site (Huelva, Spain),” *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 133, no. 624 PART A, pp. 795–807, 2007, doi: 10.1002/qj.54.
- [8] M. O. Andreae, “The dark side of aerosols,” *Nature*, vol. 409, no. 6821. Nature Publishing Group, pp. 671–672, Feb. 08, 2001, doi: 10.1038/35055640.
- [9] H. Petetin *et al.*, “Meteorology-normalized impact of the COVID-19 lockdown upon NO₂ pollution in Spain,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 20, no. 18, pp. 11119–11141, 2020, doi: 10.5194/acp-20-11119-2020.

4. EVOLUCIÓN DE LA OBSERVACIÓN DE LA TIERRA ESPACIAL RELACIONADA CON LA VIGILANCIA Y GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL.

Victoriano Moreno Burgos. Colegio Oficial de Físicos

4.1. Introducción.

La **Observación de la Tierra Espacial** es una tecnología que facilita el seguimiento de los recursos, el control del medio ambiente y la generación de mapas de estado fenológico. Mediante la OTE se puede adquirir y analizar datos sobre los recursos naturales del planeta Tierra, sin necesidad de tener contacto físico con ellos.

Los sensores son los encargados de captar la información, normalmente están colocados a bordo de satélites, tanto orbitales como geoestacionarios, y de forma continua toman información de distintas partes de la superficie terrestre del planeta Tierra.

La información, así obtenida, pocas veces puede usarse en estado original. El flujo de energía que llega o es captado por un sistema a bordo del satélite es transformado en dato útil para nuestra aplicación. En todo sistema de Teledetección podemos encontrarnos con cuatro partes básicas: la fuente de radiación, la atmósfera, el target (objeto) y el sensor.

Los sistemas de Teledetección (OTE) actuales se clasifican en: activos y pasivos. En un sistema pasivo de Teledetección, la fuente primaria de radiación es el sol, cuya energía es espectralmente distribuida a través del espectro electromagnético. En un sistema activo de Teledetección, la fuente de radiación es la misma, es decir, el sensor emite una señal sobre la superficie que se quiere estudiar, esta "choca" y es devuelta al sensor, que la recoge. Este tipo de sensores tiene la ventaja de funcionar y generar información independiente de las condiciones atmosféricas del entorno.

El proceso de captación de la imagen que se lleva a cabo por los sensores de los satélites es semejante al de una cámara fotográfica y no muy distinto del ojo humano. Sin embargo, cada sensor es capaz tan solo de recibir una determinada banda de frecuencias, asimilable a un color en el rango visible del espectro, pero extensible a cualquier frecuencia superior o inferior a la banda visible

El funcionamiento del sensor tiene lugar barriendo la superficie en sentido perpendicular al avance del satélite. Y lo que capta es la potencia o brillo con que su particular banda espectral es reflejada por los objetos. Este barrido continuo se discretiza en celdillas de terreno o elementos denominados pixel, y que corresponden a unas determinadas coordenadas geográficas. Cuanto menor es el tamaño del pixel, la resolución o precisión es mayor, análogamente al tamaño del grano de la película fotográfica. Dadas las grandes

alturas a que circula el satélite, el lado del punto imagen puede ser desde decenas de metros hasta un **cuarto metro**; de modo que un recinto de varias áreas de superficie es reconocido por un único valor de brillo integral de los diversos objetos que en él se encuentran.

Los datos obtenidos por la OT Espacial constituyen una información que da un mayor conocimiento de los recursos de la Tierra y su medio ambiente. Los satélites constituyen unas plataformas ideales para poner sobre ellos sensores que pueden captar unas vistas sinópticas de grandes áreas de la Tierra y datos multiespectrales espaciados en el tiempo.

El 4 de octubre de 1957 se puso en órbita el **Sputnik 1**. Desde entonces los satélites han cambiado nuestra concepción del mundo. Hoy existe una gran cantidad de ellos en órbita alrededor del planeta Tierra, destinados a usos civiles y militares. Comenzando con el primer satélite de Teledetección, **Landsat-1**, lanzado en julio de 1972, se hicieron posibles los estudios de cambio medioambientales que se han ido produciendo desde 1972. También a finales de 1999, apareció el primer satélite de alta resolución (puntos imagen de una resolución de 1 m) que se llama **IKONOS**, esto ha hecho que la capacidad de la Teteledetección se haya incrementado pudiendo acceder a proyectos que contemplen fenómenos locales (ciudades, términos municipales, catastro, urbanismo, agricultura de precisión, cartografía digital de muy alta escala (1:2.500), etc.). La **ESA (Agencia Espacial Europea)** puso en órbita en el año 2001 una gran plataforma satelital denominada **ENVISAT** que llevaba a bordo varios sensores de distintas tecnologías y resoluciones espaciales y multiespectrales. **MERIS y ASAR** fueron los más significativos, con el objetivo de vigilar y gestionar el medioambiente a nivel global del planeta. Otra familia de satélites importante fue la puesta en órbita por Francia con el programa **SPOT**. Así se han ido poniendo en órbita satélites de Observación de la Tierra a distintos niveles por organizaciones públicas y privadas.

A finales del 2010 se impone una nueva forma de obtener información medioambiental desde el espacio e irrumpen las **constelaciones de satélites**, que consiste en poner en la misma órbita varios satélites que llevan a bordo sensores de idéntica naturaleza y decalados en el tiempo con el fin de poder acercar la información a casi tiempo real. También se ha avanzado con las resoluciones espaciales llegando a tener en el campo civil resoluciones de hasta un **cuarto de metro**.

La UE ha comenzado a partir del 2012 con el **programa COPERNICUS** a tener en órbita varios satélites de OT (ópticos y SAR) para vigilar y gestionar el medioambiente a nivel europeo y mundial, esto satélites se denominan "**Sentinels**": **1,2,3....**España también tiene satélites propios en base al programa nacional de OT (**PNOT**) ha puesto en órbita en el 2018 un satélite SAR denominado **PAZ** y a finales de este año pondrá en órbita también un satélite con un sensor óptico denominado **Ingenio**.

Las actividades medioambientales que son susceptibles de ser vigiladas y gestionadas desde el espacio por la Observación de la Tierra son entre otras: Contaminación de aguas y terreno, Impacto por obra civil, Recursos Hídricos, procesos de deforestación, Incendios Forestales, Actividades Urbanísticas, Actividades Pesqueras, Inundaciones,

Actividad Volcánica y Sísmica, Subsidiencias, Deslizamientos de laderas, Generación de cartografía medioambiental, Gestión de riesgos químicos, Nucleares, etc.

A continuación, se describe como se emplea la Observación de la Tierra desde el Espacio en resolver algunos de los problemas medioambientales anteriormente enunciados.

4.2. Contaminación.

Tomando en un sentido muy amplio el término contaminación, la Observación de la Tierra sirve como tecnología para un control alto de los agentes contaminantes dentro de un territorio. Puede servir de apoyo a la definición de planes nacionales, especialmente los interregionales, a la valoración de los agentes contaminantes de aguas litorales o continentales, o a la situación de actuaciones de saneamiento, etc.

En especial en el tema de aguas, las situaciones de concentración de contaminación debidas a vertidos o pérdidas y la aparición de capas de petróleo pueden detectarse y seguirse utilizando imágenes multiespectrales que, según la escala, será de satélite o de sensor aerotransportado. También se ha utilizado en el seguimiento de vertidos de aguas residuales, sedimentos, desechos de óxidos de metales pesados, etc. Son vertidos en general que tienen características espectrales netamente diferentes del agua del mar, muy coloreado o con alta temperatura.

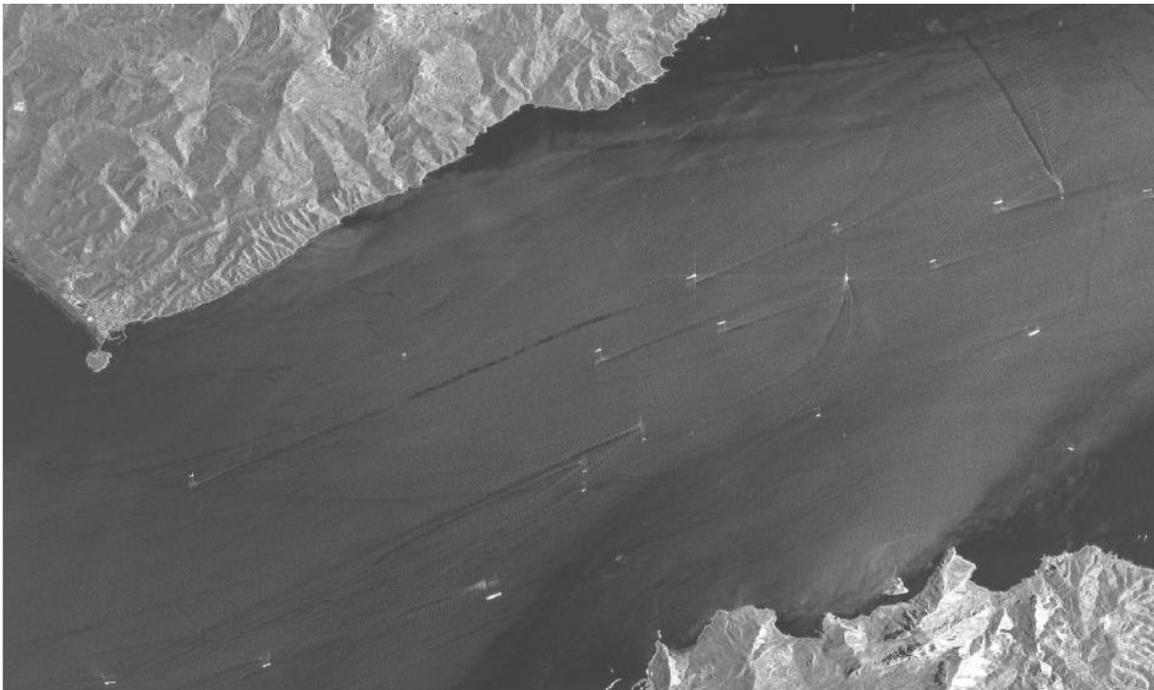


Figura 4.1. Imagen SAR de vertidos de petróleo en el estrecho de Gibraltar

Los vertidos de hidrocarburo en el mar son especialmente visibles en las imágenes radar. En la figura anterior se muestra una imagen SAR en la que se ha destaca, en color oscuro, vertidos de petróleo en el estrecho de Gibraltar. También son visibles los puntos brillantes casi blancos correspondientes a los barcos causantes de los vertidos o manchas de petróleo

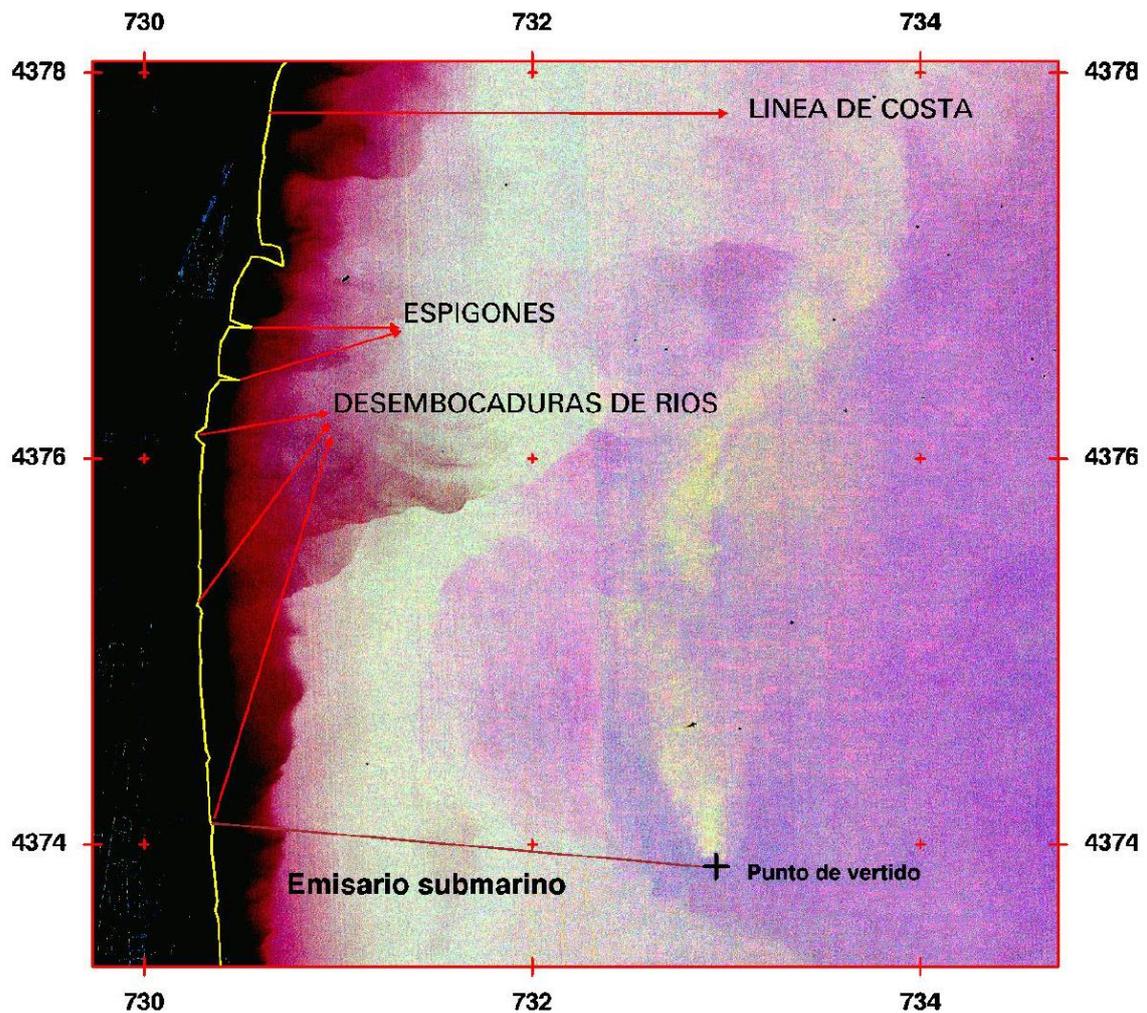


Figura 4.2. Imagen SAR de vertidos de diferentes contaminantes.

Podemos observar diferentes contaminantes de agua litoral en esta zona de costa: turbidez, concentración de clorofila, etc. Nos da una información del grado de calidad de las aguas costeras.

4.3. Impacto Ambiental.

Este tipo de análisis ocasionado por el trazado de una carretera, ferrocarril, etc., puede ser abordado por la Observación de la Tierra. Mediante ésta se pueden estudiar los trabajos posibles, de forma que, entre otras consideraciones (como longitud, conexión de núcleos urbanos, dificultad de trazado, etc.), ayude además a evaluar rápidamente la extensión del impacto ambiental inmediato en zonas de interés ecológico. Consideraciones suplementarias durante la construcción sería la ubicación de las instalaciones de obras o el control de los lugares de vertidos de escombros. También se puede seguir el impacto en la recuperación de taludes.

En la siguiente imagen se muestran diferentes trazados de una línea de ferrocarril entre Soto del Real y Segovia, atravesando la sierra de Guadarrama.

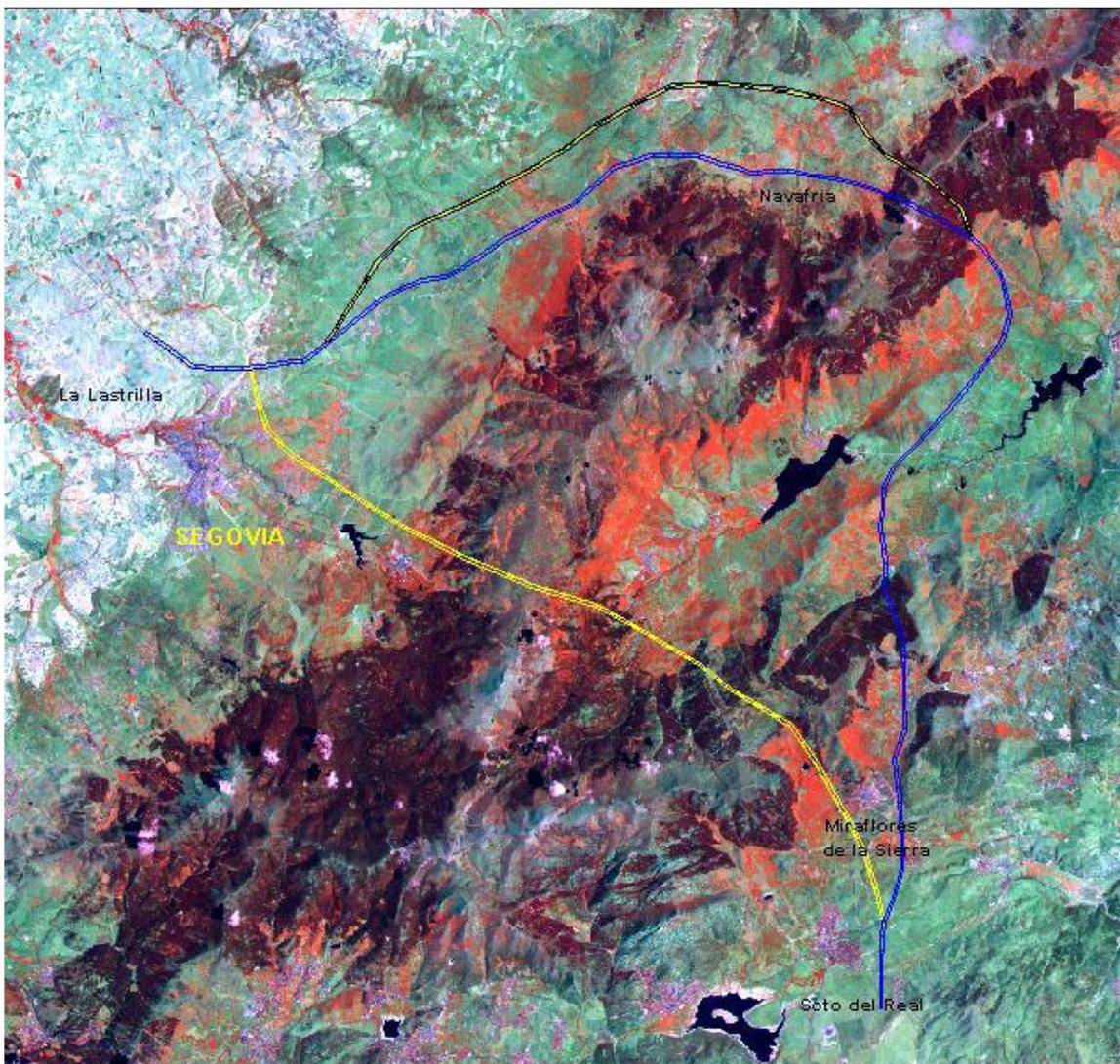


Figura 4.3. Distintos trazados para el tramo ferroviario Soto del Real - Segovia.



Figura 4.4. Estado de la explanación en obras de construcción de líneas de Alta Velocidad Ferroviaria.

4.4. Hidrología y Agricultura.

Uno de los problemas críticos actualmente es la explotación de un recurso natural tan elemental como el agua. Aunque el problema general puede ser la escasez de agua en la mayoría de las zonas, se acentúa especialmente en aquellas en las que se produce una sobre-explotación de los acuíferos para regar cultivos; este hecho puede desembocar también en la salinización de las aguas y tierras en las zonas costeras, o bien la extenuación de los mismos en zonas en las que el balance de agua recogida por la lluvia y la explotación no permite su recuperación.

Esta problemática, según se muestra en la figura siguiente, es fácilmente dimensionable con la utilización de imágenes de Observación de la Tierra. Así mismo, se pueden realizar estudios históricos que analicen la situación e intensidad de las explotaciones en el pasado.

4.5. Inundación.

La identificación y la cartografía de las áreas con alto riesgo de sufrir inundaciones es una necesidad para cualquier estudio de planificación territorial. Un elemento claramente favorable a la Observación de la Tierra, respecto a las técnicas convencionales de control de áreas inundadas, es la mayor cobertura proporcionada por el satélite y por consiguiente su menor coste en tiempo y mano de obra. La Teledetección es especialmente útil ya que, seleccionando el sensor y la plataforma adecuadas, se puede obtener muy rápidamente una cobertura sinóptica de la extensión de la inundación. En la imagen siguiente se ha cartografiado la extensión de una inundación en una imagen SAR, y al colocarla sobre el modelo digital del terreno nos ofrece una perspectiva de la misma.

En general, resulta posible delimitar el área afectada por la avenida e identificar y cartografiar los efectos de la misma en las zonas circundadas (erosión del suelo, acumulación de materiales, etc., como se muestra en la siguiente imagen).

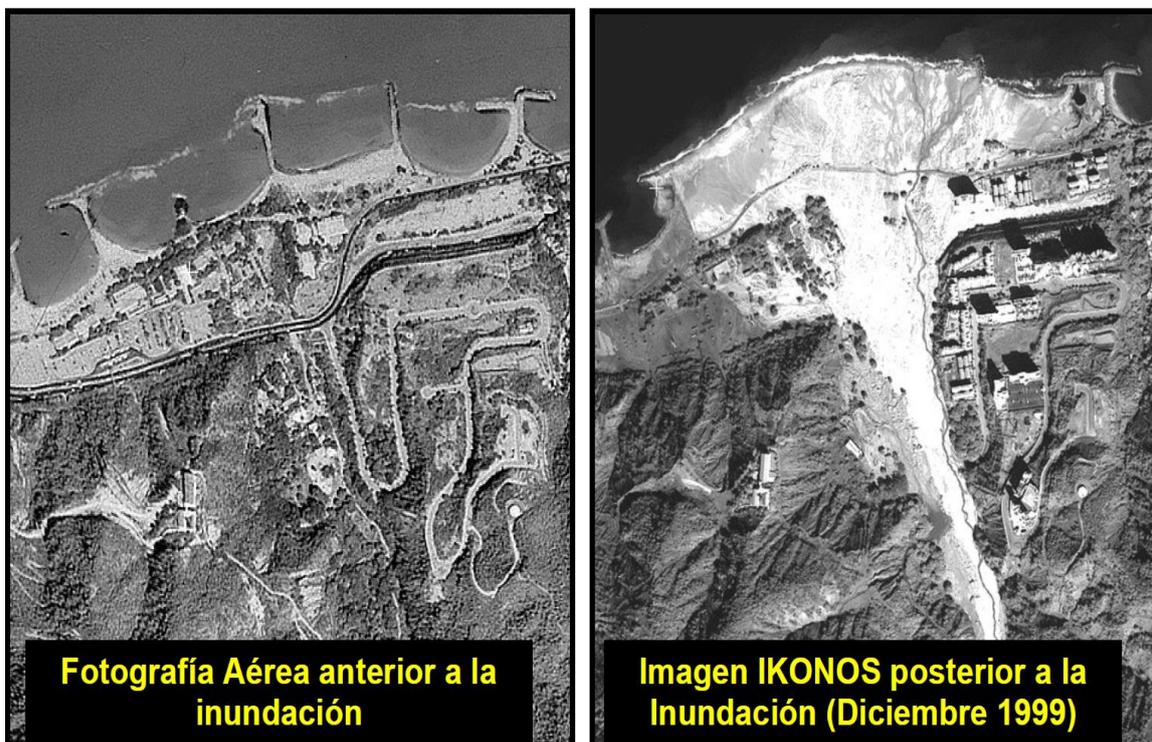


Figura 4.6. Delimitación del área afectada por las inundaciones y efectos causados por la avenida de las aguas.

4.6. Gestión Forestal.

Las imágenes y los datos que se pueden determinar desde ellas, permiten tener información sobre la extensión y localización de los recursos forestales, además de los cambios que ocurren en dichas masas forestales. Los datos procedentes de los sensores contribuyen a poder clasificar los tipos de árboles, hacer estimaciones del valor maderero, vigilar la tala, hacer mapas de las zonas afectadas por el fuego, inventariar las zonas de las masas forestales o, como se muestra en las imágenes siguientes, un estudio realizado en diferentes fechas, permite evaluar los efectos que una plaga puede producir en la masa forestal.

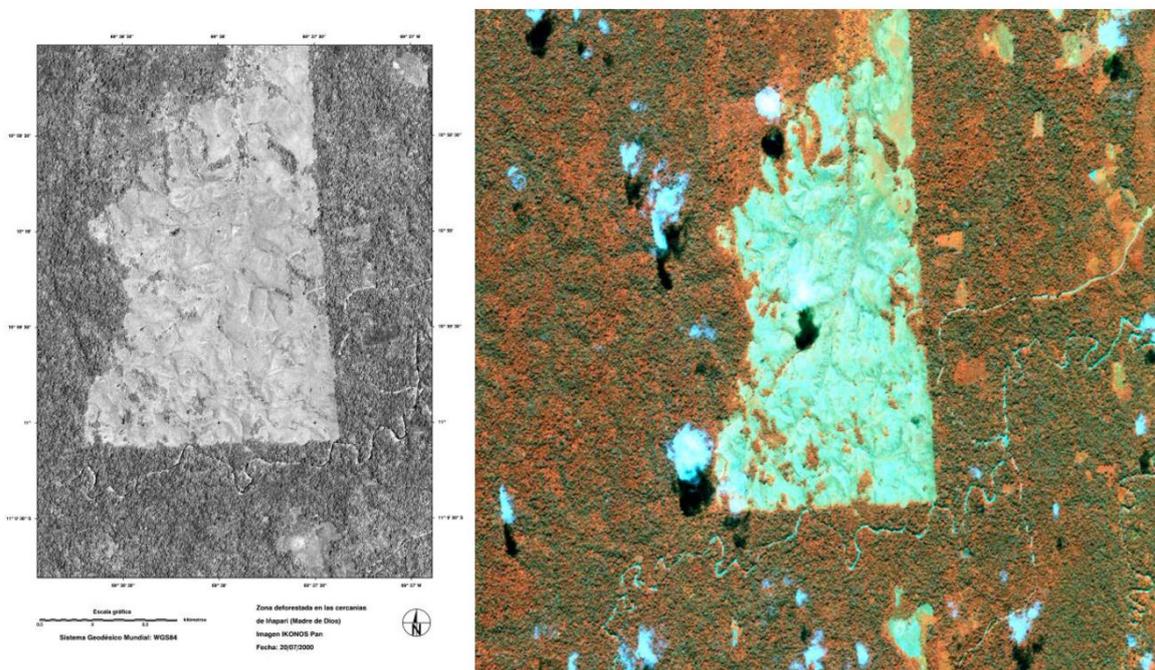


Figura 4.7. Determinación de los efectos de una plaga en la masa forestal.

4.7. Urbanismo.

La Observación de la Tierra puede servir como herramienta de apoyo a la planificación de zonas metropolitanas. Serviría para identificar las zonas de expansión de las ciudades (por ejemplo, a lo largo de los ejes principales de comunicación), presuntas urbanizaciones ilegales, grado de utilización de los polígonos industriales, la distribución y extensión de los espacios verdes, la ocupación del suelo de las zonas de influencia de los núcleos urbanos, etc. Estaríamos mejor posicionados para evaluar los impactos causados por un crecimiento incontrolado y podríamos planificar mejor dimensionadas las infraestructuras necesarias: comunicaciones y redes de servicios.



Figura 4.8. Utilización de imágenes para planificación de infraestructuras en zonas urbanas.

4.8. Gestión de Incendios Forestales.

La Teledetección, bien mediante datos obtenidos por satélites de observación de la Tierra (imágenes digitales visibles e infrarrojos térmicos, como las mostradas en la figura siguiente), bien mediante información adquirida por sensores en tierra (VIS.IR), y junto con información meteorológica convencional, permite detectar y seguir los incendios forestales. Usando técnicas de fusión de datos, e implementando todo esto sobre una cartografía digital actualizada de un territorio, es posible también gestionar en todo momento un incendio detectado.

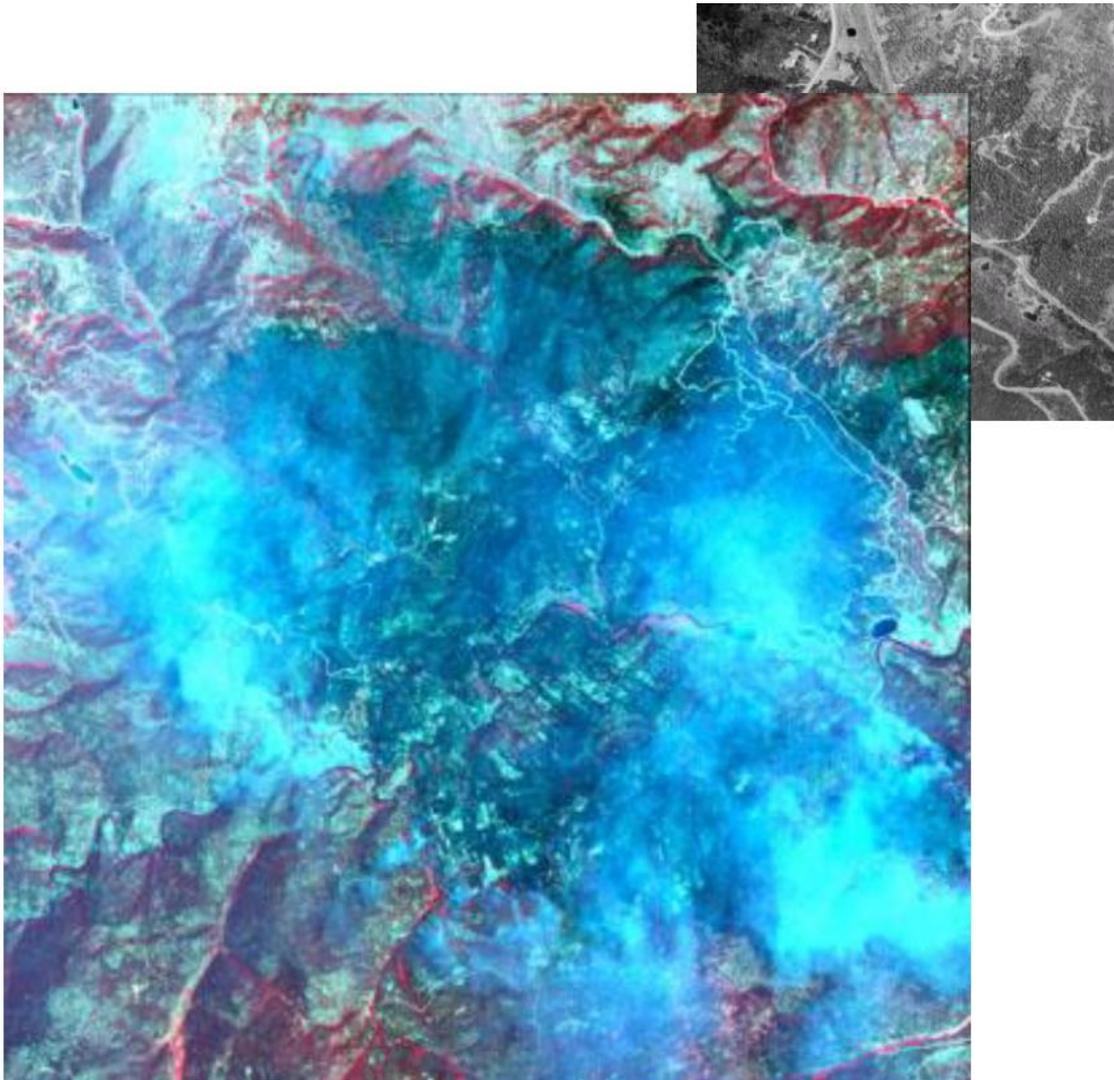


Figura 4.9. Imagen de un incendio en el Estado de Colorado (USA).

4.9. Actividad Volcánica.

La Observación de la Tierra apoyándose en los sensores tipo SAR, es capaz mediante Interferometría diferencial de generar mapas de deformación, y en consecuencia detectar pequeños movimientos (del orden de centímetros) de determinadas zonas de la superficie terrestre. Estos movimientos locales son originados por pequeños temblores que viene precedidos de grandes erupciones, o erupciones más potentes. Obteniendo cada cierto tiempo imágenes SAR de las zonas de interés mediante el procesado adecuado por técnicas de interferometría diferencial e imágenes de coherencia, podemos vigilar la actividad volcánica de un cierto territorio.

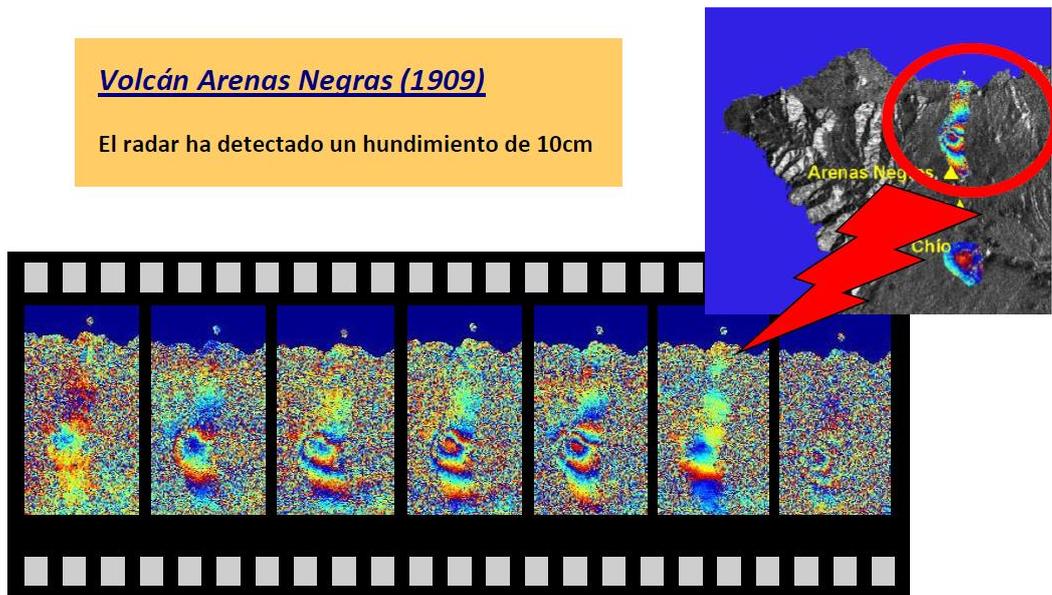


Figura 4.10. Estudio de la actividad volcánica: Volcán Arenas Negras (Tenerife).

4.10. Detección de Deslizamientos y/o subsidencias.

El uso de las imágenes procedentes de sensores activos tipo SAR utilizando imágenes de cobertura y mediante Interferometría diferencial permite la medida de deformaciones del suelo y la generación de modelos digitales del terreno. Este tipo de metodología permite detectar e identificar hundimientos del terreno de varios centímetros, puede ser útil para vigilar áreas que son propensas a este tipo de fenómenos: hundimientos por sobre-explotación de acuíferos, comportamientos de minas abandonadas, explotación de pozos petrolíferos, áreas urbanas por perforaciones del subsuelo, etc.

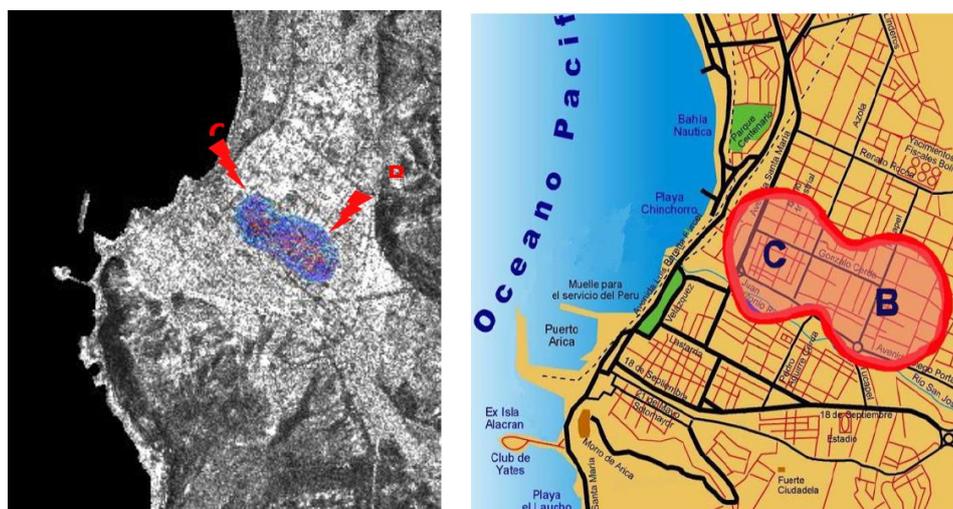


Figura 4.11. Realce de subsidencias (izda) y representación sobre el mapa de las subsidencias detectadas.

4.11. Riesgos Tecnológicos.

4.11.1. Riesgo químico.

El desarrollo económico de un país está basado en gran medida en los avances e innovaciones logrados por su industria química. Sin embargo, con la introducción de nuevos compuestos aparecen nuevas presiones sobre el Medio Ambiente, por un lado, y para la salud humana, por otro. Entre esas presiones se encuentran las debidas a las consecuencias de los accidentes.

Los accidentes relacionados con la industria química producen una gran preocupación, especialmente por su impacto en la salud. Los complejos daños causados a los recursos naturales (suelo, agua, ...) y los ecosistemas, así como la duración de los efectos perjudiciales, acrecientan cada vez más esta preocupación. Para abordar su protección es necesario recurrir a la evaluación y gestión del riesgo.

Aunque en principio una industria química suele situarse fuera del núcleo de población, éste continúa con su crecimiento, que puede ser más o menos acelerado, de modo que en pocos años la planta ha quedado absorbida por el propio núcleo. Esta dinámica induce a su vez una variabilidad en los parámetros utilizados en la evaluación del riesgo para la población. Por consiguiente, puede considerarse prioritaria la labor de prevención y control de esos accidentes con el objetivo de minimizar el riesgo.

Las autoridades públicas están obligadas a controlar el riesgo químico, garantizando que las instalaciones potencialmente peligrosas se hallen adecuadamente separadas de los centros de población y de zonas sensibles desde el punto de vista medioambiental. Hay dos aspectos complementarios a tener en cuenta en la gestión del riesgo:

- La selección de la ubicación de las instalaciones peligrosas
- El control del uso del territorio en áreas situadas al alcance de la influencia.

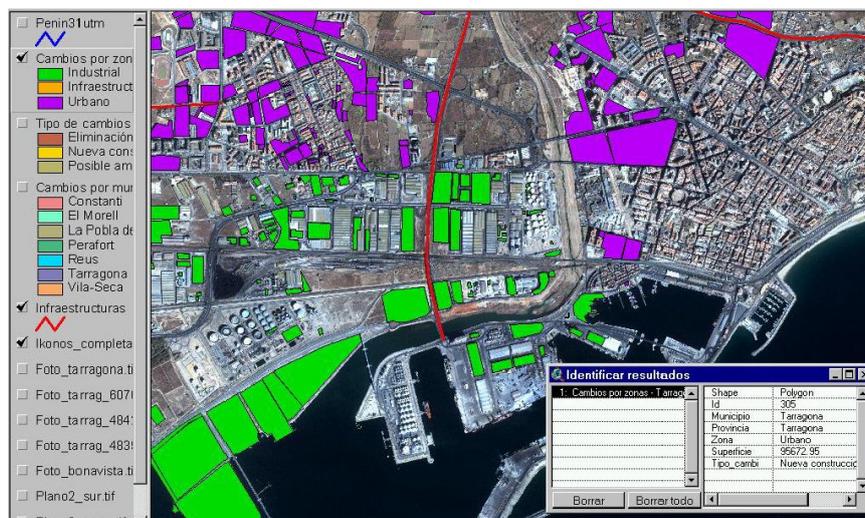


Figura 4.12. Zona industrial de la petroquímica de Tarragona y área urbana de influencia.

4.11.2. Riesgo nuclear.

Actualmente se cuenta con abundante información acerca del nivel de daños, en términos humanos y medioambientales, que pueden producir los accidentes nucleares a corto y a largo plazo. Sin embargo, los complejos daños causados a los recursos naturales, en particular al suelo y a las aguas, y a los ecosistemas que dependen de ellos así como la duración de los efectos perjudiciales acrecientan cada vez más esta preocupación.

Los productos radiactivos que supuestamente pudieran ser expulsados al exterior como consecuencia de un accidente, salen en forma de nube y se difunden en la atmósfera en función de las condiciones meteorológicas y de la dirección del viento. En un primer momento, el principal riesgo que se produce para las personas es el de contaminación interna por inhalación de los radionucleidos. Con el paso del tiempo se van depositando sobre el terreno de donde pueden ser absorbidos por las plantas y árboles. Filtrándose a través del suelo gracias a la lluvia pueden contaminar las aguas subterráneas, de la que se abastecen las pequeñas poblaciones limítrofes.

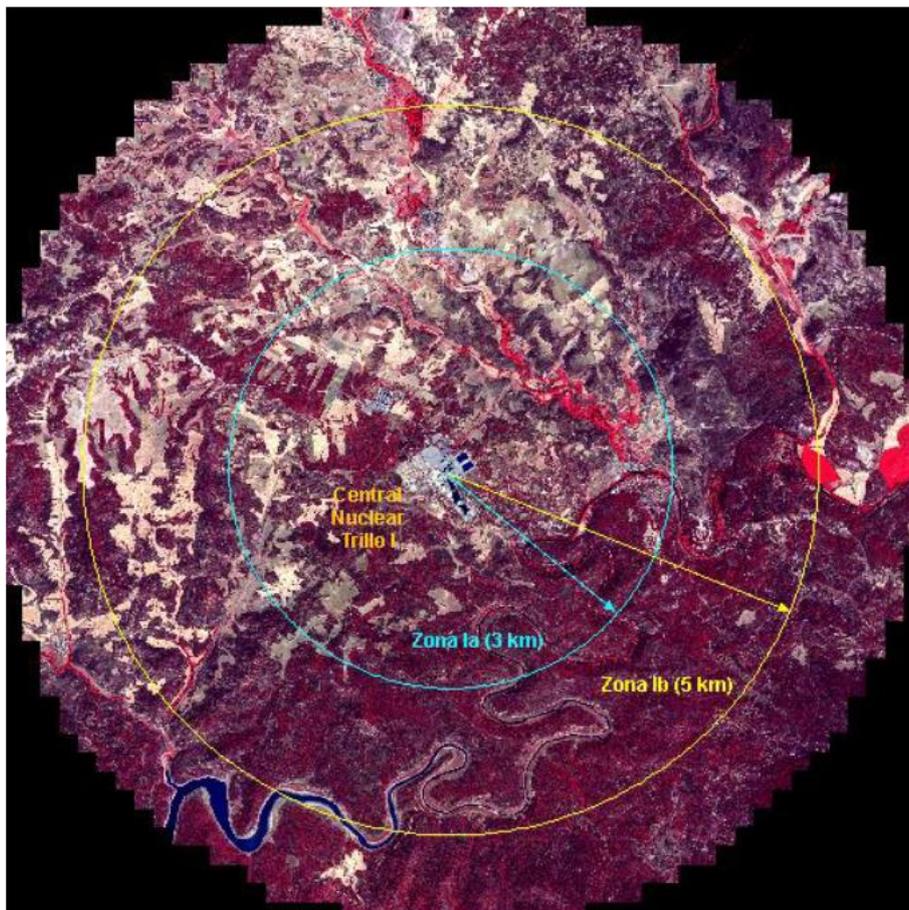


Figura 4.13. Ocupación del suelo en el entorno de la instalación nuclear de Trillo.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, es evidente la necesidad de contar con una información objetiva, precisa y sobre todo oportuna de la ocupación del suelo en el

entorno de una instalación nuclear, así como también de la dinámica geográfica tanto de la población como de los ecosistemas próximos.

Con el fin de poder llevar a cabo una óptima política de gestión del riesgo asociado con las actividades industriales, es necesario disponer de una cartografía temática, actualizada e integrada en un sistema de información, que proporcione el conocimiento de la cobertura y el uso del suelo.

Este tipo de cartografía necesita de una revisión periódica a fin de que el usuario pueda disponer de una información lo más actual y precisa posible. Un desfase en el tiempo puede conducir a decisiones erróneas en situaciones de emergencia. El carácter temporal de la cartografía de ocupación del suelo es una de las causas por las que dicha cartografía es escasa en un país a pesar de su importancia para poder gestionar el territorio con eficacia.

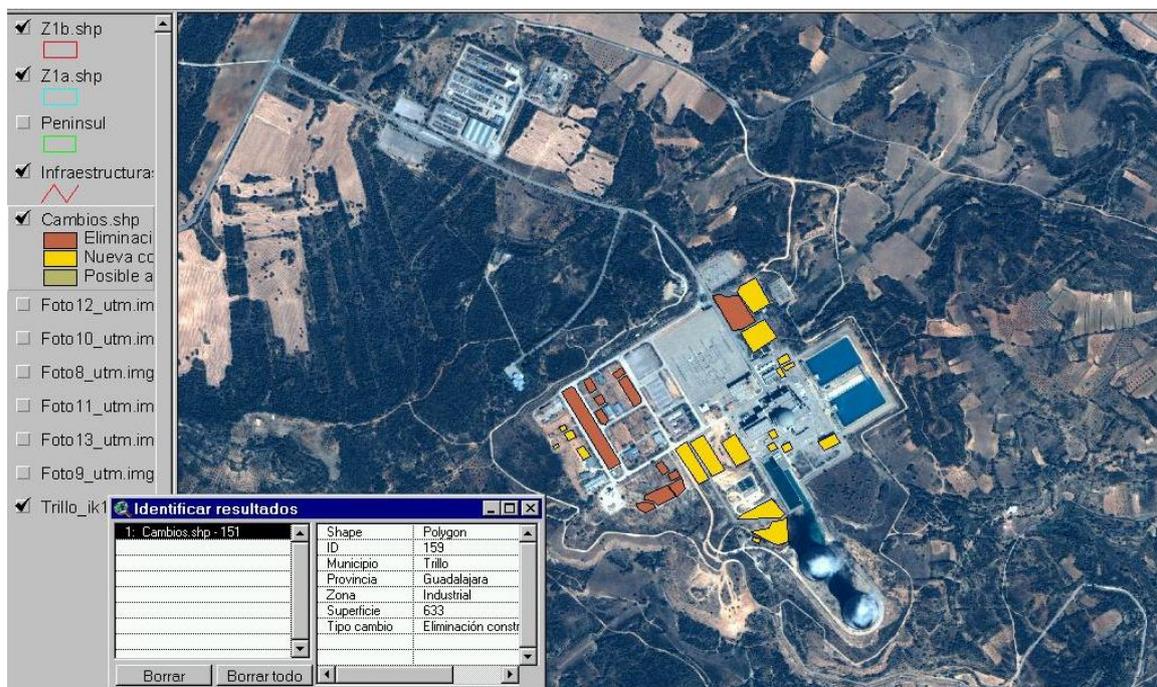


Figura 4.14. Central nuclear de Trillo y su entorno más próximo.

4.12. Conclusiones.

Durante los últimos 45 años la **Observación de la Tierra** desde el Espacio ha ido avanzando en varios aspectos con el objetivo de conseguir mejores respuestas en el control y seguimiento del **Medioambiente**. Todo esto se pone de manifiesto en los siguientes componentes:

- Un incremento notable de satélites orbitando alrededor de la Tierra. En los últimos años se han puesto en órbita tanto satélites públicos soportados por agencias oficiales de países: ESA, NASA, China, Japon, India, Canadá, Rusia, etc , como satélites privados soportados por empresas.
- Incorporación de satélites con sensores activos que generan imágenes tipo SAR. En este sentido se han incorporado misiones SAR de Observación de la Tierra soportadas por corporaciones públicas y privadas.
- Un gran incremento de la resolución espacial llegando a alcanzar en algunas misiones el cuarto de metro. Hecho relevante ya que en el 1972 las resoluciones espaciales eran de 80 mts como mucho.
- Incremento de en la precisión de la toma de vista de ciertas misiones espaciales pudiendo generar cartografía u orto imágenes de escalas 1:2000, sin apoyo externo de puntos de control.
- Plataformas agiles y sofisticadas con a las que realizar las tomas, pudiendo modificar su posición en pocos minutos.
- Incorporación del concepto real de constelación, consiste en enviar al espacio varios satélites idénticos decalados en el tiempo con el fin de poder visitar varias veces las mismas áreas o zonas de la superficie de la Tierra y asegurar así la disponibilidad de datos. Se podría decir que con ese nuevo concepto se podría realizar el seguimiento de cualquier objeto fenómeno en casi tiempo real.
- Incorporación de técnicas de Inteligencia Artificial para realizar preprocesado a borde de los satélites.
- Uso eficiente de las tecnologías de la información de tal manera que se pueda acercar y asegurar el suministro de los datos y servicios de Observación de la Tierra al usuario final.

Por último, decir que en la próxima década se estima que se pondrán en orbita del orden de 70 constelaciones de satélites de Observación de la Tierra lo que significará que habrá que lanzar al espacio del orden de 2000 satélites. Esto traerá como consecuencia una la disponibilidad de datos y además habrá una gran cantidad de servicios de valor añadido basado en dichos datos que hará posible el control sistemático del medioambiente, consolidándose usos y aplicaciones que hasta ahora en algunos casos estaban en proyectos de demostración por esa falta de datos.

5. DE LA SMART CITY A LA CIUDAD ACTIVA: PLANTEAMIENTO, ANÁLISIS Y ESTRUCTURA PARA CIUDADES SOSTENIBLES.

Jorge del Valle Arias.

Smart City Solutions and SW Business Development Manager Spain en Itron.

El 50% de la población mundial está viviendo en ciudades, y España no es una excepción. Según datos del INE de 2019, el 54% de la población vive en ciudades de más de 50.000 habitantes.

Esto hace aumentar la complejidad para dar una respuesta a las necesidades de las ciudades de una forma más eficiente y sostenible, en un momento además en el que el ciudadano reclama más información y más servicios, y en el que las ciudades deben aportarle ese valor diferencial. Sin duda la digitalización ayuda a conseguirlo, obteniendo más datos, con una mayor potencia de análisis de los mismos, y con ello tener una mayor reactividad.

5.1. Entornos urbanos en continua evolución

Los entornos urbanos, sean grandes ciudades o pequeños municipios, están en continua evolución, y es preciso que los sistemas que dan servicio a las ciudades se vayan adaptando a ese entorno cambiante.

Estos cambios se producen principalmente en tres ámbitos:

- **Infraestructura.** Las infraestructuras de las ciudades, de todo tipo (energética, de abastecimiento, de transporte, etc.) envejecen y con ello pierden eficiencia.

Las infraestructuras energéticas deben adaptarse además a las nuevas realidades: energías renovables, cambios en la regulación, y el importante crecimiento que tendrá el uso de vehículo eléctrico en los próximos años, con el impacto que ello tendrá en las redes eléctricas.

- **Medio ambiente.** Con climas que se vuelven extremos, que nos guían hacia una escasez de recursos, y que imponen la implantación de monitorización y control de esos recursos para optimizar el uso que se hace de ellos.
- **Social.** En parte ya comentado en la introducción, con el incremento de población, desplazamiento hacia las ciudades, y el ciudadano que, como “cliente” de las ciudades, reclama una cada vez mejor experiencia de usuario. Y no se puede obviar la tendencia tecnológica, estamos en la era del Internet de las Cosas y del uso de los datos.

5.2. Las Smart Cities

Empiezan a ser habituales numerosas iniciativas verticales aisladas, normalmente fruto de la criticidad de las mismas para la ciudad, pero también debidas a la estructura organizativa y a las capacidades de inversión de los propios municipios.

Sobre todo, tres iniciativas destacan sobre las demás:

- i) La primera relacionada con la polución acústica, asociadas al bienestar del ciudadano y la necesidad que tienen las ciudades de realizar mapas de ruido.
- ii) La segunda está relacionada con la calidad del aire, realizando monitorización de partículas contaminantes y de gases, y señalizando y controlando el tráfico para gestionar atascos.
- iii) Y la tercera está relacionada con el ahorro energético asociado a la iluminación urbana. No en vano, el gasto energético supone entre el 40% y el 60% de los presupuestos municipales de cualquier ciudad. El cambio a LED, asociado a la telegestión punto-a-punto, implica elevados ahorros económicos (por menor consumo energético y ahorros operativos), y una reducción de las emisiones de CO2.



Figura 5.1. Algunas de las iniciativas en funcionamiento o que se utilizarán en breve plazo de tiempo en las Smart Cities.

5.3. Visión holística de la Smart City

Sin embargo, las iniciativas Smart City no se deben implantar de forma verticalizada y aislada unas de otras. El funcionamiento de una vertical puede, de hecho lo hace, influir sobre otras. En este sentido, es necesaria una visión holística, global, en la gestión de la ciudad, que permita maximizar la eficiencia en funcionalidad entre verticales y conseguir

así una inteligencia activa, que sea capaz de interactuar los eventos entre las diferentes verticales en tiempo casi-real.

Para afrontar esa visión holística es preciso definir un orden en los procesos de definición de la Smart City. Hay dos decisiones críticas para la Smart City holística:

- Por un lado, la definición de la estructura de conectividad y comunicación.
- Por otro lado, definir una plataforma transversal de gestión urbana para el tratamiento de los datos.

Una vez definidos estos dos elementos, la implantación de la Smart City debería comenzar por un caso de uso que tenga un retorno de la inversión (ROI) muy claro, tanto desde el punto de vista económico como social.

Analizamos a continuación cada uno de estos elementos.

5.3.1. Conectividad y Comunicación

Seleccionar la tecnología de conectividad y de comunicación no es trivial. Se debe plantear un análisis estratégico de la conectividad, con un enfoque en la sensorización y la gestión global, y con dos vertientes de análisis: técnico-estratégico y administrativo-estratégico. Analicemos un poco más estas dos vertientes y los aspectos que consideramos clave.

Análisis técnico-estratégico:

- La conectividad debe ser inalámbrica
- Comunicación bidireccional y de baja latencia, ya que además de monitorizar se controlarán sistemas de la ciudad, y algunos de ellos necesitan control en tiempo casi-real, por lo que la latencia debe ser baja.
- Eficiente desde el punto de vista energético, con bajos consumos, ya que habrá aplicaciones que necesiten dispositivos autónomos, alimentados por baterías, y éstas deberán ser de larga autonomía.
- Seguridad en los datos, ya que algunas de las infraestructuras que se gestionan son críticas.
- Con ancho de banda suficiente.
- Robusto, resistente a interferencias y de bajo mantenimiento. En este punto es especialmente importante que la tecnología seleccionada sea capaz de responder frente a los cambios en el relieve que puede haber en las ciudades.
- Se debe exigir un rendimiento alto de la conectividad, es decir, un porcentaje muy elevado de datos transmitidos con éxito. Esta característica está relacionada con la robustez.

Análisis administrativo – estratégico:

- Se deben utilizar tecnologías estándar, abiertas, que posean un amplio ecosistema de soluciones como para dar solución a todas las aplicaciones verticales que se puedan plantear.
- Eficiente en coste.
- Dedicación en exclusiva **por y para la ciudad**. Es una red estratégica para la ciudad, que gestiona algunas infraestructuras críticas, por lo que la red de comunicación no se debería compartir con otros servicios.

Hay dos tipologías base de redes de conectividad:

- **Redes en ESTRELLA o punto-multipunto.** Son redes en las que la comunicación de los dispositivos es siempre hacia y desde el elemento que “crea” la red, hacia la estación base. Es así como funcionan las redes celulares y algunas redes LPWAN (Low Power Wide Area Networks) como Sigfox y LoRaWAN.

En esta tipología la estación base debe “ver”, radioeléctricamente hablando, a cada dispositivo, por lo que se pueden producir zonas de sombra, o para eliminarlas puede ser necesario sobredimensionar el diseño de red para obtener solapamientos de cobertura.

Ante cambios en el relieve de la ciudad, por ejemplo por la construcción de nuevos edificios, pueden aparecer nuevas zonas de sombra, y con ello haber dispositivos que pierdan la conectividad.

- **Redes MALLADAS o Mesh.**

En una red mallada cada equipo actúa como un repetidor, es capaz de replicar la información que le llega de otros equipos de la red. De esta forma, se habilitan múltiples caminos para que los datos de cualquier dispositivo lleguen a su destino, lo que da una gran capilaridad a la red para llegar a cada punto de la ciudad.

Estas redes tienen una gran flexibilidad y capacidad de adaptación al relieve cambiante, y facilitan la implantación de inteligencia distribuida e interacción entre verticales, ofreciendo una mayor eficiencia de la comunicación.

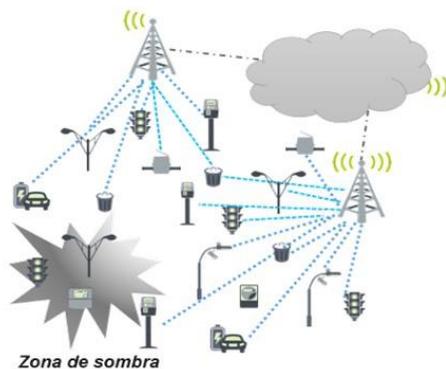
Hay dos propiedades de este tipo de redes que habilitan las características diferenciales citadas:

- Self-forming. Cada dispositivo busca automáticamente el mejor camino para transmitir el mensaje y llegar hasta el Gateway de red.
- Self-healing. En el caso de que algún camino de comunicación se inhabilite, los dispositivos, que están periódicamente chequeando las rutas de transmisión, rehacen las rutas de comunicación y responden a los cambios en las condiciones de transmisión.

Wi-SUN es la tecnología mallada que cumple las especificaciones indicadas, y es la que, en nuestra opinión, mejor se adapta a las aplicaciones Smart City con esa visión holística.

Wi-SUN (<https://wi-sun.org/>) es un estándar global para redes malladas outdoor, interoperable con ciertos de proveedores Smart City y más de 89 millones de dispositivos desplegados en todo el mundo.

Red en ESTRELLA (punto-multipunto)



Red MALLADA (Mesh)

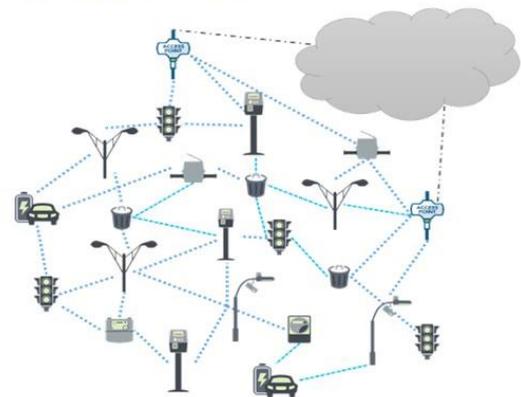


Figura 5.2. Distintas tipologías de red: Red en estrella y red mallada.

5.3.2. Plataforma de Gestión Urbana para la Smart City

Definida la arquitectura de conectividad, los cimientos de la Smart City quedan preparados para implementar aplicaciones verticales.

Aunque se comience con una única aplicación vertical, es recomendable definir una plataforma de gestión urbana que dé soporte, a modo de orquestador, a todas las aplicaciones futuras.

Debe ser, por tanto, una aplicación multi-aplicación y multi-dispositivo, multi-tenant, modular y escalable, que soporte un ecosistema abierto de soluciones.

La plataforma tendrá las siguientes funcionalidades:

- i) Conexión de dispositivos y sensores a la plataforma, con posibilidad de conectividades múltiples e interfaces de datos estándar.
- ii) Con funcionalidades de interfaz para el usuario: cuadros de mando, visualización, alarmas, ...
- iii) Con un motor de analítica de datos y automatización.
- iv) Que pueda actuar como orquestador de otras aplicaciones verticales.
- v) Que pueda conectar datos de terceras fuentes.

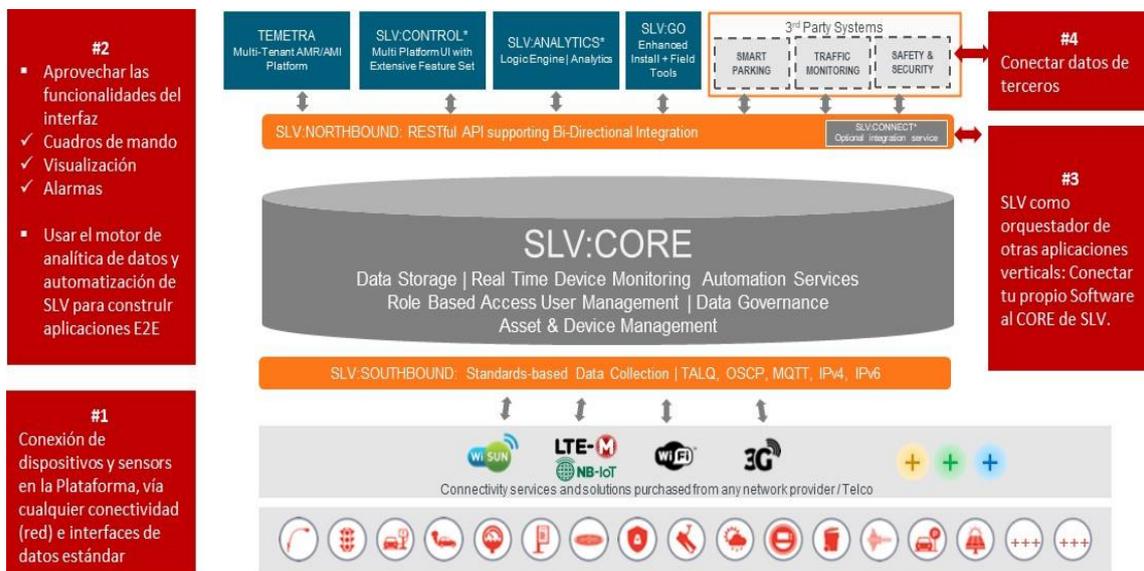


Figura 5.3. Representación esquemática de la plataforma de gestión de la iluminación urbana para Smart Cities (SLV: Streetlight.Vision)

5.3.3. Vertical priorizado por ROI y servicio al ciudadano. Smart Lighting.

En el planteamiento inicial ya se indicaba que, una vez definida la base de la Smart City, definiendo la arquitectura de conectividad y la plataforma de gestión urbana, la implantación de verticales debería comenzar por casos de uso con retorno claro.

Sin duda uno de esos verticales es el caso de uso de **Smart Lighting**, con monitorización y telegestión punto-a-punto de las luminarias.

Además de que el retorno es claro, comenzar por este vertical tiene una ventaja adicional. Cada nodo de telegestión, como se ha explicado anteriormente, actúa como un repetidor en la red de conectividad. Por lo tanto, la instalación de un nodo de telegestión en cada luminaria implica disponer de una red de comunicación densamente capilarizada, que establece la cobertura ubicua de transmisión para el resto de aplicaciones verticales futuras.

El retorno de la inversión se produce por tres vías:

- Consumo energético:
 - Reducción del consumo por medio de la menor potencia de los LED y del ahorro adicional derivado de la modulación de intensidad (dimming) en periodos determinados.
 - Detección de encendidos diarios

- Operación y mantenimiento:
 - Permite evolucionar hacia un esquema de mantenimiento predictivo, ya que se dispone de datos en tiempo real de cada luminaria y eso permite aplicar técnicas de analítica de datos.
 - Optimiza los trabajos en campo para mantenimiento y resolución de averías, por lo que se optimizan también sus costes asociados.
 - Menor tasa de fallos, al aplicar mantenimiento predictivo. Esto tiene impacto positivo también en los costes del call center para atender incidencias.
- Beneficios adicionales:
 - Menos quejas de los ciudadanos
 - Mejores condiciones lumínicas
 - Reducción de emisiones

5.4. Resumen y conclusiones

Se ha analizado la necesidad de plantear la Smart City con una visión holística, de ese modo se establece la base para una ciudad activa. Para ello es precisa una estrategia global coordinada de forma transversal.

El alumbrado público, con una aplicación de telegestión punto-a-punto, se convierte en la columna vertebral para crear la arquitectura de comunicación radio mallada capilar dentro de la ciudad. De ese modo se crea una red por y para la ciudad, con dedicación exclusiva para la Smart City, que es robusta, dedicada, segura, resiliente, bidireccional y de baja latencia, ajustada al estándar Wi-SUN, que ha demostrado ser una opción de altas prestaciones, bajo coste y visión de futuro.

Esta red interactuará con una plataforma transversal de gestión urbana, que permite orquestar e integrar otras aplicaciones verticales, recolectar y tratar datos a través de varios protocolos estándar, construir interfaces de usuario (cuadros de mando, visualización, alarmas), integrar aplicaciones verticales específicas de terceros y datos de terceras fuentes.

Debe ser una aplicación multi-tenant, multi-aplicación y multi-dispositivo.

6. INFRAESTRUCTURAS NATURALES VERDES COMO ALTERNATIVA A LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN RECURSOS HÍDRICOS. PROYECTO DE ORDENACIÓN TERRITORIAL “THE GREEN LEAVE”.

Nicanor Prendes Rubiera. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. María del Carmen Ángel Martínez (CEDEX-CEH). Sandra Villacorta Chambi (Charles Darwin University; Northern Territory 0909 Australia).

6.1. Introducción.

Cuando se establecen las estrategias de adaptación al Cambio Climático, por lo general, se parte de unos estudios “apriorísticos” en los que, considerados -y aceptados- unos escenarios base ^[27], se analizan los recursos y sus fuentes de producción y se elaboran opciones -de eficacia y eficiencia- para hacerlas sostenibles en dichos entornos medioambientales ^[29].

Ello obliga a trabajar con incertidumbres, ligadas a la disponibilidad real de los recursos naturales fundamentalmente ^[23], y del territorio, como la variabilidad de episodios extremos (sequías, inundaciones, perfiles edáficos,...) y en los que suele contemplarse, como variable compleja añadida, su distribución -no homogénea- tanto en el espacio como en el tiempo.

A esta incertidumbre hay añadir que: “todo proceso de alteración ambiental también lo es estructural (composición biológica de un ecosistema que aboca en un deterioro, paulatino, funcional) que si bien cuenta con cierta capacidad –inherente- de acomodación (resiliencia) a estas variaciones, e incluso y aunque pueda llegar a recuperar el estado original tras una perturbación ^[26], siempre tiene un umbral de agotamiento en el que si se sobrepasa se alcanza el punto de no retorno”.

De hecho, uno de los tres parámetros más sensibles a este proceso, junto con el suelo y la biodiversidad, es el agua, o recurso hídrico que, por su importancia ambiental, es el condicionante y determinante de la “productividad” zonal y su rentabilidad agrícola.

En las infraestructuras de regadío ^[24] no suele recurrirse al concepto de “adaptación pasiva” como herramienta para reacondicionar y mejorar el rendimiento hídrico partiendo de un análisis de los recursos energéticos¹ para mantener las producciones de

¹ Para minimizar los GEI’s y aumentar la eficiencia energética se integra, en el estudio, el uso de energías renovables, con el consiguiente ahorro energético (evitando horas punta, por ejemplo) y minimizando las emisiones GEI’s (CO2eq) a la atmósfera.

cultivos derivadas, con mínimas modificaciones jurídicas², espaciales³, tecnológicas⁴ y ambientales⁵, y evitar introducir cambios sustanciales en el área de afección, pero modificando los comportamientos de uso y planificación como la flexibilización de los turnos de riego que favorece la disponibilidad de la demanda de agua de forma continua y sostenida, “eliminando” las exigencias de cada cultivo a los volúmenes disponibles, que se mantienen, o deben mantenerse.

En este sentido el Instituto Tecnológico Agrario de la Junta de Castilla y León, Consejería de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural propuso una serie de actuaciones ^[16], enmarcadas a potenciar este tipo de “reformas” que, según algunos estudios y en función de determinadas áreas puede llegarse a ahorrar hasta el 35% de los consumos hídricos disponibles, lo que implica un margen significativo de eficiencia y pone en servicio “excedentes hídricos” con los que paliar los efectos, al menos inmediatos, de adaptación al cambio climático, habida cuenta de la probable reducción en el balance hídrico general de este recurso a escala de cuenca hidrográfica, con sus balances de compensación.

6.2. Procedimiento Metodológico.

La adaptación al Cambio Climático puede abordarse de forma activa (ejecutando medidas derivadas de las previsiones de los modelos y escenarios asociados para ese ámbito); o pasiva, incidiendo sobre los bienes insumos y actuando en los sistemas ya implantados, lo que se conoce como “Infraestructura Natural” que, en este contexto ^[18], se definiría como: “una red de espacios naturales que preservan los valores y funciones de los ecosistemas, proporcionando servicios ecosistémicos ^[21]”.

La característica esencial de esta segunda vía (“adaptación pasiva”) parte de una serie de condicionamientos preliminares ^[30] como garantizar bajos costos en la inversión de actualización (modernización) y en el mantenimiento de los proyectos⁶ por una parte, y una mejor optimización del recurso a considerar, por otra (hídrico, en este caso). Asimismo, su factor determinante es la reducción de la vulnerabilidad⁷ y exposición del bien insumo y de consumo.

² Una propuesta más racional de “reconcentración” parcelaria como medio instrumental para una reestructuración de la propiedad adecuada a la nueva situación creada por el regadío y sus sistemas de distribución y planificación.

³ Se contempla añadir varias infraestructuras hidráulicas (balsa de retención, o acumulación), para homogeneizar y garantizar el recurso hídrico, mejorando los sistemas ya existentes de canalizaciones, acequias, red de drenaje, etc...

⁴ Modernizar el regadío sustituyendo el riego por gravedad por aspersión, en tuberías con agua a presión, más eficaz y que garantiza una mayor diversificación y variedades de cultivos, que no serían viables si aumentase la demanda de agua.

⁵ Proyecto de restauración y reforestación local para paliar, en la medida de lo posible, cualquier impacto no deseado colateral.

⁶ Un factor de ponderación es la menor huella de carbono posible que pueda lograrse, bien asociada a la maquinaria e instrumentos de ejecución. Esta es la razón de la propuesta de inclusión de las energías renovables para el cambio de regadío.

⁷ Se trata de pasar de la “vulnerabilidad a la resiliencia” mediante la comprensión y adaptación a la incertidumbre futura, dando una respuesta eficaz a los peligros y los riesgos asociados al territorio (inundaciones, erosión, etc.) y la garantizar, con ello, los sistemas de producción a medio y largo plazo, además de mejorar la gobernanza de los recursos ^[25].

El análisis de estos proyectos se aborda siguiendo los criterios del proyecto del “The Green Leaf”^{8[18]} que, se ha demostrado en el contexto del agua relacionado con la estrategia local ^[17], fortalece la resiliencia frente a las variaciones previstas en los escenarios de cambio climático.

Si bien desde el punto de vista técnico los objetivos son claros, y se pueden abordar a partir de la anterior metodología, han de integrarse en este análisis aspectos relativos a la legislación, tanto en materia ambiental como de impacto de cambio climático⁹, aunque la condicionalidad de la “adaptación pasiva” orienta a una regulación de la Ley 21/2013, de 9 de diciembre¹⁰, a seguir el procedimiento de Evaluación Ambiental Simplificada, con la consiguiente agilización y facilidad en el desarrollo normativo y procedimental establecido, y que se traduce que para cualquier proyecto de gestión hidráulica^[20] en los que exista una infraestructura previa, el desarrollo jurídico quedaría bajo el amparo del Anexo II, Grupo 1, apartado c. 1^º¹¹.

Evidentemente, y una vez ajustado el marco legislativo han de comprobarse las posibles sinergias con otros proyectos adyacentes (módulos de operación); los impactos ^[19] y afecciones de las figuras jurídicas ambientales vinculadas al área de exposición o afectación territorial (Red Natura 2000; ZEPA’s; LIC’s; ZEC’s, Reservas, etc.,) que tendrán un peso determinante en la viabilidad final del estudio y sus consecuencias, exigiéndose, por ello, la previa elaboración y aprobación de los Planes de Ordenación de los Recursos Naturales (PORN).

Con la finalidad de ilustrar el procedimiento metodológico establecido, se eligió un proyecto específico, paradigma de gestión y referencia, asociado a la cuenca del Duero.

6.2.1. Caso de Estudio

El proyecto es el “Canal de Riego de Castronuño” (Valladolid). Obra de ingeniería hidráulica en el curso medio del Río Duero ^[11] y encaminada, en su momento, a poner en valor tierras para regadío, con una extensión de 392 Ha, dentro de las 440 Ha adscritas al término municipal homónimo, en dicha provincia, de la Comunidad Autónoma de Castilla y León, España.

⁸ La propuesta se basa en: “que cualquier cuenca es un sistema de gestión de flujo autoreplicante -tanto geomorfológicamente como de equilibrio energético-” a reflejo de una hoja en la que el diseño del drenaje define las condiciones de eficiencia de flujo.

⁹ Ha de tenerse en cuenta, asimismo, como elemento favorable en la evaluación si el proyecto a evaluar contempla el uso y potenciación de las energías renovables, en cuyo caso se debe considerar la Resolución de 30 de diciembre de 2020, de la DGCyEA, por la que se formula la declaración ambiental estratégica del PNIEC 2021-2030.

¹⁰ Modificación por Ley 9/2018, de 5 de diciembre.

¹¹ Proyectos de Consolidación y mejora de Regadíos en una superficie superior a 100 Ha. Se subraya, en este sentido, el umbral de la superficie de afección ya que se considera que a partir de él todos los mecanismos de desarrollo son viables.

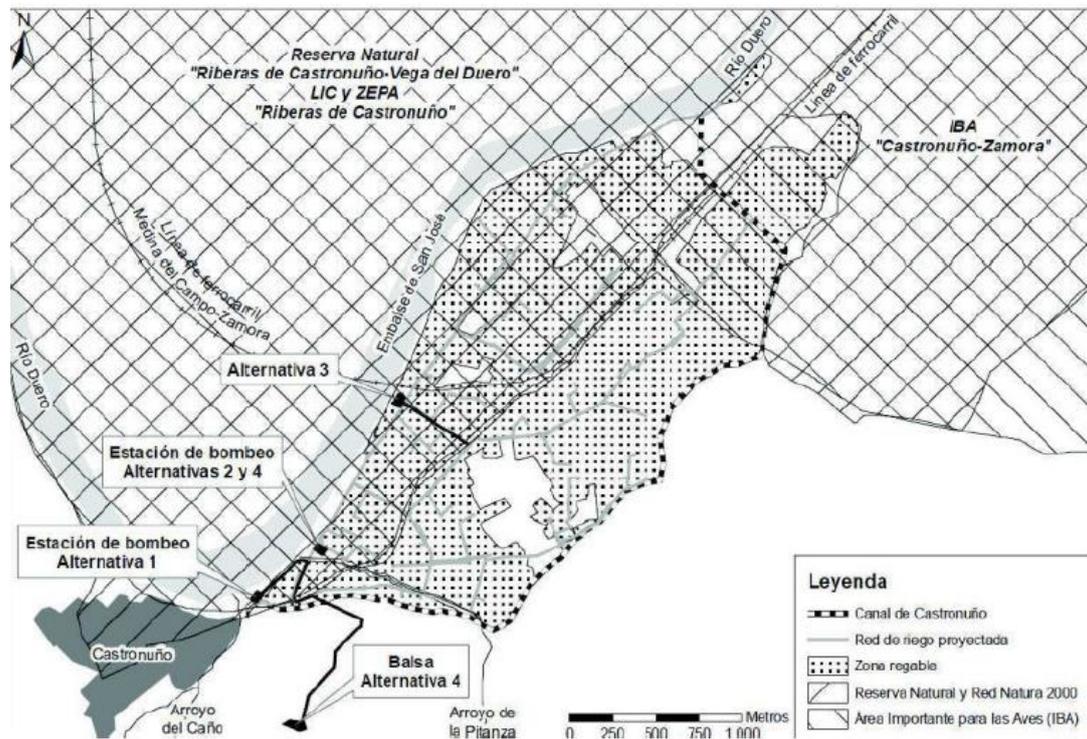


Figura 6.1. Ubicación de los elementos principales del Canal de Castronuño^[16].

Esta infraestructura lineal (canal de riego) está vinculada al vaso de la presa de San José¹², a escasos 2 km de dicha población. Se terminó de construir en 1945, como su central hidroeléctrica¹³, que lleva funcionando desde 1957, si bien hoy día tiene mayor relevancia el uso de regulación de los canales de riego que de ella derivan, entre los que destacaría el de Castronuño y cuya longitud total es de 5,5 km de canal¹³, estando revestido de hormigón^[19].

En 1990 se crea la Comunidad de Regantes del Canal del Pisuegra y se articulan, con posterioridad y en varias comunidades más¹⁴, determinados mecanismos encaminados hacia una gestión^[24] más ágil, y dar continuidad a los cultivos de trigo, cebada, alfalfa, girasol, maíz y remolacha o, en su defecto, aquellos otros de los que puedan obtenerse ventajas de producción^[16] destacándose, independientemente del área, que se da una

¹² Conocida más popularmente como presa de Castronuño. Es de gravedad y tiene una capacidad de embalse de 5, 5 Hm³ y una superficie de afección de 192 Ha. Forma parte del catálogo de zonas Húmedas de interés especial en Castilla y León (INZH).

¹³ Dicho canal tiene una capacidad de transporte, en cabecera, de 650 l/s, lo que daría un volumen de unos 2.152.388 m³.

¹⁴ Ente otras, y asociadas a este tramo de la cuenca del Duero, se han destacado varias Comunidades de Regantes, como es el caso –referencial– del Canal de Toro-Zamora (provincias de Zamora y Valladolid), declarado de Interés General por Ley 62/2003, de 30 de agosto, de medidas fiscales, administrativas y del orden social (BOE nº 313, de 31 de diciembre 2003), en cuyo Título V, Capítulo IV, Artículo 111, se declaran de interés general determinadas obras de infraestructuras hidráulicas con destino a riego y designadas, a tal efecto, como “Obras de modernización y consolidación de regadíos”, y en la que se constata la replicación el modelo de “The Green Leaf” ya que los condicionamientos y parámetros de definición serían, siempre los mismos, variando – lógicamente, los condicionantes de geográficos y de recursos y bienes de consumo, e insumo.

“replicación” en las condiciones de producción¹⁵, y gestión (conexión con presa, embalse de regulación, estado de las canalizaciones y drenes de distribución de agua, diversificación de sembrados, etc.,).

Desde hace varios años^[25] y hasta 2019, y a raíz de los escenarios propuestos ante los nuevos retos sociales y del campo, dichas comunidades de regantes apostaron por una modernización de los sistemas de regadíos vinculados a estos territorios^[24], habida cuenta de las significativas –y evidentes– pérdidas en los recursos hídricos^[19] de aquellas obras (canalizaciones y drenes), dañadas a causa de su mal estado y falta de mantenimiento, agravándose el problema y que, según los cálculos de las propias asociaciones de agricultores, su actualización y reforma favorecería la continuidad y viabilidad de aquellas explotaciones agrarias dependientes, haciéndolas sostenibles y ayudando a fijar población y desarrollo rural.

La situación geomorfológica^[28] de esta unidad agrícola es una superficie aterrazada (suave), con varios niveles escalonados, envuelta en un gran meandro encajado, en forma de una uve amplia, que provoca acciones erosivas por los afluentes y la dinámica fluvial de los ríos^[24], entre otros, Trabanco y Zapardiel, y arroyos como el Requejo del Puente, Caño y Pitanza, incluido en la zona de afección y considerándose una zona muy activa y de alta sensibilidad y vulnerabilidad^[15], sobre todo al Cambio Climático^[27].

Todo ello orientó, en el momento de su construcción, a un sistema de regadío por gravedad como más adecuado, dependiente del canal de Castronuño que lo abastece, en régimen de lámina libre. Dadas las nuevas condiciones climáticas y de la obra de regadío, y desde el punto de vista del modelo propuesto (“The Green Leaf”¹⁶), resulta poco eficiente y –por consiguiente– sus rentabilidades son muy bajas y con altos consumos hídricos, lo que compromete su futuro.

¹⁵ Parece claro que, en función de las condiciones específicas y parámetros climáticos (heladas, lluvias, sequías, etc.), que pueden consultarse en el Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR), que es alimentado, en esta zona, por la estación de Tordesillas (da las series de Evapotranspiración de referencia (ETO), Tº, Lluvia, Insolación, HR, frecuencia del viento, etc.) de las áreas agrícolas en zonas regables, presentan una determinada variabilidad de cultivos (estos datos se han consultado en ITACyL, que facilita los coeficientes de cultivo(Kc) y la fenología) en los que predomina para estas condiciones, en este sector, cultivos de maíz y a cereal de invierno, con una extensión, en estas áreas de modernización, del 95% de la superficie. El resto se reparte en cultivos como la remolacha azucarera y la patata, lo que siempre ha obligado a modificar la demanda de agua y sus sistemas de gestión del recurso y las posibilidades de optimización local. Parece claro que, en función de las condiciones específicas y parámetros climáticos (heladas, lluvias, sequías, etc.), que pueden consultarse en el Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR), que es alimentado, en esta zona, por la estación de Tordesillas (da las series de Evapotranspiración de referencia (ETO), Tº, Lluvia, Insolación, HR, frecuencia del viento, etc.) de las áreas agrícolas en zonas regables, presentan una determinada variabilidad de cultivos (estos datos se han consultado en ITACyL, que facilita los coeficientes de cultivo(Kc) y la fenología) en los que predomina para estas condiciones, en este sector, cultivos de maíz y a cereal de invierno, con una extensión, en estas áreas de modernización, del 95% de la superficie. El resto se reparte en cultivos como la remolacha azucarera y la patata, lo que siempre ha obligado a modificar la demanda de agua y sus sistemas de gestión del recurso y las posibilidades de optimización local.

¹⁶ Un parámetro de modelización que se contempla en la algoritmia del proyecto es la “pendiente” (elemento determinante, junto con la proximidad del nivel freático, para decidir, al menos en la época de construcción de esta infraestructura, si el sistema de riego debía ir por gravedad, con manto de agua, o por aspersión, en general más caro y con otra tecnología más compleja) de la superficie de afección que, para un determinado rango de variables da un mayor peso de ponderación al riego por aspersión (pendientes muy bajas) o por gravedad (mayores ángulos de desnivel). A ello ha de añadirse las nuevas variables ambientales en las que, a partir del desarrollo de las políticas del PNIEC y PNACC, integran en la formulación teórica la GEI’s, e impactos sobre cada unidad e indicador ambiental (hidrogeológico, contaminación química, redes de drenajes, etc.)

A estas limitaciones habría que añadir otras de orden logístico, como que los regantes deben organizarse para establecer turnos; priorizándose el regadío por cultivos, lo que complica aún más la rentabilidad y eficiencia en el riego, si bien en algunas parcelas se han detectado sistemas bombeos particulares y balsas o depósitos de almacenamiento que recurren al riego por aspersión¹⁷, y que, por los cultivos implantados y la suave pendiente del terreno, hace que puntualmente mejore la producción de algunas cosechas^[24].



Figura 6.2. Páramo de la zona de Castronuño y estado de los campos.

Debido a lo obsoleto de la infraestructura ^[15] de la que se parte, tal y como se constata por el estado de la red de acequias y las tuberías, y sus múltiples deficiencias ^[22] (bien estructurales o de diseño), y agravado además por la pobre calidad de los materiales de fábrica ^[19], se vienen registrando unas pérdidas de los recursos hídricos bastante significativas y que comprometen su continuidad, debido sobre todo, a los nuevos condicionamientos climáticos.

A ello de e sumarse la problemática -de gran impacto en esta unidad- de los lixiviados de los fertilizantes¹⁸ y fitosanitarios que se han encontrado y que favorecen la contaminación difusa de acuíferos¹⁹ y alfaguaras (asociadas a límites litoestratigráficos de las capas intercaladas de las arcillas y las gravas, o arenas de la serie geológica, siendo responsables (principalmente por los retornos) de las exportaciones de agroquímicos y sales desde las

¹⁷ Se ha constatado que estos equipos de riego por aspersión usan bombas (motores acoplados a una bomba extractiva autónoma, o conectada al propio tractor), de combustibles fósiles (gasoil) los que afecta a las emisiones de CO2 a la atmósfera y que, en el modelo de equilibrio constituye una entrada de GEI's significativa. Dado que, geológicamente, estamos ante un aluvial (Identificado dentro de la unidad Riberas del Duero y Afluentes (ES4170083) perteneciente a las unidades Tordesillas (CD 021.038) y que es posible que dichas extracciones de agua no pertenezcan, en rigor, a acuíferos subterráneos si no, más bien a los niveles freáticos del propio río Duero.

¹⁸ Los análisis geoquímicos de las aguas de los acuíferos de esa zona registran elevados contenidos en iones SO4 2-;NO2, y cationes traza de Pb2+ NH4 +, asociados a episodios generados por vertidos urbanos o industriales y si bien su extensión se ciñe a plumas de transmisión relacionadas con la hidrodinámica de la propia masa de agua, constituyen una fuente de contaminación de los acuíferos que van degradando la calidad de sus reservas de agua.

¹⁹ Este problema no es menor. En el área de Castilla-León, básicamente restringida al río Duero y su cuenca hidrográfica, la afección pone en riesgo potencial a un total de 22 masas de agua subterráneas, por contaminación de tipo agrícola, lo que plantea, a largo plazo, unos impactos difíciles de cuantificar, si bien existe, desde el 2019 una gran cantidad de información geoquímica, en la que se detallan todos los componentes mayoritarios y gran parte de los que aparecen en la lista de "contaminantes requeridos" por la Directiva 2006/118/CE.

zonas regables hacia los cauces naturales (Río Duero y sus afluentes), con la misma consideración de degradación de la calidad de las aguas^[14].

El resultado evolutivo, desde 1960, es un empobrecimiento general del perfil edáfico (clasificado como fluviosol calcáreo –Entisol-, de acarreo y de génesis relativamente joven a partir de depósitos aluviales poco evolucionados, junto con el tipo Cambisol Eútrico – Alfisol-, más adaptados al secano), y sus niveles de desarrollo en nutrientes, vinculados al arrastre (y por lo tanto sustitución geoquímica) e incorporación de determinados (y nuevos) cationes o sales contaminantes, muchos de ellos de origen en los fertilizantes y que terminan en el propio río que hace de sistema receptor^[28], propalando la pluma de contaminación, o, en el menor de los casos, formando costras en los suelos que inutilizan los sistemas de regadío.

Este hecho, además, tiene una especial importancia debido a la interrelación, ampliamente estudiada por otra parte por el IGME ^[26], entre el acuífero subyacente, el río y los ecosistemas locales ^[12].

La casuística territorial ha establecido una serie de figuras de protección, como la Red Natura 2000, LIC's, ZEPA's, etc., y en el área de estudio, especialmente, figura la unidad ES4180017, Riberas de Castronuño, cuya masa de agua catalogada^[15] tiene una superficie muy similar a la unidad de definición (84,21Km², acotada en un perímetro de 61,32 Km) y al área de afección aquí propuesta a mejorar (está conectada, a su vez, con la masa de agua cuyo código es 021.038 (Tordesillas), 021.041 (Aluvial del Duero: Tordesillas-Zamora) y 021.047 (Medina del Campo), generando un sistema complejo en equilibrio hídrico muy sensible, con un alto grado de solapamiento^[13].

Parece obvio que, además, parte de los recursos hídricos^[14] provienen de los acuíferos (sobre todo en aquellas parcelas en las que se han introducido sistemas de bombeo) lo que induce a pensar que este exceso de caudales de extracción respecto a la cantidad de recursos disponibles, catalogados^[11], da lugar a una situación de desequilibrio que conlleva un descenso acumulado de los niveles piezométricos y, en consecuencia, se acusa una mayor demanda de agua y de extracciones a más profundidad dentro del propio sistema hidrológico subterráneo. La proximidad del campo de referencia (parcela o unidad geomorfológica del meandro de Castronuño) al río Duero, principal tributario y elemento regulador del sistema hidrológico, complica el análisis del balance hídrico ^[26] ya que en él ha de introducirse la relación río-acuíferos y su balance²⁰ de trasvase de agua de un sistema a otro, o viceversa²¹.

²⁰ El balance hídrico de un tramo, en relación con el río y su acuífero asociado (es decir si tiene pérdidas o ganancias de agua entre ambos sistemas hidrológicos), depende de la formación geológica del sustrato, de su permeabilidad y estructura litológica, de los datos piezométricos, hidrométricos y foronómicos de los sistemas de control asignados a la unidad hidroestructural.

²¹ Dentro de esta casuística y para este tramo del río, vinculado hidrogeológicamente a las estaciones de registro y área de influencia de Tordesillas y sus estaciones temporales de control foronómico (el Duero cuenta, en la actualidad, con 143 estaciones de registro), y dada la importancia de mantener unos volúmenes tanto de reserva como de gasto, ha de incluirse en los cálculos hidrogeológicos del tramo asignado a este sistema (recuérdese que en esta cuenca se han contabilizado 179 tramos de balance divididos en cuatro situaciones: cauces Efluentes (CE); Influentes (CI); de Relación Variable (CV) y de Relación Mixta (CMx) o Compuesta).

Conceptualmente el modelo desarrollado^[28] se basa en la relación río-acuífero ganador (es decir con flujo de corriente y lavado de las sustancias y con desplazamientos de los perfiles edáficos locales), favorecido todo ello por ser, geológicamente^[13], una unidad detrítica conformada por las gravas cuarcíticas, arenas, calizas y arcillas suprayacentes (terciario, pliocuaternario y cuaternario) al zócalo paleozoico y cuya porosidad es media a muy alta, lo que justifica la importante infiltración directa pluvial, además de la de los retornos provenientes del riego.

6.2.2. Condicionamientos de Partida

En la cuenca del Duero ^[10], y de acuerdo con todos los estudios de campo realizados por las diferentes comunidades de Regantes ^[28], se corrobora el mismo patrón de comportamiento para proyectos de este tipo y cuya causalidad habría que buscarla en el marco del Plan Hidrológico de la Demarcación del Duero (PHD) ^[15], y en cumplimiento de los objetivos de la Directiva Marco del Agua (DMA).

Básicamente, los criterios esenciales de actuación ^[30] para definir el modelo “The Green Leaf” asimilables a la parcela base y entendida como los requisitos mínimos de Infraestructuras Naturales Verdes, sobre la que se elabora el modelo de referencia, son:

- Evaluación técnico-ambiental del proyecto a mejorar. Esta información, preliminar, diagnostica la problemática y que, en líneas generales ya se esbozó anteriormente. En este tipo de proyectos, y dada su coyuntura histórica, es importante establecer bien los criterios de eficiencia ^[29] pues una mejora puede generar más problemas que la reformulación como obra nueva.
- Nuevas estructuras a diseñar. El proceso de modernización exige proponer actuaciones complementarias y cuya finalidad es aproximarse a los objetivos de optimización y eficiencia de los recursos hidráulicos ^[24]. En estos proyectos se incluye un reservorio hídrico (balsa de regulación²²); redistribución de los drenes ya existentes, y los sistemas de generación de energías renovables (eólicos o fotovoltaicos²³) en cumplimiento de la neutralidad climática.
- Adaptación. A las nuevas estrategias de reducción y cumplimiento del PNACC y PNIEC, y cuyas soluciones se deben basar en combinar las interdependencias entre el cambio climático, los ecosistemas y los servicios que se demandan ^[29], para aumentar la resiliencia que, en este tipo de proyectos, inciden en las inundaciones, biodiversidad e, indirectamente, en la mitigación del cambio climático. En este caso las opciones son dos, o una adaptación activa, con medidas sobre todo el

²² Fija la captación de un caudal continuo, flexibilizando los turnos de riego y mejoran el funcionamiento de la instalación.

²³ El sistema de generación de energía renovable, y autónomo, está condicionado por parámetros geográficos y variará en relación a los mapas que, en este caso, serían de vientos e insolación (en las zonas de vega es más útil, y dan mayores rendimientos, las estaciones de placas o paneles fotovoltaicos y los subsistemas de acumulación con reguladores de carga).

conjunto de la unidad o pasiva que es estudiar la viabilidad de las obras ya existentes y ver su capacidad de reacondicionamiento a las nuevas variables climáticas y ambientales.

Basado en este esquema ^[18], y en función de la tipología tan específica de estos proyectos, las medidas propuestas deben incidir sobre los impactos (mayor eficiencia en el consumo de agua y energía, con los consiguientes rendimientos en la producción y calidad del recurso agrícola en este caso; disminución de la contaminación de acuíferos; reducción y corrección de pérdidas de volúmenes de agua²⁴; mejora de la calidad –química- del agua; ahorro y reducción de la emisiones de GEI's²⁵), variables a partir de la vida útil de la obra.

Como medida de adaptación pasiva, y dada la condicionalidad de ejecución del plan de mejora, esta opción incluye acciones de reforestación ^[21], fijación de suelo y cobertera vegetal en superficies de “sombra”, ayudando a la creación de sumideros de carbono ^[20].

Asimismo, y como objetivos secundarios, con estas mejoras se optimizarían costes económicos y energéticos^[28], haciendo independiente el consumo energético (sobre todo las fuentes que proceden de renovables²⁶) de las curvas de costes y demanda de energía, lo que se vería proyectado en el sistema de riego que tendría una mayor regularidad en las presiones en la red de distribución^[19], adecuando más fácilmente la demanda a la oferta, y cuyo resultado ha de ser -necesariamente- una gestión más adecuada del riego para los agricultores^[22].

Consecuencia de lo anterior es una mayor flexibilidad en la tipología de los cultivos, siempre condicionados al sistema de riego (o aspersión o manto de gravedad²⁷) con lo que se mejora la productividad y se favorece una mayor diversificación de especies y variedades de explotación.

La finalidad, por lo tanto, es recuperar las condiciones iniciales de partida, pero mejorando los aspectos considerados -hasta ahora- como invariantes ^[20] (actualización tecnológica a causa de las emisiones de GEI's) y que vendrían agravados por la inclusión de sistemas de bombeo a base de combustibles fósiles ^[17].

²⁴ El consumo en una campaña de riego, en función –obviamente- de las necesidades hídricas de los cultivos (incertidumbre que debe resolverse en el proyecto), para esta área de entrenamiento, de unas 400 Ha, se estima en los 2.152.388 m³ (2,15 hm³, de volumen neto necesario). Si el canal de Castronuño tiene una sección con 5,5 km de longitud y una capacidad, en cabecera, de 650 l/s, los cálculos estimados, para una campaña, puede llegar a alcanzar unas pérdidas de 1.261,25 m³.

²⁵ De acuerdo con el PNIEC deben converger en los objetivos de mejora de la eficiencia energética; en la contribución de las energías renovables y en la reducción de las emisiones ligadas al territorio (20% en los tres casos).

²⁶ El suministro de energía para la estación de bombeo está previsto que cubra en torno al 50% de las necesidades energéticas (dada la casuística en este tipo de parcelas, asociados a los llanos y sin vientos regulares, es más eficaz la implantación de paneles solares fotovoltaicos que complementará la potencia necesaria con la toma a la red eléctrica convencional existente actualmente) y abastecerán a los equipos de motores contribuyendo a una menor pérdida de la presión de agua en las conducciones de la red.

²⁷ La modalidad en el cambio de uso de riego por gravedad a aspersión supone, como término medio, un ahorro hídrico de 0,96 Hm³, por lo que la sustitución del riego a pie -utilizado actualmente y que es difícil aplicar a láminas de agua por debajo de 100 mm, mientras que con la aspersión pueden darse riegos de hasta 4 mm, suficientes para garantizar la germinación- por el sistema de aspersión sería del 82% frente al 60% de riego por gravedad. Ello significa una “recuperación” significativa del volumen de agua, minimizando el impacto climático y evitando usar recursos hídricos sobre todo de los acuíferos subyacentes.

Otro de los objetivos es la construcción (e integración en el espacio del estudio) de una balsa²⁸ de acumulación, o regulación (elemento común, y necesario, en la mayoría de los proyectos de la zona^[25]), en cotas lo suficientemente altas^[19], sin cargas ambientales²⁹, para tener garantías de presión de carga^[22] que pueda satisfacer las demandas del riego -por presión lógicamente- a las zonas parcelarias dentro del perímetro de actuación eficaz^[26], y vinculadas al sistema fuente^[28] (el río principal tributario).

La existencia de un sistema de redes de riego (acequias y zanjas) de distribución antiguo^[24], con bastantes deficiencias (fugas) pero que puede reaprovecharse (y optimizarse) ayudaría en la reducción de los caudales de retorno (pérdidas del sistema, incluyendo la escorrentía y percolación), contribuyendo a la resiliencia^[17] frente al Cambio Climático y justificaría la propuesta de la adaptación pasiva basada en la infraestructura Natural Verde^[18].

6.2.3. Análisis territorial. Teledetección

Establecidas, y fijadas, las condiciones de contorno, sobre todo en las cuestiones jurídicas^[10] y los requerimientos derivados de la legislación ambiental^[16] del proyecto piloto para configurar la validez del modelo “The Green Leaf”^[27], aplicado -en este proyecto- a un segmento de una cuenca hidrográfica^[21], y las exigencias (condiciones restrictivas) impuestas por la ordenación territorial^{[14][20]}, el paso de este proceso, al acotar la zona de ensayo, sería la constatación de su viabilidad y posibilidades sobre el territorio, describiendo -geográficamente- sus unidades territoriales e interrelaciones.

La herramienta usada es la teledetección y las técnicas derivadas de los Sistemas de análisis espacial de Información Geográfica (SIG) que, de forma relativamente rápida, y cuantitativamente, posibilitan una clasificación de los elementos que configuran el paisaje y, por consiguiente, la base aproximativa del diseño y arquitectura en los proyectos ambientales.

²⁸ La mejora y modernización de los sistemas de regadío, y sus obras asociadas, deben priorizar los criterios de eficiencia energética basada en recursos renovables, reduciendo al máximo posible, en este sentido, la relación costes/producción, incluyendo las emisiones de CO₂. Por ello la balsa de regulación (o cualquier otro sistema de almacenamiento hídrico) debe dimensionarse, y ser operativa, para que su llenado y uso cumplan con estos parámetros y puedan garantizar la recarga y mantenimiento del elemento dentro del ciclo energético correspondiente.

²⁹ Este tipo de obras deben construirse fuera de los elementos condicionantes (figuras de protección como LIC's, ZEPA.s, Red Natura 2000) lo que incluiría áreas de tierras de cultivo a una determinada cota que garantice una presión de carga mínima para satisfacer la distribución del agua a todas las parcelas, haciendo -por consiguiente- que su incidencia ambiental sea mínima y se pueda ajustar la demanda a la oferta (criterio de gestión integral).



Figura 6.3. Mapa de ubicación de la zona, desde la perspectiva puramente vertebral del territorio (Google Map. Zona de Castronuño). Cuenca del Duero.

La primera fuente de información procede de documentos oficiales de ordenación territorial y en los que, sucintamente, se resaltan los núcleos urbanos y la red de comunicaciones de la zona ^[28]. A su vez se define la red hidrográfica del Duero (con su evidente meandro) y algunos espacios acotados (color verde) identificados como zonas de especial interés.

Una primera apreciación es que la zona es relativamente plana (el páramo castellano), encajada en una importante vega, o llanura de inundación, en la que se destaca, sobre todo en la parte S, diferentes escalones morfológicos (asociados a terraza fluviales), y cuya respuesta señala que es una zona media de un río evolucionado con cierto control geológico de su curso y unos materiales detríticos condicionantes de dichas unidades, depositadas en las riberas y cauces menores ^[23].

El mapa topográfico ya marca un principio de cartografía, oficial, en la que ya se distinguen las unidades^[14] más importantes (Reservas Naturales, unidades hidrográficas, dentro de las que destacan los ríos, embalses, riberas, afluentes, surgencias^[12] y canales de riego, como más representativos, además de núcleos de poblaciones, infraestructuras lineales –ferrocarriles y carreteras- y campos o áreas de tipo industrial,...) y que evitaría desplazamientos al terreno, al menos en esta primera etapa ^[25] (Figura 6.4).

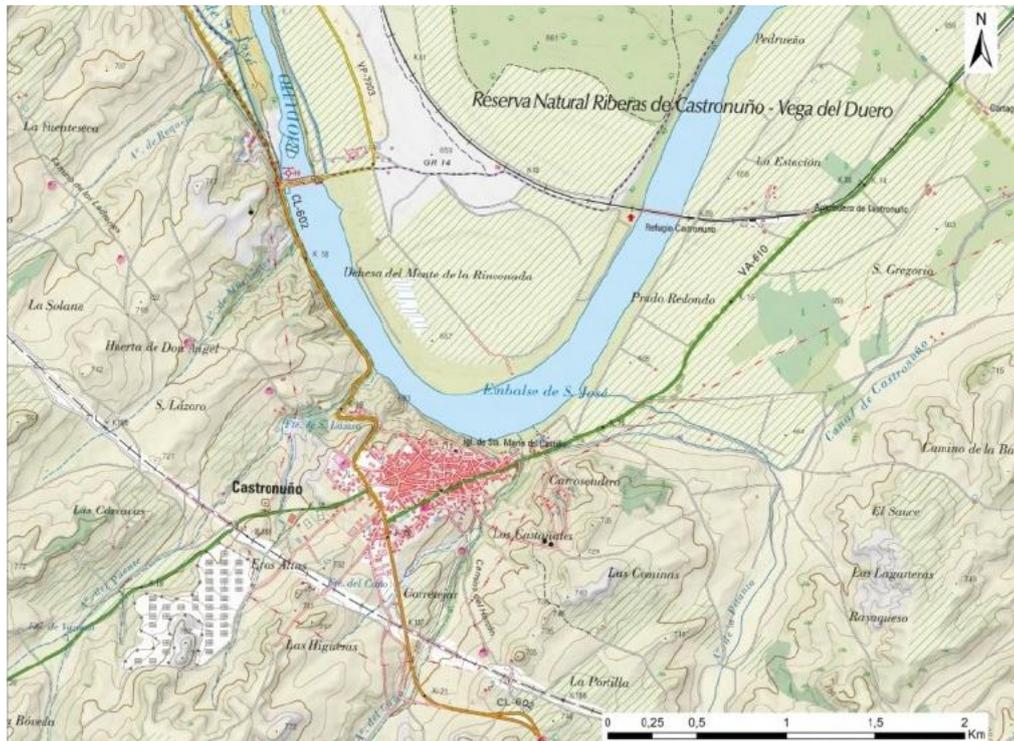


Figura 6.4. Mapa topográfico, de poblaciones, redes y elementos territoriales vinculados a la zona. Se incluye las curvas de nivel que permitirán algunos tratamientos de carácter puramente de ordenación y clasificación de unidades a considerar.

Territorialmente ^[27] es una zona dedicada, como actividad principal, a los recursos agrícolas y, en menor medida ganaderos, con una estructura, alrededor de las poblaciones, radiales lo que evidencia una amplia tradición en este sector³⁰ y, por lo tanto, una estructura económica muy bien arraigada y consolidada.

Parece claro que es una vega con bastantes recursos hídricos y fértiles ^[24], sobre todo en la vertiente N del río, en la que el espacio confinado del meandro permite un abastecimiento garantizado de agua y unos perfiles edáficos relativamente ricos por su composición geoquímica, abundante en nutrientes ^[28] y cationes de interés agrícola.

Destacar que en la zona SW, entre las carreteras secundarias de acceso a Castronuño se encuentra una unidad identificada como campo fotovoltaico solar, de gran interés para el desarrollo de este proyecto y que se ilustra en las Figuras 6.4 y 6.5.

La imagen de la zona confirma todos los extremos anteriores y, además, pone de manifiesto la presencia de algunos pivots hídricos ^[15], de gran importancia (acotados dentro del meandro de Castronuño) y que señalan una importante inversión en su

³⁰ Estructura heredada, al menos, desde la baja edad media y que responde al modelo patrón de Castilla, la Vieja.

momento en los recursos agrícolas en la zona y que se han situado, obviamente, en las zonas con más posibilidades de agua.



Figura 6.5. Imagen aérea, rectificada, de la zona de estudio. En ella se pueden ver diferentes unidades geomorfológicas, de infraestructuras y el estado de los campos y su situación y estado fenológico. Destáquese el campo de los paneles fotovoltaicos solares.

Estas tres imágenes, incluida la fotografía aérea (Figura 6.5), y los anteriores planos, o mapas locales, suponen lo que –tradicionalmente- se ha llamado “trabajo de campo”.

Es el primer nivel ^[17] para establecer la discriminación morfológica, las unidades de relieve, los elementos y los atributos en la zona de estudio ^[21].

La comparación entre ambas imágenes (Figura 6.4 y Figura 6.5, respectivamente) nos da unas primeras aproximaciones. Esto es: El río está regulado (lo que minimiza el riesgo de inundaciones aguas arriba y, por ello, como zona ARSPSIS, queda reducida a su mínimo nivel de exposición)³¹; existe una fuente de recurso renovable (planta solar fotovoltaica) que optimiza la zona como área de aprovechamiento de energía limpia y, por tanto, baja en emisiones y es posible diseñar actuaciones en las que el recurso agua esté involucrado y con ello pueda incrementarse su demanda, consumo y gasto, manteniendo su sostenibilidad.

³¹ No se considera, de momento, la zona como expuesta si se aplicase los criterios y modelos predictivos de Cambio Climático, por lo que los resguardos de la presa de regulación y los sistemas de detraimiento de caudales (como son las acequias y demás) puede compensar este efecto, si bien debería estudiarse más detalladamente).

El siguiente nivel en el modelo de ensayo de “The Green Leaf” es la generación de mapas de propiedades ^[30], georreferenciados y rectificados (mediante la aplicación de “Arc-Map”), para su tratamiento integral.

La base topográfica y planimétrica digital es la “BCN 25” del IGN. El uso del MDT, o MDE (“Spatial Analyst” y “Surfer”) cartografían la zona de interés en función de los condicionantes establecidos, y asumiendo ciertas variables topográficas, de áreas de exclusión y unidades hidrogeológicas locales.

Sobre las imágenes anteriores se integra la red hídrica ^[12], que es la que marcará las líneas de selección en cuanto a la importancia de este recurso, sobre todo en criterios de optimización agrícola, y de referencia en acequias y canales de riego, tal y como se ilustra en la Figura 6.6.

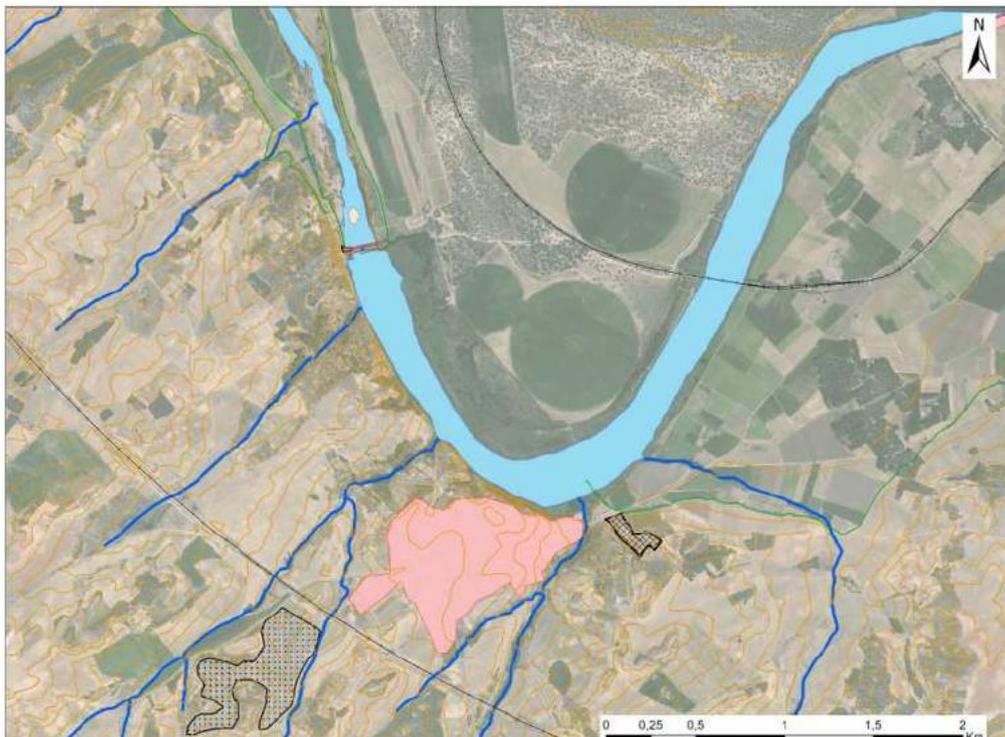


Figura 6.6. Red superficial hidrológica de la zona. Marcaría las lineaciones y zonas de protección asociadas a zonas de riesgo de inundación y ARPSIS locales. En la imagen se han cartografiado una unidad fotovoltaica, ya construida y operativa (hacia el SW de Castronuño) y una de nueva propuesta (NE) como alternativa de recurso energético renovable.

Evidentemente, esta red acota las llanuras de inundación (vegas más fértiles) y sus riesgos Asociados ^[11], así como la cartografía, topográficamente, de las terrazas ^[28] (de evidente desarrollo en la zona S, y ligadas a variaciones en la pendiente), canales naturales, paleocanales, trazado y direccionalidad de afluentes y efluentes y, por tanto, aporta

información secundaria de los procesos evolutivos y de cambios morfológicos de la red hídrica con el tiempo³² y desarrollo de la dinámica fluvial. Esta circunstancialidad hace que este tipo de áreas (de nueva creación natural) sean excesivamente porosas^[13] y al no estar consolidadas, sus niveles freáticos sean más bajos de lo acostumbrado para el meandro^[26].

Sobre la red hidrográfica, y ya a modo de establecer las zonas de exclusión^[25], se representan las distintas figuras de protección ambiental^[27], (ZEPAS, IBAs y LIC's, etc.,) que, prácticamente, ocupan la zona del meandro y parte se margen izquierda del brazo (parcelas de código 102 del catastro) que estarían dentro de la zona piloto del "The Green Leaf"^[18].

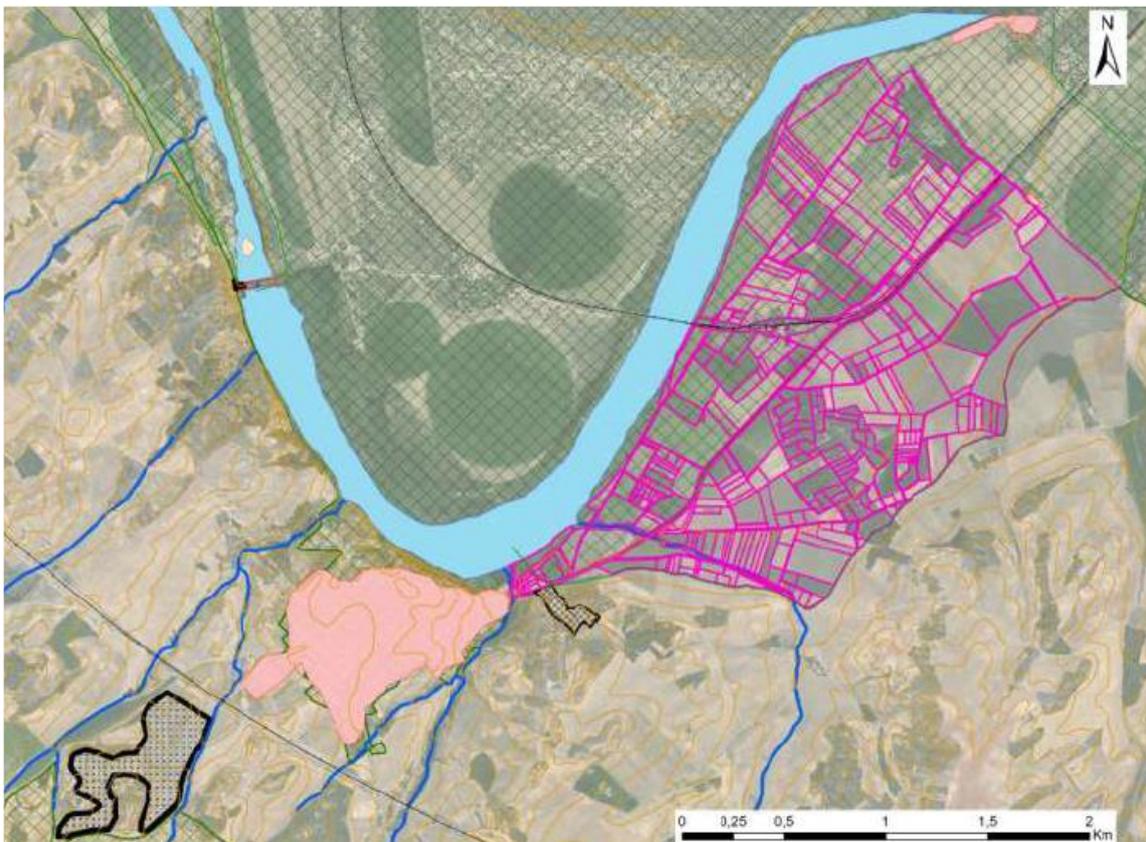


Figura 6.7. Área de exclusión de Protección Ambiental Especial Ambiental, de acuerdo a la información oficial del MITERD, como base cartográfica del IGN.

³² La progradación, hacia el N del meandro señala un área desprotegida, de acreción sedimentaria, en la que se da un déficit hídrico, al menos en los niveles más superficiales y que queda acotada por el cambio de orientación del afluente, que no mantiene la lineación NE-SW, derivando hacia el NW.

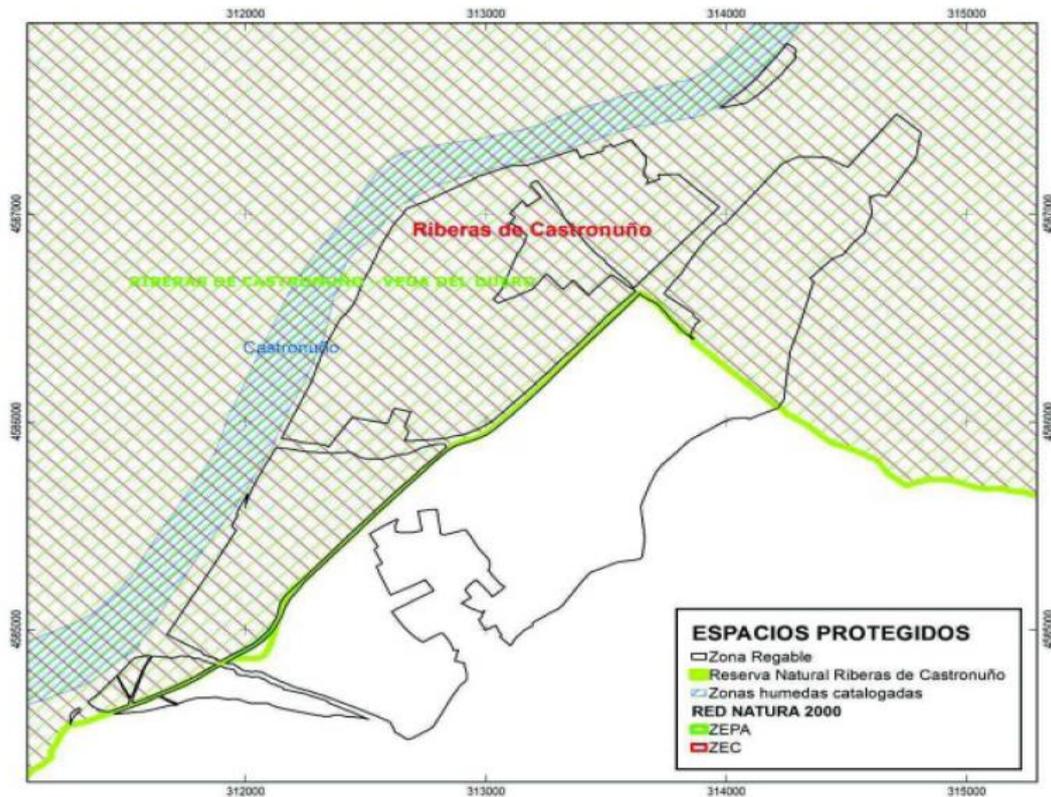


Figura 6.8. Zonas de mejora y modernización de regadío del canal de Castronuño, respecto a la Red Natura 2000 (ZEPA y ZEC) Reserva natural y Zonas Húmedas cartografiadas (BOE....)

En el BOE ^[25] se ha fijado el proyecto definiendo las zonas protegidas o áreas de exclusión que, como puede constatarse, son coincidente el análisis ambiental ^[28] deducido para la parcela tomada como referencia (Figura 6.8).

Avanzando en la información topográfica, se ha añadido la capa de cotas^[19], cartografiando en cuatro rangos altimétricos que se corresponderían a la vega baja del Duero (<670m), una zona intermedia, de pendiente ligeramente más acusada (>670 m y <720m) caracterizada por discretos abanicos aluviales y de acarreo^[28]; una zona superior, entre 720 m y no mayor de 730 m, dependiente relativamente suave y luego otra, (por encima de esta cota que marcaría las divisorias de agua y, por lo tanto, la protección natural en cuanto a cuencas de afección, tanto visuales como de flujo (Figura 6.9)^[24].

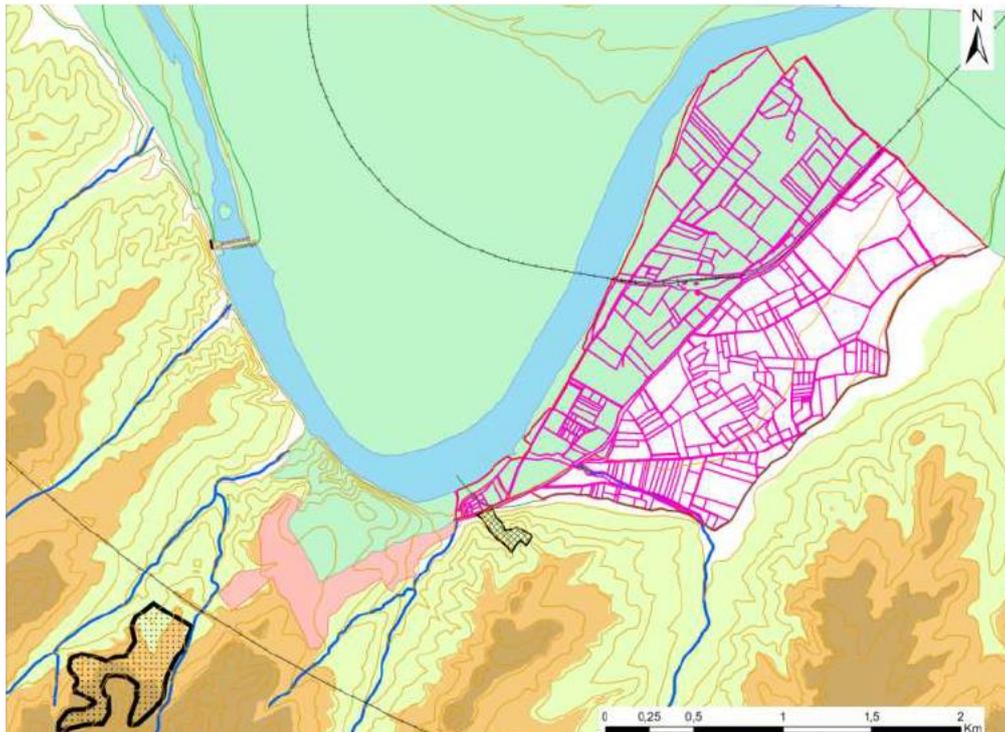


Figura 6.9. Superposición de la altitud e impacto sobre la red hídrica (se han segregado tres alturas de cota para zonificar las áreas de interés y que tiene la importancia de asociar, a cada segmento, un valor de energía potencial que puede ser determinante de la ubicación de estructuras de almacenamiento para los sistemas de riego.

Cada capa de información acota más las posibilidades de ubicación de las infraestructuras [19]. Así, a modo de resumen general, tendríamos que la zona hacia el N del río Duero, las figuras de protección [12] (ambientales) haría muy difícil abordar cualquier proceso de implantación de recursos hídricos (más allá de los actualmente existentes).

Y en la zona S la topografía [13] condicionaría la instalación de sistemas de almacenamiento (balsas y sistemas de regulación) que, además, deberían, de acuerdo con los protocolos de Protección civil, resguardar a las poblaciones allí ubicadas [30].

Con toda esta información de base ya es posible detectar zonas de interés para ejecutar las infraestructuras del proyecto.

Así, la cartografía establecería que el rango intermedio de cotas comprendido entre la curva de nivel 720m y 730m es la más idónea [19] para la ubicación de la basa de almacenamiento ya que, a esa altura, las conducciones pueden tener la suficiente presión [22] como para poder garantizar el riego a toda la parcela [11].

La cota superior, además de tener, lógicamente más pendiente, no garantizaría el efecto pantalla de las divisorias de agua que, configurarían una pantalla natural de diques de protección ante este tipo de desastres de rotura o colapso, accidental, de las balsas necesarias para garantizar la eficiencia del sistema y el modelo de “The Green Leaf”.

Con los criterios esbozados ya, la ubicación de la balsa se fijará en algún lugar de la franja (marrón), y protegida de la población por la divisoria de aguas (Figura 6.11, izquierda).

Por consiguiente, el mapa de trabajo respondería a la siguiente configuración (Figura 6.10):

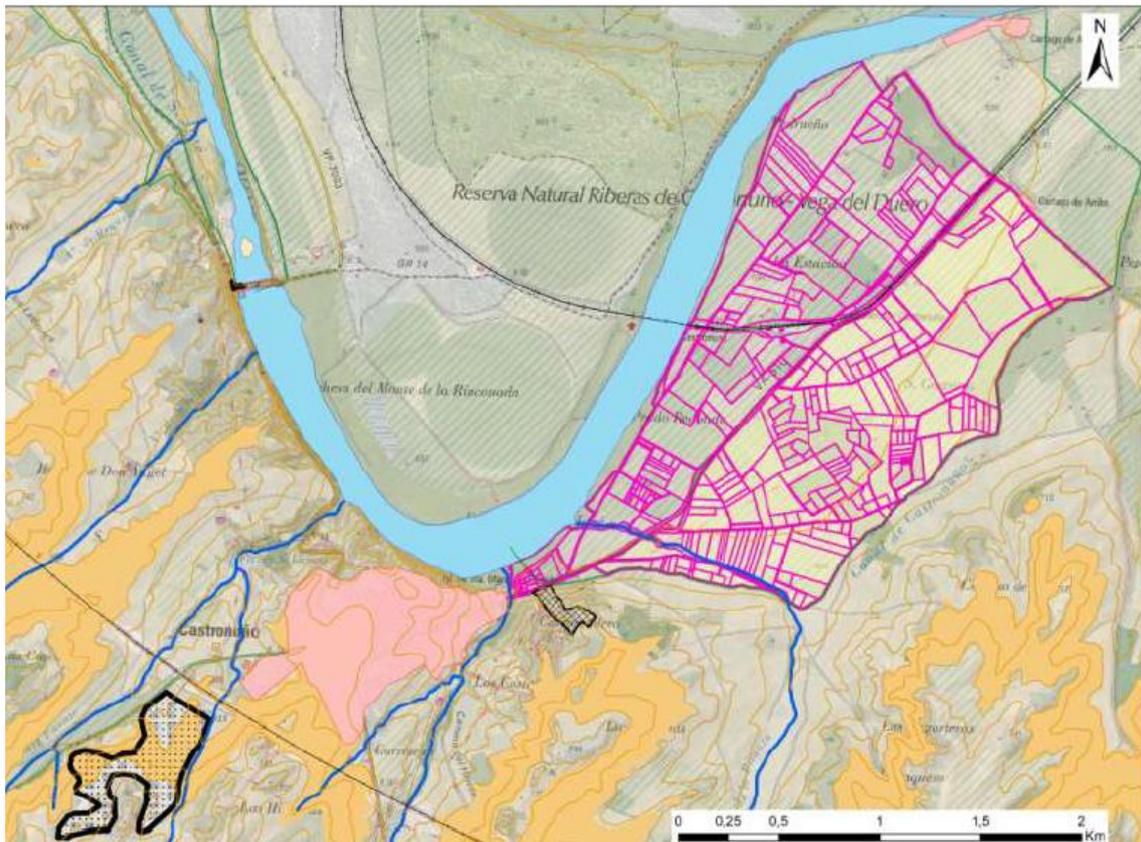


Figura 6.10. Zonas seleccionadas para ubicar la balsa de almacenamiento (franja de cota marrón). Evidentemente deben seguirse las áreas, dentro de esta franja que estén a la sombra de divisorias de agua que protejan las poblaciones.

Llama la atención que en el mapa de ordenación territorial aparezca un campo fotovoltaico, ya construido, lo que favorece (ya de por sí) la implantación de sistemas de riego basados en energías limpias y renovables, favoreciéndose, desde la perspectiva de emisiones de GEI's (Gases de Efecto Invernadero) el impulso del proyecto que, además, integra la proyección de otra central fotovoltaica independiente de la anterior.

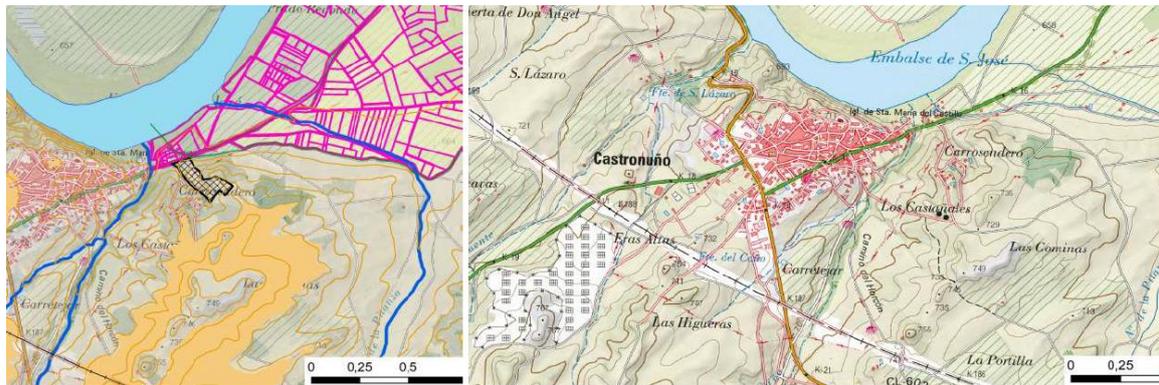


Figura 6.11. Zona de mayor seguridad y resguardo para la ubicación de la balsa (izquierda). Infraestructuras de energía (derecha).

El examen de la propuesta de “Mejora y modernización del Regadío en la Comunidad de Regantes del Canal de Castronuño (Valladolid)” contempla el acondicionamiento y ejecución de una planta fotovoltaica solar como recurso energético, exclusivo para el sistema de modernización de riego. Este proyecto, por consiguiente, cumpliría con todos los requisitos de lo que se ha venido en llamar la “adaptación pasiva” por lo que, desde un punto de vista de las sinergias, sería interesante constatar la necesidad y justificar la oportunidad de instalar este nuevo parque fotovoltaico, entendiendo esto como un proyecto integral que debe considerar las condiciones de contorno.

6.3. Conclusión

Dada su condicionalidad de adaptación pasiva (que exige como punto de partida ya una infraestructura de actuación, independientemente de su estado y operatividad previo), el proyecto debe adscribirse, desde el punto de vista jurídico, en el Anexo II de la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental (modificada por la Ley 9/2018 de 5 de diciembre).

La zona, tradicionalmente con abundantes recursos hídricos, está regada, en el momento de la propuesta, a través de infraestructuras obsoletas y cuya base energética son fuentes contaminantes (bombeo directo a la red de riego), como base de recurso los aportes del Duero (a su paso por Castronuño) y aprovechando diferentes surgencias, alfaguaras y pozos artesanos de los niveles freáticos locales, ayudados por las acequias y canales (que se pretenden optimizar por su estado operativo), siendo –además– una zona muy llana, lo que favorece los sistemas por gravedad, reduciéndose enormemente los impactos al no provocar, al menos de forma inmediata, arrastres por tensión y estrés hídrico.

El sistema, actualmente con importantes pérdidas de caudal y baja eficiencia energética, asociada al uso de motores convencionales, y altos costes, tanto energéticos como ambientales, ha llevado a la propuesta de mejora de la infraestructura, por parte de las comunidades de propietarios y regantes locales.

De acuerdo con las condiciones de partida, la propuesta metodológica a aplicar en el proyecto en cuestión, dada la condicionalidad de una infraestructura con las mismas características que las que se pretende sustituir, o remediar, se ajusta a lo que se ha llamado el sistema de modelización “The Green Leaf”.

Este modelo supone una serie de ventajas como la reducción de emisiones, la capacidad de replicación metodológica en sectores de una problemática similar y con la renovación de infraestructuras de bajo coste (más modernas y eficientes) que garantizan la vida útil de aquellas y una mejor ordenación territorial.

En este caso la implantación, actualmente en funcionamiento, a escasos 7 km, de una fuente energética renovable, como es una planta fotovoltaica ya operativa tan sólo requeriría (como obra nueva) una balsa de almacenamiento, o acumulación, que garantice las presiones de carga para la distribución, a partir de los sistemas de distribución que se pretenden modernizar del agua en todo el sector propuesto.

Con ello se garantiza la disminución de emisiones de CO₂ a la atmósfera, implantando las energías limpias y renovables que, además, hacen independiente los recursos hídricos, y de riego, de coyunturas estacionales y, en consecuencia, mejora las condiciones laborales de la zona, además de un mayor control de la contaminación difusa a causa de los aportes de fertilizantes, y la variabilidad de nuevas especies de producción agrícola.

El proceso de modernización minimiza los impactos ambientales en la red hidrológica; mejora el perfil geoquímico del suelo y las alteraciones topográficas, así como una mayor protección de la fauna (Zona de Especial Conservación, o ZEC) y Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA) locales, según los criterios del Código de Buenas Prácticas Agrarias.

6.4. Bibliografía

- [10] Comisión Europea (2009) Estrategia Común de Implantación de la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE). Documento Guía n.º 18. Guía sobre el estado de las aguas subterráneas y la evaluación de tendencias. (Traducción Dirección General del Agua MARM), 87 pps. Edit. UE.
- [11] Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General del Agua (2005) Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitaria. 34 pps. Edición. MAGRAMA.
- [12] IGME-DGA (2009) Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. Demarcaciones Hidrográficas del Miño-Sil, Cantábrico, Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Segura, Júcar y Ebro. Encomienda de gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME (MCIN) para la realización de trabajos científico-técnicos

de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. 778 PPS. Edita IGME.

- [13] IGME-DGA (2006) Mapa Litoestratigráfico y de permeabilidades, e hidrogeológico de España a escala 1:200.000. Mapa Litoestratigráfico, de permeabilidades e hidrogeológico de España a escala 1:200.000 (igme.es). 134 pps. Edición IGME.
- [14] DGA-IGME (2010). Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descargas por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico. Demarcaciones Hidrográficas del Miño-Sil, Cantábrico, Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Segura, Júcar y Ebro. Encomienda de gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME (MCIN) para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas (T.II, 456 pps). Ed. IGME.
- [15] DGOH (1990). Estudio de las zonas húmedas de la España peninsular: Inventario y tipificación. Dirección General de Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid, 435 p. Edición MAPAMA
- [16] MOPTMA-MINNER (1994). Libro Blanco de las Aguas Subterráneas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Dirección General de Calidad de las Aguas (Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente) e Instituto Tecnológico Geominero de España (Ministerio de Industria y Energía), Madrid, 135 p.
- [17] Allen, A., Zilbert Soto, L., Wesely, J., Belkow, T., Ferro, V., Lambert, R., Langdown, I., & Samanamú, A. (2017). From state agencies to ordinary citizens: reframing risk-mitigation investments and their impact to disrupt urban risk traps in Lima, Peru. *Environment & Urbanization*, 29(2), 477–502. <https://doi.org/10.1177/0956247817706061>
- [18] Benedict, M. y. (2006). *Green Infrastructure, linking landscapes and communities*. Washington: Island press. 127 pps. IGCS. Congress USA.
- [19] Circular Law (17/2003). 2004. Recomendaciones para el Proyecto y Construcción del Drenaje subterráneo en obras de Carretera. Ministerio de Fomento. 117 pgs. http://www.carreteros.org/normativa/drenaje/oc17_03/apartados/oc.htm.
- [20] Epiquién, M. (2017). Retos y oportunidades para una gestión sostenible de los recursos hídricos. I FORO INTERNACIONAL: Retos y oportunidades para una Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos. Lima: Sedapal. Lima, 125 pgs. Edit, AICastillo. Perú.
- [21] Forest Trend (nd). Proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica Retrieved from <https://www.forest-trends.org/infraestructura-natural-en>

[peru/#elproyecto](#).

- [22] Martínez, A. (1992). Evaluación geotécnica de los taludes. La microcuenca de Quirio- Chosica. In J. M. Romero, Los desastres sí avisan - estudios de vulnerabilidad y mitigación II (pp. 117-122). Lima: Tecnología Intermedia (ITDG).
- [23] Informe de viabilidad previstos en el artículo 46.5 de la ley de aguas (según contemplado en la Ley 11/2005, de 22 de Junio, por la que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional) 32 pps. Edición Ministerio de Medio Ambiente.
- [24] Proyecto de mejora y modernización del regadío en la comunidad de regantes del canal de Toro-Zamora (Valladolid y Zamora). Sector IV. Fase II. 2010. Pg 29. SEISASA del Norte (Sociedad Estatal de Infraestructuras Agrarias). Ministerio de Medio Ambiente y medio Rural y Marino. Gobierno de España. 123 pps. Informe de validación. SGEA.
- [25] BOE. Viernes 9 de mayo de 2014 nº 113, Sec III, pg 35766. De resolución de 14 de abril de 2014, de la Secretaría de Estado de Medio ambiente, por la que se formula declaración de impacto ambiente del Proyecto de Mejora y Modernización del Regadío del Canal de Castronuño, Termino municipal de Castronuño (Valladolid).
- [26] Murillo Díaz, J. M. (2013). Las Aguas Subterráneas y la Red Natura 2000. Demarcación 021. Duero. Ecosistemas Naturales de especial Interés Hídrico. Act. 4. Identificación y caracterización de la interrelación entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descargas por manantiales, y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico. IGME, 731 pps.
- [27] CE.2021. Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité. Forjar una Europa Resiliente al cambio climático — Estrategia de adaptación al cambio climático. (27 pps).
- [28] Sánchez del Corral, A. (2007). Geomorfología del Duero en Toro (Zamora). Evolución de La Llanura de Inundación. Revista C&G. 21 (1-2), pps. 103-122. ISSN: 0214-1744.
- [29] Mapas Ecosistémicos de Ordenación territorial y optimización de recursos renovables en ambiente hidráulico. 2020. Base Datos: (<http://servicioecosistemicos.minam.gob.pe/>).
- [30] El nuevo sistema de inversión pública Lima, marzo de 2017. (https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/invierte/INVIERTE.PE.pdf). Marcos-Garcia, P., Pulido-Velazquez, M. (2017). Cambio climático y planificación hidrológica: ¿es adecuado asumir un porcentaje único de reducción de aportaciones para toda la demarcación? Ingeniería del Agua | 21.1. Doi:10.4995/la.2017.6361.

7. USO DE NUEVAS PLATAFORMAS WEB-GIS UTILIZADAS EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y SU APLICACIÓN AL DESARROLLO RURAL.

Pedro Oñorbe de Torre. Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid.

RESUMEN

En el próximo periodo, después de controlada la pandemia del coronavirus, nos queda un nuevo reto que será el de volver a activar la economía. Vamos a contemplar en esta charla, como la teledetección puede ayudar a consolidar la reactivación del sector rural y muy especialmente el de la producción agraria.

Comentaremos algunos de los proyectos que concentran los esfuerzos de investigadores y técnicos agrarios en la promoción de la agricultura de precisión con la intención de facilitar la labor del agricultor, mejorar la productividad, reducir el uso de insecticidas y fitosanitarios en el control de plagas, extender el campo de uso de la digitalización rural e incidir en una propuesta de reindustrialización del sector, extendiendo el uso de las plataformas gis de nueva generación así como la generalización de uso de sensores específicos agrarios incorporados a todos los aperos utilizados en agricultura y muy especialmente la promoción de la digitalización rural agraria.

Haremos una presentación de varias de las plataformas gis, tanto públicas como privadas, así como insistiremos en la responsabilidad de la administración pública en ampliar la red internet de alta velocidad de forma que llegue a todos los pueblos de España potenciando el control distribuido, la digitalización rural y fijando población en el entorno rural. También, una breve exposición de los principales actores que se mueven en el entorno rural y que pueden potenciar los proyectos, como son los Grupos de Acción Local (GAL), sus redes nacionales (RRN, REDR y REDER), la potenciación del Programa Leader para financiación de sus proyectos de desarrollo y la función de los Centros de Investigación y Desarrollo Agrario de las Comunidades Autónomas en colaboración con diversas Universidades.

7.1. Teledetección en agricultura de precisión.

7.1.1. El espectro electromagnético, los campos aplicados en agricultura

Dentro de las aplicaciones de teledetección en ingeniería civil, una de las más clásicas es la aplicación en agricultura de precisión, aprovechando la respuesta de planta y suelo a la incidencia energética de la luz del sol.

Analizando esta respuesta en los distintos campos del espectro electromagnético podemos determinar parámetros que denominamos índices vegetativos que permiten

diagnosticar la situación de estrés de un vegetal y aplicar medidas correctoras tanto a nivel de composición de suelo como de necesidades de humedad o de defensa contra plaga incipiente.

Este análisis es el que permite optimizar el regadío, abonado y tratamiento fitosanitario con los correspondientes ahorros.

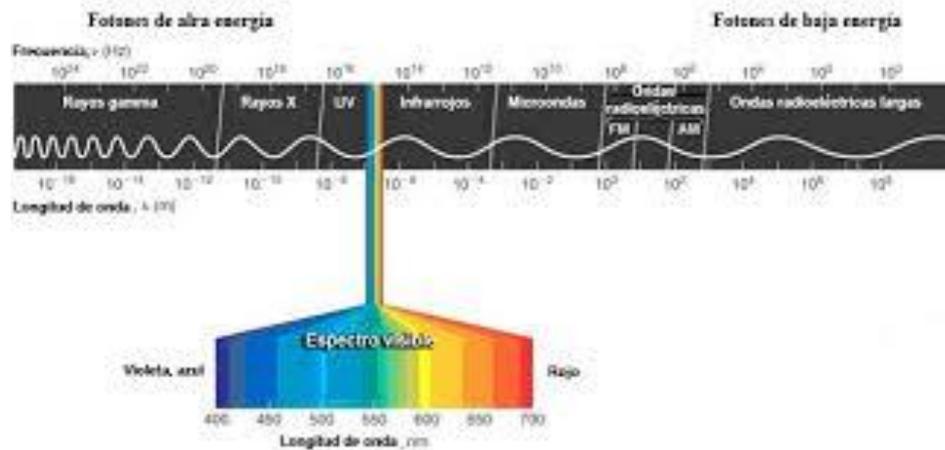


Figura 7.1. Representación del espectro electromagnético

En agricultura se trabaja especialmente en el sector óptico, el infrarrojo cercano y el térmico para cálculo de NDVI y estrés hídrico.

Para la toma de datos utilizamos las cámaras incorporadas en satélites, en drones o en sensores de tierra, muchos de los cuales se incorporan en los propios aperos de labranza.

Entre los satélites más utilizados nombramos a la serie Sentinel del programa europeo Copérnicus, especialmente los Sentinel 2A y 2B por ser de los más utilizados al ser de uso gratuito.

Cada vez son más utilizados los datos obtenidos con cámaras Lidar para análisis de diversas alturas y usados para índice foliar

Empiezan a utilizarse cámaras multispectrales para ampliar el campo de experimentación sobre todo en control de plagas y en casos puntuales las cámaras hiperespectrales.



Figura 7.2. De izquierda a derecha: Sentinel 2A (izda), cámara multispectral (centro) y cámara hiperespectral (dcha).

7.2. GIS aplicados en agricultura de precisión.

Disponemos de muchos GIS aplicados a agricultura, entre los que destacamos los del Ministerio de Agricultura:

- ❖ SIGPAC de uso gratuito utilizado para control de pagos de la Política Agraria Común
- ❖ SIAR para control de regadíos
- ❖ SIGA de datos agrarios especialmente en cultivos herbáceos

Otro webGIS muy utilizado y complementario del SIAR es el SPIDER del Instituto de Desarrollo Regional de la Universidad de Castilla La Mancha.

Muchas casas de seguros agrarios están ofreciendo plataformas de control de parcela y producción de servicio gratuito o muy barato a sus clientes y promocionan estudios y proyectos de evaluación de daños en catástrofes naturales.

7.3. Índices agrarios aplicados en agricultura de precisión.

Los índices agrarios aplicados en agricultura de precisión son muy variados pero a la hora de su aplicación en información recogida por teledetección nos centramos en pocos de ellos y con utilizaciones muy concretas:

- ❖ NDVI, el más utilizado y representa el estrés vegetativo. Obtenido comparando la respuesta en borde rojo y en infrarrojo cercano.
- ❖ Estrés hídrico tomado comparativamente entre infrarrojo térmico y NDVI.
- ❖ Índice foliar tomado con cámara lidar a distintas alturas y representativo de la masa foliar y por tanto de la salud clorofílica de la planta.
- ❖ Índice específico de plaga tomado con mediciones selectivas hiperespectrales y térmicas (en experimentación).
- ❖ Índice de tipo de suelo. Necesita trabajo directo en campo y es muy útil para seleccionar tipo de cultivo y variedad más apropiada.

7.4. Transmisión de datos y actuaciones.

Los datos obtenidos en campo se acumulan en sistemas data logger y son transmitidos a oficinas centrales para su análisis y toma de decisiones.

Una vez analizados hay que transmitir a cliente las medidas correctoras recomendadas en

un lenguaje sencillo fácilmente comprensible.

Últimamente diversas empresas fabricantes de aperos (tractores, cosechadoras etc) están ofreciendo plataformas para la incorporación directa de las recomendaciones a los aperos para su actuación en automático.

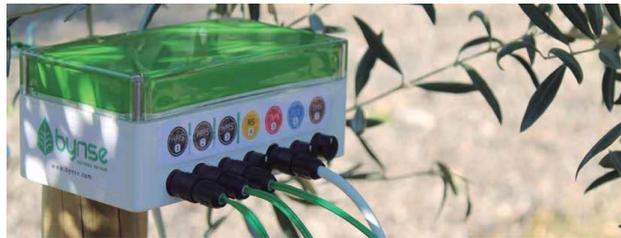


Figura 7.3. Equipo de adquisición de datos (Data logger)

7.5. Principales actores en promoción rural.

Uno de los principales objetivos de la agricultura de precisión es mejorar la productividad de tal forma que aún pequeñas explotaciones puedan ser rentables y fijar población en los entornos rurales.

7.5.1. Actuaciones de los Grupos de Acción Local (GAL).

Existen 252 Grupos GAL en España, con un promedio de 40 municipios asociados y otros 40 socios no municipales (Mancomunidades, Cooperativas y Particulares).

7.5.2. Agrupaciones de GAL

Red Rural Nacional (RRN)

REDR

REDER

Se financian a través de los fondos Leader del programa Feader europeo.
Se coordinan con las actuaciones europeas de desarrollo rural.

Las actuaciones se controlan a nivel autonómico y los proyectos los evalúan entes autorizados (IMIDRA, IMIDA, etc).

Se coordinan también con los Servicios de Desarrollo Rural provinciales.

7.6. Actuaciones de GAL y Grupos Operativos.

Los proyectos promocionados por Grupos GAL son de cuantía aproximada de 15.000 €

Proyectos de importe superior se promocionan a través de los denominados Grupos Operativos que pueden ser Autonómicos o Supraautonómicos, convocados anualmente.

Algunos ejemplos de proyectos promovidos por Grupos GAL o Grupos Operativos son:

- ❖ Ampliación de red wifi municipal
- ❖ Promoción de plataformas de turismo rural
- ❖ Mejora de servicios mancomunados
- ❖ Cursos de formación, viveros de empresas
- ❖ Proyectos forestales mancomunados
- ❖ Proyectos de innovación en agrupaciones agrarias o ganaderas
- ❖ Proyectos de energía solar fotovoltaica de autoconsumo
- ❖ Proyectos de mejora en eficiencia energética (iluminación, regadíos)
- ❖ Implantación de servicio de telemedicina rural.

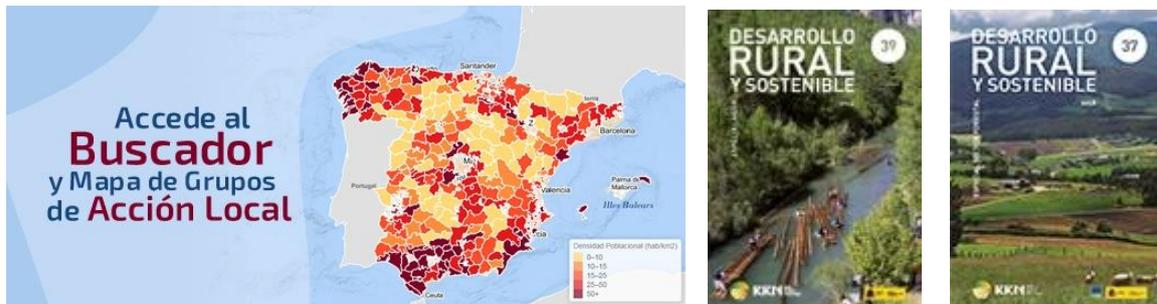


Figura 7.4. Buscador de ubicación de grupos GAL (izda) y ejemplares de la revista de la Red Rural Nacional (dcha).



Figura 7.5. Presentación LEADER en un GAL (izda). Presentación de un vivero de empresas (dcha).

8. ANÁLISIS AMBIENTAL DE LOS NUEVOS ESTÁNDARES DE COMUNICACIONES PARA VEHÍCULOS AUTOMÓVILES.

José Daniel Martínez de Rioja del Nido (UPM), Eduardo Martínez de Rioja del Nido (URJC) y José Javier Martínez Vázquez (Coordinador del CT Nº 56)

RESUMEN

Las comunicaciones de los vehículos entre sí y con su entorno, conocidas como V2X, van a experimentar un rápido crecimiento en los próximos años y se espera que revolucionen los sistemas de transporte terrestre ya que están ligadas al denominado Internet de los Vehículos (IoV). Esto significa que habrá mejoras en las condiciones de seguridad de la conducción, en la gestión del tráfico rodado y en la optimización del consumo de energía. Actualmente, existen dos tecnologías de comunicaciones a corta distancia entre vehículos automóviles: V2X y LTE V2X, el último también denominado V2X celular o C-V2X. La capa física de ambos sistemas está regulada básicamente por la norma IEEE 802.11. Este trabajo pretende realizar una descripción funcional y un análisis medioambiental de ambos sistemas de acuerdo con la regulación nacional e internacional sobre la exposición del organismo humano a los campos electromagnéticos.

8.1. Introducción

Un sistema inteligente de transporte, conocido por sus siglas en inglés ITS, tiene tres elementos básicos: el conductor, el vehículo y el entorno. Éste último puede dividirse en dos tipos diferentes: el estático y el dinámico. La inteligencia en el transporte se materializa en las comunicaciones entre sus tres elementos básicos. Los principales objetivos de los ITS son la reducción del número de accidentes en carretera, sobre todo aquellos con heridos y víctimas mortales y la gestión del tráfico para evitar atascos, tramos con tráfico denso, etc.

En los Estados Unidos desde 2016 es obligatorio que los coches vayan equipados con el sistema DSRC (Dedicated Short Range Communications). Este estándar, que apareció en el año 99, ha sido el origen de los actuales ITS-G5 y 3GPP PC5 también conocidos como comunicaciones V2X y V2X celular o C-V2X. Ahora, a comienzos de 2021, será obligatorio que los nuevos automóviles norteamericanos tengan instalado uno de los dos sistemas a su salida de fábrica. Las comunicaciones V2X y V2X celular son el paso previo a la incorporación a los vehículos de transporte terrestre del denominado Internet de los Vehículos (IoV), muy relacionado con las redes de sensores a bordo de los automóviles y la gestión y procesado de los datos que generan. Todo ello parte integrante de lo que hoy en día se ha dado en llamar la conducción segura y la conducción autónoma.

Estos estándares regulan las comunicaciones entre vehículo y vehículo (V2V), entre vehículo e infraestructura (V2I) y entre vehículo y peatón (V2P) o ciclista (V2R) con la finalidad de proporcionar asistencia al conductor para la circulación segura de su automóvil. Los sistemas V2X permiten a los vehículos, a la infraestructura de transporte terrestre y a nuestros terminales de usuario tipo smartphone, comunicarse todos entre sí y compartir información vital para la seguridad en la circulación.

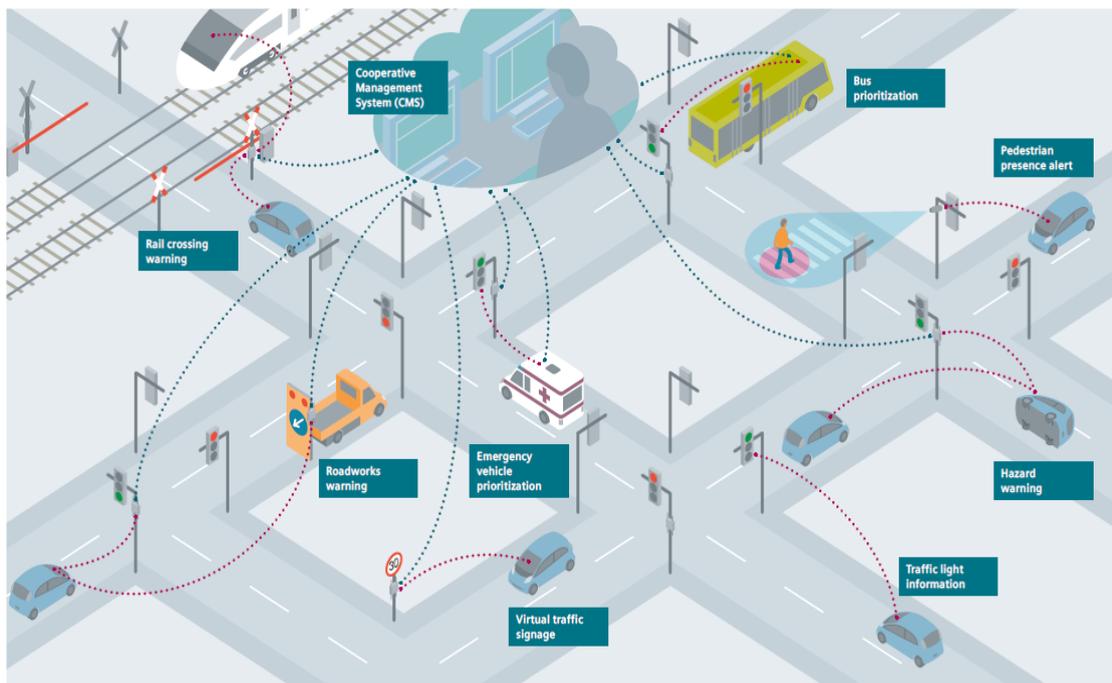


Figura 8.1. Representación de un sistema de gestión del tráfico basado en V2X.

Los mensajes transmitidos comunes a todos los vehículos contienen la posición GPS, la velocidad y la aceleración, además de información de control del coche como puede ser el estado de la transmisión mecánica, de los frenos, la posición del volante y un historial de la ruta recorrida por el vehículo, así como un posible destino.

En el futuro, nuestro vehículo y la mayoría de los vehículos que circulan por la carretera utilizarán tecnología de radio y GPS para conocer en un ángulo de visión de 360 ° todos los vehículos en nuestra ruta que se encuentran próximos al nuestro. El sistema transmite continuamente su posición, dirección y velocidad a los vehículos situados alrededor nuestro. También permite obtener información sobre las señales de tráfico, áreas de peaje, pasos a nivel, zonas de escuelas o de trabajo, etc.

Para funcionar adecuadamente y de forma segura, un sistema de este tipo debe garantizar la fidelidad de las comunicaciones entre vehículos. La fuente de cada mensaje debe ser de confianza y el contenido del mensaje tiene que estar protegido de cualquier interferencia exterior. El sistema así visto, ha de tener varias capas de seguridad y de

protección de la privacidad para asegurar que los automóviles pueden trabajar con mensajes enviados por otros vehículos.

Otro aspecto clave del funcionamiento de estos sistemas es intentar que las alarmas recibidas no distraigan al conductor. Sólo se debe recibir una alerta cuando se está produciendo o gestando una situación de peligro.

8.1.1. Breve descripción del sistema GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) se compone de tres segmentos: el segmento espacial que es el conjunto de satélites en órbita alrededor de la Tierra, el segmento de control que conforman las estaciones terrestres de seguimiento y control, y el segmento de usuario que son los receptores, también denominados sensores GPS, propiedad de los usuarios.

El Sistema GPS permite localizar la situación en la Tierra de un receptor de usuario con precisión. Para determinar su posición, el receptor localiza automáticamente un mínimo cuatro satélites de la red, de los que recibe información con la identificación y la trama de sincronismo de reloj de cada uno de ellos.

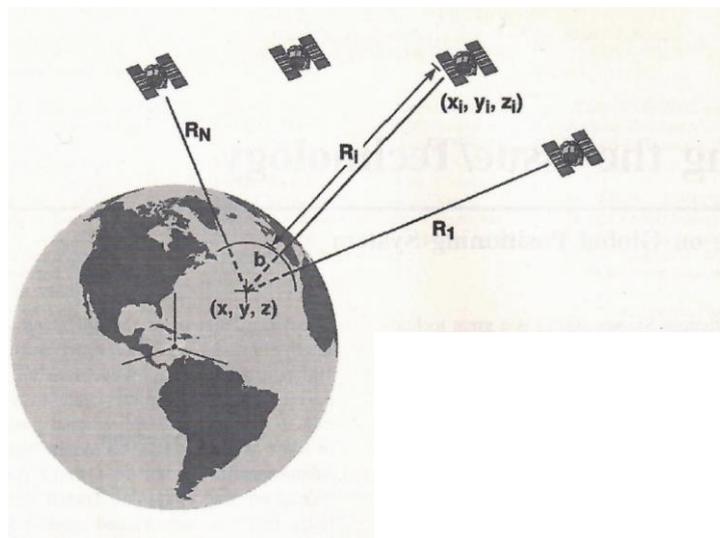


Figura 8.2. Principio de la navegación GPS.

Cada satélite de la constelación GPS contiene múltiples relojes atómicos que contribuyen con datos horarios muy precisos a las señales del GPS. Los receptores del GPS descodifican esas señales y sincronizan eficazmente cada receptor con los relojes atómicos con el objeto de medir el tiempo que emplea una señal en ir desde el satélite al receptor. Afortunadamente, este requisito puede ser salvado utilizando simples osciladores de cuarzo en los receptores. La diferencia entre el tiempo en el receptor y el tiempo en el satélite en el momento de realizar la medida es igual para todos los satélites que intervienen en el proceso. Las distancias obtenidas son todas mayores o todas menores que las reales en un valor común, y por ello se denominan pseudodistancias.

$\{ R_i \}$: Pseudodistancias (medidas)

$\{(x_i, y_i, z_i)\}$: Posiciones conocidas de los satélites

Así, la diferencia entre el instante de tiempo que el satélite toma como inicial y el instante de tiempo que el receptor considera el inicio de la medida, será la cuarta incógnita del sistema de ecuaciones, además de las tres coordenadas espaciales del receptor.

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - b, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

Si $N \geq 4$, se pueden obtener las coordenadas del usuario (x,y,z) y la diferencia de tiempos de medida b.

La red GPS tiene actualmente 31 satélites en servicio.

8.2. Internet de los vehículos (IoV)

Con el desarrollo de las tecnologías de comunicaciones, una gran cantidad de dispositivos acceden a Internet (bien directa o indirectamente), dando lugar a lo que se ha dado en llamar Internet de las Cosas (IoT). Las Cosas o dispositivos que conforman IoT, se encuentran conectadas e intercambiando información entre ellas por medio de las comunicaciones máquina-máquina (M2M) o las comunicaciones hombre-máquina (MMI). Este Internet de las Cosas conectadas, mejora la comprensión y la respuesta a todo lo que sucede a nuestro alrededor. También, aumenta la calidad de los servicios y la eficacia en el aviso a los servicios de emergencia. Por ejemplo, en una fábrica, los sensores de temperatura de las máquinas cuyo funcionamiento es crítico dentro de los procesos de fabricación, pueden evitar que se paren las cadenas de montaje por una avería grave. Lo harán avisando con antelación sobre la posibilidad de que alguna de las máquinas pueda alcanzar una temperatura de trabajo poco aconsejable. En las explotaciones de gas y petróleo, los sensores alertan de cambios en la presión de los conductos de transporte pudiendo parar las bombas de forma automática y evitar un posible desastre. Se supone que este año, 50.000 millones de cosas estarán conectadas a Internet. Por tanto, a medida que IoT va aumentando su despliegue, se hace necesario adoptar nuevos requisitos de red: movilidad de los dispositivos, conocimiento de su ubicación y baja latencia.

Las redes de comunicaciones para automóviles hacen posible la prestación de servicios y la utilización de múltiples aplicaciones a bordo del coche. Las redes de comunicaciones **ad hoc** para vehículos (VANET) funcionan normalmente enfocadas a la seguridad en la circulación y basadas en las comunicaciones entre vehículos y entre vehículo y equipo de cobertura lateral (RSU). A partir de las redes VANET, nacen en los Estados Unidos y en

Europa distintas iniciativas: Dedicated Short Range Communications (DSRC) en USA y Car to Car Communications Consortium (C2C-CC) en Europa. Con el tiempo, las redes VANET han ido evolucionando hacia el Internet de los Vehículos (IoV). En IoV, cada vehículo se considera un objeto inteligente, equipado con plataformas de detección, capacidad de computación, unidades de control, dispositivos de almacenamiento y puede estar conectado por medio de las comunicaciones V2X a cualquier otro vehículo, a una RSU, a la red, etc.

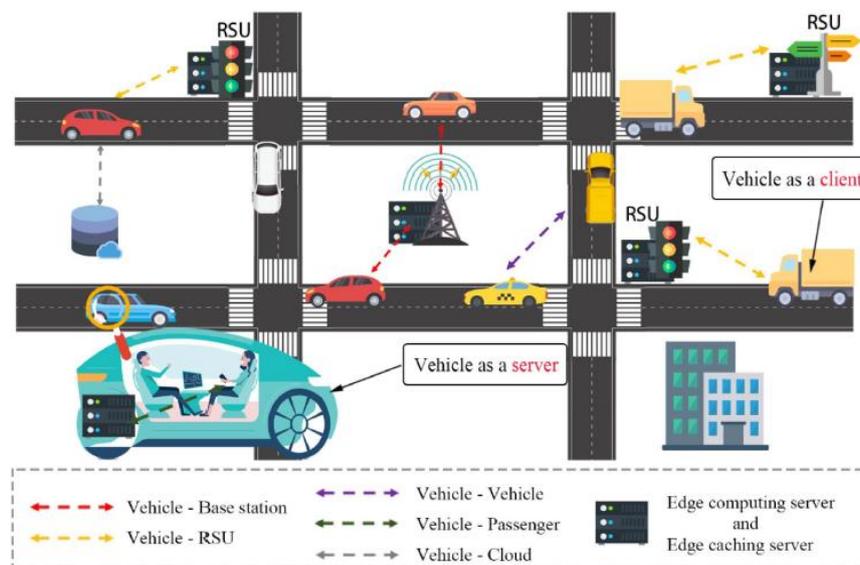


Figura 8.3. IoV basado en un Sistema de Información Edge (EIS).

Las tecnologías de IoV nacen de la necesidad de mejorar la seguridad en la circulación, mitigar la congestión del tráfico y reducir el consumo de combustible y la contaminación. Cada vehículo puede ser un terminal de información o un servidor edge para dispositivos IoT en la carretera. Aunque IoV pondrá en circulación un elevado número de aplicaciones, su arquitectura heterogénea, la complejidad de sus recursos, y los servicios diferentes que va a prestar, necesitan de nuevos diseños, que van desde las nuevas tecnologías radio a nuevas arquitecturas y protocolos. IoV es diferente del Internet convencional y de las redes IoT. Cada vehículo, ya sea de conducción automática o asistida, va a generar un flujo de información unas mil veces mayor que el de una persona. La densidad de vehículos puede cambiar de forma drástica en el tiempo y en el espacio: horas punta frente a horas valle de tráfico y calles principales frente a otras mucho menos concurridas.

Para dar soporte tecnológico a IoV han ido apareciendo y se van desarrollando un amplio abanico de tecnologías de comunicaciones vía radio: DSRC, Wifi, 4G/LTE, 5G, VLC, etc. Se necesita una nueva arquitectura que integre el acceso de las diferentes tecnologías y facilite la interoperación sobre las distintas redes de comunicaciones vía radio existentes. En estos momentos en que las redes son cada vez más dinámicas, complejas y heterogéneas, sería deseable que se utilizaran técnicas de Inteligencia Artificial y de

computación distribuida para conseguir los requisitos de muy baja latencia, alta fiabilidad, amplias áreas de cobertura, alta capacidad de acceso, etc.

Uno de los sistemas en desarrollo es el denominado EIS (Edge Information System), que actúa como una plataforma intermedia entre los procesadores a bordo del vehículo y el centro de datos remoto de la nube.

Los servidores edge están desplegados en las estaciones base o en las RSU y tienen unidades de almacenamiento de datos como SSD's y unidades de procesamiento de datos como GPU's y TPU's. Están conectados a la red troncal mediante enlaces de gran capacidad y pueden entrar en comunicación con vehículos dentro de su área de cobertura por medio de las comunicaciones V2I. Los situados en estaciones base tienen un área de cobertura más grande que los instalados en RSU's y por tanto son más idóneos para la gestión de la movilidad. Por otra parte, los servidores situados en las RSU's tienen menores tiempos de latencia. Ambos tipos de servidores tienen conocimiento del entorno en el que están ubicados y pueden almacenar y procesar datos de los vehículos que están circulando en sus proximidades: actualizar mapas HD, monitorizar el tráfico de los alrededores, difundir información sobre el estado de las carreteras, etc.

Los coches estarán equipados con diferentes sensores, módulos de comunicaciones y unidades de almacenamiento y procesado de datos. El equipo de procesado a bordo será de alto rendimiento, mínimo consumo de energía y una disipación térmica baja con un coste aceptable. Las comunicaciones con otros vehículos se harán por medio de sistemas V2V y las comunicaciones con las RSU's con V2I. Normalmente las tasas de transmisión de los sistemas V2V son menores que las correspondientes a los V2I.

El módulo de comunicaciones es una parte esencial del sistema EIS. Hay dos tipos de estándares de comunicaciones para IoV: las familias de protocolos WLAN y de comunicaciones celulares. La primera es conocida con las siglas DSRC y viene siendo objeto de estudio e investigación en la última década. Mas tarde, con el desarrollo rápido de las comunicaciones móviles, V2X ha sido visto como un escenario indispensable en las redes celulares, que se ha dado en llamar C-V2X. Las V2X celulares se están desarrollando en tres fases: la 1ª fase emplea LTE para su implementación. La 2ª y 3ª fases utilizaran la 5G NR con el objeto de poder usar aplicaciones más avanzadas a bordo de los automóviles.

Los vehículos según la función que desempeñen en la red podrán trabajar como clientes o como servidores. Si actúan como clientes, pueden acceder a los recursos de adquisición y procesado de datos de las RSU o las BTS. También, pueden funcionar como proveedores de servicios para los ocupantes del automóvil o para otros vehículos que pueden mejorar algunas de sus aplicaciones.

Hoy en día, los dispositivos móviles han llegado a ser una parte necesaria de la actividad humana en todo el mundo. No obstante, la potencia de computación de cada dispositivo móvil no es todavía suficiente para satisfacer el alto nivel necesario para las aplicaciones. La computación cloud es una de las soluciones. La computación cloud juega el papel de

un servidor remoto para distribuir el número masivo de servicios bajo demanda y provee recursos flexibles de tecnología de la información para la demanda de diferentes aplicaciones.

Con la ayuda de la computación Cloud la mayoría de las aplicaciones de procesado se efectúan en la nube y el resultado se envía de nuevo al dispositivo móvil. Este procedimiento se denomina offloading y ahorra potencia de procesado en los terminales móviles. El Offloading y el almacenamiento en la nube han eliminado los inconvenientes del almacenamiento y la potencia de procesado limitados de los terminales móviles. Sin embargo, la utilización de la nube para el offloading introduce sobrecarga en las comunicaciones, incrementando el coste y el retardo introducido por la red WAN. En definitiva, la calidad del servicio se ve afectada. Para resolver este problema, se introduce el concepto de computación Edge, también llamada computación Fog, que constituye una posible solución para loV por ampliación del modelo Cloud Computing fuera de los límites de Internet, mediante la provisión de recursos flexibles y servicios en los puntos de la red más alejados del núcleo.

Igual que la computación Cloud, la computación Edge integra todos los recursos tales como computación, ancho de banda y almacenamiento alojados en dispositivos distribuidos geográficamente con tecnologías Network Function Virtualization (NFV) y Software Defined Networks (SDN). En los sistemas de computación Edge, los conjuntos de recursos distribuidos geográficamente en los límites de la red, que consisten en puntos de acceso, routers, switches, estaciones base y equipos de usuario (dispositivos pobres en recursos) o Cloudlet e IOx (máquinas ricas en recursos) son denominados nodos Edge. Pero uno de los mayores retos que plantean los sistemas de computación Edge, especialmente aquellos que pueden verse afectados por el tiempo de respuesta, son la situación y el tamaño de los nodos Edge.

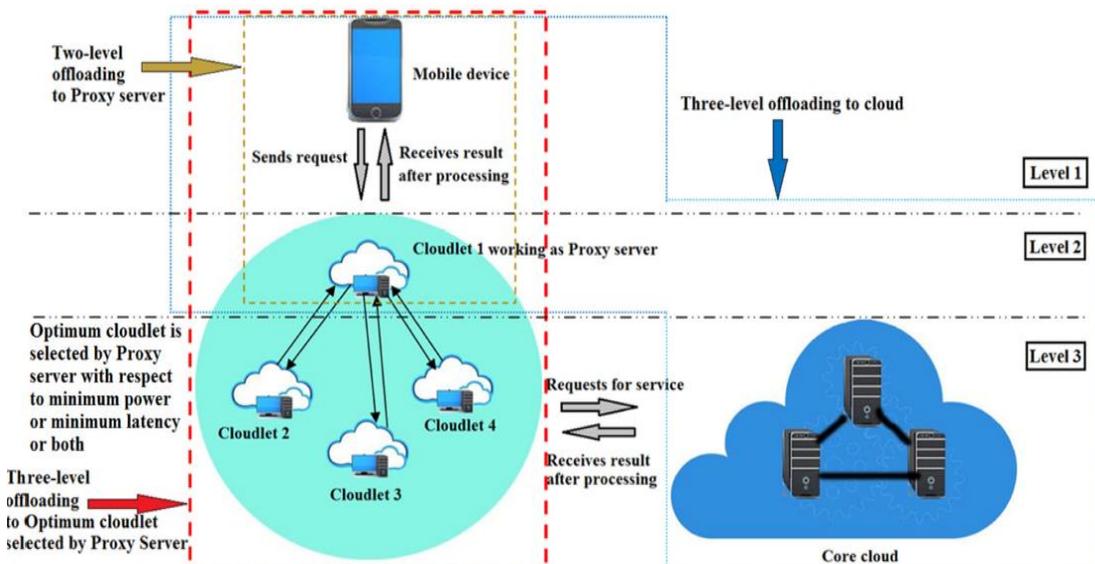


Figura 8.4. Estructura de un nodo Edge con Cloudlets.

Una cloudlet es un ordenador rico en recursos o una agrupación de ordenadores (cluster) que contiene copia en memoria caché de datos disponibles en la nube. El offloading desde una cloudlet supone mayor ancho de banda, latencia más baja y un coste inferior para el acceso a la red. Cuando un dispositivo móvil tiene que llevar a cabo un offloading puede hacerlo desde la cloudlet más cercana y ahorrar coste, retardo, etc.

Los dispositivos móviles como ordenadores portátiles, tablets y teléfonos móviles se conectan a la cloudlet más próxima y esta a su vez está conectada a la nube como se muestra en la figura anterior.

8.3. Las comunicaciones V2X y las redes de sensores a bordo

Las comunicaciones V2X están ligadas a las redes de sensores a bordo de los nuevos vehículos automóviles. La figura siguiente compara la situación de un sistema convencional de eliminación del choque entre vehículos y un sistema de seguridad basado en V2V.



Figura 8.5. Sistema de seguridad basado en GPS y V2X (i) y sistema de seguridad convencional (d).

Suponiendo que todos los vehículos están equipados con V2V, el coche naranja recibe mensajes de otros vehículos en un área de 300 metros de radio y 360^o de visión. Esto permite a las aplicaciones de seguridad controlar todo lo que ocurre alrededor del coche para evitar accidentes. El sistema convencional está dotado de un radar frontal de largo alcance con cámara, así como dos equipos radar laterales de corto alcance en las esquinas traseras del automóvil para detección de puntos ciegos.

El campo de visión de los sensores delanteros se ha sombreado en azul y el área sombreada de blanco representa el campo de visión de la cámara. Las zonas azules traseras representan los radares de corto alcance. Como se observa en las figuras, el radar frontal puede ser obstaculizado por el primer vehículo situado en su carril

inmediatamente delante, y entonces es incapaz de detectar otros vehículos en el mismo carril. De la misma manera, la cámara es obstaculizada por el camión situado a la derecha en la calzada de circulación en sentido opuesto. Con los cuatro sensores mostrados, el sistema convencional está limitado para la detección y monitorización fiable de sólo dos de los vehículos mostrados, el situado justo delante y el situado en la zona ciega de la parte trasera izquierda del vehículo naranja. El sistema V2V puede recibir avisos de riesgo de cualquier dirección utilizando un sensor GPS y comunicaciones DSRC.

Otros casos de utilización de los sistemas V2X se describen en las figuras que se muestran a continuación:

a) Temporización optimizada de las señales de tráfico.



Figura 8.6. Representación de la dependencia de las indicaciones de las señales según las características del tráfico.

Recoge datos como tipo de vehículo, situación, velocidad y emisiones de CO y CO2 de los vehículos en la zona para optimizar la temporización de los semáforos que regulan el tráfico.

b) Aviso de aplicación brusca del freno.

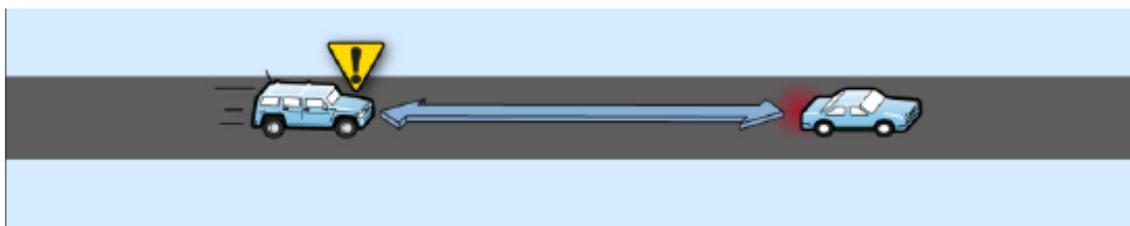


Figura 8.7. Aviso de disminución brusca de velocidad del coche que circula delante.

Un vehículo que circula a gran velocidad delante de otro y de forma repentina reduce la marcha. El conductor es avisado para evitar una situación de peligro originada por los coches que circulan delante de él.



Figura 8.8. Indicación del aviso en el salpicadero del vehículo.

El sistema pretende avisar al conductor sin distraer su atención de la carretera y emitir los avisos sólo cuando el riesgo potencial sea elevado.

c) Alarma de colisión por alcance.



Figura 8.9. Representación de una posible colisión por alcance.

De igual manera, el sistema indica al conductor que se aproxima a un vehículo que circula a baja velocidad o está parado y puede dar lugar a un accidente.

d) Alarma de colisión por alcance sin visibilidad.

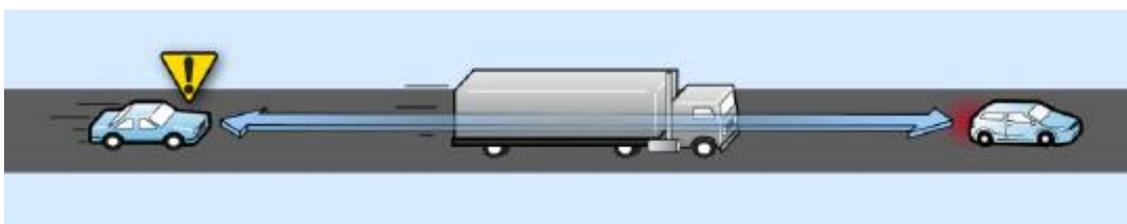


Figura 8.10. Aviso al conductor de peligro de colisión sin visibilidad.

Los sensores a bordo pueden advertir al conductor activando la alarma de frenado de emergencia. En este caso también puede ser de utilidad la denominada percepción

colectiva para darle información al conductor de lo que ocurre delante de un obstáculo que le impide la visión.

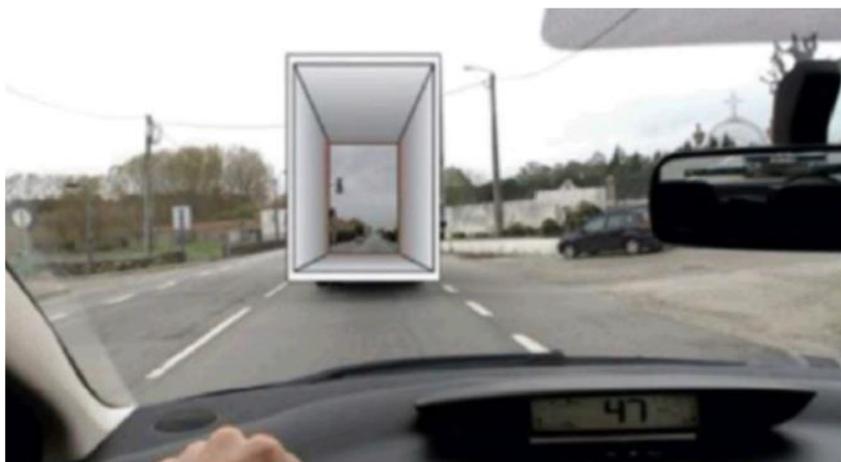


Figura 8.11. Ejemplo de visión cooperativa.

La percepción colectiva puede indicar al conductor que un peatón está cruzando la calzada a la altura de un semáforo existente por delante del camión o que puede haber un coche parado a pocos metros de distancia.

e) Alarma de punto ciego del retrovisor lateral.

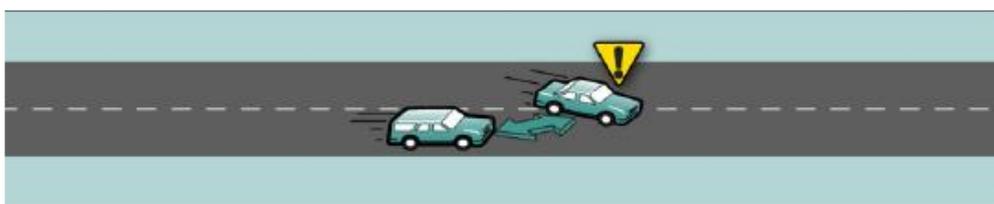


Figura 8.12. Alerta al conductor de un posible adelantamiento.

En esta situación, el sistema ayudaría a corregir las limitaciones de visibilidad en un adelantamiento causadas por el conocido como punto ciego del retrovisor lateral.

f) Aviso para evitar la maniobra de adelantamiento.

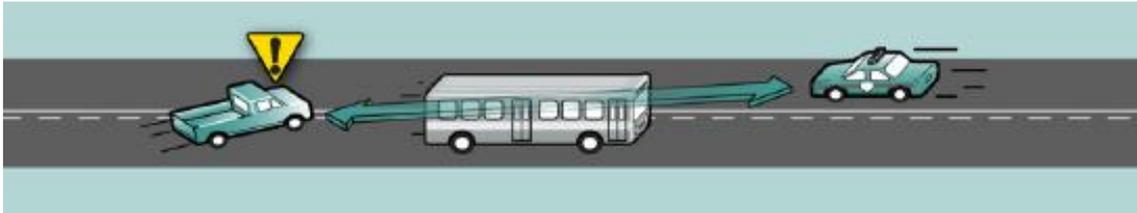


Figura 8.13. Alerta de la presencia de un vehículo que circula en sentido contrario.

El conductor recibe indicación de que un coche circula en sentido contrario al intentar o iniciar una maniobra de adelantamiento.

g) Aviso de cruce sin visibilidad.

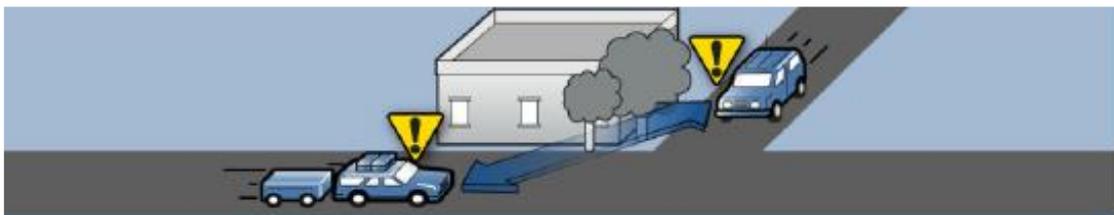


Figura 8.14. Indicación al conductor de la proximidad de un cruce sin visibilidad.

El conductor recibe indicación de el paso a gran velocidad por un cruce sin visibilidad, es otro ejemplo de funcionamiento de las V2X. Se informa de la falta de seguridad en la intersección. Cuando bloquea la visión del conductor sobre un vehículo que circula en sentido contrario o que viene del cruce.

h) Priorización del transporte público y de vehículos de emergencia.

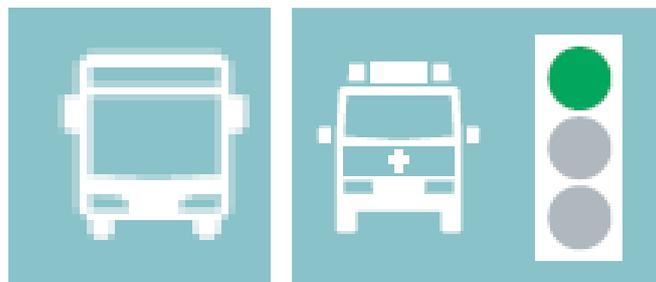


Figura 8.15. El sistema da prioridad a las urgencias y a los servicios públicos.

La priorización del transporte público lo hace más atractivo y conveniente para los usuarios, al aumentar la puntualidad y la eficiencia. También, permite la llegada a destino más rápida de los vehículos de emergencia evitando accidentes de otros coches que circulen en ese momento en las proximidades.

i) Aviso de paso a nivel.

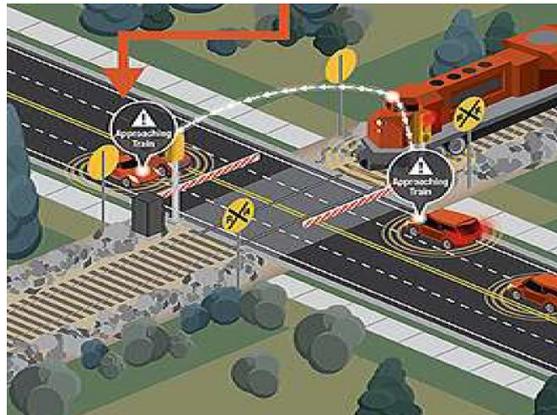


Figura 8.16. Anuncia al conductor que el paso a nivel está protegido.

El conductor recibe indicación de un posible riesgo de colisión y del tiempo estimado para que el tren libere el paso a nivel.

j) Aviso de presencia de peatones y ciclistas.



Figura 8.17. El conductor es advertido de la presencia de peatones o ciclistas.

Se incrementa la seguridad para los usuarios más vulnerables de la carretera con el objeto de evitar un posible arrollamiento.

k) Información a los usuarios de los transportes públicos.

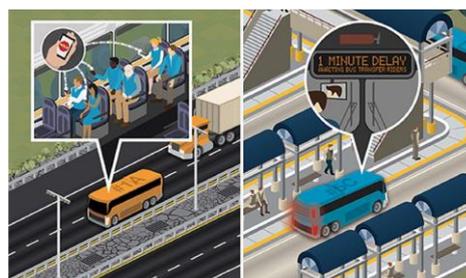


Figura 8.18. Información en tiempo real a los viajeros de un autobús del tiempo entre paradas y los enlaces con otros sistemas de transporte.

El sistema proporciona a los usuarios del transporte público información sobre el tiempo estimado en realizar el trayecto, la posible utilización de otro modo de transporte y los tiempos intermedios como paradas, retrasos, etc,

l) Aviso de peligro.



Figura 8.19. Advierte al conductor de cualquier peligro en su ruta.

Suministra información continua y notificación puntual de las interrupciones del tráfico.

m) Aviso de paso de semáforo en rojo.



Figura 8.20. Informa de la proximidad de un vehículo que ha cometido una infracción.

Se trata de evitar un accidente por un error humano que da lugar a una infracción del código de circulación.

n) Aviso de elemento de la infraestructura fuera de servicio.

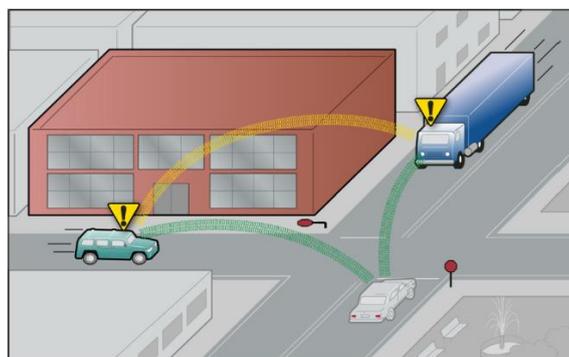


Figura 8.21. Alerta de la falta de seguridad en la circulación en algún punto de la ruta.

En ocasiones, puede ocurrir que algún elemento de la infraestructura para la regulación del tráfico esté fuera de servicio. Es el caso de la señal de “stop” que aparece en el suelo

en la figura. La inutilización de la señal provoca que dos vehículos que se acercan al cruce puedan colisionar. Un tercer vehículo actuaría enviando datos a los otros dos que se encuentran en riesgo de colisión.

o) Avisos sobre la situación meteorológica o el firme de la calzada.



Figura 8.22. Informa sobre problemas para circular en la zona: niebla, defectos en el firme de la calzada, riesgo de nevadas, etc.

Avisa al conductor cuando las condiciones de circulación son peligrosas, ya sea por razones climatológicas o por defectos en el firme de la calzada.

8.4. Los nuevos estándares de comunicaciones V2X

El principal objetivo de los sistemas de comunicaciones entre vehículos es el aumento de la seguridad en la circulación vial y la reducción del coste generado por los accidentes de tráfico. Las redes de comunicaciones entre vehículos (Vehicular Communications Network-VCN) que ahora se denominan Redes vehiculares ad hoc (Vehicular Ad hoc Network - VANET) son la base para las primeras versiones de los Sistemas Inteligentes de Transporte (Intelligent Transport System - ITS).

Un sensor GPS permite obtener las coordenadas del vehículo y su posición con respecto a los demás automóviles de su entorno. Se puede realizar así un pequeño historial de la ruta que sigue e incluso una lista de posibles destinos.

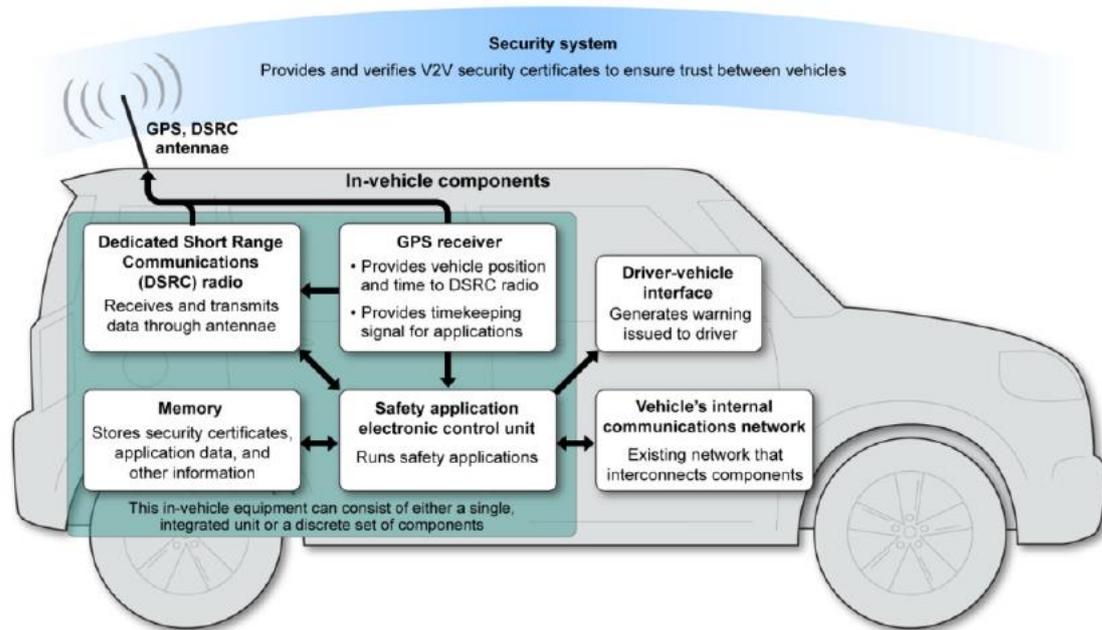


Figura 8.23. Diagrama de bloques del sistema V2X instalado a bordo de un automóvil.

Actualmente, las comunicaciones V2X están basadas en uno de los dos estándares de comunicaciones a corta distancia entre vehículos que se han publicado hasta la fecha:

- ITS-G5 / IEEE 802.11 derivada de las normas IEEE de redes Wi-Fi.
- Las comunicaciones V2X para vehículos automóviles basadas en comunicaciones móviles celulares LTE, conocidas como LTE-V2X, desarrolladas por el 3GPP.

a) El estándar ITS-G5 / IEEE 802.11.

El primer estándar de comunicaciones V2X, fue la norma IEEE 802.11p que se editó en 2010. Se trataba de una corrección de otra norma, la IEEE 802.11a sobre redes de área local vía radio (WLAN). La norma 11p detalla un conjunto de protocolos necesarios en la comunicación directa a corta distancia (DSRC) para el intercambio de información sin necesidad de utilizar un equipo de servicio básico (BSS), empleado en la norma tradicional 802.11.

Las comunicaciones entre vehículos V2X son de tipo Ad-hoc y duplex, con un radio de cobertura de hasta 2 km. Utilizan la banda ITS centrada en los 5,9 GHz con tasas de transmisión que van desde 6 hasta 27 Mbps y latencias menores de 50 ms.

Las unidades de radio a bordo de los vehículos (On Board Unit - OBU) facilitan la conexión con otros vehículos (V2V), con equipos próximos o remotos de la infraestructura vial (V2I) o con dispositivos utilizados por peatones y ciclistas (V2P y V2R). También, es posible la conexión a Internet (V2N).

La comunicación V2V establece un enlace directo entre vehículos sin dependencia de un soporte fijo de infraestructura y se utiliza fundamentalmente para la seguridad en la circulación y para algunas aplicaciones vía radio de ayuda a la conducción.

La comunicación V2I permite a un vehículo entrar en contacto con las unidades situadas a los lados de la carretera para acopio de información y datos. La infraestructura está compuesta fundamentalmente de equipos emplazados en el lateral de la calzada (Road Side Unit - RSU). Las RSU son capaces de proporcionar acceso a Internet (V2N) a aquellos vehículos equipados con un dispositivo a bordo (OBU). La comunicación V2R y V2P proporciona un enlace entre la unidad del vehículo OBU y el dispositivo utilizado por un peatón o un ciclista.

Desde sus inicios el estándar 802.11 ha evolucionado con otras muchas tecnologías como MIMO o los códigos low density parity check LDPC. Para completar las futuras necesidades de las comunicaciones V2X, IEEE 802.11 ha creado un grupo de trabajo llamado próxima generación V2X (NGV), de cara a definir una nueva corrección basada en las tecnologías WLAN ya existentes y probadas. Entre las mejoras que incluirá el nuevo estándar pueden destacarse: Esquema de modulación de portadora OFDM, tasa más alta/baja de transmisión 256 QAM / BPSK dependiendo del estado del canal y de la proximidad o lejanía del usuario, ancho de banda de 10 / 20 MHz por usuario y velocidad máxima del vehículo 250 km/h.

b) El estándar C-V2X o LTE - V.

El estándar LTE-V incluye dos interfaces radio. La interfaz radio celular, conocida con las siglas Uu, actúa como soporte de las comunicaciones V2I, mientras que la interfaz PC5 soporta las comunicaciones V2V basadas en el enlace directo LTE. El enlace de comunicaciones entre dispositivos (D2D) aparece por primera vez en la versión 12 y contempla dos modos de operación: modo 1 y modo 2. Ambos modos tenían como objetivo prolongar la vida útil de las baterías de los dispositivos móviles a costa de aumentar el tiempo de latencia. Por esta razón no se utilizan en comunicaciones entre vehículos. La versión 14 introduce dos nuevos modos de comunicaciones, modo 3 y modo 4, específicamente pensados para las comunicaciones entre vehículos. En el modo 3, la red celular selecciona y gestiona los recursos radio que van a emplear los vehículos en su comunicación directa. En el modo 4, son los vehículos los que seleccionan de forma autónoma los recursos radio para la comunicación directa V2V. Como contrapartida, los vehículos que funcionen en modo 4 pueden operar fuera de la cobertura de la red celular. Hasta la fecha, sólo se han redactado especificaciones para el modo 4.

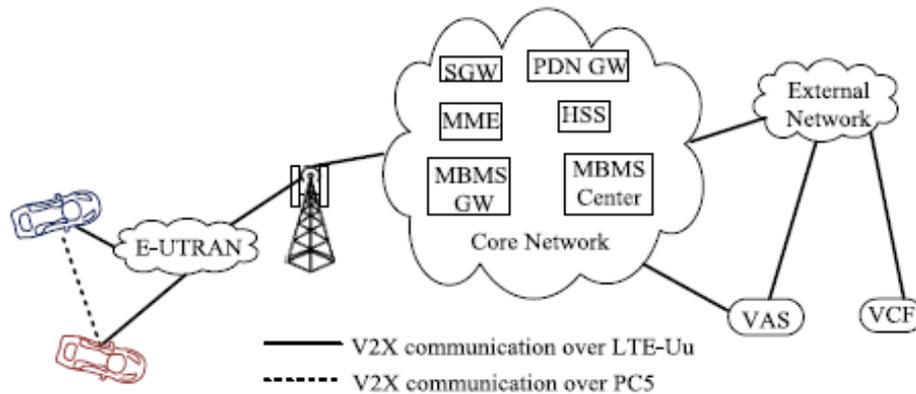


Figura 8.24. Representación de la infraestructura del sistema C-V2X.

La versión 14 utiliza SC-FDMA con canales de 10 y 20 MHz. La versión 15 incluye Agregación de Portadora para el modo 4, modulaciones de mayor orden (p.e. 64-QAM), latencias menores de 100 ms y para determinadas funciones por debajo de 20 ms, recursos radio distribuidos entre usuarios del modo 3 y del modo 4. La velocidad máxima del vehículo es de 500 km/h.

Las transmisiones V2X sobre la interfaz Uu son gestionadas por la red LTE reduciendo colisiones e interferencias mutuas. Este hecho origina parámetros de QoS como la tasa de bit o retardo, garantizados para diferentes aplicaciones y es la mayor ventaja sobre el acceso CSMA/CA del V2X basado en 802.11.

3GPP ha comenzado recientemente la versión 5G New Radio V2X para evaluar una mejora de los servicios V2X. Aparece en la versión 15 del estándar y se completan en la versión 16 de junio de 2019. 5G New Radio funciona con OFDM y SC-FDMA para el enlace ascendente. Se utilizan dos rangos de frecuencia: El primero 450 MHz – 6 GHz y el segundo 24,25 GHz - 52,6 GHz. El máximo ancho de banda para un solo usuario es de 100 MHz en el primer rango y 400 MHz en el segundo.

8.5. Estudio comparativo de ambos sistemas

La puesta en servicio y la idoneidad de los estándares 802.11 y LTE-V en distintos escenarios de comunicaciones, se ha intentado evaluar mediante una gran cantidad de estudios y pruebas de campo. La mayoría de las investigaciones han concluido que ambas tecnologías son capaces de proporcionar servicios básicos de comunicaciones como pueden ser los mensajes de cooperación entre conductores. Sin embargo, ninguna de las dos tecnologías consigue alcanzar los requisitos de fiabilidad y latencia estipulados para las comunicaciones críticas de seguridad y la conducción autónoma. Por tanto, parece

lógico que la solución adoptada por las diferentes administraciones no tenga que ser la misma en todos los casos.

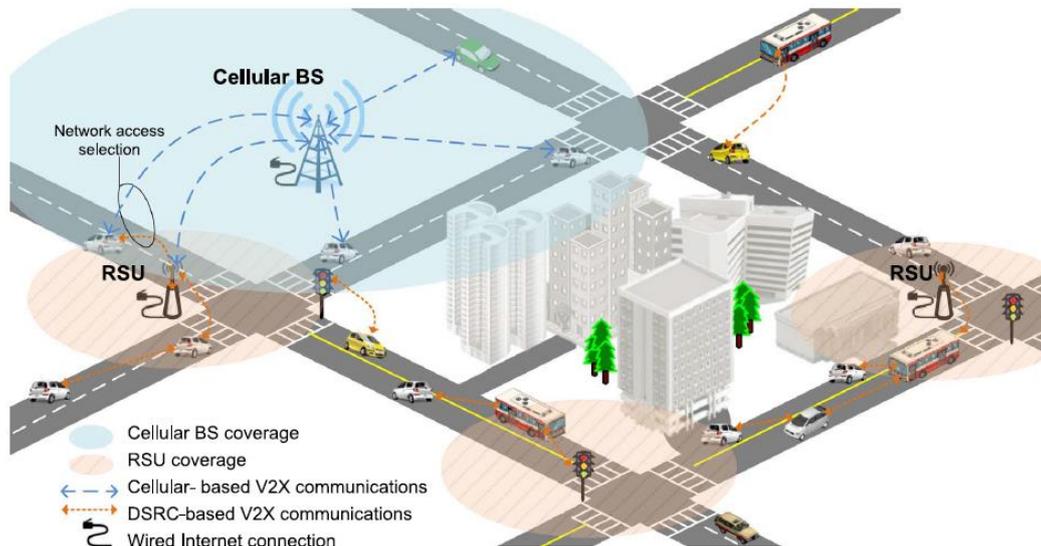


Figura 8.25. Escenario de una infraestructura de conjunta V2X y C-V2X.

Por otra parte, resulta obvio que una sola tecnología no podrá dar soporte a una gran variedad de aplicaciones para un elevado número de vehículos. Así pues, es muy probable que ambos estándares puedan coexistir tal y como se muestra de forma esquemática en la figura anterior.

Para un eficiente funcionamiento conjunto de ambas redes, es necesario resolver algunas cuestiones técnicas, fundamentalmente originadas por la topología de las redes V2X, de carácter muy dinámico, que junto con el despliegue de celdas de pequeño tamaño en la próxima generación de V2X celular, requiere técnicas de traspaso entre equipos de distintos sistemas y mecanismos de selección de red. También, habrán de tenerse en cuenta los costes de implantación de red, la puesta en servicio en entornos reales y la compatibilidad entre los sistemas V2X existentes.

La tecnología IEEE 802.11 ya ha sido ampliamente probada en un gran número de situaciones desde hace muchos años. En cambio, la LTE-V o C-V2X es mucho más reciente y las primeras pruebas se realizaron en 2018.

El estándar 802.11 es mejor en términos de latencia de transmisión. Sin embargo, LTE-V tiene mejor funcionamiento en lo relativo a tasa de transmisión y fiabilidad. La principal ventaja de IEEE 802.11 frente a LTE - V es que viene funcionando desde hace muchos años, tiene una fiabilidad aceptable y una tecnología lista para ser utilizada en las comunicaciones entre vehículos.

Tras el éxito del wifi, IEEE 802.11 V2X ha acaparado la atención de la industria con su adaptación del sistema a las redes para vehículos. Actualmente, el grupo de trabajo IEEE

802.11 está tratando de migrar los diferentes protocolos para enriquecer el intercambio de información entre vehículos e infraestructura.

Sin embargo, las redes LTE fueron diseñadas y optimizadas para servicios móviles de banda ancha (Mobile Broad Band - MBB), que no es óptimo para transmitir una gran cantidad de pequeños paquetes, como son los casos de utilización para V2X, y se generan distintos problemas como saturación del canal y fallos en el control del tráfico de la red que rápidamente se convertiría en ineficiente para cargas útiles muy pequeñas. Considerando la carga pesada que supone el tráfico V2X en áreas densas o durante las horas pico de demanda, podrían ocurrir latencias serias sin un esquema de control de la congestión. Sin embargo, LTE D2D sólo puede cursar servicios públicos de seguridad para usuarios de poca movilidad, y no puede satisfacer los requisitos de alta fiabilidad y baja latencia de las comunicaciones V2V en entornos de vehículos circulando a alta velocidad. La necesidad de un *handover* rápido y frecuente, junto con el cambio continuo de la topología de la red, hacen muy restrictiva la garantía V2X de QoS que se convierte en un reto enorme para el sistema LTE. Por tanto, hubo que hacer modificaciones para soportar comunicaciones V2X.

Aun así, las redes LTE son redes móviles y seguras caracterizadas por una gran cobertura y capacidad. Presentan un potencial muy elevado para soportar un tráfico enorme procedente de aplicaciones de las comunicaciones entre vehículos y los correspondientes servicios.

Una de las principales ventajas de utilizar la tecnología celular es el amplio radio de cobertura de las estaciones base, que suple las desconexiones en la red V2X para vehículos y minimiza el número de *handovers* cuando un vehículo atraviesa un determinado tramo de carretera. Sin embargo, las próximas generaciones de tecnología celular van a adoptar radios de cobertura más pequeños, en un intento de incrementar la capacidad de la red a costa de una peor gestión de los *handover*. Así pues, se verá un despliegue de red ultradensa de pequeñas celdas en la próxima generación de V2X celular, preservando la compatibilidad con las generaciones anteriores.

En resumen, LTE V2X proporciona una ruta de evolución desde LTE a 5G sobre los estándares 3GPP y pueden coexistir técnicamente con canales adyacentes de acceso radio basados en los estándares IEEE 802.11 p. Así, la tecnología LTE V2X es un competidor muy fuerte de la IEEE 802.11p, que integra la comunicación celular LTE 4G y la Tecnología de Comunicaciones (CT) *device to device* D2D, y evolucionará hacia 5G NR V2X en el futuro.

Otra cuestión que ha de tenerse en cuenta es la red a la que pertenecen los usuarios. Un conductor de un vehículo puede preferir mantener su conexión de red actual que cambiar a otro tipo de red sólo por un pequeño incremento en la calidad del servicio. Por ejemplo, cuando una estación base cubre un segmento de autopista y las RSU's están dispersas con radios de cobertura que no se solapan a lo largo de la autopista, un conductor de vehículo puede preferir seguir enganchado a la estación base celular en lugar de pasar a las RSU que le darían una mejor conexión a Internet.

8.6. Legislación y normativa aplicable

Las comunicaciones V2X utilizan actualmente la banda ITS centrada en los 5,9 GHz. Para la futura generación celular V2X del 3GPP, la 5G NR V2X, hay previstos dos rangos de frecuencia de utilización: 450 MHz – 6 GHz y 24,25 GHz - 52,6 GHz. Las longitudes de onda correspondientes estas bandas de frecuencia y la distancia a la que se puede considerar campo lejano se reflejan en la tabla siguiente:

Frecuencia	Longitud de onda λ (cm)	Campo lejano 3λ (cm)
400 MHz	75	225
2 GHz	15	45
6 GHz	5	15
25 GHz	1,25	3,75
50 GHz	0,6	1,8

Dado que los cálculos se realizan considerando que se trata de ondas planas y se emplean antenas de pequeño tamaño, la distancia a la que se puede considerar campo lejano se ha fijado en 3 longitudes de onda aproximadamente.

En España, existen dos Reales Decretos sobre exposición a campos electromagnéticos y restricciones a las emisiones radioeléctricas.

- REAL DECRETO 299/2016, de 22 de julio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos.
- REAL DECRETO 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas.

En el ámbito internacional, la norma más ampliamente utilizada es la IEEE C95.1. cuya última edición es del año 2019.

- IEEE Standard C95.1 – 2019 for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz.

El R.D. 299/2016 fija los siguientes Niveles de Acción de Densidad de Potencia, en las bandas de frecuencia ITS y 5G NR, que se muestran a continuación:

<i>NA Entorno controlado (Trabajadores)</i>		
Banda ITS	$2 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$	50 W/m^2

<i>NA Entorno controlado (Trabajadores)</i>		
Banda 5G NR	$0,4 \text{ GHz} \leq f \leq 2 \text{ GHz}$	10 W/m ²
	$2 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$	50 W/m ²

El Nivel de Acción (NA), se establece de tal forma que garantice, mediante una evaluación simplificada, el respeto de los valores límite de exposición o de los valores a partir de los cuales se deben adoptar las medidas de protección o de prevención pertinentes precisadas en el artículo 4 del R.D.

El R. D. 1066/2001, establece los Niveles de Referencia de Densidad de Potencia que se indican a continuación:

<i>NR Entorno no controlado (Público en general)</i>		
Banda ITS	$2 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$	10 W/m ²
<i>NR Entorno no controlado (Público en general)</i>		
Banda 5G NR	$400 \text{ MHz} \leq f \leq 2.000 \text{ MHz}$	2 – 10 W/m ² (f / 200)
	$2 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$	10 W/m ²

Los Niveles de Referencia (NR) de la exposición sirven para ser comparados con los valores de las magnitudes medidas. El respeto de todos los niveles de referencia asegurará el respeto de las restricciones básicas.

El estándar IEEE C95.1 – 2019 for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz, dispone los siguientes Límites de Referencia (LR) de Densidad de Potencia:

EXPOSICIÓN DE TODO EL CUERPO (Promediado durante 30 minutos)

<i>LR Entorno controlado (Trabajadores)</i>		
Banda ITS	$2 \text{ GHz} \leq f \leq 300\text{GHz}$	50 W/m ²

<i>LR Entorno no controlado (Público en general)</i>		
<i>Banda ITS</i>	$2 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$	10 W/m^2

<i>LR Entorno controlado (Trabajadores)</i>		
<i>Banda 5G NR</i>	$400 \text{ MHz} \leq f \leq 2.000 \text{ MHz}$	$10 - 50 \text{ W/m}^2 (f / 40)$
	$2 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$	50 W/m^2

<i>LR Entorno no controlado (Público en general)</i>		
<i>Banda 5G NR</i>	$400 \text{ MHz} \leq f \leq 2.000 \text{ MHz}$	$2 - 10 \text{ W/m}^2 (f / 200)$
	$2 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$	10 W/m^2

EXPOSICIÓN LOCAL (Promediado durante 30 minutos)

<i>LR Entorno controlado (Trabajadores)</i>		
<i>Banda ITS</i>	$2 \text{ GHz} \leq f \leq 6 \text{ GHz}$	200 W/m^2

<i>LR Entorno no controlado (Público en general)</i>		
<i>Banda ITS</i>	$2 \text{ GHz} \leq f \leq 6 \text{ GHz}$	40 W/m^2

<i>LR Entorno controlado (Trabajadores)</i>		
<i>Banda 5G NR</i>	$400 \text{ MHz} \leq f \leq 2.000 \text{ MHz}$	$95 - 200 \text{ W/m}^2 (5,93 \cdot f^{0.463})$
	$2 \text{ GHz} \leq f \leq 6 \text{ GHz}$	200 W/m^2
	$25 - 52 \text{ GHz}$	$485 - 550 \text{ W/m}^2 (274,8 \cdot f^{0.177})$

<i>LR Entorno no controlado (Público en general)</i>		
<i>Banda 5G NR</i>	$400 \text{ MHz} \leq f \leq 2.000 \text{ MHz}$	$20 - 40 \text{ W/m}^2 (1,19 \cdot f^{0.463})$
	$2 \text{ GHz} \leq f \leq 6 \text{ GHz}$	40 W/m^2
	$25 - 52 \text{ GHz}$	$100 - 110 \text{ W/m}^2 (55 \cdot f^{0.177})$

El Límite de Referencia (LR) es el máximo nivel de exposición relativo a la densidad de potencia.

La condición de exposición local consiste en que la mayor parte de la energía incidente afecta a una parte limitada del cuerpo, generalmente debido a que la fuente se encuentra muy cerca del mismo.

8.6.1. Especificaciones de potencia

La capa física de ambos sistemas V2X viene especificada por el estándar IEEE 802.11, en cuyo Apéndice D, Tabla D-3. Clasificación de potencia transmitida máxima para estaciones radio en la banda 5,85-5,925 GHz en los Estados Unidos, Apartado C, aparecen los siguientes valores:

Clasificación de la Estación por Potencia Transmitida	Máxima Potencia Transmitida de la Estación (mW)	PIRE Máximo permitido en dBm
C	100	33

La máxima potencia transmitida son 100 mW, sin embargo la potencia equivalente radiada de forma isotrópica (PIRE) máxima puede llegar a los 2 vatios. Lo que implica una ganancia máxima de antena de 20.

El estándar LTE-V2X también tiene estipulados los valores para los terminales de usuario que figuran en la tabla siguiente, siendo el valor máximo de potencia 400 mW (26dBm):

Power class 1 (dBm)	Power class 2 (dBm)	Power class 3 (dBm)
-	26	23

De acuerdo con estos valores, se calculan, en el apartado siguiente, las distancias a las que se cumplen los Niveles de Referencia, Niveles de Acción y Límites de Referencia reseñados en la reglamentación nacional e internacional.

8.6.2. Cálculo de distancias

La potencia PIRE es la potencia equivalente radiada de forma isótropa y esta relacionada con la potencia transmitida por la antena y su ganancia por la siguiente expresión:

$$PIRE = P_T \cdot G$$

La densidad de potencia radiada en la dirección de máxima radiación se obtiene dividiendo la potencia PIRE por el área de una esfera de radio r :

$$\frac{PIRE}{4\pi r^2} = \frac{P_T \cdot G}{4\pi r^2}$$

Esa densidad de potencia ha de ser igual al Nivel de Referencia, Límite de Referencia o Nivel de Acción, lo que se cumple a partir de un determinado valor de r :

$$\frac{PIRE}{4\pi r^2} = LR, NR \text{ ó } NA$$

Suponiendo una PIRE entre 100 mW y 2 W, como fija la normativa IEEE 802.11, se tiene:

PIRE 100 mW

NR, NA ó LR	2 W/m ²	10 W/m ²	40 W/m ²	50 W/m ²	200 W/m ²
Distancia cm	6,3 cm	2,83 cm	1,40 cm	1,25 cm	0,6 cm

PIRE 2 W

NR, NA ó LR	2 W/m ²	10 W/m ²	40 W/m ²	50 W/m ²	200 W /m ²
Distancia cm	28,2 cm	12,65 cm	6,30 cm	5,60 cm	2,80 cm

Seguramente, el caso más común será una antena con ganancia de 2, por lo que la PIRE en este supuesto tendría un valor de 200 mW.

PIRE 200 mW

NR, NA ó LR	2 W/m ²	10 W/m ²	40 W /m ²	50 W/m ²	200 W/m ²
Distancia cm	9 cm	5,66 cm	2,00 cm	1,78 cm	0,9 cm

PIRE 400 mW

NR, NA ó LR	2 W/m ²	10 W/m ²	40 W /m ²	50 W/m ²	200 W/m ²
Distancia cm	12,7 cm	8 cm	2,82 cm	2,5 cm	1,26 cm

PIRE 800 mW

NR, NA ó LR	2 W/m ²	10 W/m ²	40 W /m ²	50 W/m ²	200 W/m ²
Distancia cm	18 cm	11,32 cm	4,00 cm	3,79 cm	1,8 cm

Para potencias PIRE de 2 W la distancia calculada es del mismo orden de magnitud que la distancia de campo lejano. No obstante, parece lo más lógico guardar una distancia de 15 cm en todos los casos, dado el desconocimiento que tenemos del campo próximo a la antena.

Esta distancia de 15 cm, en las estaciones situadas al margen de la carretera (RSU y BTS) carece de importancia en principio. Sin embargo, en las unidades a bordo de los vehículos (OBU) parece que habrá de tenerse en cuenta.

Al situarnos dentro de un vehículo, sólo deberían considerarse los niveles fijados en la normativa para público en general (entornos no controlados). Para mantenimiento de instalaciones (entornos controlados), habrán de tenerse en cuenta el resto de los valores incluidos en la normativa.

8.7. Conclusiones

La aparición del denominado Internet de los Vehículos y del vehículo autónomo ha dado lugar al desarrollo de los nuevos sistemas de comunicaciones para los automóviles, conocidos por las siglas V2X y C-V2X, dependiendo del organismo regulador y también, de la forma de llevar a cabo el acceso a la red.

La aplicación de la reglamentación nacional e internacional a los niveles de potencia fijados por la norma IEEE 802.11 para las comunicaciones V2X, arroja las siguientes conclusiones:

1. Dado que las potencias utilizadas en las comunicaciones V2X son comparables a las que manejan los terminales de usuario 5G, puede decirse que se respetan en general las restricciones básicas y los valores límite de exposición dispuestos en la reglamentación tanto nacional como internacional.

2. Los valores de Niveles de Acción, Niveles de Referencia y Límites de Referencia para entornos controlados son muy altos y, en consecuencia, las distancias de la antena a las que se alcanzan los citados valores son realmente de pequeño valor, incluso por debajo de la distancia a la que se podría considerar campo lejano.
3. Dentro de la banda ITS, el caso más desfavorable es el Nivel de Referencia de 10 W/m^2 para entornos públicos no controlados. Con PIRE de 200 mW la distancia es de 5,6 cm y con PIRE de 2W la distancia es de 12,6 cm. Si bien el campo lejano empezaría en los 15 cm, habría que tomar en cuenta estos valores ya que tienen un orden de magnitud considerable respecto de la posición de un conductor o peatón.
4. Para la banda 5G NR, el caso más desfavorable es el de los 2 W/m^2 , también en entornos no controlados y tanto para exposición del cuerpo entero como exposición local. En este caso las distancias para PIRE de 200 mW es de 9 cm y para PIRE de 2W es de 28 cm. Al igual que en el caso anterior, son distancias que habrán de tenerse en consideración.

8.8. Bibliografía.

- [31] Zhang y Letaief. Mobile Edge Intelligence and Computing for the Internet of Vehicles. Proceedings of the IEEE. Febrero de 2020.
- [32] Shen, Fantacci y Chen. Internet of Vehicles. Proceedings of the IEEE. Febrero de 2020.
- [33] Zhou, Xu, Chen y Wang. Evolutionary V2X Technologies Toward the Internet of Vehicles: Challenges and Opportunities. Proceedings of the IEEE. Febrero de 2020.
- [34] US Department of Transportation. Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application. Agosto 2014.
- [35] Manal, Najima, Imane y Rachida. VANET protocols for more safety and fluidity in Intelligent Transportation Systems. 6th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS). IEEE 2018.
- [36] LTE-V for Sidelink 5G-V2X Vehicular Communications. IEEE 5. A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications. Rafael Molina Masegosa y Javier Gozalvez. IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY MAGAZINE. December 2017.
- [37] Roux, Sesia, Mannoni y Perraud. System Level Analysis for ITS G5 and LTE- V2X Performance Comparison. IEEE 16th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS). 2019.

- [38] Digitalizing the road. Sitraffic Vehicle2x. Siemens.com/traffic. 2020.
- [39] Anwar, Franchi y Fettweis. Physical Layer Evaluation of V2X Communications Technologies: 5G NR V2X, LTE – V2x, IEEE 802.11bd. and IEEE 802.11p. IEEE 2019
- [40] Gonzalez-Martín, Sepulcre, Molina-Masegosa y Gozalvez. Analytical Models of the performance of C-V2X Mode 4 Vehicular Communications. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.68, Nº2, February 2019.
- [41] Molina-Masegosa, Gozalvez y Sepulcre. Configuration of the C-V2X Mode 4 Sidelink PC5 Interface for Vehicular Communications. 14th International Conference on Mobile Ad – Hoc and Sensor Networks (MSN). 2018.
- [42] Abboud, Omar y Zhuang. Interworking of DSRC and Cellular Network Technologies for V2X Communications: A Survey. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 65, Nº12. December 2016.
- [43] https://www.its.dot.gov/cv_basics/
- [44] Xiaoqun Yuan, Yan He, Qing Fang, Xiaowen Tong, Changlai Du y Yi Ding. An Improved Fast Search and Find of Density Peaks-based Fog Node Location of Fog Computing System. 2017 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData).
- [45] Anwasha Mukherjee, Debashis De and Deepsubhra Guha Roy. A Power and Latency Aware Cloudlet Selection Strategy for Multi-Cloudlet Environment. IEEE TRANSACTIONS ON CLOUD COMPUTING, VOL. 7, NO. 1, JANUARY-MARCH 2019.
- [46] Yuanjie Li, Nguyen Tung Anh, Azhar Saeed Nooh, Kuwon Ra, Minho Jo. Dynamic Mobile Cloudlet Clustering for Fog Computing. 2018 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)
- [47] Rishabh Sharma, Sanjay Kumar, Munesh Chandra Trivedi. Mobile Cloud Computing: A Needed Shift from Cloud to Mobile Cloud. 2013 5th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks.
- [48] Special Issue on GPS. Proceedings of the IEEE. Enero de 1999.

9. LA RED DE SENSORES A BORDO DEL COCHE DE HIDRÓGENO.

Eduardo Martínez de Rioja (URJC), José Daniel Martínez de Rioja (UPM) y José Javier Martínez Vázquez (Coordinador del CT nº 56)

RESUMEN

Los vehículos que utilizan la pila de combustible de hidrógeno tienen unas características muy específicas que lo diferencian de cualquier otro tipo de vehículos eléctricos. Las condiciones en que se mezclan el aire con el hidrógeno, el funcionamiento de la membrana que filtra los protones hacia el cátodo, la seguridad de los depósitos de combustible situados dentro del coche y el carácter inflamable y explosivo del gas hacen necesaria la instalación de una red de sensores dedicada a la detección de cualquier anomalía que pudiera alterar el funcionamiento de este tipo de automóviles.

9.1.Introducción.

El coche con pila de combustible de hidrógeno está siendo estudiado en Europa y Estados Unidos como una alternativa al coche de batería eléctrica. Quizás sus mayores inconvenientes sean la limitada oferta actual de hidrolineras, en España existen en este momento tres puntos de repostaje, y el elevado precio de los vehículos, aproximadamente el doble que el de un coche eléctrico convencional de tamaño equivalente. A su favor, se puede argumentar que no necesita recarga eléctrica de la batería y que tiene una autonomía que duplica a la de sus competidores eléctricos. La recarga de la batería está llamada a ser uno de los problemas más serios de la tracción eléctrica ya que en las grandes ciudades todo el mundo tratará de conectarse a la red de suministro eléctrico en el mismo tramo horario, dando lugar a picos de consumo para los que no están preparados los sistemas de distribución de energía eléctrica.

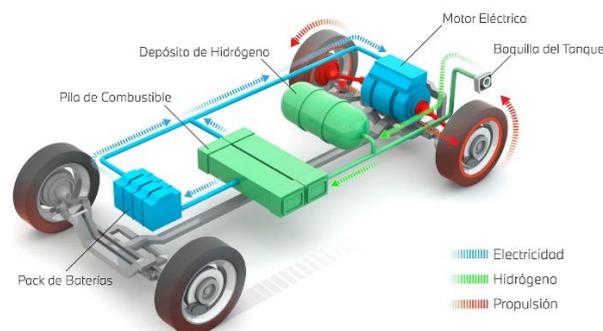


Figura 9.1. Representación esquemática del vehículo con pila de hidrógeno (www.bmw.com)

El coche de hidrógeno funciona con una pila de combustible basada en el intercambio de protones a través de una membrana. La pila necesita que se le suministre hidrógeno

molecular H₂ y oxígeno o aire para producir energía eléctrica, agua y calor. El motor eléctrico podría ser alimentado directamente por la pila de hidrógeno, sin embargo, la pila mantiene la tensión de una batería que responde de una manera rápida cuando el conductor necesita más potencia en el coche como son los casos de un adelantamiento o del arranque del vehículo. También, los sistemas actuales de recuperación de energía durante el frenado pueden reponer carga a la batería eléctrica, mientras que no podrían añadir carga eléctrica a la pila de hidrógeno. Dicho de otro modo, la batería actúa como sistema de almacenamiento y suministro de energía, no siendo necesario efectuar su recarga después de un recorrido del vehículo. Por otra parte, la pila de hidrógeno no soporta cambios bruscos de corriente por lo que es obligada la instalación de un sistema que evite gradientes de corriente muy pronunciados. Así, la batería puede formar parte de un conversor DC/DC elevador, y las fluctuaciones de corriente van a ser siempre lineales y suaves, evitando riesgos de avería en la pila de hidrógeno.

Otro aspecto que puede incidir en la difusión de este tipo de automóvil es el de las características del hidrógeno y su historial cuando ha sido utilizado como combustible en sistemas de transporte colectivo. Sin embargo, puede decirse que los automóviles de hidrógeno son tan seguros como los de gasolina, son económicamente competitivos y además, no contaminan.



Figura 9.2. Ilustración del Lunar Cruiser en el diario ABC.

En su edición del 8 de septiembre de 2020, el diario ABC hace referencia al **Lunar Cruiser**, un vehículo tripulado que estará impulsado con tecnología de pila de combustible de hidrógeno. Su entrada en funcionamiento está prevista para 2030 y será fabricado por la firma japonesa Toyota.

9.2. Características del vehículo con pila de hidrógeno.



Figura 9.3. Disposición de equipos en un Toyota Mirai.

Potencia: 100 kW (170 C.V.)

Margen de temperaturas de funcionamiento: -30 °C (-22°F) a 105° C (221°F)

Peso: 114 libras = 51,75 kg

Par motor: 221 lb/ft = 329 kg /m

Batería ión litio: 346 voltios

Rango para vehículos ligeros: 200 – 450 voltios

Rango para vehículos pesados: 400 – 600 voltios

Batería para el arranque e indicaciones a bordo: 12 voltios

Vehículos ligeros: 12 voltios

Vehículos pesados: 24 voltios

Capacidad de combustible: 5.5 Kg

Presión tanque de combustible: 70 MPa / 700 barías / 10.000 psi

Autonomía de 360 millas (500 km)

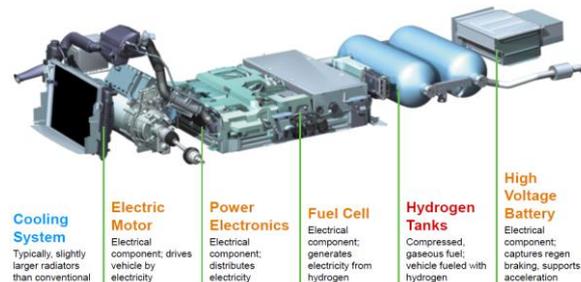


Figura 9.4. Componentes de un vehículo movido con pila de hidrógeno.

9.3. Breve descripción de la pila de hidrógeno.

A principios de los 90 ya se pensaba que los vehículos eléctricos podrían funcionar con celdas de combustible basadas en membrana de polímero como Nafión hidratado. En este tipo de baterías, el electrolito es una membrana de baja permeabilidad a las sustancias gaseosas y que permite el paso de protones. La más ampliamente utilizada es de la marca comercial Nafion.

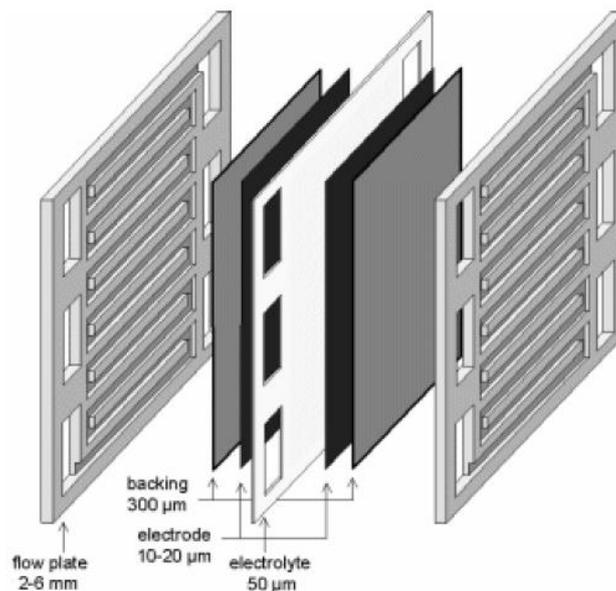


Figura 9.5. Elementos de una celda de combustible.

La pila de hidrógeno consta de una serie de celdas que están fabricadas con láminas cuyo espesor es del orden de la micra. Las superficies de estas láminas oscilan entre 5 y 300 cm², si bien las más usuales se sitúan entre 25 y 100 cm².

La membrana se combina con una capa de refuerzo de material poroso y buen conductor eléctrico, un electrodo catalizador y unas pletinas con estructura de canal para transportar el oxígeno y el hidrógeno a la membrana activa. Los canales de flujo envían hidrógeno al ánodo y oxígeno al cátodo. Los electrones libres se forman en el ánodo por la oxidación del hidrógeno. Esto es debido a que las pletinas que conforman los canales de flujo de combustible son de material conductor como el grafito. En el otro lado, en el cátodo, los electrones son enviados a este electrodo porque se necesitan para la reacción de los iones de oxígeno con los protones de hidrógeno para dar agua.

Una sola celda de este tipo presenta una tensión en circuito abierto de 1 V aproximadamente. Si la celda genera potencia, la tensión disminuye en función de la corriente suministrada. Para conseguir mayores potencias es necesario conectar en serie o en paralelo varias celdas hasta formar una pila capaz de alcanzar niveles de tensión y de corriente más altos.

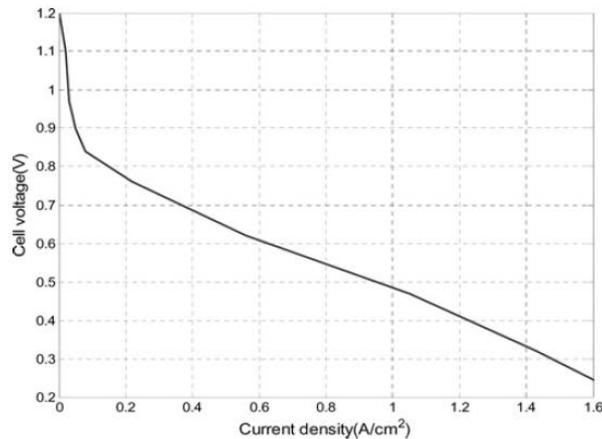


Figura 9.6. Curva de polarización o gráfica tensión-corriente de una celda.

El hidrógeno no reacciona con el carbono si éste último no está tratado. Además, el carbono ha de ser dopado con metales pesados para que actúen como catalizadores en las reacciones químicas que tendrán lugar dentro de la celda. En el caso del hidrógeno suelen utilizarse catalizadores del grupo del níquel, generalmente platino.

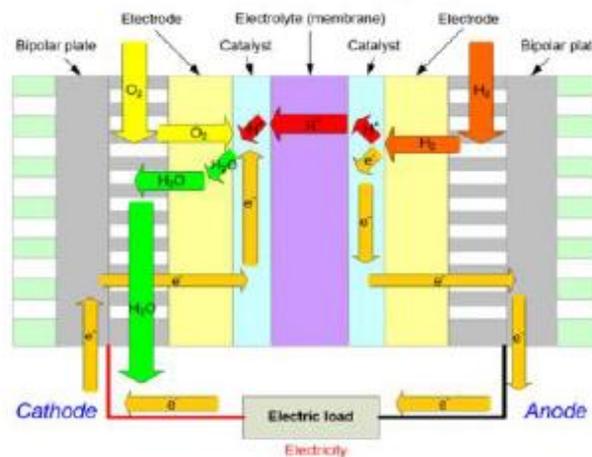
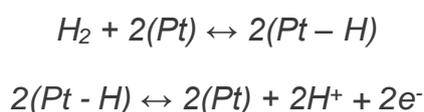
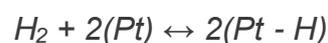


Figura 9.7. Esquema de funcionamiento de una celda.

En el ánodo de la pila de combustible tienen lugar los siguientes pasos en el proceso de hidrogenación catalítica, con metales del grupo del níquel como el platino:



Primer paso. La molécula de Hidrógeno se disocia en átomos que reaccionan con el metal catalizador. Es decir que el catalizador rompe el enlace de la molécula de hidrógeno dando lugar a dos átomos de hidrógeno.



El hidrógeno atómico penetra en los intersticios existentes entre los átomos metálicos del catalizador formando grupos Pt-H. El metal se hincha apreciablemente cuando absorbe hidrógeno a presión. Por otra parte, el grafito forma un enlace muy débil con las moléculas del platino.

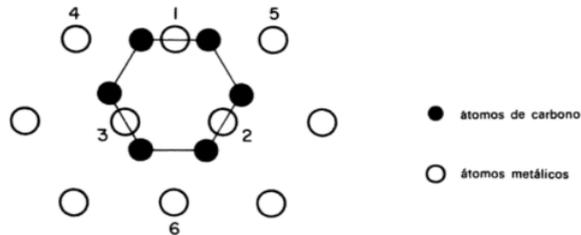


Figura 9.8. Enlace del carbono con elementos metálicos.

Segundo paso. En un proceso de oxidación, el metal catalizador rompe su enlace, muy débil, con el hidrógeno y da lugar a iones positivos de Hidrógeno y electrones:



Los electrones pueden establecer un camino entre ánodo y cátodo a través de una posible carga. De esta manera el cátodo, que atrae a los electrones, es el electrodo positivo y se establece una diferencia de potencial entre cátodo y ánodo.

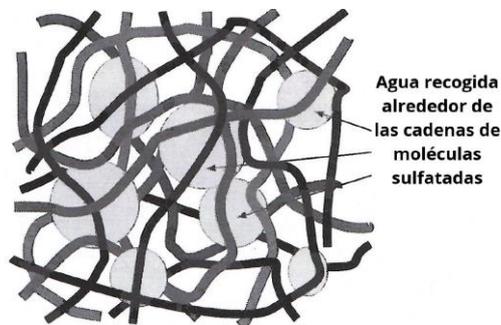
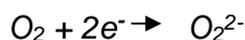
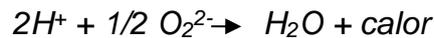


Figura 9.9. Detalle de la membrana de intercambio de protones PEM.

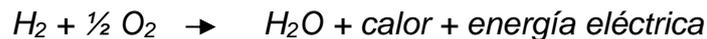
La membrana contiene radicales negativos SO_3 que tratan de combinarse con los protones H^+ estableciendo enlaces muy débiles. El material polímero es hidrófilo, de forma que atrae moléculas de agua y se humedece. En esta situación, los protones de hidrógeno pueden moverse con facilidad y puede haber 20 moléculas de agua por cada radical SO_3 , por lo que el agua y los protones libres pasan hacia el cátodo debido a lo que se ha denominado fenómeno de arrastre electro-osmótico. Se consiguen así conductividades eléctricas elevadas, pero si el nivel de hidratación de la membrana disminuye, baja también la conductividad.

En el área catódica tiene lugar la siguiente reacción química de reducción:





Hay que tener en cuenta que el hidrógeno y el oxígeno no reaccionan de manera espontánea, ni siquiera fácilmente. No obstante, se comprueba que la velocidad de reacción aumenta en presencia de metales como el platino, que actúan como catalizador. En este caso, el metal debe estar finamente dividido o en forma de pequeñas partículas de polvo metálico. La reacción total en la pila de hidrógeno es:



El atractivo comercial de este tipo de dispositivos se ha ido incrementando paulatinamente debido a las siguientes mejoras:

- a) La carga catalizadora ha disminuido desde 10 mg Pt / cm² a 0.5 mg Pt / cm².
- b) Gran parte de las líneas de investigación para la producción de pilas de combustible están orientadas a mejorar características como la conductividad, la permeabilidad al agua y la estabilidad térmica de las membranas.
- c) Reducción de los costes de preparación y de procesado de los materiales empleados en la fabricación de la pila.
- d) La aparición de nuevos materiales que trabajan a temperaturas mucho más altas y que instalados en la pila, funcionan sin necesidad de humidificadores.

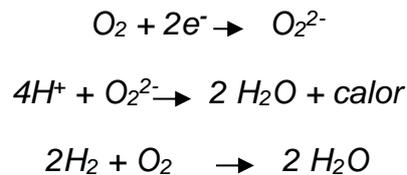
Las características eléctricas de una pila de combustible son las siguientes:

- Eficiencia energética: ~ 85%
- Densidad de corriente de funcionamiento: 100 mA/cm²
- Tensión de funcionamiento (entre 0,7 y 1 voltios).
- Densidad de potencia: ~ 3 kW/L ó kW/ m³
- Potencia específica: ~ 2 kW/kg
- Potencia:
 - Baja ~ 100 W
 - Media ~ 100 KW
 - Alta > 1MW
- Temperatura de funcionamiento: 90 °C (LT) / 180 °C (HT)

En el desarrollo de las celdas de hidrógeno, el mayor interés se ha centrado en tratar de alcanzar un funcionamiento con densidad de potencia elevada (pocas celdas por unidad de potencia y por tanto menor coste) y una eficiencia energética alta.

9.4. Flujos de gases reaccionantes y producción de agua.

Como ya se ha indicado, en el área catódica tiene lugar la siguiente reacción química de reducción:



Esta es la reacción química de la pila. Reaccionan dos moles de hidrógeno con un mol de oxígeno. La carga que interviene en la reacción es de $4F$ ya que cada molécula de hidrógeno transfiere 2 electrones.

Cada mol de un gas, ya sea elemento gaseoso o compuesto gaseoso ocupa, en condiciones normales de presión y temperatura, un volumen de 22,4 litros. El número de moléculas que contiene ese volumen es de $6 \cdot 10^{23}$ y se denomina número de Avogadro.

9.4.1. Consumo de oxígeno.

Por cada mol de oxígeno, se emplean 4 electrones, la carga que se mueve en el circuito vendrá dada por:

$$Carga = 4 \cdot F \cdot \text{moles de oxígeno}$$

Siendo F la constante de Faraday ($F = 96.485$ culombios/mol) que es el producto del número de Avogadro multiplicado por la carga de un electrón, $1,6 \times 10^{-19}$ culombios.

En la unidad de tiempo:

$$Carga/t \text{ (culombios/seg)} = 4 \cdot F \cdot (\text{culombios/mol}) \cdot \text{Cantidad de oxígeno en la unidad de tiempo (moles de oxígeno/seg)}$$

$$\frac{I}{4 \cdot F} \text{ moles/seg} = n^{\circ} \text{ moles de } O_2/\text{seg}$$

Si hay n celdas en la pila:

$$\frac{I \cdot n}{4 \cdot F} = n^{\circ} \text{ moles de } O_2/\text{seg}$$

Y teniendo en cuenta que:

$$P_e = V_c \cdot I \cdot n$$

Resulta:

$$\frac{P_e}{4 \cdot F \cdot V_c} = n^\circ \text{ moles de } O_2/\text{seg}$$

Se conoce la masa molar del oxígeno, 32 gramos, y la constante de Faraday, 96.485 culombios/mol. De donde se obtiene el flujo de oxígeno:

$$8,29 \cdot 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \text{ kg de } O_2/\text{seg}$$

Si la densidad del oxígeno es de 1,429 kg/m³, el caudal de oxígeno necesario es:

$$\frac{8,29}{1,429} \cdot 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \text{ m}^3 \text{ de } O_2/\text{seg}$$

$$5,8 \cdot 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \text{ m}^3 \text{ de } O_2/\text{seg}$$

El caudal está definido como:

$$Q = v \cdot S$$

La velocidad de circulación del fluido multiplicado por la sección del conducto de alimentación.

Para una sección de tubería de 1 cm², la velocidad de circulación del gas por el conducto de alimentación sería de 0,58 m/s por kw de potencia.

9.4.2. Utilización de aire.

Normalmente, se utiliza aire en lugar de oxígeno ya que la respuesta es más pobre pero desde un punto de vista económico, es rentable. Se evita un segundo depósito de oxígeno y no es necesario ningún proceso para su obtención. Las curvas de polarización obtenidas con oxígeno y con aire son las que se muestran a continuación.

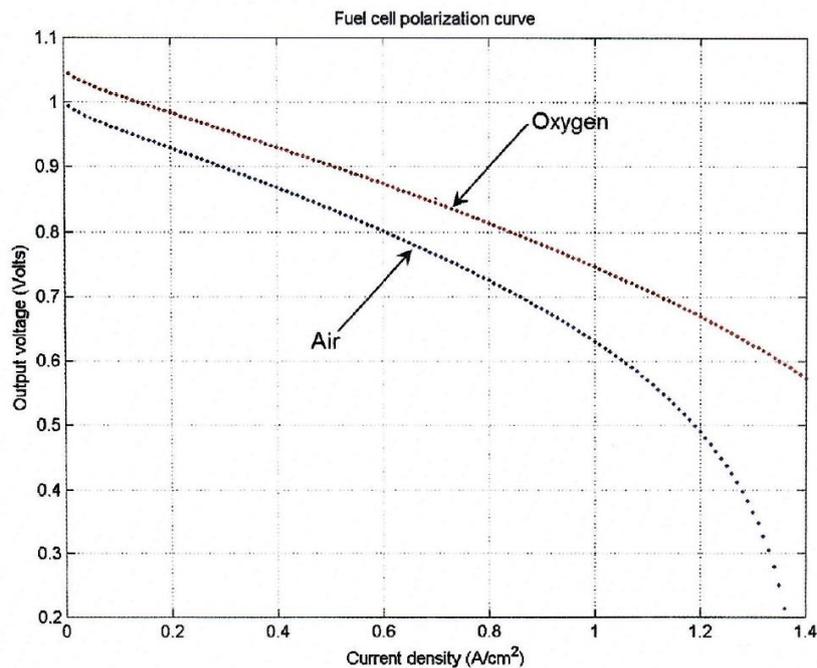


Figura 9.10. Curvas de polarización para alimentación con aire y con oxígeno.

Puede observarse como la tensión difiere poco de una curva a otra. La diferencia principal es la densidad de corriente máxima que se reduce aproximadamente a la mitad. La curva se ha obtenido con una presión de aire de 1/0,21 ~ 5 veces la presión de oxígeno, debido a que el aire tiene una composición aproximada de 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno.

Por tanto:

$$\text{Cantidad de oxígeno} = 0,21 \text{ Cantidad de aire}$$

La masa molar del aire es de 28,97 gramos:

$$\text{Cantidad de aire} = \frac{P_e}{4 \cdot F \cdot V_c} \text{ moles de aire/seg}$$

Se obtiene la cantidad de aire:

$$7,5 \cdot 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \text{ kg de aire/seg}$$

La densidad del aire es de 1,28 kg/m³, por lo que el caudal necesario de aire es:

$$\frac{7,5}{1,28} \cdot 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \text{ m}^3 \text{ de aire/seg}$$

Para obtener del aire la cantidad de oxígeno necesaria para el funcionamiento de la pila, tendremos:

$$\frac{5,86}{0,21} \cdot 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \text{ m}^3 \text{ de aire/seg}$$

Para una sección de tubería de 1 cm², la velocidad de circulación del gas por el conducto de alimentación sería de 3 m/s por kw de potencia.

9.4.3. Consumo de hidrógeno.

Por cada mol de hidrógeno se emplean 2 electrones, por lo que:

$$\frac{I \cdot n}{2 \cdot F} = n^{\circ} \text{ moles de H}_2/\text{seg}$$

O lo que es igual:

$$\frac{P_e}{2 \cdot F \cdot V_c} = n^{\circ} \text{ moles de H}_2/\text{seg}$$

Puesto que la masa molar del hidrógeno es de 2,02 gramos, se tiene:

$$1,01 \cdot 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \text{ kg de H}_2/\text{seg}$$

Siendo la densidad del hidrógeno de 0,084 kg/m³, el caudal de hidrógeno necesario es de:

$$\frac{1,01}{0,084} \cdot 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \text{ m}^3 \text{ de H}_2/\text{seg} = 11,35 \cdot 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \text{ m}^3 \text{ de H}_2/\text{seg}$$

En este caso, para una sección de tubería de 1 cm², la velocidad de circulación del gas por el conducto de alimentación sería de 1,13 m/s por kw de potencia.

9.4.4. Cantidad generada de agua.

Se produce un mol de agua por cada dos electrones:

$$\frac{P_e}{2 \cdot F \cdot V_c} = \text{moles de H}_2\text{O}/\text{seg}$$

La masa molecular del agua es de 18,02 gramos, por lo que la producción de agua es:

$$9,34 \cdot 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \text{ kg de H}_2\text{O}/\text{seg}$$

De acuerdo con esta formulación, en el caso de 1kw y una hora, se obtendría aproximadamente medio kilo de agua, para una tensión en la celda de 0,7 voltios.

Si la densidad de agua es 1000 kg / m³, el caudal de agua producido es:

$$10^3 \cdot 9,34 \cdot 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} m^3 \text{ de } H_2O/\text{seg}$$

$$9,34 \cdot 10^{-5} \frac{P_e}{V_c} m^3 \text{ de } H_2O/\text{seg}$$

$$9,34 \cdot 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \text{ litros de } H_2O/\text{seg}$$

El resultado sería de medio litro de agua por kw y por hora.

9.4.5. Relaciones entre el flujo, el caudal y la presión.

El flujo a través de una conducción de un fluido responde a la expresión:

$$\varphi = \rho \cdot S \cdot v$$

Siendo ρ la densidad del fluido, S la sección de la conducción y v la velocidad. El flujo tiene dimensiones de kg/seg.

El caudal es el flujo dividido por la densidad:

$$Q = \frac{\varphi}{\rho} = S \cdot v$$

Y tiene dimensiones de m^3/seg .

La masa de fluido que circula a través de S en un tiempo dt :

$$\text{masa} = \rho \cdot S \cdot v \cdot dt$$

La cantidad de movimiento es la masa por la velocidad:

$$\text{masa} \cdot \text{velocidad} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot dt$$

La fuerza que actúa sobre el fluido es la derivada temporal de la cantidad de movimiento:

$$F = \frac{d}{dt}(\text{masa} \cdot \text{velocidad}) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2$$

Por tanto, la presión en la conducción:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

9.5. Aspectos de interés sobre el funcionamiento de la pila.

De los sistemas de pila de combustible, el de membrana de intercambio de protones es el que se ha postulado desde hace años como el más prometedor, sobretodo para sistemas de generación de energía doméstica y automóviles con motor eléctrico. La razón es la baja temperatura de funcionamiento que presenta y que el diseño es relativamente sencillo.

El transporte de agua y iones en una pila de combustible tipo PEM ha sido estudiado ampliamente. Inicialmente, se asumió que la membrana estaba uniformemente hidratada con propiedades de transporte constantes. Este caso sólo se da con membranas ultradelgadas y muy bajas densidades de corriente. Más tarde, los modelos utilizados empezaron a tener en cuenta el transporte de gas dentro de las capas de difusión de los electrodos y el agua transportada a través de la membrana por la fuerza electro-osmótica y por difusión. Modelos posteriores añadieron la valoración del intercambio de calor de las fases sólidas a los gases y viceversa en los canales de flujo de gas.

La experimentación ha demostrado que las diferencias de presión entre los flujos de gas de ánodo y cátodo podrían dar lugar a la deformación, incluso a la perforación de la membrana y, en consecuencia, a un funcionamiento deficiente de la pila o incluso una avería de carácter grave. Es por tanto necesario medir la existencia de flujo y la presión en los canales de entrada de los gases que van a reaccionar en la pila. También, puede concluirse que la falta de combustible durante el funcionamiento de la pila puede originar daños irreparables en el dispositivo.

La membrana puede considerarse el corazón de la pila de combustible tipo PEM. Ha de estar bien hidratada para mantener su conductividad protónica, por lo que es necesario que absorba parte de la humedad existente dentro de la pila de combustible de cara a mantener su capacidad para transferir protones. El electrolito de polímero condiciona la temperatura para la puesta en marcha de la pila, pero elimina muchos problemas de corrosión y permite que las pérdidas resistivas sean bajas. Estas pérdidas resistivas de la pila de combustible pueden deberse en buena medida a la disminución de la conductividad protónica originada por la deshidratación total o parcial de la membrana.

Con densidades de corriente elevadas ($> 1 \text{ A / cm}^2$) se producen pérdidas óhmicas en la membrana y la difusión de agua desde el cátodo es insuficiente para mantener la membrana hidratada. En consecuencia, para minimizar este efecto de pérdidas óhmicas, el flujo anódico de H_2 podría humidificarse y cuando se utiliza aire en lugar de oxígeno puro, la corriente de gas catódica debe humidificarse también.

Las variaciones del agua contenida en la membrana de polímero de una pila son producidas por el arrastre electro-osmótico de agua junto al transporte de protones desde el ánodo hasta el cátodo, por la reacción química de reducción de oxígeno en el cátodo que genera agua, por las condiciones de humidificación en los canales de entrada

de los gases reaccionantes y finalmente, debido a la difusión de agua desde el cátodo hacia el ánodo que reduce el gradiente de concentración de líquido o vapor en la zona del cátodo.

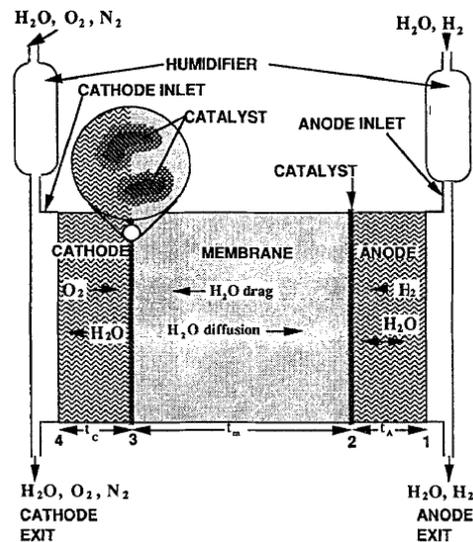


Figura 9.11. Distribución de agua dentro de una celda.

Por otra parte, la presencia de agua líquida en las capas de difusión de gas puede impedir el paso de los gases, H_2 y O_2 , hacia los catalizadores. También, cuando hay exceso de agua en el sistema pueden surgir los problemas de inundación del cátodo. El agua contenida en el hidrógeno y en el aire más la producida en la reacción electroquímica en el cátodo y la transportada por arrastre electro-osmótico produce en algunos casos exceso de agua en la pila, que normalmente se traduce en la inundación del cátodo.

En consecuencia, la gestión del agua dentro de la pila implica un equilibrio entre los dos extremos: deshidratación de la membrana e inundación del cátodo.

Hoy en día existen celdas de combustible PEM con temperaturas de funcionamiento de $200\text{ }^\circ\text{C}$, que se denomina PEM FC de alta temperatura. La principal diferencia con la celda PEM convencional es que utiliza distintos materiales tanto en la membrana como en los electrodos catalizadores. La membrana está fabricada a partir de un compuesto denominado Polybenzimidazol (PBI) dopado con ácido fosfórico, que atrae a los iones H^+ y permite el funcionamiento de la celda a temperaturas en torno a los $180\text{ }^\circ\text{C}$. Esta característica hace que las nuevas celdas sean menos sensibles al monóxido de carbono y al metano. El monóxido de carbono en 10 ppm puede contaminar el platino de los catalizadores degradando su funcionamiento por lo que los catalizadores de ánodo y cátodo de la PEM FC de alta temperatura están fabricados de platino y rutenio. Por otra parte, las celdas PEM de alta temperatura funcionan con el agua generada por el propio sistema, no siendo necesaria la humidificación de los elementos reaccionantes.

La eliminación del calor propio del sistema y mantener la membrana bien hidratada y conductiva, se traduce en menores pérdidas óhmicas y tensiones eléctricas de celda más

elevadas. Además, una gestión térmica inapropiada durante el funcionamiento podría agravar el problema de la gestión del agua. Por lo tanto, el sistema debe estar dotado de un circuito de refrigeración que mantenga la temperatura dentro de unos límites. En el apartado 3 se ha indicado que la tensión en una celda de la pila varía con la corriente entre 0,7 y 1 voltios. El valor máximo de tensión corresponde a una situación de temperatura en el cátodo tal que el agua procedente de la reacción de O_2 y H_2 aparece en estado líquido. En el caso del valor mínimo de tensión, se corresponde con una temperatura más elevada que conllevaría la existencia de vapor de agua en la misma zona. Si se trata de una celda de alta temperatura también se tendría un nivel de tensión máximo para la temperatura de funcionamiento más baja y un nivel de tensión más bajo para una temperatura más elevada.

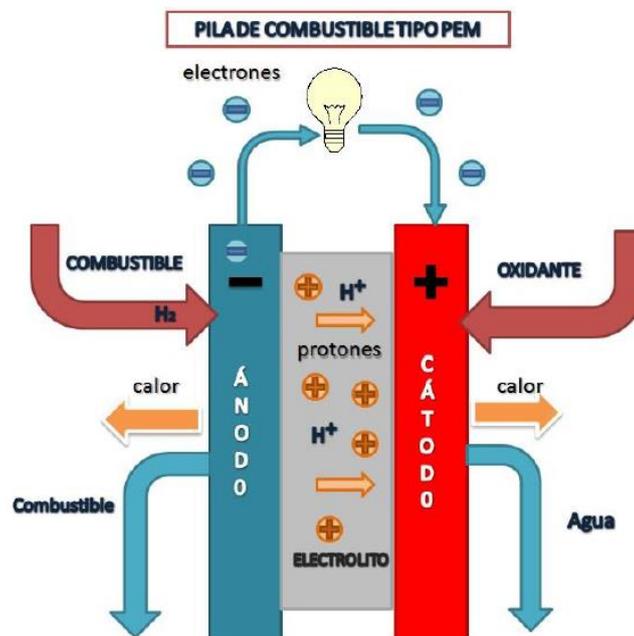


Figura 9.12. Representación esquemática del funcionamiento de una pila de hidrógeno.

Normalmente, para conseguir una eficiencia energética elevada, la mayoría de las pilas de combustible de tipo PEM funcionan con densidades de corriente bajas (consecuentemente densidades de potencia bajas) y cuando se consigue un funcionamiento con alta densidad de potencia, se sacrifica la eficiencia energética.

9.5.1. Comportamiento dinámico.

Uno de los problemas más críticos de la pila de hidrógeno es su funcionamiento dinámico. Se denomina comportamiento dinámico de la pila de hidrógeno a la respuesta de la pila ante los cambios de carga que puedan producirse. La tensión en la pila disminuye a medida que la corriente crece. Esto es debido a la aparición de pérdidas óhmicas que se

añaden a las tensiones de activación en los electrodos y las pérdidas por cambio de concentración de los gases reaccionantes.

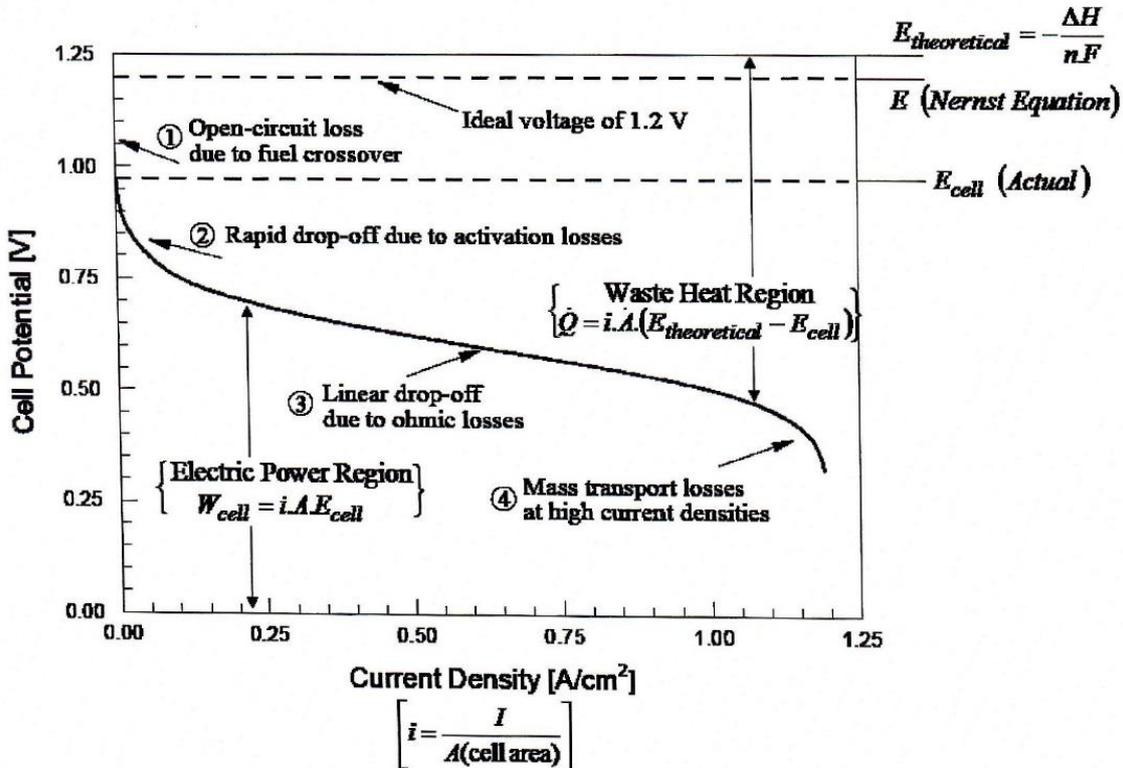


Figura 9.13. Distintas zonas de trabajo en la curva de polarización.

La energía eléctrica producida por una celda viene dada por la expresión:

$$W = q \cdot E$$

Donde E es la tensión de la celda en voltios, q es la carga total transferida en la celda por mol de H₂ consumido en culombios/mol y W es la energía en julios/mol. La carga q puede también expresarse como:

$$q = n \cdot N \cdot e$$

Siendo n el número de electrones por molécula de H₂, N es el número de moléculas por mol o número de Avogadro y e es la carga del electrón en culombios. El producto del número de Avogadro por la carga del electrón es F, la constante de Faraday. De esta manera, se tiene:

$$q = n \cdot F$$

$$W = n \cdot F \cdot E$$

$$E = \frac{W}{n \cdot F} = \frac{-\Delta G}{2 \cdot F}$$

En donde se ha sustituido la energía eléctrica por la energía libre de Gibbs. Esta fórmula se correspondería con el valor de 1,25 voltios de la curva de polarización o tensión teórica.

Si se tiene en cuenta la variación de la energía de formación de Gibbs con la presión, se obtiene la fórmula de Nernst y la tensión en la pila disminuye ligeramente, hasta los 1,2 voltios.

En circuito abierto, hay pérdidas por el paso de combustible a través de la membrana sin que se produzca oxidación en la capa catalizadora del cátodo y que representa pérdidas de combustible. Igualmente, puede haber paso de electrones circulando internamente en lugar de hacerlo por el circuito exterior. Estas pérdidas pueden suponer una caída de 0,2 voltios, hasta un valor de tensión de celda en circuito abierto de 1 voltio.

Con densidades de corriente bajas hay una caída de tensión rápida del orden de 0,25 voltios debida a la energía de activación necesaria en cualquier reacción química. A medida que aumenta la corriente, hay una zona lineal con pendiente negativa suave debido a las pérdidas óhmicas.

Por último, si la corriente sigue aumentando, se entra en una zona de pendiente pronunciada que termina en el límite de corriente (tensión cero). En esta zona de la curva, el área ocupada por los gases reaccionantes en las capas de difusión de gas se va reduciendo hasta llegar a ser nula en el punto límite de corriente. La avidez de las partículas de uno y otro gas por combinarse es tan grande que la recombinación es cada vez más rápida y no da tiempo a que los gases reaccionantes rellenen toda la superficie de su capa de difusión correspondiente.

9.5.2. Compresor.

Si el automóvil toma el aire directamente de la carretera para reaccionar con el hidrógeno, cuando el coche se para a causa de un frenazo brusco, pueden producirse problemas de falta de oxígeno en las celdas de la pila. También, durante el arranque puede haber escasez de aire, debido a la ausencia de movimiento.

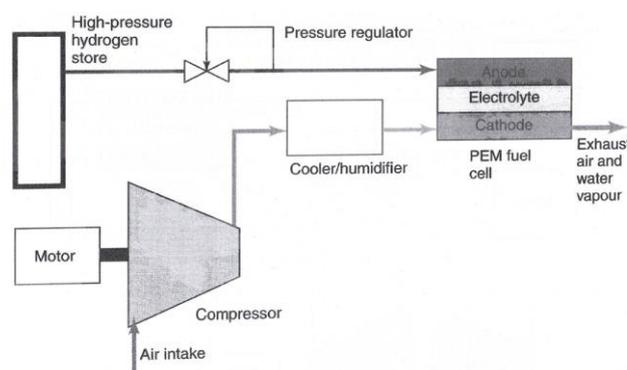


Figura 9.14. Utilización de compresor en una pila de combustible.

La instalación de un motor y un compresor reduce la sobretensión de activación del cátodo, al aumentar la presión de los elementos reaccionantes. También mejora el rendimiento de la celda, haciendo la curva de polarización de la celda con una parte lineal más horizontal y permitiendo mayor nivel de corriente antes del codo que limita la zona de cortocircuito.

La necesidad de un compresor para la alimentación de aire a la pila disminuye su rendimiento, ya que la alimentación ha de salir de la propia pila. Por otra parte, como ya se demostró en apartados anteriores, a una presión de 2 ó 3 barías el aire viaja a la misma velocidad que el vapor de agua. Este punto resulta de gran interés ya que, de no ser así, el aire quemaría el interior de la celda a su paso.

También, el nivel de presión de aire obliga a que la presión de alimentación de hidrógeno sea la misma, para evitar deformaciones en la membrana o en las capas de difusión de gas.

9.5.3. Influencia de la presión en el rendimiento de la celda.

La ganancia de tensión por incremento de potencia se calcula mediante la expresión:

$$\Delta V = C \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

La constante C puede tener un valor entre 0,03 voltios y 0,1 voltios, dependiendo de factores de diseño, fabricación y funcionamiento, por lo que su cálculo se debe realizar para cada caso concreto.

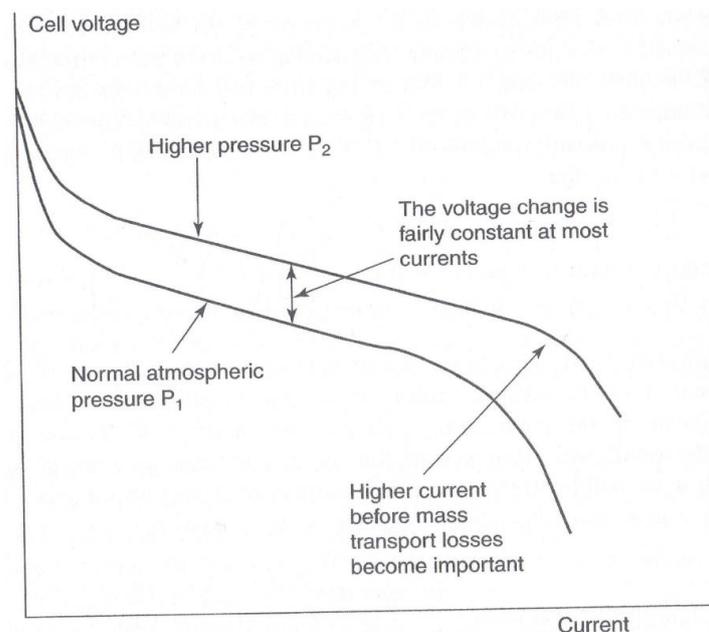


Figura 9.15. Influencia de la presión en la curva de polarización.

La figura muestra dos gráficas distintas. En la primera, se da una visión “optimista” de la variación de tensión con la presión de alimentación de los gases reaccionantes. Puede observarse que tiene un máximo en torno a una presión tres veces la presión atmosférica. En la segunda, se contempla una visión “realista” de la situación, en donde la utilización del compresor para elevar la presión del aire siempre conduce a un resultado con pérdidas.

	optimista	realista
Constante C	0.1	0.06
Temperatura	15°	15°
Eficiencia motor	0.95	0.90
Eficiencia compresor	0.75	0.70
Estequiometría	1.75	2.0

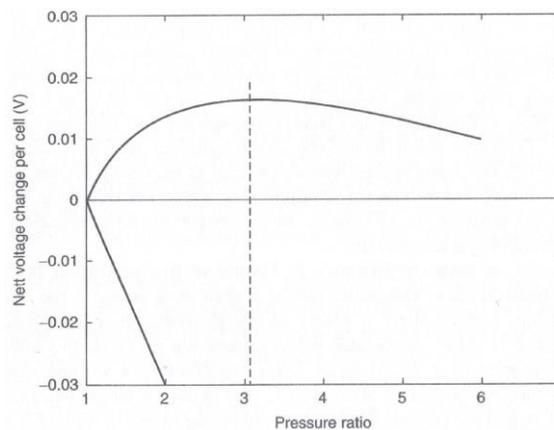


Figura 9.16. Influencia de la presión en la tensión de salida.

Por otra parte, hay que regular la presión de los gases reaccionantes consiguiendo la misma presión en la alimentación del ánodo y del cátodo, para que la membrana no se deforme. Además, cuando la carga aumenta, la presión debe de aumentar en la misma proporción también en los dos electrodos.

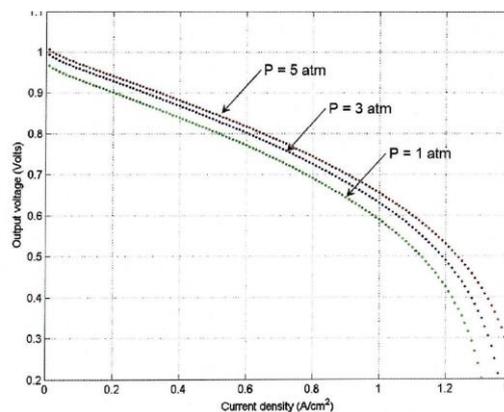


Figura 9.17. Curvas de polarización con distintas presiones de alimentación de gases.

9.5.4. Gradiente de potencia.

Una pila de hidrógeno de 100 kw puede tener unas 300 celdas y cada celda puede tener hasta 30 canales de alimentación de flujo. Es decir, hay unos 9000 canales de alimentación de gas en toda la pila. Cualquier pequeño obstáculo en los canales de flujo de gas daría lugar a un desequilibrio en las tensiones de unas celdas respecto a otras. Además, si la corriente que exige la carga no se corresponde con el suministro de gas reaccionante, habrá problemas de falta de alimentación y la tensión de la pila caerá.

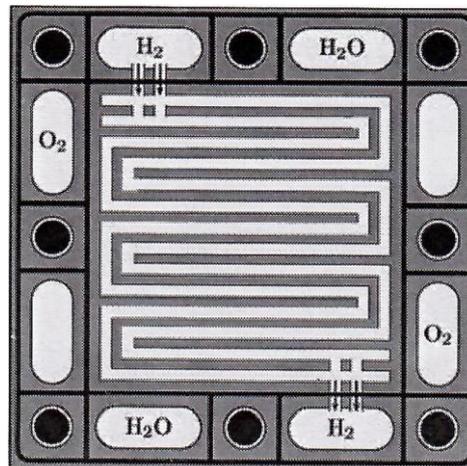


Figura 9.18. Pletina bipolar con canales de alimentación de gas.

Así, los cambios bruscos de la carga, durante la operación normal de la pila, pueden causar graves daños al dispositivo. La celda de hidrógeno no funciona adecuadamente con gradientes de potencia pronunciados. Algunos autores sitúan este valor en torno a pendientes máximas de 2,5 Kw/seg.

9.5.5. Conversor DC/DC.

Los convertidores DC/DC son una posible solución para el problema de los gradientes de potencia pronunciados. En la figura siguiente, se observa como la tensión de la pila de hidrógeno V_i se conecta a un condensador o batería de tensión V_c , a través de una bobina L .

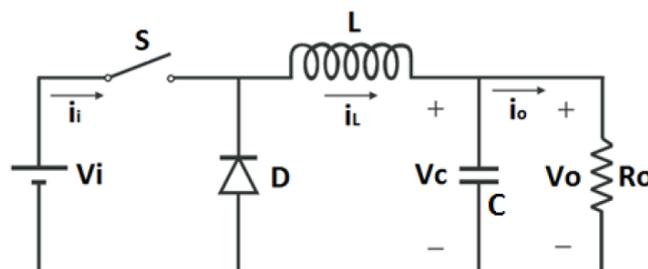


Figura 9.19. Topología de un convertidor reductor.

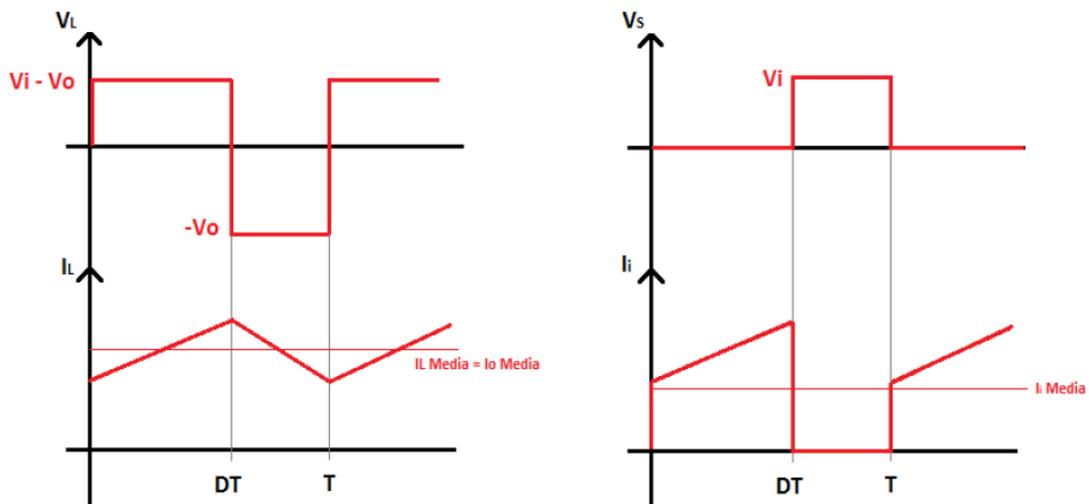


Figura 9.20. Formas de onda del convertidor reductor.

En el diagrama de formas de onda, puede observarse como la corriente de la pila estaría en este caso, sometida a cambios muy bruscos, dicho de otra forma, funciona con gradientes de potencia elevados. Por esta razón se descarta este tipo de topología.

El convertidor elevador sin embargo, da lugar a variaciones más suaves de corriente, de manera que las pendientes pueden regularse con el ciclo de trabajo, ya que se demuestra que:

$$V_o / V_i = 1 / (1 - D)$$

Donde V_i es la tensión de la pila, V_o es la tensión de la batería y D es el tiempo del ciclo de trabajo durante el que permanece cerrado el interruptor S .

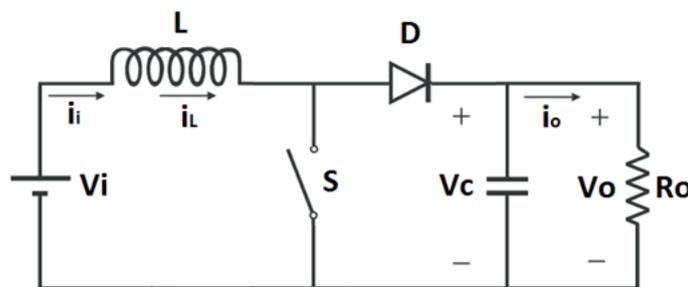


Figura 9.21. Topología de un convertidor elevador.

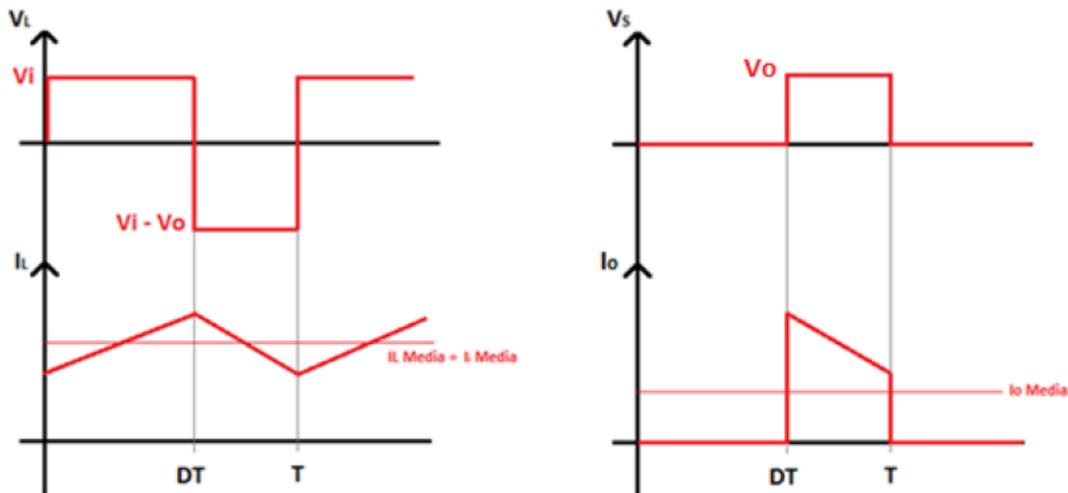


Figura 9.22. Formas de onda del convertidor elevador en modo continuo.

Cuanto más similares sean los niveles de tensión de la pila y de la batería, más suaves van a ser los gradientes de corriente y mayor es la eficiencia (relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada).

El rizado de corriente, vendrá dado por:

- a) En el intervalo $0 \leq t \leq DT$:

$$\Delta i_L = V_i \frac{\Delta t}{L}$$

En el instante en que se abre el interruptor S, $\Delta t = T_{ON} = DT$ y por tanto:

$$\Delta i_{Lmax}(+) = V_i \frac{T_{ON}}{L} = V_i \cdot \frac{D \cdot T}{L}$$

- b) En el intervalo $DT \leq t \leq T$

$$\Delta i_L = (V_i - V_o) \frac{\Delta t}{L}$$

En el instante en que el interruptor S se vuelve a cerrar, $\Delta t = T_{OFF} = (1-D)T$, con lo que en este caso:

$$\Delta i_{Lmax}(-) = (V_i - V_o) \frac{T_{OFF}}{L} = (V_i - V_o) \cdot \frac{(1 - D) \cdot T}{L}$$

La suma de los dos incrementos de corriente máximos ha de ser cero:

$$\Delta i_{Lmax}(+) + \Delta i_{Lmax}(-) = 0$$

En consecuencia:

$$V_i \frac{DT}{L} + (V_i - V_o) \cdot \frac{(1-D) \cdot T}{L} = 0$$

De aquí, se obtiene, como ya se había indicado en un principio:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D}$$

También, se puede concluir que:

$$I_{Lmin} = I_L - \Delta i_{Lmax}/2$$

$$I_{Lmax} = I_L + \Delta i_{Lmax}/2$$

Obteniéndose un valor de corriente por la bobina que es función de L para dos valores de tensión de entrada y de salida dados. La bobina puede dimensionarse como:

$$L = V_i \cdot \frac{D \cdot T}{\Delta i_{Lmax}} = -(V_i - V_o) \cdot \frac{(1-D) \cdot T}{\Delta i_{Lmax}}$$

De igual modo:

$$I_{Lmax} - I_{Lmin} = \Delta i_{Lmax}$$

Dado que las potencias de entrada P_i y salida son iguales:

$$R = \frac{V_o^2}{P_i}$$

Y también,

$$P_i = I_i V_i = I_o V_o$$

De donde,

$$\frac{I_i}{I_o} = \frac{1}{1-D} = \frac{I_L}{I_o}$$

Y la corriente de salida cumple:

$$I_o = \frac{V_o}{R}$$

Siendo los valores de corriente y de tensión, valores medios.

Algunos dispositivos más sofisticados basados en la misma topografía hasta aquí utilizada permiten la cancelación del rizado.

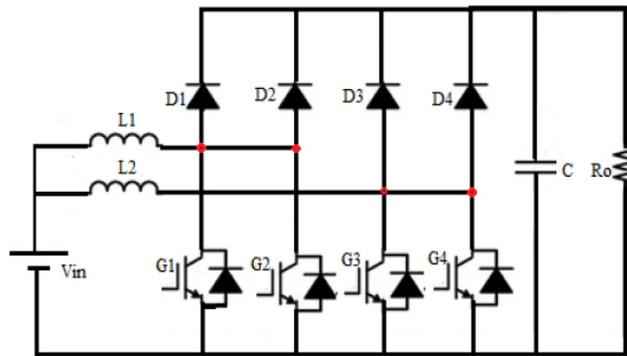


Figura 9.23. Circuito convertidor elevador intercalado (IBC).

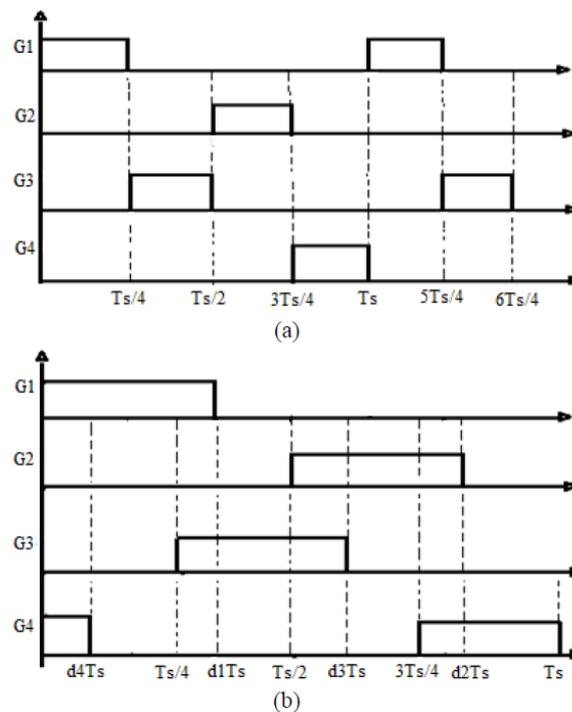


Figura 9.24. Secuencia de señales de activación de FET. A) $D=T/4$. B) $D>T/4$.

En este caso, si n = número de fases y m = número de interruptores por fase, se cumple:

$$V_o = \frac{V_m}{(1 - m D)}$$

$$I_L = \frac{V_o}{n (1 - m D) R_o}$$

En el caso de 2 interruptores tendremos:

$$\frac{V_{in} T_{ON}}{L T/2} = \frac{V_i - V_o}{L} \left(1 - \frac{T_{ON}}{T/2}\right)$$

Donde:

$$D = \frac{T_{ON}}{T}$$

Resultando:

$$V_{in} = V_o(1 - 2D)$$

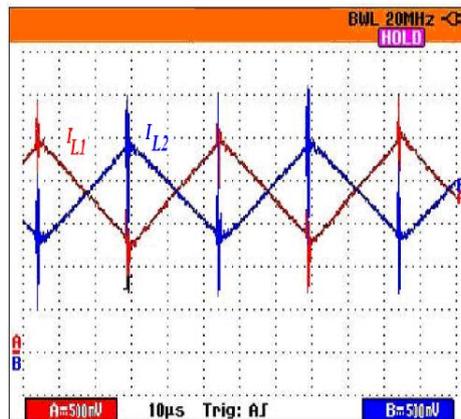


Figura 9.25. Medida de la cancelación del rizado en un IBC.

La utilización de este tipo de dispositivos reduce en gran medida los cambios bruscos de tensión y de corriente, permitiendo que la alimentación de la pila de hidrógeno no sufra desvanecimientos por falta de suministro de gases a su entrada.

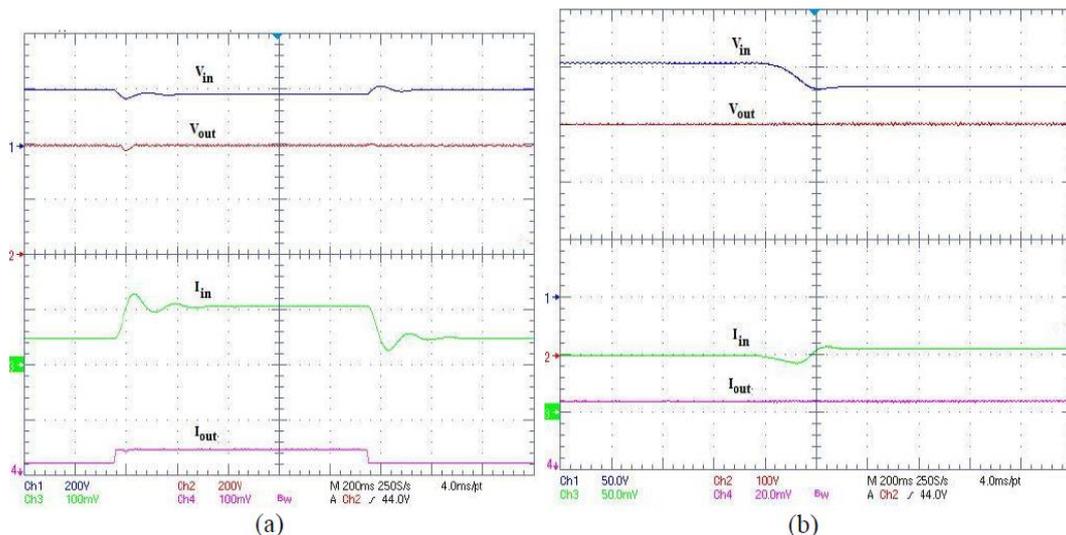


Figura 9.26. Medida de la respuesta de un IBC frente a) variaciones bruscas en la carga y b) caídas de la tensión en la pila de hidrógeno.

Para una variación repentina de corriente en la salida (0,4 ms) la corriente de entrada sufre un transitorio mucho más lento (8 ms) unas 20 veces menor. También, puede

observarse como para una caída de tensión a la entrada, el dispositivo responde sin variaciones de tensión ni de corriente a la salida.

9.5.6. Humidificación.

Con densidades de corriente elevadas ($> 1 \text{ A / cm}^2$) se producen pérdidas óhmicas en la membrana y la difusión de agua desde el cátodo es insuficiente para mantener la membrana hidratada. En consecuencia, conviene limitar la corriente máxima de funcionamiento para evitar este tipo de averías.

En general, el agua generada por la propia pila es suficiente para un funcionamiento normal de la misma. Sin embargo, el paso del aire o del hidrógeno por las diferentes capas de la pila, puede originar un efecto de secado o incluso puede llegar a quemar algunas áreas de las capas de difusión de gas, o de los electrodos. No obstante, en el caso de la utilización en vehículos automóviles, como el hidrógeno sale del depósito a una presión muy elevada y a temperatura muy baja, este problema no se presenta en el lado anódico.

También, cuando se utiliza aire en lugar de oxígeno puro, la corriente de gas catódica debe humidificarse con el objeto de evitar que seque, incluso queme, a su paso, la zona del cátodo.

Se define el coeficiente de humedad como la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire:

$$\omega = \frac{m_w}{m_a}$$

Mientras que la humedad relativa se define como:

$$\phi = \frac{P_w}{P_{sat}}$$

El cociente entre la presión parcial de vapor de agua en la mezcla y la presión de vapor de agua de saturación.

La presión de vapor de agua a la salida cuando el contenido de agua a la entrada es despreciable, viene dado por la expresión:

$$P_w = \frac{0,420 \cdot P_{exit}}{\lambda + 0,210}$$

Donde P_{exit} es la presión de aire a la salida de la pila.

Cuando el contenido de agua en el aire no es despreciable, la presión de vapor de agua a la salida viene dada por la expresión:

$$P_w = \frac{(0,420 + \psi\lambda) \cdot P_{exit}}{(1 + \psi)\lambda + 0,210}$$

Donde ψ es un coeficiente definido por la expresión:

$$\psi = \frac{P_{win}}{P_{in} - P_{win}}$$

Siendo P_{in} la presión total de aire a la entrada un poco mayor que P_{exit} y P_{win} la presión de vapor de agua a la entrada.

La figura siguiente muestra un dispositivo de humidificación que utiliza el aire exhausto que sale de la pila y va perdiendo agua y temperatura para humidificar el aire entrante como combustible. Se trata de un dispositivo sencillo, de bajo coste y que es ampliamente utilizado en los sistemas PEM FC para vehículos automóviles. El aire a la salida de la pila se va enfriando y perdiendo agua a su paso por el humidificador. El agua que contiene el aire de salida, condensa e impregna de agua una membrana que separa el aire que entra a la pila y el que sale. Esta agua baja la temperatura del aire entrante y lo humidifica.

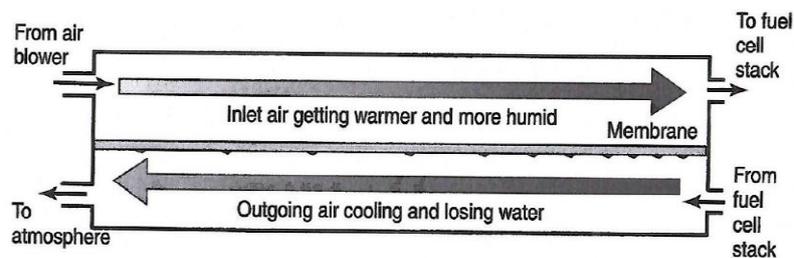


Figura 9.27. Humidificador de aire utilizando el agua producida por la misma pila.

Un posible circuito de alimentación de aire de una pila PEM FC podría estar compuesto de un compresor, un inyector de agua, un vaso relleno de material poroso que facilita la evaporación del agua, un separador de agua para evitar la entrada de agua líquida en la pila, después de la pila otro separador para obtener el agua necesaria para la humidificación y finalmente una válvula que libera el exceso de presión.

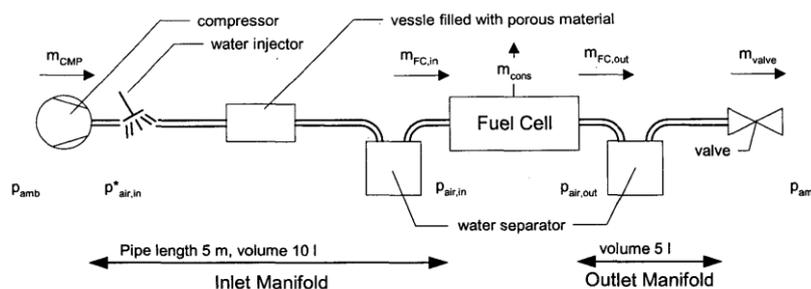


Figura 9.28. Circuito de alimentación de aire de una pila PEM FC.

El aire en el compresor aumenta su temperatura debido al incremento de la presión. Si la temperatura sube, es necesario enfriarlo cuando se suministra como combustible a la PEM FC. Esta operación se lleva a cabo por medio de un inyector que introduce pequeñas gotas de agua fría en el aire que sale del compresor. Así, el aire se enfría y a la vez se humedece. Serviría también el dispositivo de la Figura 58. Como la humedad del aire y su temperatura están relacionadas y no se pueden controlar de forma independiente, se opta por rebajar la temperatura del aire al máximo con el inyector y permitir que la humedad relativa del aire fluctúe entre determinados niveles. El flujo de aire y la presión se regulan por medio de un controlador de flujo de masa situado a la salida del compresor y una válvula de presión.

9.5.7. Gestión del agua.

La inundación de las celdas por acumulación de agua altera su funcionamiento normal, provocando caídas de tensión. El exceso de agua bloquea los poros en las capas de difusión de gas e impide la llegada de los gases reaccionantes a las capas que actúan como catalizadores, originando falta de alimentación de gas con la consiguiente caída de tensión.

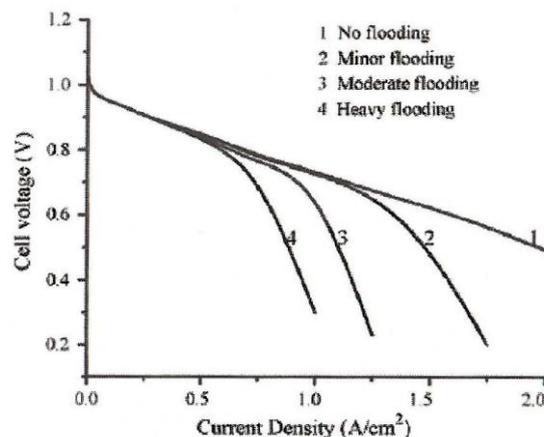


Figura 9.29. Efecto del exceso de agua en la curva de polarización de una PEM FC.

La figura anterior muestra cómo afecta al funcionamiento de la celda el grado de inundación y se compara con la curva de polarización correspondiente a una celda sin problemas de exceso de agua.

a) Inundación del cátodo.

Los mecanismos de inundación del cátodo son los siguientes:

Se forma agua por la reacción de reducción del oxígeno que produce agua. Si se incrementa la carga, la densidad de corriente aumenta y se produce más agua.

Al aumentar la densidad de corriente, el número de protones que atraviesan la membrana también aumenta. La cantidad de agua que arrastran los protones hacia el cátodo (proceso electro-osmótico) se incrementa en la misma proporción.

La humidificación en exceso del aire utilizado como reaccionante también puede dar lugar a la inundación del cátodo, sobre todo cuando la densidad de corriente es baja y la tasa de oxígeno necesaria es también baja.

Parece complicado humidificar de acuerdo con la cantidad de gas que se suministra. En el supuesto que se pudiera relacionar una cosa con la otra, la variación de la cantidad de aire tendría que acompañarse con la variación de hidratación y deberían de ser simultáneas.

El movimiento de agua por difusión, salvo en tasas de corriente bajas, del orden de 0,3 amperios /cm², siempre será menor que el debido al arrastre electro-osmótico.

El agua del cátodo es eliminada por evaporación en los electrodos o por difusión, en los canales de alimentación de gas, como vapor de agua. Estos procesos tienen lugar a temperaturas y tasas de flujo de aire elevadas dentro de la celda.

Si el agua del cátodo no se elimina de forma eficiente de la celda, puede tener un efecto negativo sobre su funcionamiento. De hecho, el oxígeno que se suministra a través del cátodo puede no llegar a la capa que actúa como catalizador al ser obstaculizado por el agua o vapor de agua existente en el cátodo que cierra los poros de la capa de difusión de gas.

b) Inundación del ánodo.

Es menos frecuente que la inundación de cátodo. En caso de humidificación de hidrógeno, bajas tasas de hidrógeno en los canales de alimentación pueden dar lugar a un exceso de agua en las capas de difusión de gas, originando la falta de alimentación de gas y un serio problema en el funcionamiento de la celda.

Las causas más frecuentes de inundación del ánodo son:

Densidades de corriente bajas y temperaturas de funcionamiento de la celda bajas también. La humidificación del hidrógeno puede originar la acumulación de agua en el ánodo. Como ya se ha indicado en un apartado anterior, en el caso de vehículos automóviles, como el hidrógeno sale del depósito a una temperatura muy baja, este problema no se presenta en el lado anódico.

Por difusión de agua desde el cátodo. Con densidades de corriente bajas, si la humedad relativa en el ánodo no es tan alta como en el cátodo, la difusión de agua desde el cátodo al ánodo es mayor que la corriente de arrastre en sentido opuesto.

c) **Inundación de los canales de alimentación de gas.**

La condensación de vapor de agua en algún punto de los canales de alimentación de gas puede obstaculizar la circulación de los gases reaccionantes y provocar una caída de tensión en la pila.

9.5.8. Circuito de refrigeración.

El calor generado en una pila de hidrógeno se debe básicamente a la energía que se libera en las reacciones químicas y electroquímicas que tienen lugar dentro de cada celda. También, el resultado de la reacción final del combustible con el oxidante, es agua y una gran cantidad de calor.

El circuito de refrigeración cumple las siguientes funciones:

1. Asegura una temperatura estable de la pila durante su funcionamiento.
2. Elimina el calor generado en la pila de forma eficiente y continua.
3. En muchos casos el circuito de refrigeración se utiliza también para conseguir la temperatura de arranque de la pila, unos 40° C en caso de PEM FC de baja temperatura y unos 80° C en caso de PEM FC de alta temperatura.

Los canales por los que circula el líquido refrigerante se fabrican de grafito o metal y forman parte de las pletinas bipolares sobre las que están los canales de flujo de gas.

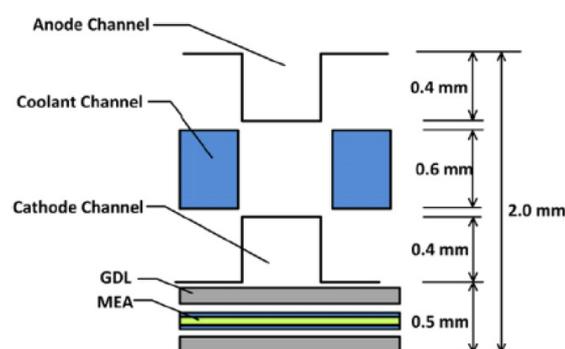


Figura 9.30. Canales de refrigeración de una PEM FC de un automóvil.

El fluido utilizado para la refrigeración puede ser aire, agua desionizada que tiene una gran capacidad de aislamiento del calor o aceite. El aire se emplea en sistemas de baja potencia, menores de 2 kw. El agua permite refrigerar sistemas de hasta varios cientos de kw. Algunos fabricantes usan Glycol en lugar de agua desionizada. Este compuesto orgánico de la familia de los alcoholes contiene dos radicales hidroxilo (OH) enlazados con

átomos de carbono por cada molécula. Normalmente, se denomina así al compuesto más simple de esta clase, el etileno glicol, también llamado etanodiol. Es un líquido incoloro, aceitoso de sabor dulce y olor agradable. Se utiliza de líquido anticongelante en los sistemas de refrigeración de los coches y también como líquido de frenos. Es medianamente tóxico. En el caso de pilas de potencia media o alta los canales de refrigeración son independientes para cada celda.

La tendencia actual para la refrigeración de equipos basados en PEM FC, son los denominados tubos o conductos de calor que van embutidos dentro de las pletinas bipolares como se muestra en la figura. Se ha comprobado que pueden mover grandes cantidades de calor a distancias considerables sin necesidad de emplear sustancias adicionales.

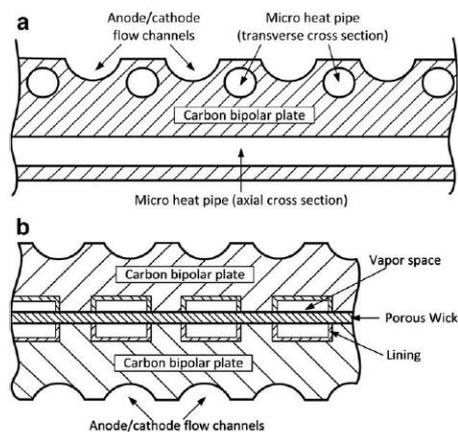


Figura 9.31. Conductos de calor para refrigeración de una PEM FC. a) Sistemas de muy baja potencia. b) Sistemas de baja y media potencia.

Los microtubos de calor se pueden implementar en sistemas de hasta 100 vatios, mientras que los tubos de calor se aplican en casos con potencia máxima de 1 kw.

9.6. Funcionamiento normal de la PEM FC.

La figura muestra un esquema de montaje de PEM FC para vehículos automóviles. Puede observarse el suministro de hidrógeno desde el depósito instalado al efecto, y el suministro de aire a través de un compresor.

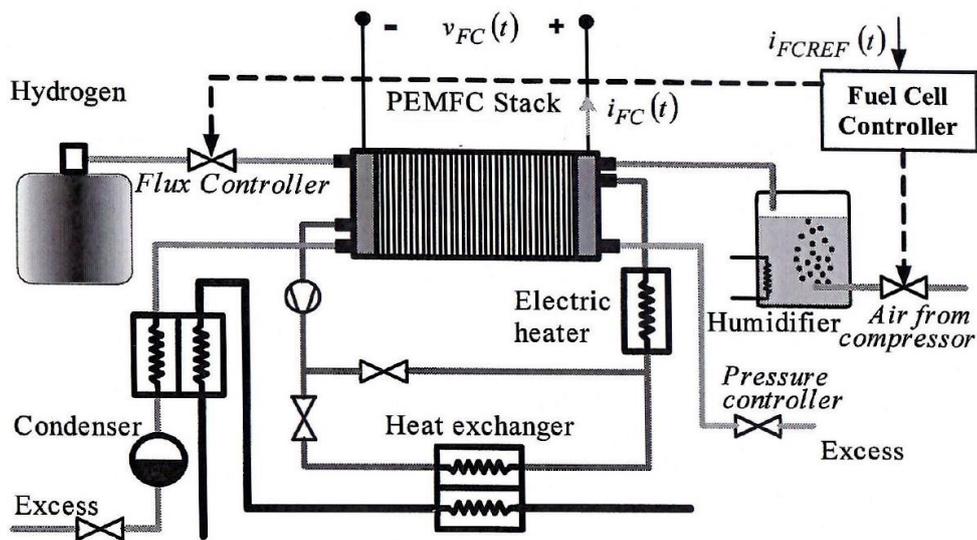


Figura 9.32. Esquema de montaje de una PEM FC de un automóvil.

El compresor asegura la alimentación de oxígeno cuando el coche inicia la marcha o comienza a frenar. El aire necesita humidificarse para evitar que, al ser introducido en la pila a más de 2 barías de presión, la pila se queme. Sería el mismo efecto que produce en nuestra piel el aire que sale de un secador de pelo. En las condiciones de presión y temperatura adecuadas, la velocidad del aire y del vapor de agua en los conductos de alimentación de oxígeno es la misma y por lo tanto los conductos de flujo de aire se rellenan a la misma velocidad con los dos gases.

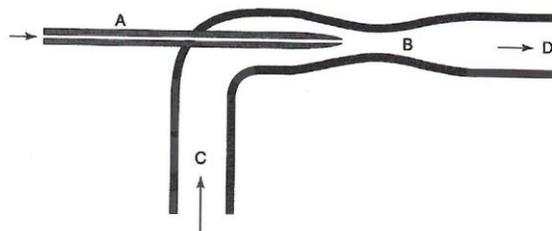


Figura 9.33. Representación esquemática del inyector de hidrógeno en conducto de alimentación del ánodo de la pila.

El hidrógeno sale a gran presión del depósito, por lo que el suministro de este gas se efectúa en frío, a muy baja temperatura, evitando que sea necesario humidificarlo.

El sistema está provisto de un regulador que permite ajustar la velocidad de relleno de gas hidrógeno al mismo valor que el del aire, mediante dos cambios de sección en el conducto de alimentación del gas. En la figura puede verse la sección A del inyector y las secciones B y D para regular la velocidad.

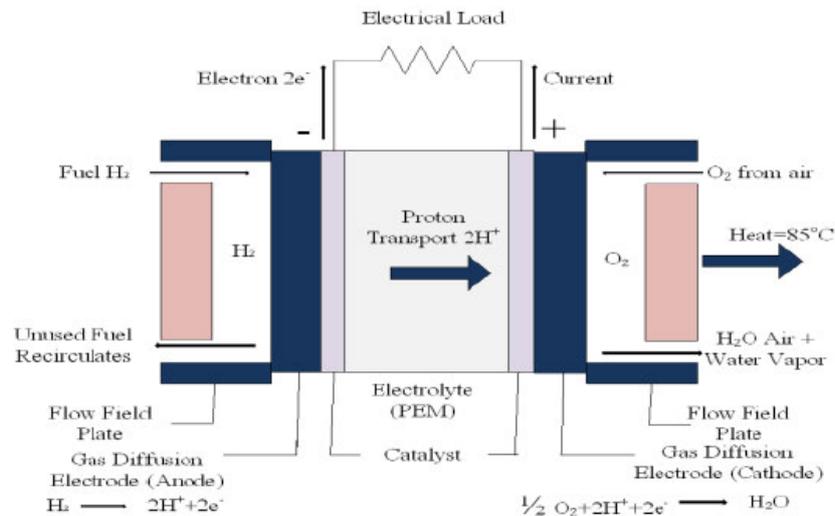


Figura 9.34. Nueva representación esquemática del funcionamiento de una pila de combustible.

El hidrógeno molecular que no reacciona puede ser reutilizado mediante una realimentación de salida a entrada en el conducto de alimentación del gas. En ese caso, el funcionamiento del inyector provocaría la succión de la masa de gas en la zona C.

En este punto conviene indicar que la presión dinámica generada por el hidrógeno molecular es mucho menor que la del oxígeno, debido a que el hidrógeno tiene una densidad aproximadamente 15 veces menor que la del aire. Esto daría lugar a esfuerzos no compensados en la membrana, por lo que los conductos de alimentación de hidrógeno han de ser rellenados previamente a una presión estática de 2 ó 3 barías aproximadamente. Otra posible solución a este problema es la utilización de un controlador de flujo de masa (Mass Flow Controller MFC) que envía a la conducción de gas un caudal determinado en unas determinadas condiciones de presión y temperatura. También, conviene señalar que el sistema funciona con unos coeficientes de exceso de hidrógeno y de aire en torno a unos valores máximos de 1,5 y 2, respectivamente.

El circuito de refrigeración, que también se utiliza para poner la PEM FC a la temperatura necesaria para iniciar el funcionamiento, puede ser de agua desionizada o de aceite.

9.6.1. Sensores para el funcionamiento de la PEM FC.

De acuerdo con lo expuesto en el apartado anterior, son necesarios determinados controles de presión y temperatura de cara a un funcionamiento continuo del dispositivo, evitando averías graves.

1. La pila necesitaría ajustar la presión en ambas entradas para que sea la misma. En algunos casos, una válvula entre los canales de alimentación de los dos gases

reaccionantes asegura el equilibrio entre las presiones de una y otra entrada. Habitualmente, esta válvula permite el paso de aire hacia la alimentación de hidrógeno. Dado que el nitrógeno es muy difícil que reaccione para formar un compuesto con otros elementos de la tabla periódica, se protege el dispositivo en caso de falta de hidrógeno.

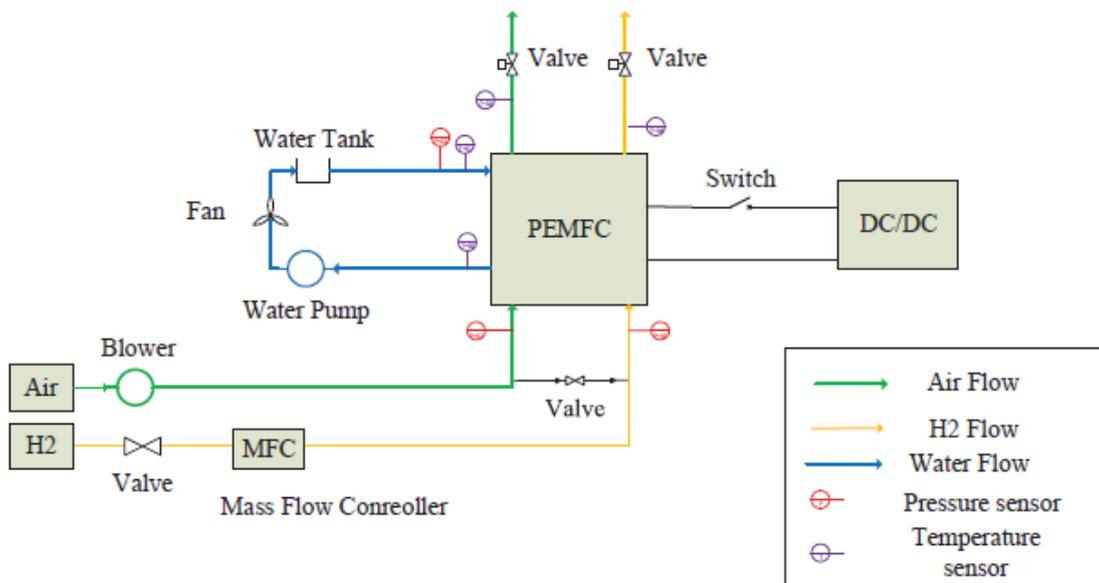


Figura 9.35. Representación esquemática de una PEM FC con una válvula para equilibrar la presión entre los conductos de aire e hidrógeno.

- La temperatura irá aumentando a medida que se vaya formando agua en el cátodo y obliga a la instalación de un circuito de refrigeración por agua, aceite o etanodiol. El sistema de refrigeración proporciona la temperatura necesaria en la pila para el arranque. La temperatura del fluido refrigerante se comprueba a la entrada y a la salida de la pila.

Al iniciar el funcionamiento de la pila de combustible, es necesario que ésta alcance una temperatura determinada: En el caso de PEM de baja temperatura 40 °C, para las PEM de alta temperatura 140 °C. Por esta razón, el circuito de refrigeración por agua dispone de un serpentín de caldeo que permite la puesta en funcionamiento de la pila. Por otra parte, los materiales de la PEM FC no pueden alcanzar los 80 ó 90 °C en el caso de baja temperatura y 180 °C en alta temperatura, durante el funcionamiento normal de la pila ya que se podrían causar daños estructurales y la correspondiente avería del sistema. Por este motivo, conviene controlar la temperatura interna de forma continua.

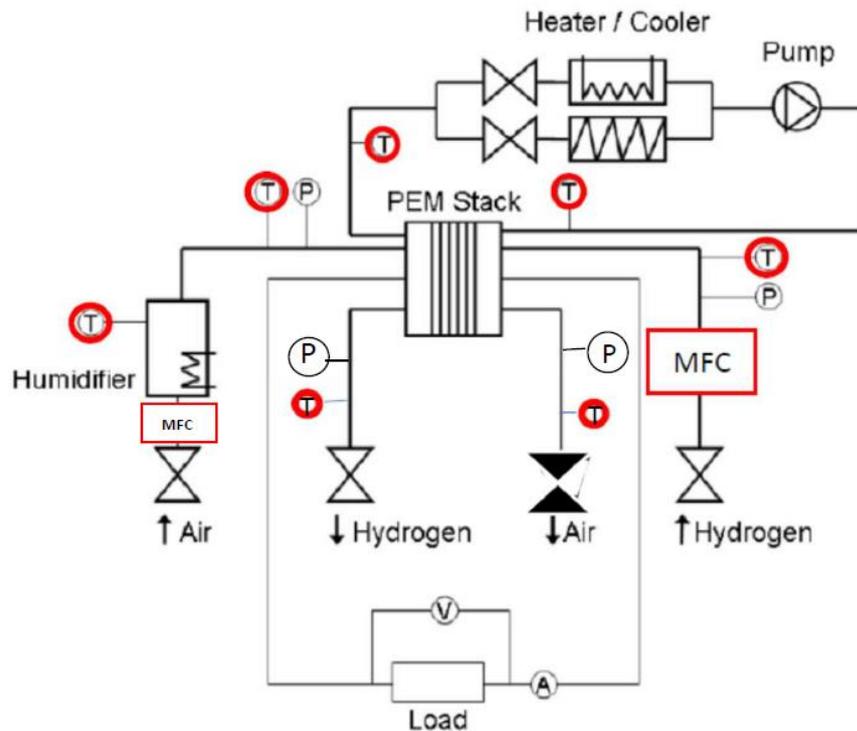


Figura 9.36. Pila de combustible PEM FC con red de sensores para su funcionamiento.

3. Se comprueba la temperatura del agua de humidificación y la del aire humidificado para evitar que pueda quemar las celdas. Antes del proceso de humidificación, se ajusta el caudal de aire a la salida del compresor para evitar que el vapor de agua falsee la medida. El caudal se suele fijar mediante un Controlador de Flujo de Masa MFC.

4. Aunque el hidrógeno sale del depósito a muy baja temperatura, se comprueba igualmente este punto para asegurar el correcto funcionamiento del sistema. La presión de hidrógeno a la salida del depósito, 700 barías, ha de rebajarse a 2 ó 3 barías antes de enviar el gas a los conductos de distribución. La cantidad de hidrógeno que se suministra al equipo, igual que la de aire, es medida mediante un Controlador de Flujo de Masa (Mass Flow Controller).

5. A la salida del canal de alimentación de aire, puesto que la formación de agua en el cátodo genera mucho calor, una válvula accionada por temperatura libera el gas exhausto y permite su renovación, manteniendo la presión constante.

6. En el ánodo, si la temperatura subiera por encima de la temperatura máxima de funcionamiento, también se liberaría gas a los conductos de evacuación de hidrógeno, por medio de otra válvula accionada por temperatura.
7. Desde el punto de vista eléctrico, puede medirse la tensión y la corriente de la pila y comprobar el punto de trabajo de funcionamiento dentro del rango de valores diseñado de acuerdo con la curva de polarización. Si el diseño es correcto, no se producirá falta de hidratación de la membrana con densidades de corriente elevadas.

9.6.2. Circuito de aire.

Ya se ha indicado con anterioridad que el aire y el vapor de agua que lo enfría han de viajar a la misma velocidad. El aire sale del compresor caliente. La presión aumenta, el volumen aumenta y la temperatura tiene que aumentar. La presión de vapor de agua en un margen de temperaturas en torno a la temperatura ambiente, 22º C, es de 50 kPa, 0,5 barías. Esto fuerza a una presión de aire 4 ó 5 veces mayor, entre 2 y 3 barías.

El aire que entra en los conductos de alimentación de gas, a una presión de 2 ó 3 barías, ha de contener el caudal necesario en todo momento para que la reacción de oxidación tenga lugar. Aplicando el teorema de Bernuilli:

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2$$

Los subíndices 1 son relativos a la salida del compresor, mientras que los subíndices 2 son los correspondientes a la conducción de alimentación de oxígeno o aire. Supongamos:

$$P_1 - P_2 = 0,01 \text{ bar}$$

Por la ecuación de continuidad:

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

Si, además, la relación entre las secciones de conducción es:

$$S_1 = 2 \cdot S_2$$

Se obtiene:

$$v_2 = 45 \text{ m/s}$$

Según lo calculado en el apartado 4.2, el caudal de aire necesario para la reacción final es:

$$30 \cdot 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} m^3 \text{ de aire/seg}$$

Si suponemos la máxima carga de 100 kw y la tensión de celda de 1 voltio, la velocidad obtenida indica que la sección de la conducción ha de ser de 6 cm², lo que implica un radio de tubería de 1,5 cm aproximadamente.

De los cálculos realizados se desprenden dos conclusiones:

- Inicialmente, P₂ puede ser cero con lo que la velocidad alcanzaría valores muy elevados.
- La presión dinámica es mucho más reducida que la estática.

La alimentación de aire consiste en un compresor, una válvula de control de presión, un dispositivo de control de flujo de masa, un mezclador de vapor de agua y varios dispositivos de evaporación para permitir que el aire entre en la pila lo más frío y seco posible.

El flujo de aire se regula a través del compresor y una válvula de control continuo de la presión. Un dispositivo de control de flujo de masa (MFC) permite ajustar el caudal independientemente de los cambios de presión y temperatura. El MFC se instala lo más próximo posible al compresor para que el vapor de agua utilizado en la humidificación no enmascare las medidas. El MFC controla el caudal de aire necesario en función de la corriente en la carga. El caudal de aire ya se ha indicado como:

$$30 \cdot 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} m^3 \text{ de aire/seg}$$

Para potencias elevadas, 100kw:

$$30 \cdot 10^{-3} m^3 \text{ de aire/seg}$$

O lo que es igual:

$$30 \cdot 10^3 cm^3 \text{ de aire/seg}$$

Para un radio de tubería de 1,5 cm:

$$v = 50 m/seg$$

La presión de aire para esa velocidad:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = 3,2 \cdot 10^{-2} bar$$

El caudal se divide entre el número de celdas, si suponemos que es de 300 celdas, para cada una tenemos un caudal:

$$10^2 \text{ cm}^3 \text{ de aire/seg}$$

Si suponemos una sección de conducto en los canales de alimentación de la celda de $\frac{1}{2}$ cm² se tiene una velocidad:

$$v = 2 \text{ m/seg}$$

Así pues, puede concluirse que la presión dinámica es mucho menor que la estática.

La presión de aire debe controlarse a la entrada y a la salida de la pila ya que una caída de presión en el interior de la PEM FC supone pérdida de flujo de aire y por lo tanto la existencia de fugas. Por otra parte, la presión a la entrada disminuye cuando aumenta la potencia de funcionamiento de la pila, mientras que la presión a la salida aumenta con la potencia entregada. La temperatura sube y la presión tiene forzosamente que aumentar. Podría existir, en consecuencia, una cierta controversia entre ambas medidas, por lo que es aconsejable siempre tener un correcto conocimiento del valor de ambas.

9.6.3. Circuito de hidrógeno.

El inyector y los adaptadores de velocidad del apartado 6 pueden ser de utilidad cuando la presión de hidrógeno es mayor que la presión normal de funcionamiento de la pila, entre 2 y 3 varias. Sin embargo, el hidrógeno del vehículo está almacenado a 700 barías, una presión demasiado elevada para ser manipulada en la tracción de un automóvil. Por otra parte, hay que regular la entrada de hidrógeno en la pila ya que la eficiencia del sistema depende de ello.

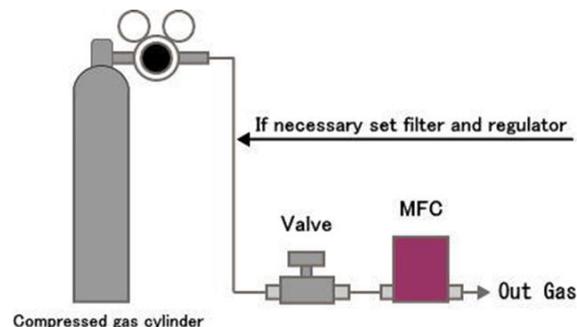


Figura 9.37. Depósito de hidrógeno con válvula reductora de presión y MFC.

La presión de salida del depósito se rebaja a niveles más manejables mediante una válvula reductora. La presión de salida de la válvula reductora estará cercana a un valor de 2 ó 3 barías, con el objeto de igualar la presión en los canales de entrada de aire y de hidrógeno.

Al igual que en el caso del aire, la presión dinámica es mucho menor que la presión estática, incluso en este caso es todavía más reducida debido al hecho de que la densidad del hidrógeno es muy baja.

Hay que rellenar los conductos de aire y de hidrógeno dentro de la pila a la misma presión, por lo que es necesario comprobar la presión tanto a la entrada como a la salida. La

presión en ambas conducciones se reduce después de cada reacción. En el caso del aire, el gas exhausto es inservible, ya no tiene oxígeno y ha de ser liberado. Por el contrario, el hidrógeno gas sobrante puede ser reutilizado por medio de un conducto de realimentación. El hidrógeno gastado en la reacción es el que se ha descompuesto de protones H^+ y electrones, el resto de hidrógeno molecular puede ser aprovechado nuevamente.

9.6.4. Controlador de flujo de masa (MFC).

El controlador de flujo de masa traduce el flujo de masa, moles por segundo, al volumen molar (22,4 litros por mol en condiciones normales de presión y temperatura), dando un caudal resultante en centímetros cúbicos por minuto (ccpm).

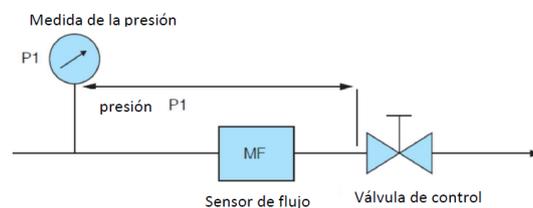


Figura 9.38. Diagrama de bloques de un MFC

El sensor de flujo permite calcular el caudal que ha de pasar por la válvula de control, ajustando la sección de salida en función de que el caudal haya de ser mayor o menor que el generado en ese momento.

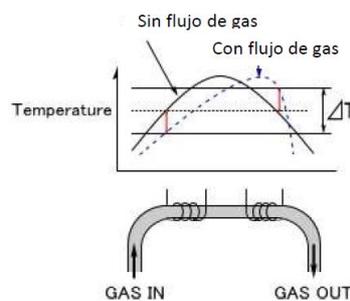


Figura 9.39. Distribución de temperatura en el sensor de flujo.

El funcionamiento del sensor de flujo está basado en tubo de muestra calentado, los flujos pasan a través de un tubo de alta precisión. Se aplica calor al tubo y el cambio de temperatura se mide. La diferencia de temperatura entre los dos puntos indica la cantidad de energía que el fluido ha absorbido, lo que depende de la masa en movimiento a través del tubo. Los caudalímetros de masa con sonda insertada utilizan el mismo principio, pero con dos sondas RTD (Resistance Temperature Detector) posicionadas en el flujo. El sensor superior mide la temperatura del fluido, mientras que el segundo se calienta a una temperatura superior a la del primer sensor. El calor se transfiere desde el segundo sensor al fluido a una tasa correspondiente a la tasa de flujo másico.

9.6.5. Posible implementación de la red de sensores.

La técnica de MEMS (Micro Electromechanical Systems) viene siendo utilizada desde hace algunos años, empleando Polidimetil-siloxano (PDMS) como dieléctrico y poliimida (PI) como capa de aislamiento.

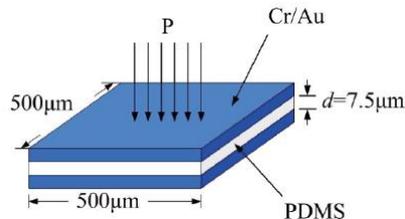


Figura 9.41. Sensor de presión capacitivo en tecnología MEMS.

La variación de la capacidad viene dada por la expresión:

$$\Delta C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{\Delta d}$$

En donde, A es el área de los electrodos, ϵ_0 es la permitividad del vacío, ϵ_r la permitividad relativa del dieléctrico y Δd la variación de la distancia entre las placas.

La resistencia RTD (Resistance Thermal Detector) puede ser utilizada como sensor de temperatura. Su característica viene dada por la ecuación:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \Delta T)$$

Donde R_0 es la resistencia a la temperatura de referencia, α es un coeficiente que debe ser constante con la temperatura y R es la resistencia a una temperatura dada cuya diferencia con la temperatura de referencia es ΔT . Utilizando una curva de calibración, puede transformarse la resistencia en temperatura.

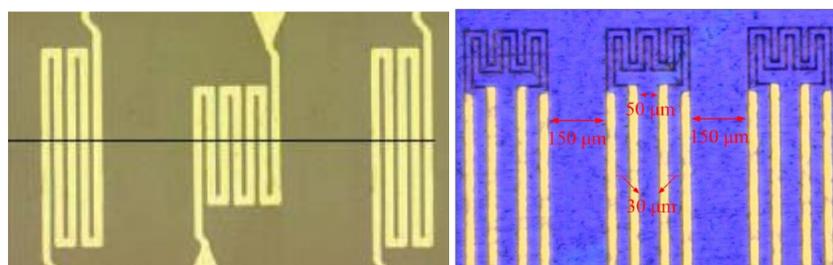


Figura 9.42. Estructura de dos TDR con un calentador entre ambos y otro posible microsensor de flujo.

La fabricación de un calentador con técnicas MEMS – PDMS consiste en un serpentin que se calienta al paso de una corriente como se muestra en la figura anterior. En el caso de un MFC, el calentador aumenta el pico de temperatura en el centro de los dos TDR, facilitando la medida del desplazamiento del máximo al paso del gas.

Los pasos en la fabricación de este tipo de dispositivos se muestran en la figura siguiente, para los tres tipos de sensores que se han descrito hasta ahora: Sensores de presión, sensores de temperatura y calentadores.

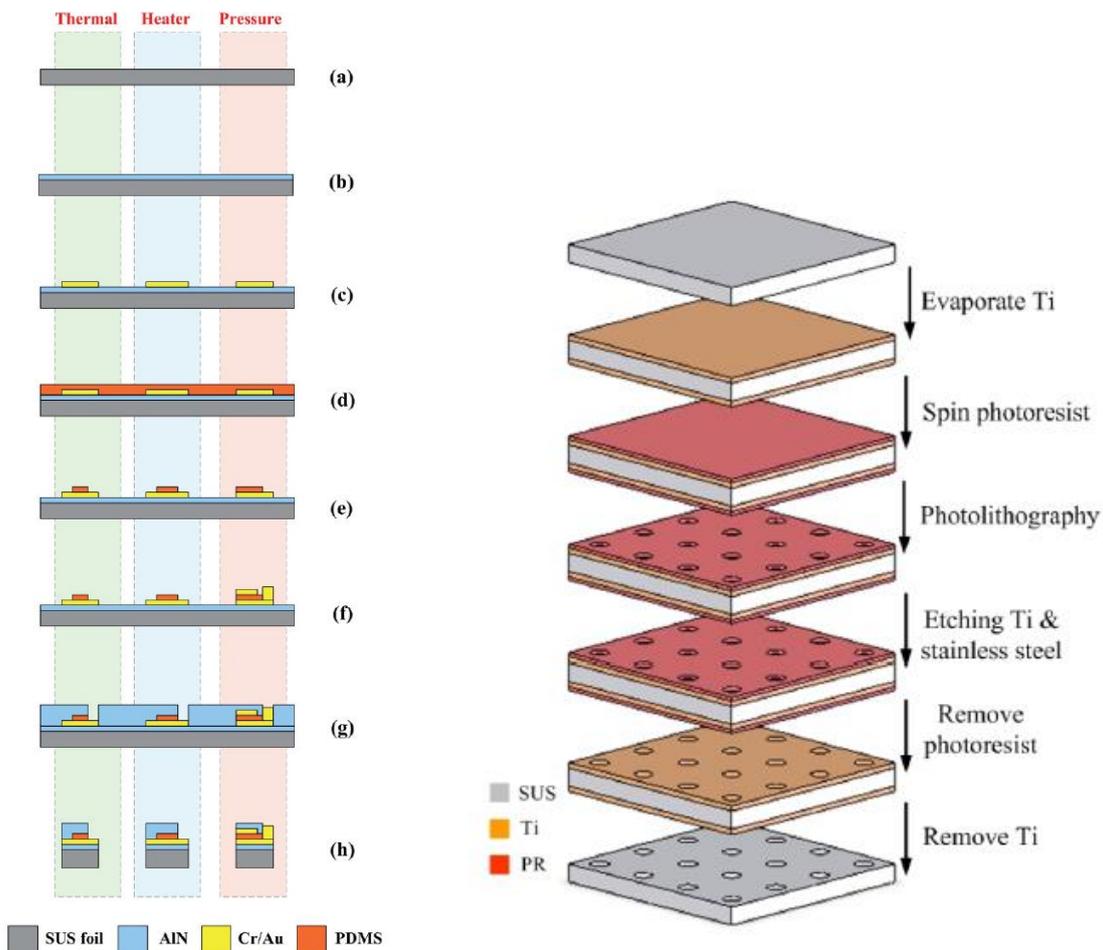


Figura 9.43. Proceso de fabricación de microsensors MEMS e implantación de huecos en la capa de difusión de gas.

Se parte de una lámina de acero inoxidable (a) sobre la que se deposita una película de nitruro de aluminio (b) que es buen conductor térmico y muy aislante como conductor eléctrico. El siguiente paso es depositar las capas inferiores de Cr/Au (c). Estas capas forman uno de los electrodos o la capa en forma de serpentín de los TDR y los calentadores. Se recubre la oblea de PDMS (d) y se recorta mediante técnicas de grabado (e). En caso de necesitarse se recrece un segundo electrodo (f) y se vuelve a depositar nitruro de aluminio (g). Finalmente, se corta el acero con técnicas de grabado y agua regia (h).

En el caso de los sensores capacitivos llegan a medirse variaciones de capacidad en torno a los $4\text{fF} / \mu\text{m}$, con valores totales próximos a 100 fF . Para los controladores térmicos de flujo de masa, pueden obtenerse valores de ΔT de 20°C con temperaturas en los microsensors de 125°C y el gas a temperatura ambiente.

Los sensores MEMS van incrustados en la capa de difusión de gas, alojados en pequeños huecos fabricados mediante técnicas fotolitográficas para controlar la presión, temperatura y el flujo de los gases reaccionantes.

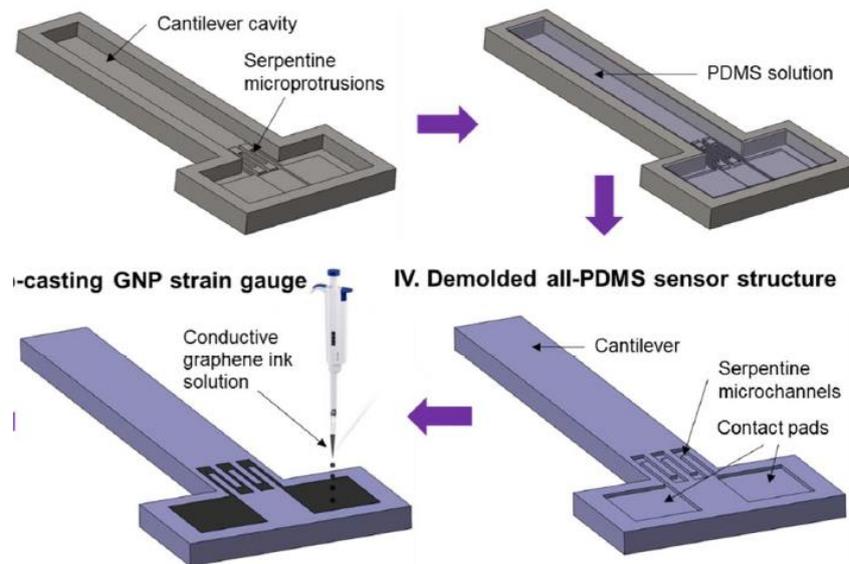


Figura 9.44. Sensor de flujo fabricado con impresora 3-D y PDMS.

También, empleando como material PDMS se fabrica este sensor de flujo aprovechando la impresión 3D. Funciona con flujo de gas, trabajando tanto a tensión como a compresión, haciendo variar la resistencia de serpentin existente entre electrodos.

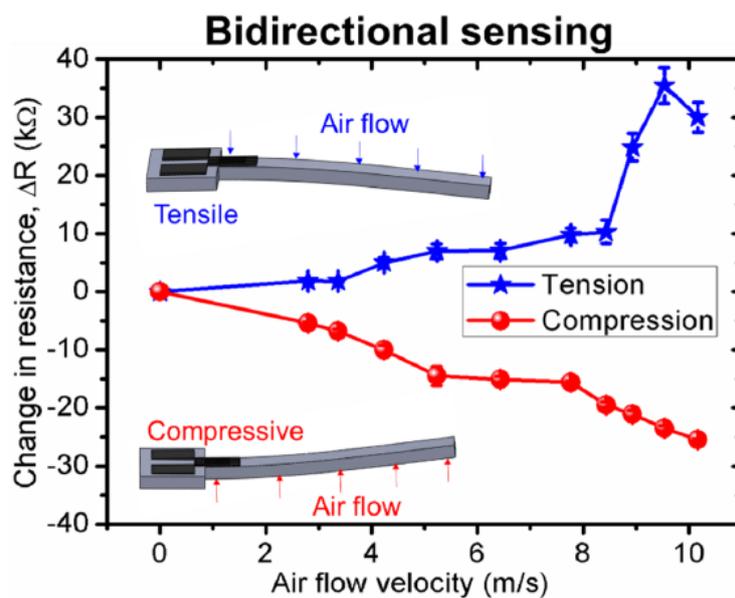


Figura 9.45. Curvas características del sensor de flujo.

La lengüeta del sensor tiene una longitud de 5 cm, con un ancho de 1 cm y un espesor también, de 1 cm. La fabricación se llevó a cabo con una técnica de impresión 3-D basada en laser para fabricar un molde de acero inoxidable donde luego se vertió el PDMS. La resistencia de serpiente se implementó con grafeno.

Este sensor de lengüeta podría ser utilizado igualmente como sensor de impacto en el volumen del coche destinado a los depósitos de combustible. Un cambio brusco en la velocidad provocaría un movimiento de vibración de la lengüeta y la correspondiente variación de la resistencia de grafeno.

9.7. Características del hidrógeno.

El hidrógeno es el átomo más común del Universo, pero no se encuentra libre en nuestro planeta. Es un vector energético ya que almacena energía que puede liberarse más tarde de forma controlada. Como gas tiene una densidad energética de 3 kWh/m³ y una densidad volumétrica de 0,0899 kg/m³, cada kg de H₂ contiene 30 kWh de energía, 2,4 veces más que el gas natural, 2,8 veces más que la gasolina o el gasóleo y 7 veces más que las mejores baterías de alto voltaje. Su almacenamiento, transporte y distribución requiere niveles de compresión muy altos (o enfriado a 253 °C bajo cero para condensarlo).

Se produce de forma industrial por distintos métodos: electrolisis, gasificación, reformado, etc y se fabrican más de 50 millones de toneladas al año. Como fuente de energía, el hecho de que pueda almacenarse y transportarse supone una gran ventaja frente a otro tipo de energías. Para generar hidrógeno por electrolisis se necesitan 57 kWh de energía eléctrica y 10 litros de agua para obtener un kg de H₂ de pureza elevada.

• CARACTERÍSTICA	• HIDRÓGENO	• OTROS
Densidad (gas)	• 0,0899 kg/m³ (0°C, 1bar)	• 1/10 del gas natural (GN)
Densidad (líquido)	70,79 kg/m³ (-253°C, 1bar)	• 1/6 del GN
Punto de ebullición	• -252,76 °C (1 bar)	• 90°C menos que GN licuado
Energía por unidad de masa LHV	• 120 MJ/kg	• triple que la gasolina
Densidad de energía LHV	• 0,01 MJ/L	• Un tercio del gas natural
Energía específica (licuado) LHV	• 8,5 MJ/L	• Un tercio del GN licuado
Velocidad de la llama	• 346 cm/seg	• 8 veces la del metano
Rango de ignición	• 4-77% volumen de aire	• 6 veces el del metano
Temperatura de auto ignición	• 585 °C	• 220 °C la gasolina
Energía de ignición	• 0,02 MJ	• 1/10 del metano
Límites de detonación	18-59 % volumen de aire	• 4 veces el del metano • 20 veces el del propano

La pila de combustible de hidrógeno produce energía limpia ya que se genera de un proceso electroquímico del que el producto resultante es el agua.

El hidrógeno puede ser usado como combustible básicamente con las mismas tecnologías para las que se utilizan los combustibles fósiles y desarrollar una potencia similar. La complejidad del hidrógeno reside en su manejo, ya que hay que almacenarlo bajo presión y al ser una molécula tan pequeña es propenso a sufrir escapes.

Entre las ventajas del vehículo de hidrógeno frente al de baterías destacan la autonomía, el peso y el tiempo de repostaje. Mientras que entre los inconvenientes se encuentran la complejidad, la eficiencia y, de momento al menos, el precio y la baja disponibilidad de puntos de repostaje. Como es lógico, se prevé que cada tecnología tendrá su parte de mercado según el uso y las necesidades del vehículo. En coches de uso diario con distancias medias de menos de 200 km, el coche eléctrico de baterías es perfectamente adecuado si se puede recargar durante la noche o mientras está aparcado. Para vehículos que requieren más energía para hacer distancias más largas como camiones, barcos o aviones, o vehículos donde el tiempo de recarga penaliza, como los taxis, el hidrógeno será una opción más viable.

Una de las primeras ventajas que acuden a la mente es la reducción de contaminantes al evitar la combustión propiamente dicha. Se llega a hablar de emisiones cero en el caso de las pilas de hidrógeno, que únicamente desprenden agua.

Con la misma potencia, unos 110 Kw, la autonomía de los vehículos con batería eléctrica es del orden de la mitad que los de pila de hidrógeno.

	Eléctrico 110 kw	Eléctrico 160 kw	Pila de hidrógeno 110 kw
Autonomía	275 km	385 km	600

9.7.1. El almacenamiento del hidrógeno.

Es muy importante el concepto de seguridad en relación con el almacenamiento y la utilización del hidrógeno. El hidrógeno tiene una de las energías específicas (energía por kg) más altas entre los elementos de la Tabla Periódica pero su densidad está entre las más reducidas (energía por metro cúbico). Esto significa que para almacenar una cantidad relativamente grande de hidrógeno en un volumen reducido es necesario comprimirlo a presiones muy elevadas. Otro problema añadido es que, al contrario que otros combustibles gaseosos, el proceso para licuar el hidrógeno es complejo. Tiene que ser enfriado por debajo de los 22 °K, presentando en estado líquido una densidad igualmente baja de 71 kg / m³. Los métodos utilizados actualmente para el almacenamiento de hidrógeno son: 1. Compresión en cilindros de gas. 2. Almacenamiento como líquido. 3. Almacenamiento como líquido criogénico

El hidrógeno posee el peso molecular más bajo que cualquier otro gas. Tiene una conductividad térmica muy alta, velocidad molecular media igual a la velocidad del sonido y la viscosidad y densidad más baja de todos los gases. Esto da lugar a tasas de pérdidas a través de pequeños orificios más rápidas que otros gases. El hidrógeno se pierde 2,8 veces más rápido que el metano y 3,3 veces más rápido que el aire. Además, el hidrógeno es altamente volátil e inflamable y en ciertas circunstancias con determinadas mezclas de aire puede explotar. El hidrógeno, por tanto, debe ser manipulado con mucho cuidado. Los sistemas deben diseñarse con una muy baja probabilidad de pérdidas y deben ser controlados regularmente en orden a detectar esas pérdidas.

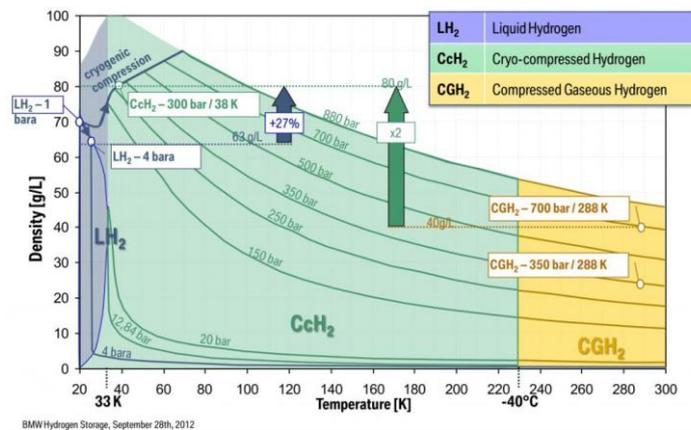


Figura 9.46. Estado del hidrógeno según las condiciones de presión y temperatura.

Considerando todas las propiedades en conjunto, puede decirse que el hidrógeno es incluso en algunos aspectos menos peligroso que otros combustibles utilizados habitualmente. El mayor problema del hidrógeno es la muy baja energía de ignición, lo que supone que el fuego puede iniciarse muy fácilmente, y además, hay que hacer hincapié en el hecho de que la llama es imperceptible al ojo humano. Sin embargo, estas energías son más bajas que las que podemos encontrarnos en la mayoría de los casos prácticos. Una chispa puede iniciar un fuego en cualquier tipo de combustible, no obstante, en el caso de hidrógeno la explosión tendrá lugar con concentraciones de combustible en aire del 18 % como mínimo, mucho mayores que las de otros combustibles. La temperatura de ignición del hidrógeno es notablemente más alta que la de otros combustibles.

Otro problema, que ha de tenerse en cuenta, es el amplio rango de concentraciones en las que puede producirse la ignición, deflagración ó incluso la detonación. Sin embargo, la alta volatilidad del hidrógeno y su elevada velocidad molecular media provocan una rápida dispersión del gas en el aire.

Actualmente se almacena hidrógeno como gas presurizado en bombonas a alta presión o como líquido criogénico en tanques aislados con una temperatura interna de -253 °C.

9.7.2. El hidrógeno almacenado como un gas comprimido.

El sistema presenta las siguientes ventajas: Es sencillo, el tiempo de almacenaje es ilimitado y no altera la pureza del hidrógeno. El método más sencillo desde un punto de vista técnico y el más ampliamente utilizado es el almacenaje de hidrógeno en estado gaseoso en cilindros presurizados. Estos cilindros existen en todo tipo de tamaños para adaptarse a las necesidades del usuario.

La compresión a 20 MPa para almacenamiento en cilindros de acero es la más utilizada pero algunas aplicaciones como el vehículo eléctrico se necesitan densidades de almacenamiento mayores. La utilización de cilindros de acero presenta algunos inconvenientes: Su elevado peso, la contaminación del metal por la formación de enlaces CH₄ que se adhieren a las paredes metálicas del contenedor en forma de burbujas y debilitan su estructura, la salida incontrolada de gas del depósito puede propulsar el vaso del depósito con fuerza.

Los vehículos eléctricos han de tener una autonomía de unos 500 ó 600 km para lo cual se necesitan entre 5 y 10 kilos de hidrógeno a bordo. Hay restricciones muy rigurosas sobre el volumen y el peso de los depósitos situados a bordo de los vehículos eléctricos por lo que los fabricantes de automóviles consideraron inicialmente los métodos de hidrógeno a alta presión y criogénico. Finalmente, el estándar adoptado fue el de alta presión, debido a que el hidrógeno líquido es menos salubre que el hidrógeno gas. Como se indica en la tabla siguiente y en relación con el modo en que son fabricados, se conocen cuatro tipos de depósitos:

TIPO	MATERIALES	PRESIÓN (Bar)	COSTE (\$/kg)	DENSIDAD (% peso)
I	Todo metálico, muy pesado	300	83	1,7
II	Acero o Al, recubierto de fibra de vidrio en zona cilíndrica.	200	86	2,1
III	Aluminio recubierto	700	700	4,2
IV	Materiales compuestos	700	833	11,3

Tipo I. Los tanques tipo I son muy pesados. También es cierto que son los más económicos. Se utilizan para almacenar hidrógeno en los laboratorios. Este tipo de depósitos es muy pesado y tiene paredes muy gruesas lo que provoca que su capacidad gravimétrica sea muy pequeña, en torno al 1,7 %.

Tipo II. Son metálicos, de acero o aluminio y reforzados con materiales compuestos de fibra de carbono o vidrio en la sección cilíndrica del depósito. Siguen siendo depósitos muy pesados, lo que les hace inviables para su uso en automoción, pero son utilizables en

aplicaciones estacionarias. En particular, dada las elevadas presiones que son capaces de soportar suelen emplearse como depósitos de alta presión en las hidrolineras.

Tipo III. Constan de un forro metálico interno con o sin costuras a fin de evitar las fugas de hidrógeno por difusión, recubierto todo ello por un material compuesto dispuesto en distintas direcciones. La parte metálica es normalmente de aluminio, aunque también puede ser de acero. Los más resistentes son aquellos que emplean fibra de carbono como material compuesto, siendo capaces de soportar hasta 700 barías. En este caso la mayor parte de la carga estructural es soportada por el material compuesto. La eliminación de paredes gruesas de materiales metálicos y el mayor uso de materiales compuestos hace que el peso de estos depósitos disminuya en comparación a los de tipo I y II.

Tipo IV. Tiene un revestimiento interno de material plástico, habitualmente polietileno de alta densidad, para evitar la difusión del hidrógeno, reforzado mediante fibras de carbono en distintas direcciones que recubren todo el forro de plástico. En la parte más externa suele contar con un recubrimiento de fibra de vidrio a fin de proteger la superficie externa. Estos tanques tipo IV mantienen las válvulas metálicas para poder llevar a cabo la recarga del depósito y el suministro de hidrógeno. Soportan una presión máxima aproximada de 700 bar. Al eliminar todo el material metálico del depósito, son mucho más ligeros que los de los tipos I y II. Sin embargo, el forro interno de plástico es peor barrera a la difusión del hidrógeno que los metales. Por otra parte, aunque los depósitos tipo IV son mucho más ligeros que los del tipo I y II, también son mucho más caros debido al uso de una gran cantidad de fibra de carbono. Con ellos es posible llegar a alcanzar una densidad gravimétrica de hidrógeno de hasta el 11.3 %, en comparación al 1,7% de los del tipo I. También, es importante destacar que el depósito tipo IV es capaz de absorber impactos 5 veces mayores que uno equivalente de acero, de tipo I ó tipo II.

9.7.3. Sensores para el almacenamiento.

Actualmente el almacenamiento de hidrógeno de forma segura, eficiente y maximizando las capacidades volumétricas y gravimétricas es un gran reto y es el foco de un gran número de investigaciones.

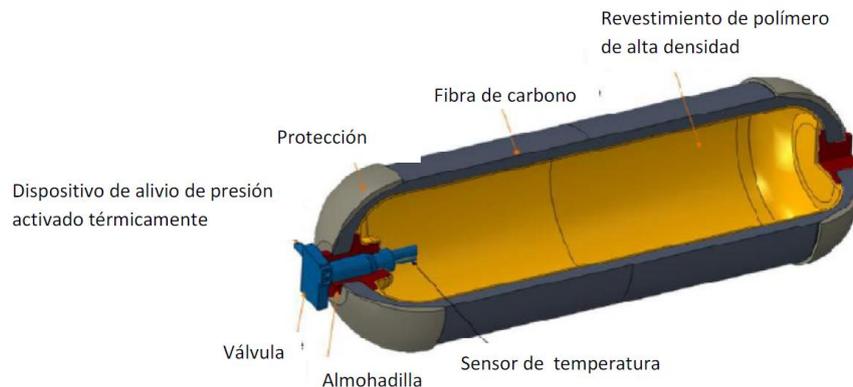


Figura 9.47. Depósito de hidrógeno a presión de material compuesto para automóviles.

Se trata de equipos diseñados para trabajar a 70 MPa (700 barías) para vehículos de uso personal y familiar y a 35 MPa (350 barías) para vehículos de tipo industrial y autobuses.



Figura 9.48. Diferencia de espesor en las paredes del depósito según la presión de almacenamiento: 35 ó 70 MPa.

Una pérdida accidental de hidrógeno puede originar la ignición del combustible al contacto con el aire produciendo la combustión hasta que se agote el hidrógeno. No obstante, este problema se atenúa bastante con la instalación de válvulas de alivio de presión y discos de ruptura que liberan el gas de forma instantánea y segura vertiéndolo al conducto de ventilación.

En este tipo de tanques de almacenamiento de hidrógeno montados a bordo de los vehículos se permiten sobrepresiones de corta duración que suelen tener lugar durante el rellenado cuando el calor resultante de la compresión provoca un incremento de la temperatura. El valor de esta sobrepresión transitoria ha de situarse por debajo de la

máxima presión de trabajo permitida (MAWP) que es del orden de un 125 % de la presión normal de funcionamiento.

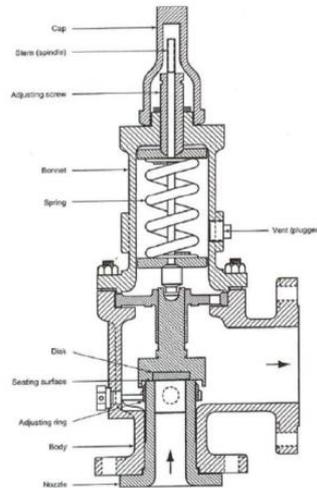


Figura 9.49. Detalle de una válvula con disco de ruptura.

Los tanques de combustible de materiales compuestos son mucho más ligeros que los fabricados con acero y soportan niveles de presión muy parecidos. Normalmente, van instalados con sensores de presión y temperatura. El sistema de almacenaje está equipado con un dispositivo y una válvula de liberación de presión que actúa cuando se supera la presión máxima de funcionamiento (MOP) que es un 110 % de la presión de trabajo máxima permitida (MAWP).

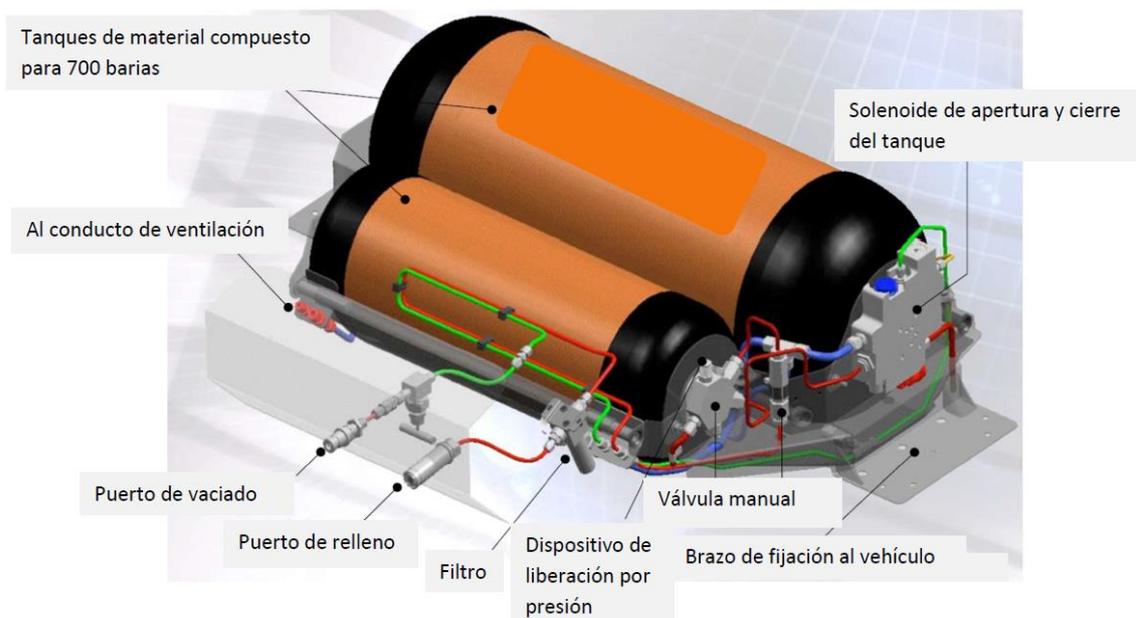


Figura 9.50. Disposición de depósitos a bordo de un automóvil.

Una válvula de solenoide se conecta directamente a cada tanque para controlar el flujo de hidrógeno. El solenoide se excita y permite la salida de gas cuando el vehículo se pone en funcionamiento y se desconecta cerrando cuando se saca la llave de contacto. La válvula de solenoide se desconecta igualmente cuando la tensión de la pila cae de forma inesperada.

La utilización de sensores de pérdidas de hidrógeno ha sido sugerida pero no es obligatoria. Cuando alguno de los sensores de hidrógeno detecta una fuga de gas, las válvulas de solenoide cierran automáticamente, tratando de prevenir cualquier posible ignición.

El dispositivo de alivio de presión activado térmicamente (TPRD) libera el gas del tanque cuando la temperatura del hidrógeno alcanza los 110 °C (230 °F). En el mismo dispositivo, va instalado un disco de ruptura y la válvula de liberación de presión (PRV) que va montada sobre el Regulador de Presión de Hidrógeno y que liberaría hidrógeno a la atmósfera si la presión en el conducto de gas sobrepasa un valor determinado (MOP).

La válvula de exceso de flujo (EFV) funciona como un mecanismo de prevención de un posible exceso en la descarga de hidrógeno del tanque de combustible en caso de daño o rotura en el conducto de gas.

Los sensores de impacto frontal y trasero forman parte del sistema de seguridad de colisiones del vehículo y están instalados en el parachoques delantero y en el suelo del asiento trasero. En caso de colisión, se corta automáticamente el flujo de hidrógeno al vehículo que como consecuencia se apagará.

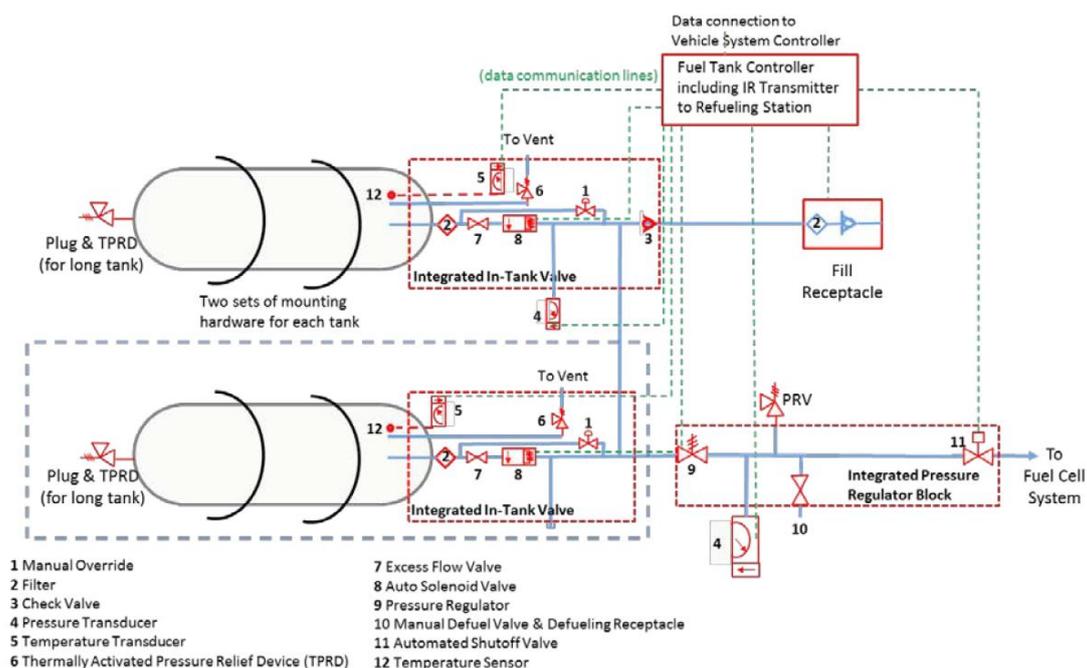


Figura 9.51. Esquema de un sistema de almacenamiento a bordo con dos tanques.

En la figura anterior puede verse un esquema de un sistema de almacenamiento a bordo con dos tanques. A la entrada, una válvula de actuación manual, un filtro y una válvula de retención que permite el paso de gas en un solo sentido. En cada uno de los tanques, un sensor y un indicador de temperatura, un indicador de presión, un dispositivo de alivio de presión activado térmicamente (TPRD), una válvula de exceso de flujo y una válvula de cierre por activación de un solenoide. A la salida, un regulador de presión, una válvula de cierre automático y una válvula manual para el vaciado de los depósitos.

Todos los elementos están conectados con un dispositivo de control que puede transmitir en la banda IR e intercambiar información con la máquina expendedora de la estación de servicio.

9.7.4. Sensores para el volumen del vehículo destinado a pasajeros.

Se trata de tres tipos de sensores: sensores de hidrógeno, sensores de llama de hidrógeno y sensores de humo.

a) Sensores de hidrógeno.

En la parte del coche que aloja el motor y en el volumen destinado a los pasajeros, aunque no están regulados por la normativa, los fabricantes suelen instalar un mínimo de tres sensores para detectar fugas de hidrógeno. La detección y cuantificación de hidrógeno molecular en niveles bajos de concentración tiene actualmente una gran importancia en distintas aplicaciones como las energías limpias, control medioambiental o seguridad pública. En este contexto, los transistores FET (Field Effect Transistor) tanto convencional como de efecto túnel TFET o de efecto túnel mejorado con plasma (CPE-TFET) y MOSFET se están revelando como detectores de hidrógeno muy sensibles y fiables al modular sus características con la cantidad de hidrógeno existente en el ambiente. El transistor TFET tiene la característica de proporcionar la misma corriente de drenador para una tensión de puerta más reducida.

Las estructuras C-MOS y MOSFET viene siendo estudiadas como sensores de H₂ desde la década de los 80. Las moléculas de H₂ se disocian en átomos en la parte externa de la puerta metálica en la estructura FET debido a la acción catalizadora del Paladio. Los átomos de hidrógeno pueden reaccionar con el oxígeno del ambiente dando moléculas de agua. Las moléculas de hidrógeno que no se disocian se alejan de la zona metálica. Los átomos de hidrógeno que quedan sobre la superficie de Paladio se difunden a través del metal hasta la interfaz metal / aislante del FET y se polarizan. La presencia de estos dipolos atómicos origina una carga ligada a la interfaz metal / aislante que altera las características del FET y modula la corriente de drenador en función de la carga de hidrógeno para una misma tensión de puerta. Se detectan así cantidades de hidrógeno de 200 partes por millón (ppm).

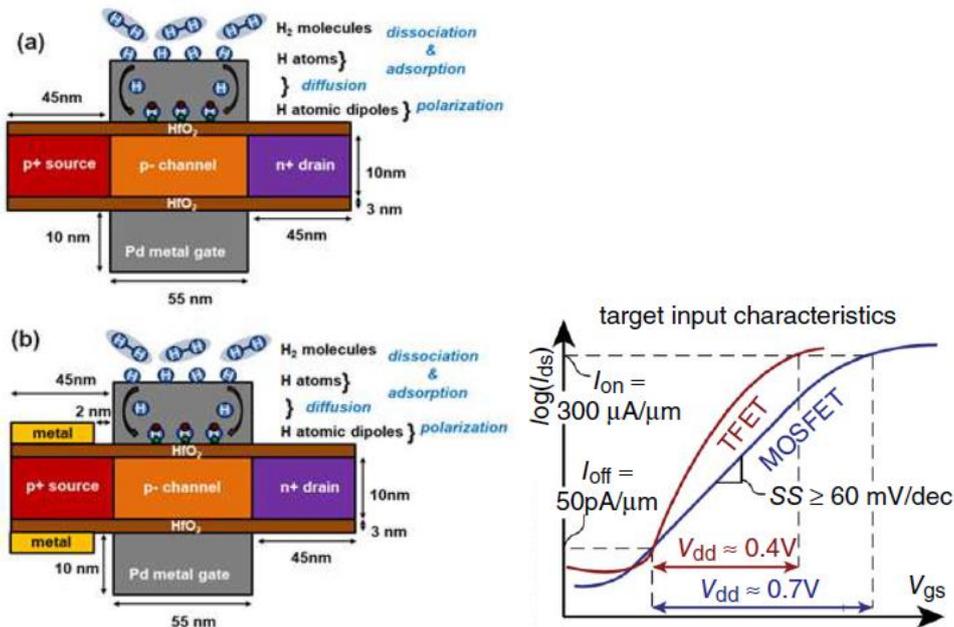


Figura 9.52. Comportamiento de una estructura a) TFET y b) CPE-TFET y c) característica V-I de un TFET.

Hoy en día existen múltiples estructuras de este tipo, por ejemplo, los transistores orgánicos de película delgada (OTFT) que también tienen muy alta sensibilidad y fiabilidad en la detección de hidrógeno. Todos ellos con la ventaja de que funcionan con tensiones muy bajas y un consumo muy reducido.

b) Sensores de llama de hidrógeno.

La llama de hidrógeno es casi imperceptible al ojo humano. Tampoco, produce humo ni hollín, si bien una vez que se ha producido el fuego pueden entrar en combustión otros materiales que si sean detectables tanto por la llama como por el humo. Consecuentemente, la instalación de sensores de llama y de humo pueden ser claves para evitar daños personales en accidentes y averías. Por esta razón resulta de interés una clasificación de los tipos de fuego en función del material que entra en combustión.

Symbol of the fire class	Characteristics of the fire class	Symbol of the fire subclass	Characteristics of the fire subclass
A	Combustion of solids	A1	Combustion of solids is accompanied by smoldering (for example, wood, paper, straw, coal, textile)
		A2	Combustion of solids isn't accompanied by smoldering (for example, plastics)
B	Combustion of liquids	B1	Combustion of liquids, insoluble in water (for example, gasoline, ethers and esters, petrol), and liquefied solids (for example, paraffin)
		B2	Combustion of liquids, soluble in water (for example, alcohol, methanol, glycerin)
C	Gas Combustion (for example, household gas, hydrogen, propane)	—	—
D	Combustion of metals	D1	Combustion of soft metals, except for the alkaline (for example, aluminum, magnesium and their alloys)
		D2	Combustion of alkaline metals and other similar (for example, sodium, potassium)
		D3	Combustion of metallic connections (for example, metalloorganic connections, hydrides of metals)

Figura 9.53. Clasificación del fuego dependiendo del tipo de material en combustión.

Los sensores de llama de hidrógeno más utilizados trabajan en las bandas UV e IR y detectan la radiación a frecuencias ópticas en la zona del espectro no visible. Dado que se trata de dispositivos de estado sólido, con el objeto de que la luz solar no sature los detectores, las bandas de funcionamiento son las señaladas en la figura: 0.28, 2.8 y 4.3 μm . En estas zonas espectrales, la luz solar no se solapa con la luz producida por una llama, por lo que pueden instalarse en cualquier parte del habitáculo del vehículo.

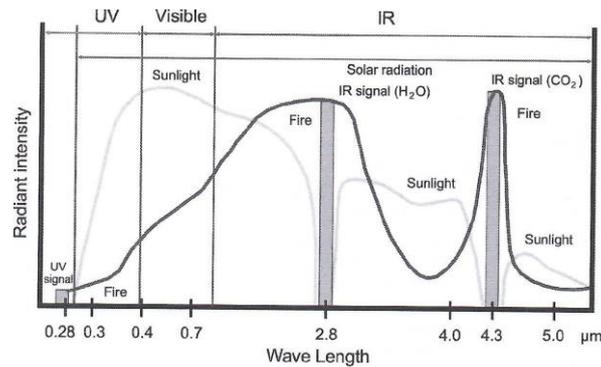


Figura 9.54. Características espectrales de la llama de hidrógeno y de la luz solar.

Algunos detectores de llama de hidrógeno están centrados en la banda de los 2,8 μm . En esta zona la luz de la llama de hidrógeno se debe fundamentalmente a las moléculas de vapor de agua, dando lugar a una detección rápida del fuego y evitando falsas alarmas que pudieran originarse por arco eléctrico, descargas atmosféricas, etc.

Un sensor de este tipo, en la zona UV, puede estar compuesto por una lente, un filtro de color, un fotodiodo y un amplificador CMOS, todo ello encapsulado en plástico. El amplificador convierte los picoamperios de corriente generados por el fotodiodo en milivoltios por medio de la resistencia de 1 G Ω . Las medidas se han realizado con una llama situada a 20 metros del dispositivo.

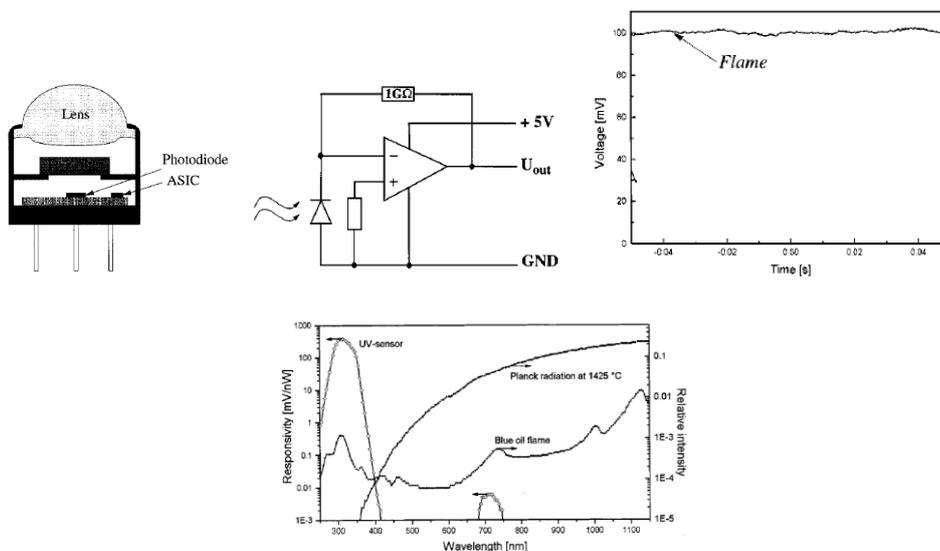


Figura 9.55. Características del sensor de llama de hidrógeno.

La tensión de salida se mantiene prácticamente constante y puede observarse como la curva de sensibilidad del sensor tiene un máximo en los 310 nm y que es muy selectivo ya que la relación con cualquier señal entre los 400 y los 1.100 nm está por encima de 10^4 .

c) Detectores de humo.

Los detectores de humo funcionan captando la luz de un diodo LED o láser, recogida en un fotodiodo que actúa como receptor.

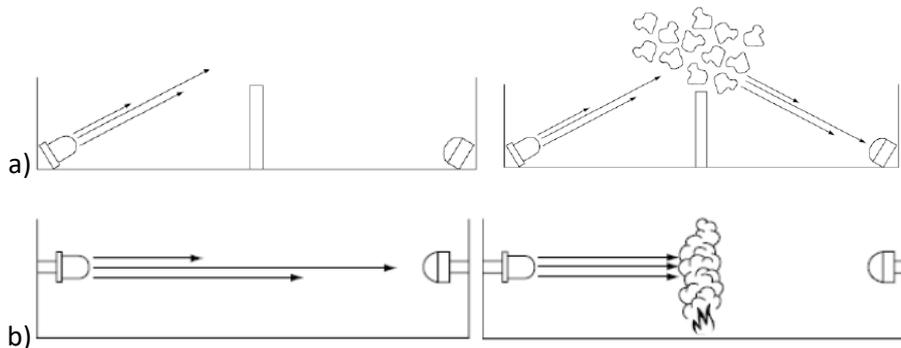


Figura 9.56. Tipos de sensores de humo. a) Luz dispersa. b) Luz bloqueada.

Las partículas de humo entran en la cámara del sensor y producen la dispersión o el bloqueo del rayo de luz que emite la fuente luminosa, un diodo LED o un diodo láser. La luz dispersa por efecto del humo llega al fotodiodo y es detectada la presencia de partículas de humo en el ambiente.

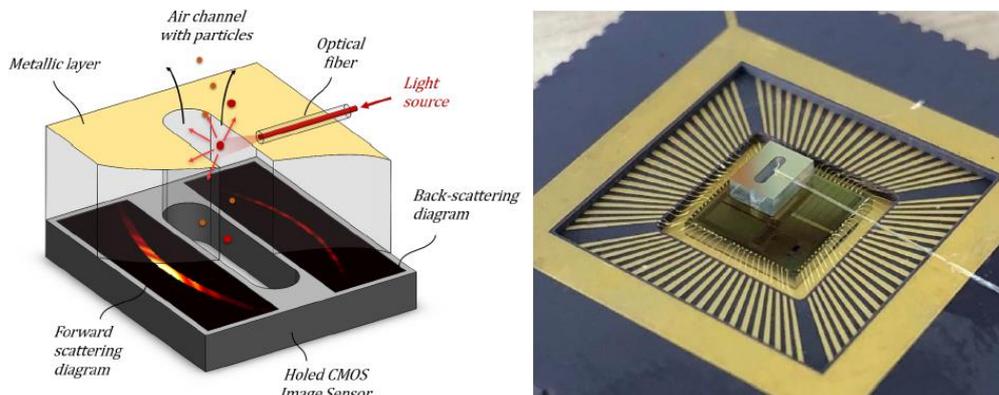


Figura 9.57. Sensor miniaturizado de humo por dispersión de luz actual.

En la figura se muestra un sensor de humo más actualizado, aunque el principio de funcionamiento es el mismo. La luz de un diodo llega al dispositivo a través de una fibra óptica integrada en el mismo. La luz ilumina a un sensor de imagen CMOS, similar a una matriz CCD pero con mejores prestaciones. Las partículas de humo, de un diámetro de algunas micras, dispersan la luz y el sensor CMOS capta la imagen de la luz dispersa que se forma. La imagen es procesada numéricamente para conocer el tipo de material en combustión. El volumen de detección creado es un cono de longitud $500\ \mu\text{m}$ y apertura numérica 0,22, para asegurar la proximidad entre la

partícula de humo iluminada y la zona donde se capta la imagen. La fuente de luz es un diodo LED de 637 nm con una potencia óptica de 1,5 mw.

De acuerdo con la teoría de Lorenz-Mie, la luz dispersa por una partícula forma un diagrama de dispersión que es función del tamaño de la partícula y del material, dando lugar a una huella que permite identificar qué tipo de compuesto está ardiendo en unos segundos, por lo que se puede atajar el problema en sus inicios.

Ya se ha comentado que la llama de hidrógeno no produce humo por lo que es necesario que otros materiales entren en combustión para detectar la presencia de humo.

d) Otras consideraciones de interés.

Como se ha indicado en el apartado 10.6.5. el sensor de lengüeta podría ser utilizado como sensor de impacto en el volumen del coche destinado a los depósitos de combustible. Un cambio brusco en la velocidad provocaría un movimiento de vibración de la lengüeta y la correspondiente variación de la resistencia de grafeno.

El vehículo de hidrógeno ha de ir señalizado no sólo en el frontal y la parte trasera, también ha de hacerse visible en los laterales que se trata de un vehículo de hidrógeno, para en caso de accidente proteger a las personas que puedan intentar prestar tareas de auxilio.

9.7.5. El repostaje en las hidrolineras.

Algunos informes del National Physical Laboratory (NPL) de Londres en 2018, hacían previsión de más de 1,5 millones de vehículos de hidrógeno en el Reino Unido en 2030. También, señalaban unas 1.100 hidrolineras en aquel país para esas fechas. Sin embargo, el repostaje de hidrógeno presenta ciertos inconvenientes.

Si un gas a temperatura moderada se expande a través de una válvula, el gas se calienta, pero si la temperatura inicial de ese gas se sitúa por debajo de la temperatura de inversión, la expansión de dicho gas provoca una reducción de la temperatura en vez de un calentamiento. A este efecto, se le denomina “Efecto de Joule-Thomson”.

Durante el proceso de rellenado de los depósitos de gas, el calor originado en la compresión y también, el debido al efecto Joule-Thomas, dan lugar a que la temperatura en el interior de los depósitos aumente bruscamente. Sin embargo, la norma ISO 15869 no permite que la temperatura interior de los depósitos supere los 85 °C por criterios de seguridad. La temperatura del gas almacenado en la estación de servicio tampoco debe estar por debajo de los -40 °C, porque el gas hidrógeno pasaría de ser comprimido a crio-comprimido con el consiguiente cambio de densidad, como puede verse en la Figura 72 del apartado 10.7.1., y por consiguiente, el cambio en la cantidad repostada.

Un rellenado muy rápido, se traduce en un aumento brusco de la temperatura. La tasa de rellenado más alta esta normalizada en 60 g/s (10 kg/3600 s). Un aumento de temperatura se traduce en un rellenado por debajo de la capacidad nominal de los tanques de hidrógeno, con la consiguiente reducción en la autonomía del vehículo. Por otra parte, el proceso de rellenado de los depósitos debe hacerse en un tiempo no mayor de 5 minutos en orden a ofrecer al usuario la misma facilidad para repostar que los vehículos que circulan con combustibles fósiles.

Cuando la máquina dispensadora de gas termina la tarea del rellenado, los tanques se van enfriando a medida que transfieren el calor a su entorno que se supone más frío. Este enfriamiento está acompañado de una disminución de la presión en el interior del depósito y este proceso se mantiene hasta que la temperatura del gas es la misma que la temperatura ambiente. La presión al final de este proceso es menor que la presión al final del rellenado y si es menor que la presión nominal de trabajo, el tanque ha sido rellenado por debajo de su nivel y la densidad del hidrógeno también será inferior a la nominal.

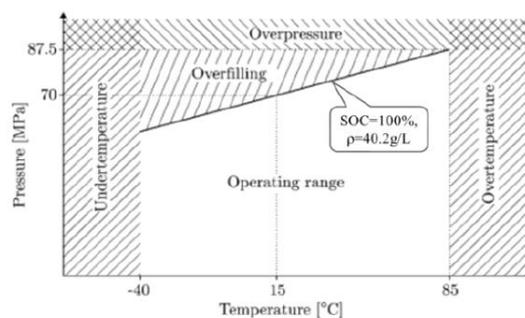


Figura 9.58. Rango de utilización de un depósito de 70 MPa de Hidrógeno.

No está permitido que la temperatura al final del repostaje supere los 15 °C y la presión nominal de trabajo (NWP). Sin embargo, normalmente la temperatura final está por encima de los 15 °C por lo que la presión suele ser ligeramente mayor que la nominal y se asegura el rellenado al 100 % después del enfriamiento de los tanques.

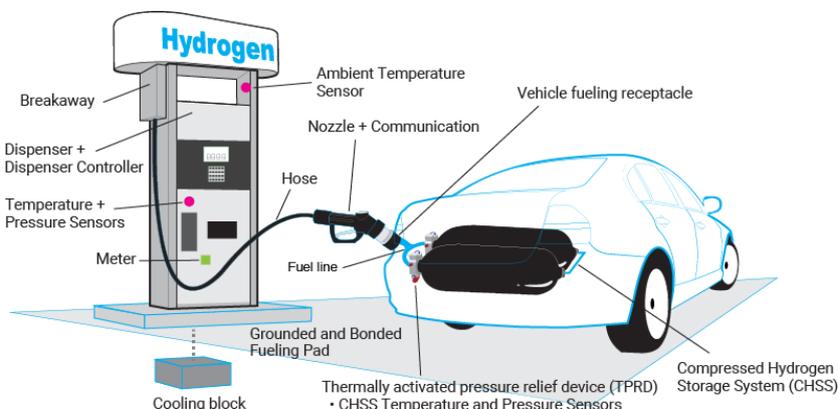


Figura 9.59. Máquina dispensadora de Hidrógeno con sensores de presión y temperatura.

Durante el rellenado, la presión puede alcanzar un valor un 25 % por encima de la presión nominal, llegando a los 87,5 MPa a la temperatura máxima de 85 °C.

Las estaciones de servicio están equipadas con máquinas dispensadoras dotadas de sensores de presión y temperatura para que el suministro se lleve a cabo de forma controlada. Todo ello, a costa de un mayor tiempo de rellenado de los depósitos.

Otro problema es la cantidad de hidrógeno que se pierde en el proceso de rellenado de los tanques a bordo de los vehículos. La máquina dispensadora suministra gas a los tanques del vehículo con una precisión del 1%, pero no asegura la cantidad que entra dichos tanques.

Igualmente, sin resolver, está el control de la calidad del hidrógeno que se destina a abastecer las estaciones de servicio. La normativa ISO-19880-8 recomienda un control de calidad basado en las siguientes medidas:

- Control continuo de impurezas.
- Control de niveles de componentes reactivos: agua, monóxido de carbono, formaldehidos, etc.
- Suspensión automática del suministro en cuanto se detecte alguna impureza.

En este punto, tampoco hay un protocolo para obtener muestras de hidrógeno, de forma que al efectuar el muestreo puede contaminarse la muestra o los dispositivos de muestreo pueden no ser los adecuados o los depósitos que contienen las muestras no son los correctos.

En cualquier caso, parece ser que hoy en día sigue siendo un aspecto controvertido el rellenado rápido, exacto y seguro de los depósitos de combustible en la utilización de este tipo de vehículos.

9.8. Anexos.

9.8.1. Hoja técnica de una pila de hidrógeno de la empresa Ballard.

High Performance Fuel Cell Stack

Introducing FCgen®-HPS

Ballard's high performance proton exchange membrane (PEM) liquid cooled fuel cell stack.

FCgen®-HPS incorporates our latest technology, design and materials to meet the requirements of the most demanding mobility applications delivering one of the highest fuel cell stack power densities in the industry.

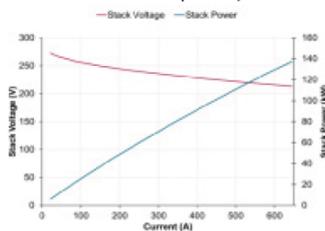
The FCgen®-HPS stack uses Ballard's latest generation of proprietary membrane electrode assemblies (MEA) and thin carbon plates to deliver performance and durability.

The FCgen®-HPS stack provides up to 140kW of stable electrical power over a wide range of operating and environmental conditions. The FCgen®-HPS stack can be configured to different power outputs to meet customer requirements.

Designed for motive applications, the FCgen®-HPS features fast, dynamic response and robust and reliable operation. The FCgen®-HPS establishes a new industry standard for power density, performance and product reliability.

Key attributes:

- High power density¹ fuel cell stack
 - o ~ 4.3kW/L
 - o ~ 4.7kW/kg
- Designed to automotive standards
- Freeze start capability

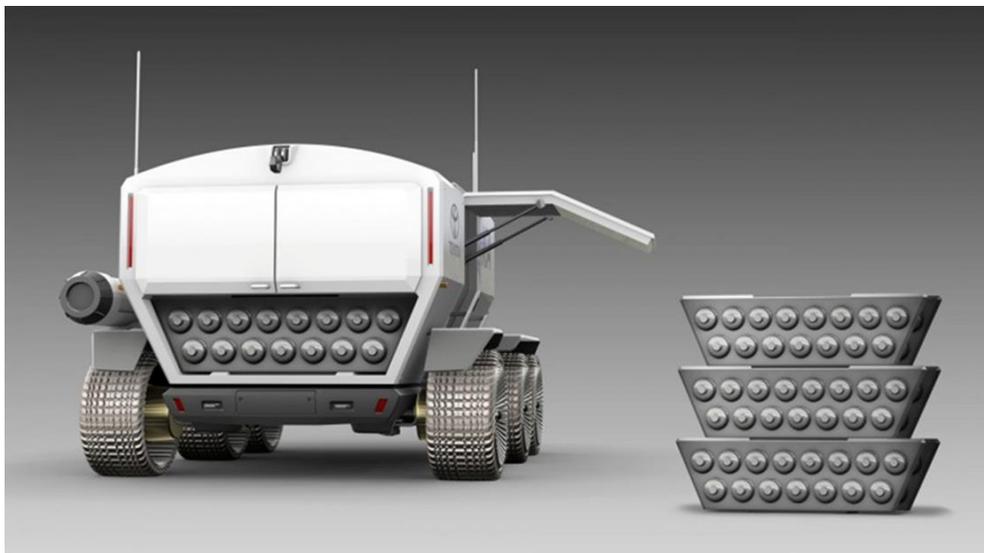


PRODUCT SPECIFICATIONS

PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell stack	
Rated Power	up to 140 kW
Cell Count	309
Rated Current	645 A
Rated Voltage	202 V
Mass (dry)	55 kg
Length	484 mm
Width	555 mm
Height	195 mm
Fuel Standard	ISO 14687-2
Oxidant	Air up to 2.5 bara
Coolant	DI water or Fuel Cell Grade Glycol
Max Coolant Temp.	95°C
Min. Start Temp.	-28°C
Storage Temp. (<12 hrs)	-40°C to 95°C
Storage Temp. (long term)	2°C to 40°C

(1) excludes end plate hardware

9.8.2. Nota en el diario ABC de 8 de septiembre de 2020.



Vehículo lunar “Lunar Cruiser” impulsado con pila de hidrógeno y desarrollado por la Agencia Espacial Japonesa (AXA) y Toyota para funcionar en una base lunar en 2030. Tendrá una autonomía de 9.000 km.

9.8.3. Apunte sobre artículo en la revista IEEE Spectrum de diciembre 2020.

Se trata de un vehículo eléctrico con pila de hidrógeno desarrollado por la Agencia Espacial Alemana (DLR). Alberga un depósito de 39 litros de hidrógeno a 700 barías de presión. La autonomía es de 400 km y el peso de 450 kg. La potencia de la PEM FC es de 8.5 kw y la correspondiente a la batería complementaria de 25 kw. Se ha estimado que tendrá una vida útil de 300.000 km a lo largo de 10 años y un precio final de 15.000 euros.

9.9. Conclusiones.

El coche con pila de combustible de hidrógeno está siendo estudiado en Europa y Estados Unidos como una alternativa al coche de batería eléctrica. Entre las ventajas del vehículo de hidrógeno frente al de baterías destacan la autonomía, el peso, el volumen y el tiempo de repostaje. Mientras que entre los inconvenientes se encuentran la complejidad, la eficiencia y, de momento al menos, el precio y la baja disponibilidad de puntos de repostaje.

En coches de uso diario con distancias medias de menos de 200 km, el coche eléctrico de baterías es perfectamente adecuado si se puede recargar durante la noche o mientras está aparcado. Para vehículos que requieren más energía para hacer distancias más largas como camiones, barcos o aviones, o vehículos donde el tiempo de recarga penaliza, como los taxis, el hidrógeno será una opción más viable.

El funcionamiento de la pila de hidrógeno y el almacenamiento del hidrógeno molecular imponen una serie de comprobaciones necesarias para la utilización segura del vehículo. Por tanto, el automóvil de hidrógeno ha de estar equipado con una red de sensores a bordo que permita al conductor, no sólo manejar el vehículo con plenas garantías de seguridad sino también proporcionarle indicación de lo que ocurre en caso de avería.

Así, ha de comprobarse que la presión en ambas entradas de gas tiene que ser la misma. En algunos casos, una válvula entre los canales de alimentación de los dos gases reaccionantes permite el paso de aire hacia la alimentación de hidrógeno protegiendo el dispositivo en caso de falta de hidrógeno. La temperatura en el cátodo irá aumentando a medida que se vaya formando agua y obliga a la instalación de un circuito de refrigeración. La temperatura del fluido refrigerante ha de ser comprobada a la entrada y a la salida de la pila. Hay que medir la temperatura del agua de humidificación y la del aire humidificado para evitar que pueda quemar las celdas. Igualmente, y por el mismo motivo, hay que asegurarse de que la temperatura del hidrógeno es la correcta. La cantidad de hidrógeno y de aire que se suministra al equipo, es medida mediante sendos Controladores de Flujo de Masa (Mass Flow Controller). Desde el punto de vista eléctrico, puede medirse la tensión y la corriente de la pila y comprobar el punto de trabajo de funcionamiento dentro del rango de valores diseñado de acuerdo con la curva de polarización. Si el diseño es correcto, no se producirá falta de hidratación de la membrana con densidades de corriente elevadas.

También, en el almacenamiento del hidrógeno molecular, es necesario verificar que no existen fugas de gas, tampoco sobrepresiones fundamentalmente derivadas del calentamiento en el proceso de almacenamiento a alta presión.

Finalmente, y debido a que la llama de hidrógeno es imperceptible al ojo humano, sería conveniente dotar al vehículo de sensores de llama y además, para el caso de accidente, el vehículo de hidrógeno ha de ir señalizado no sólo en el frontal y la parte trasera, también ha de hacerse visible en los laterales que se trata de un vehículo de hidrógeno.

9.10. Bibliografía.

- [49] Al Baghdadi. PEM FUEL CELL ENGINES. International Energy and Environment Foundation. 2018.
- [50] Samir Jemei. Hybridization, Diagnostic and Prognostic of Proton Exchange Membrane Fuel Cells. Durability and Reliability. Wiley. 2018.
- [51] Tong, Qian, Huo. Hydrogen – Air PEM Fuel Cell. De Gruyter. 2018.
- [52] Larminie y Dicks. Fuel Cell Systems Explained. Wiley. 2009.
- [53] Young. Fuel Cells. Reinhold Publishing Corporation. 1960.
- [54] Venturi, M. Fischer, R. Henkel, F. Hydrogen Sensors for Automotive Fuel Cell Applications. SAE. Agosto de 2013.
- [55] Mat, Mayda, Kar, Hassan, Talik. Proton Exchange Membrana (PEM) and solid oxide (SOFC) Fuel Cell Based Vehicles-a Review. 2nd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering 2017.
- [56] Keller, Christmann, Sanchez-Arjona, Heuer. A modular fuel cell battery hybrid propulsion system for powering small utility vehicles. 2nd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering 2017.
- [57] Fei Gao. Fuel cell principles. On line course. IEEE. 2015.
- [58] Zou & Kim. Temperature control for a 5KW water cooled PEM Fuel Cell System for a Household Application. IEEE Access. October 2019.
- [59] Mohmmad Alrewq, Alhussein Albarbar. Investigation into the characteristics of proton exchange membrane fuel cell-based power system. IET Sci. Meas. Technol., 2016, Vol. 10, Iss. 3, pp. 200–206. Marzo 2016.
- [60] IEA. The Future of Hydrogen. June 2019.
- [61] IEA. Technology Roadmap. Hydrogen and Fuel Cells. 2015.
- [62] <https://h2stationmaps.com/hydrogen-stations#equipment>
- [63] Méndez Sánchez. El coche de hidrógeno. Revista Tesla primavera 2019.
- [64] Amadane, Mounir, El Marjani, El Alaqui, Ettouhami y Daoudi. Computational Analysis of Water Distribution in a PEM Fuel Cell Under Different Conditions. 5th International Conference on Optimization and Applications. 2019.
- [65] Zhu, Zou, Peng, Xie, Li. Modelling and Fuel flow control of PEMFC considering

over pressure case. Chinese Automation Congress. 2017.

- [66] Springer, Zawodzinski y Gottesfeld. Polymer Electrolyte Fuel Cell Model. Journal of the Electrochemical Society. August 1991.
- [67] Nguyen y White. A Water and Heat Management Model for PEM Fuel Cell. Journal of the Electrochemical Society. August 1993.
- [68] Haubrock, Heideck y Sticzynski. Dynamic Investigation on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting.
- [69] Guitolini, Yahyaoui, Farias, Frizera y Tadeo. A review of fuel cell and energy cogeneration Technologies. The 9th International Renewable Energy Congress 2018.
- [70] Hübert, Boon-Brett y Buttner. Sensors for Safety and Process Control in Hydrogen Technologies. CRC Press. 2016.
- [71] Rivard, Trudeau y Zaghib. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MPDI). Materials. Junio 2019.
- [72] H2 Tools. Focusing on safety knowledge. Department of Energy. USA. Mayo de 2017.
- [73] 3rd European Summer School on Hydrogen Safety. University of Maryland. July 2008.
- [74] Safety Issues with Hydrogen as a Vehicle Fuel. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. September 1999.
- [75] Gomila Villalonga, Joan Josep. Rediseño de la gestión térmica una pila de combustible tipo PEM de alta temperatura. Proyecto Final de Máster. ETSEIB. Barcelona 2018.
- [76] Sauqué Sala, David. Modelado y diseño de un sistema de refrigeración para una pila PEM de alta temperatura. Trabajo Fin de Grado. ETSEIB. Barcelona 2016.
- [77] Reija Chao, Uxía. Modelado térmico de una pila de combustible PEM de alta temperatura. Trabajo Fin de Máster en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética. Barcelona 2017.
- [78] Moreno Rodríguez, Sergio. Estudio Teórico-Práctico de la Célula de Combustible. Caracterización eléctrica y mejoras en la gestión del agua a partir de nuevos materiales. ETSIIM. Madrid 2016.
- [79] Chris de Beer, Paul Barendse and Azeem Khan. Emulation of High

Temperature PEM Fuel Cell Electrical Dynamics and Operational Phenomena. 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.

- [80] Sutoh, Otsuki, Wakabayashi, Hoshino y Hashimoto. The Right Path. Comprehensive Path Planning for Lunar Exploration Rovers. IEEE Robotics & Automation Magazine. Marzo de 2015.
- [81] Liu, G, Liu, Y, Zhang, Gao, Yuan y Zheng. The Kapvik Robotic Mast. An Innovative Onboard Robotic Arm for Planetary Exploration Rovers. IEEE Robotics & Automation Magazine. Marzo de 2015.
- [82] Arroyo Galán, J. Interconexión Ultracondensadores - Motor en un Vehículo Eléctrico. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid. Julio de 2017.
- [83] Hegazy, Van Mierlo y Lataire. Analysis, Control and Comparison of DC/DC Boost Converter Topologies for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle Applications. 14th European Conference on Power Electronics and Applications. 2011.
- [84] Shanmuga Priya y Balasubramanian. Analysis of Multidevice Interleaved Boost Converter for High Power Applications. 2014 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT).
- [85] Hegazy, Van Mierlo y Lataire. Analysis, Modeling and Implementation of a Multidevice Interleaved DC/DC Converter for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles. IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 27, nº11. Noviembre de 2012.
- [86] M. K. Nguyen, T. V. Le, S. J. Park and Y. C. Lim, "A Class of Quasi Switched Boost Inverters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 3, pp. 1526-1536, March 2015.
- [87] Nirunsin, S. y Khunatorn, Y. "Water Management of PEM Fuel Cell Stack". Lambert Academic Publishing. 2014.
- [88] Harald Moser. "High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells: The impact of fuel contaminants and temperature on fuel cell performance". VDM Verlag Dr Muller. 2010.
- [89] Thounthong y Davat. "Fuel Cell Energy Source for Electric Vehicle Applications". Nova Science Publishers. 2008.
- [90] Puentestar y Rodríguez. "Diseño y Construcción del Cargador de Batería en un Vehículo Eléctrico". Editorial Académica Española. 2015.
- [91] Xuan Gong, Feifei Dong, Mohamed A. Mohamed, Omer M. Abdalla, and Ziad M. Ali. "A Secured Energy Management Architecture for Smart Hybrid

Microgrids Considering PEM-Fuel Cell and Electric Vehicles”. IEEE Access. March 2020.

- [92] Rodatz, Paganelli y Guzzella. Optimizing Air Supply Control of a PEM Fuel Cell System. Proceedings of the American Control Conference. Denver, Colorado Junio de 2003.
- [93] Rodatz, Paganelli, Sciarretta y Guzzella. Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle. Control Engineering Practice. Diciembre de 2003.
- [94] Xi, Xiangmin, Zhiyong y Jianxin. Research Progress of Fast Filling of High Pressure Hydrogen for Fuel Cell Vehicles. 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering.
- [95] Brewer, Paul. National Physical Laboratory. Hydrogen. International Awareness Forum on Environment, Energy and Public Health: From Mexico to the Americas and with participation of different regions of the world. Santiago de Querétaro. 11 de Octubre de 2018.
- [96] Target Explanation Document: Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Fuel Cell Vehicles. Department of Energy. USA. 2017.
- [97] Som, Majumdar, Kundu y Kanungo. Investigation Charge Plasma Enhanced Tunnel Field Effect Transistor for Hydrogen Gas Sensing Application. IEEE Sensors Letters. Volume 4, Issue 6. 2020.
- [98] Li, Lai y Tang. Temperature Dependence of Sensing Characteristic for OTFT-Based Hydrogen Sensor. IEEE Transactions on Electron Devices. April 2020.
- [99] Hajime Asahi y Yoshiji Horikoshi. Molecular Beam Epitaxy for Steep Switching Tunnel FETs. Capítulo 8. Wiley 2019.
- [100] Mikhanoshina y Sypin. Flame detector as a Basis of Combined Fire Detector. 15th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014.
- [101] Hossain Lipu, Fahrin Karim, Lushanur Rahman y Sultana. Wireless Security Control System & Sensor Network for Smoke & Fire Detection. IEEE International Conference on Advanced Management Science 2010.
- [102] Pauchard, Manic, Flanagan, Besse y Popovic. A Method For Spark Rejection in Ultraviolet Flame Detectors. IEEE Transactions on Industrial Electronics. February 2000.
- [103] Costea y Schiopu. New Design and Improved Performance for Smoke Detector. 10th. International Conference on Electronics, Computers and Artificial

Intelligence. ECAI 2018. Iasi, Rumania.

- [104] Jobert, Fournier, Barritault, Boutami, Auger, Maillard, Michelot, Lienhart, Nicoletti y Duraffourg. A Miniaturized Optical Sensor for Fire Smoke Detection. 20 th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors. 2019.
- [105] Lee, Yang, Chien y Chang. Pressure and flow Rate Monitoring in PEM Fuel Cells by Embedded Flexible Microsensors. 5 th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. January 2010.
- [106] Kamat, Jayawardhana y Kottapalli. PDMS Flow Sensors with Graphene Piezoresistors Using 3D Printing and Soft Litography. 2020 IEEE SENSORS.
- [107] Wu y Yao. MEMS Thermal Mass Flow Meter with Double-Heater Structure. 2011 IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits.
- [108] Lee, Chu y otros. Integration of Micro Flow Sensors and Flexible Substrate as GDL in Micro Fuel Cell. 4th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Shenzhen, China. January de 2009.
- [109] Djuzhev, Novikov, Demin, Ovodov y Ryabov. An experimental study on MEMS-based gas flow sensor for wide range flow measurements. 2018 IEEE Sensor Application Symposium.
- [110] Kuijpers, Wiegerink, Krijnen, Lammerink y Elwenspoek. CAPACITIVE LONG-RANGE POSITION SENSOR FOR MICROACTUATORS. 17 th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Maastricht MEMS 2004.

