

DOCUMENTO DE TRABAJO

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

COMITÉ TÉCNICO CT-30



CONAMA 2022

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Edita: Fundación Conama

Año: 2022

Autores del presente documento:

José Antonio Delgado Penín, Adolfo Comerón Tejero y Michaël Sicard

Universidad Politécnica de Cataluña

Victoriano Moreno Burgos

Colegio de Oficial de Físicos

Carmelo Alonso Jiménez

Indra Sistemas, S.A.

Jorge del Valle Arias

Smart City Solutions & SW Business Development Manager Spain in ITRON

Pedro Oñorbe de Torre

Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid

Alejandro Payán de Tejada

Consejo General de la Arquitectura Técnica de España

María Deseada Esclapez Vicente

Plataforma Tecnológica del Agua. Depuración de Aguas del Mediterráneo

África Barreto Velasco y Omaira Elena García Rodríguez

Agencia Española de Meteorología (AEMET)

Marta Ruiz Llata

Universidad Carlos III de Madrid

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 RELADORES.

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**.

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.

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.

África Barreto Velasco. Doctora en Física por la Universidad de La Laguna y responsable del programa de aerosoles in-situ y teledetección del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (CIAI), dependiente de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Es experta en la monitorización de los aerosoles atmosféricos mediante las citadas técnicas y pertenece al Comité de Dirección del nodo del Norte de África - Oriente Medio y Europa del SDS-WAS (Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) así como al grupo de asesoría científica en materia de aerosoles del programa GAW (Global Atmosphere Watch) de la OMM.

Omaira García Rodríguez. Doctora en Física por la Universidad de La Laguna y responsable del programa de investigación de Espectrometría de Infrarrojo del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (CIAI), dependiente de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Es experta en la monitorización de la composición atmosférica empleando técnicas de teledetección remota.

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.

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.

Carmelo Alonso Jiménez. Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid, se ha doctorado recientemente por la Universidad Politécnica de Madrid con la Tesis “Técnicas multiescala en el seguimiento de la vegetación con imágenes de satélite” (DOI: 10.20868/UPM.thesis.70528). Trabaja desde hace más de 25 años en el sector geoespacial, en Indra Sistemas donde actualmente forma parte del Equipo Geoespacial en la Unidad de Digital Labs. En ese tiempo ha adquirido una amplia experiencia en el desarrollo de diversos proyectos de teledetección, tanto a nivel nacional como internacional. Su conocimiento técnico se extiende en el campo de la observación de la Tierra, desde sistemas aéreos y satelitales, tanto con sensores ópticos como radar, procesamiento de imágenes y tecnologías GIS. Dr. Alonso Jiménez participa en este Comité Técnico prácticamente desde su fundación.

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.

Alejandro Payán de Tejada. Arquitecto Técnico por la Universidad Politécnica de Madrid, máster en Prevención de Riesgos Laborales y doctor en innovación tecnológica de la edificación también por la UPM. Durante su tesis doctoral diseñó a nivel de hardware y software un sistema de monitorización de variables ambientales basado en la plataforma de bajo coste Arduino. En el ámbito laboral, es miembro del gabinete técnico del Consejo General de la Arquitectura Técnica de España donde desempeña labores de representación de la profesión en diferentes ámbitos consultivos como Comités de normalización de AENOR o procesos de consulta para normativas nacionales como la Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España. Ha colaborado asimismo en proyectos europeos centrados en la sostenibilidad del proceso edificatorio como Building Life o el Foro AUNA. Por último, ha participado en la coordinación y redacción de iniciativas sobre la vigilancia de la salud en espacios interiores como la Guía Salud y Edificios: 7 llaves para un edificio saludable, el libro Edificios y salud: Reinventar el hábitat pensando en la salud de las personas o el Estudio sobre la Calidad del Aire Interior en viviendas.

María Deseada Esclapez Vicente. Licenciada en Química y Doctora en Ciencia de Materiales por la Universidad de Alicante, con mención de Doctorado Europeo y Premio Extraordinario de Doctorado. Cuenta con 15 años de experiencia investigadora, especialmente centrada en tratamientos electroquímicos de contaminantes emergentes en medio acuoso. Está integrada en el Departamento de Innovación de DAM desde 2017 realizando tareas relacionadas con la coordinación y gestión de proyectos I+D+i. De las investigaciones en las que ha participado se han podido publicar alrededor de 30 artículos científicos en revistas internacionales indexadas. (<https://orcid.org/0000-0003-2946-9841>)

Professor Dr. Marta Ruiz Llata obtained her PhD in Industrial Engineering from the University Carlos III of Madrid (UC3M) in May 2005 for her thesis "Design and Implementation of Optoelectronic Neural Networks. Application in Vision Systems", for which she obtained the extraordinary doctorate award in 2007. She was then hired as a postdoc teaching assistant and later as an assistant professor in the Department of Electronic Technology at UC3M, where she signed a permanent position in December 2010. During her pre-doctoral stage, when she spent 7 months as visiting student with the Photonic Systems Laboratory at the Massachusetts Institute of Technology (MIT), she gained great experience in the handling of optical components (lenses, diffraction networks, holography...) as well as in optoelectronic circuits and photonics devices. She also acquires a basic knowledge of neural networks and other machine learning algorithms. At the beginning of the postdoctoral period, she also started to get involved in research topics related to optical sensors (fiber optic sensors and interferometry techniques) and large-scale instrumentation systems (development of a diagnostic installed in Stellarator TJ-II at Ciemat for measuring electronic density in fusion plasma). As she consolidated her research career, the research lines evolved towards instrumentation systems, focusing on the development of optical sensors for industrial, environmental and biomedical applications. All these applications include: activities related to the research of new technologies and measurement techniques, the development of demonstrators or prototypes and the use, and adaptation to each particular case, of machine learning techniques. Throughout her research career at the UC3M she has acquired experience in interferometry, near and mid-infrared absorption spectroscopy, photoacoustic spectroscopy and LiDAR systems. More recently she spent a sabbatical leave during the academic course 19/20 with the "Precision Laser Diagnostics for Energy and the Environment" research group at the University of Colorado Boulder (USA). During her time there she added experience on the analysis of spectroscopic data of environmental and combustion processes, acquired by means of dual optical frequency combs, for the identification of molecules characterized by broad and complex spectra. Currently, within the Sensors and Instrumentation Techniques research group at UC3M, she leads the activities to promote technology transfer in optical sensors for transport infrastructures. These activities started in the project "Development of an onboard winter maintenance system with continuous monitoring of innovative road variables" under the Retos-Colaboración Program 2015, with the development of a residual salinity sensor based on fluorescence spectroscopy and a pavement condition sensor based on diffuse reflectance spectroscopy using laser diodes. This pavement sensor was patented in 2012 and in September 2020 has been licensed to the company Licensed to Asimob. Advanced services in mobility. SL. A second pavement sensor based on dual comb sources has been protected with a European patent in June 2021.

Her current basic research activities are focused on photoacoustic spectroscopy. The first contributions in this field were framed within the project PARAQUA (Photonic sensing Architectures for Rapid Assessment of fresh water QUALity) and consisted of the demonstration of different trace gas detection experiments in the near infrared region of the spectrum and in the mid-infrared, using gas cells fabricated using 3D printed techniques and the development of acoustic sensors for photoacoustic with interferometric readout. She has advised a doctoral thesis in this field, defended in June 2020, that has received the Extraordinary Prize Award by the UC3M and the best doctoral thesis Award by the IEEE Instrumentation & Measurement Society Spanish Chapter. Ongoing research targets isotopic ratio measurements of H₂O and CO₂ molecules.

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 Contratado 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 terminó el *Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación* en 2018. En junio de 2021, defendió su tesis doctoral que obtuvo el premio extraordinario de Doctorado de la UPM. Premio Investigador Joven en el Congreso de la Unión Internacional de Radio Científica URSI 2019 celebrado en Sevilla, y premio de *Innovación Tecnológica 2021 del Ayuntamiento de Madrid*. 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 y realiza una estancia en la Universidad de Oviedo, en la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón. 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 Técnico sobre Teledetección y Sensores Medioambientales. Dr. Martínez Vázquez *is life senior member of the IEEE*.

RESUMEN DE CONTENIDO.

1. Gestión del espectro radioeléctrico teniendo en cuenta las directrices de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para controlar los efectos del cambio climático.

Prof. José A. Delgado-Penín. Dr. Ing. Telecomunicación. Catedrático Emérito UPC BarcelonaTECH.

Esta primera ponencia trata de responder al interrogante de cómo puede la gestión del espectro radioeléctrico ayudar a mitigar el cambio climático. Esta pregunta está relacionada con el trabajo que lleva a cabo la OMM mediante los sistemas meteorológicos que son implementados en la superficie terrestre y en el espacio por sistemas activos o pasivos. La OMM propone a la ITU-R estudiar y quizás modificar las diferentes bandas del espectro que existían hasta ahora. Esto sólo es posible en una discusión mundial en la próxima conferencia mundial del año 2023.

2. Erupción del volcán de La Palma: Caracterización de aerosoles volcánicos y emisiones de gas desde una perspectiva sinérgica.

África Barreto. Izaña Atmospheric Research Centre (IARC), State Meteorological Agency of Spain (AEMet). Adolfo Comerón y Michael Sicard. CommSensLab. UPC.

Este trabajo aporta una visión general de la erupción del volcán de La Palma (Islas Canarias, España) ocurrida entre el 19 de septiembre y el 25 de diciembre de 2021, por medio de la caracterización de los aerosoles volcánicos y de los gases traza desde una perspectiva sinérgica. En un esfuerzo de colaboración científica sin precedentes, varios grupos de investigación y organizaciones privadas de toda Europa trasladaron instrumentación científica a la zona de la erupción para estudiar de forma coordinada las características de los aerosoles volcánicos, así como de los gases traza en el momento de ser emitidos a la atmósfera.

3. LANDSAT: 50 años observando la vegetación desde el espacio.

Carmelo Alonso Jiménez (Goespacial - Unidad Digital Labs, Indra Sistemas S.A) y Victoriano Moreno Burgos (Colegio Oficial de Físicos).

Con esta ponencia se recuerda que el 23 de julio de 1972 se puso en órbita el primer satélite Landsat. En estos cincuenta años, las imágenes de la superficie terrestre obtenidas por los satélites han ido mejorando en detalle (resolución espacial), en frecuencia de adquisición (resolución temporal), en regiones del espectro electromagnético (resolución espectral) y en rango dinámico de valores digitales (resolución radiométrica). Se aprovecha este cincuentenario para analizar la evolución tecnológica experimentada por los satélites de observación de la Tierra en relación con su aplicación en el seguimiento de la cobertura vegetal.

4. Vehículo eléctrico. Planificación optimizada de la red de carga. Optimización y balanceo de carga para la gestión de cargadores.

Jorge del Valle Arias. Smart City Solutions & SW Business Development Manager Spain en Itron.

Que el futuro está en la electrificación de la movilidad es algo que nadie puede negar. Y eso nos enfrenta a una serie de retos relacionados con la infraestructura de carga, no solo desde el punto de vista de las redes de generación y distribución, sino también desde el punto de vista de la infraestructura para los usuarios finales, especialmente cuando nos referimos a flotas de vehículos eléctricos, del tipo que sea, que necesitan disponer de depósitos de carga múltiple y, en ocasiones, distribuidos geográficamente en una ciudad o región.

5. La importancia de la información al usuario sobre las variables ambientales interiores que le rodean.

Alejandro Payán de Tejada. Consejo General de la Arquitectura Técnica.

Ya es conocido el dato de que las personas pasamos más del 90% de nuestro tiempo en el interior de edificios, ya sea por trabajo, ocio o en nuestro propio hogar. Es por lo tanto imprescindible, informar al usuario (o a los sistemas de automatización del edificio) de los parámetros de salud aceptados internacionalmente y que sirvan de orientación para que los edificios puedan ser gestionados con garantías de salud para sus ocupantes. Para ello, la sensorica y la comunicación accesible son dos principios básicos que pueden ofrecer soluciones en la captación de datos fiables y una transmisión al usuario de estos sin caer en la sobreinformación innecesaria. Las áreas de interés serían las siguientes: Confort higrotérmico, Calidad del aire y salubridad, Materiales, Calidad y confort acústico, Confort lumínico, Ergonomía, movilidad y accesibilidad, Calidad del agua.

6. Monitorización de olores en estaciones depuradoras de aguas residuales mediante el uso de drones.

María Esclapez, Javier Burgués, Silvia Doñate Hernández, Lidia Saúco Bozic y Santiago Marco (Depuración de Aguas del Mediterráneo - DAM e Instituto de Bioingeniería de Cataluña - IBEC).

Las metodologías actuales de evaluación de olores en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs) conducen a mediciones de olores con baja resolución temporal y espacial y que no permiten una caracterización precisa de la de emisión de olores. El uso de drones proporciona medidas de concentración de olor en entornos espacialmente densos y localiza de forma autónoma la fuente de molestias por olores en entornos industriales complejos, tales como las EDAR. El desarrollo del primer prototipo ha implicado una serie de retos de investigación: (i) Diseñar un sistema electrónico capaz de predecir la concentración de olores a partir de las lecturas de los sensores en mezclas complejas de gases olorosos y variables en el tiempo utilizando algoritmos de aprendizaje automático, (ii) Integrar la sensorica necesaria en un dron minimizando el impacto producido por las hélices del dron en las mediciones; y (iii) Desarrollar algoritmos que produzcan mapas 2D de la distribución de los olores promediados en el tiempo, a pesar de la conocida complejidad de la distribución de la concentración en penachos turbulentos.

7. Propuesta para un plan nacional de vigilancia del ciclo de carbono atmosférico basado en sensores.

Marta Ruiz Llata, Pedro Martín Mateos y Pablo Acedo. Departamento de Tecnología Electrónica. UC3M.

En esta presentación se analizan tres tecnologías novedosas de interés para el despliegue de redes de vigilancia locales y distribuidas del ciclo de carbono. En primer lugar, el método de Radiometría Heterodina Láser (LHR) permite obtener el perfil vertical (con resolución en altitud) de la concentración de CO₂ operando desde la superficie de la Tierra y analizando el efecto en el espectro de la luz solar recibida de los componentes atmosféricos para encontrar con precisión la distribución vertical de la concentración de CO₂ en la atmósfera. En segundo lugar, soluciones basadas en el método de espectroscopia fotoacústica, combinan tamaño reducido, alta sensibilidad y un despliegue de campo sencillo, permitiendo la posibilidad de proporcionar un mapa exacto, y potencialmente libre de huecos, de la concentración de gases a nivel del suelo mediante una red de sensores distribuida. En tercer lugar, la espectroscopia por doble peine de frecuencias ópticas, como técnica de espectroscopia de absorción de espectro expandido y camino abierto, que actualmente se ha convertido en una alternativa a la espectroscopia por transformada de Fourier (FTIR) para despliegue en campo debido a su diseño compacto y a la ausencia de partes móviles en el diseño óptico del espectrómetro.

8. Reducción de chatarra espacial mediante la instalación de antenas de tecnología impresa en satélites.

José Daniel Martínez de Rioja del Nido (UPM) y Eduardo Martínez de Rioja del Nido (URJC).

Desde el lanzamiento del satélite Sputnik en 1957, se han lanzado toneladas de cohetes al espacio, llegando a generar unas 8.000 toneladas de basura espacial. La basura espacial engloba cualquier pieza, generada por el ser humano, que orbita sin control alrededor de la Tierra. Actualmente existe una clara tendencia hacia el uso de satélites de menor tamaño, gracias al importante ahorro económico en términos de fabricación y de costes de lanzamiento con respecto a los satélites convencionales de mayor tamaño. Sin embargo, existen factores que limitan una posible reducción del tamaño de los satélites convencionales. Los satélites geoestacionarios de alta capacidad, encargados de proporcionar acceso a internet de banda ancha, necesitan llevar a bordo un voluminoso sistema de antenas para proporcionar servicio. Este sistema, formado típicamente por cuatro antenas reflectoras de más de dos metros de diámetro y un centenar de cadenas de alimentación, requiere un elevado volumen de almacenamiento en el satélite. La sustitución de este sistema de antenas por otro que reduzca a la mitad el número de reflectores y cadenas de alimentación permitirá la fabricación de satélites geoestacionarios de menor tamaño, e incluso con capacidad de operar en múltiples misiones, minimizando el número de satélites geoestacionarios necesarios en órbita.

9. Huella de carbono, secuestro de CO₂, mercado de derechos, cálculo de derechos, actividades rurales.

Pedro Oñorbe de Torre (COIIM)

Generalidades sobre huella de carbono, derechos de emisión de CO₂. ¿Qué son los derechos de compensación de huella de carbono? Cálculo de derechos de huella de carbono con cámara hiperespectral. Otros proyectos relacionados con reducción de emisiones: energía solar de autoconsumo, comunidades de usuarios y cooperativas de generación.

10. Una primera aproximación ambiental al vehículo eléctrico: Red de sensores de la batería, la carga super rápida y los niveles de campo magnético.

José Javier Martínez Vázquez (Coordinador), José Daniel Martínez de Rioja del Nido (UPM) y Eduardo Martínez de Rioja del Nido (URJC).

Las diferencias entre una batería para un vehículo con motor de combustión interna y la batería de un coche eléctrico son muchas: potencia, capacidad, tamaño, peso, coste, funciones que desempeña, etc. La batería de un coche convencional de combustible fósil básicamente sirve para el arranque del motor y para el funcionamiento de algunos servicios como el cierre centralizado, las luces que alumbran la calzada, la iluminación del habitáculo interior y del cuadro de indicaciones situado en el salpicadero. La batería de un coche eléctrico es un elemento esencial para el movimiento y operación del vehículo y pesa aproximadamente la cuarta parte del peso total del automóvil. Se trata por tanto de un dispositivo que no solo debe funcionar, también hay que mantenerlo en un estado adecuado para que su vida útil sea lo más larga posible. Por otra parte, la necesidad de ir acortando los tiempos de carga de las baterías obliga al aumento de los niveles de corriente empleados en cada recarga, con lo que entran en juego valores de campo magnético que deben contrastarse con la regulación nacional en esta área. Si bien algunos fabricantes han optado por rebajar las corrientes en la recarga elevando la tensión nominal de las baterías, este punto no ha llegado a normalizarse en la actualidad.

ÍNDICE

Introducción: Sobre la Trazabilidad del Suministro Eléctrico.....	15
<i>José Javier Martínez Vázquez. Coordinador</i>	
1. GESTIÓN DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO TENIENDO EN CUENTA LAS DIRECTRICES DE LA O.M.M. PARA CONTROLAR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO.	16
<i>José Antonio Delgado-Penín</i>	
1.1. Introducción.	16
1.2. Programa de vigilancia meteorológica mundial.....	17
1.3. Sistemas meteo y espectro radioeléctrico.	19
1.4. Propuestas de la OMM a la UIT para CMR-23.	19
1.4.1. Agendas.....	20
1.5. Conclusiones.....	21
1.6. Referencias bibliográficas.	21
2. ERUPCIÓN DEL VOLCÁN DE LA PALMA: CARACTERIZACIÓN DE AEROSOLLES VOLCÁNICOS Y EMISIONES DE GAS DESDE UNA PERSPECTIVA SINÉRGICA.	22
<i>A. Barreto, M. Sicard, O.E. García y otros</i>	
2.1. Introducción.	23
2.2. Modelización de la nube de dispersión volcánica a través de MOCAGE.....	24
2.3. Despliegue de instrumentación científica en la isla de La Palma.....	24
2.4. Red de perfiladores verticales.	25
2.5. Calidad del aire.	26
2.6. Sondeos meteorológicos.....	27
2.7. Observatorio atmosférico de Izaña.	28
2.8. Conclusión.	28
2.9. Referencias.	29

3.	LANDSAT: 50 AÑOS OBSERVANDO LA VEGETACIÓN DESDE EL ESPACIO.....	30
	<i>Victoriano Moreno Burgos y Carmelo Alonso Jiménez</i>	
3.1.	Introducción.....	30
3.2.	El Programa LANDSAT.....	31
3.3.	Cincuenta años de aplicaciones usando las imágenes del satélite LANDSAT.....	36
3.3.1.	Cartografía de usos y ocupación de suelo.....	37
3.3.2.	Contaminación.....	38
3.3.3.	Impacto ambiental por obra civil.....	39
3.3.4.	Hidrología-Agricultura.....	40
3.3.5.	Gestión forestal.....	42
3.3.6.	Gestión de incendios forestales.....	42
3.3.7.	Nieves y glaciares.....	44
3.4.	Conclusiones de los últimos 50 años del programa LANDSAT.....	46
4.	VEHÍCULO ELÉCTRICO. PLANIFICACIÓN OPTIMIZADA DE LA RED DE CARGA. OPTIMIZACIÓN Y BALANCEO DE CARGA PARA LA GESTIÓN DE CARGADORES.....	47
	<i>Jorge del Valle Arias</i>	
4.1.	Planificación de la electrificación.....	47
4.2.	Operación optimizada de las cargas.....	50
4.3.	Conclusión.....	52
5.	MONITORIZACIÓN AMBIENTAL CON DRONES.....	53
	<i>M^a Deseada Esclapez, Javier Burgués, Silvia Doñate Hernández, Lidia Saúco Bozic y¹Santiago Marco</i>	
5.1.	Introducción.....	53
5.2.	Proyecto SNIFFDRONE.....	53
5.2.1.	Diseño y construcción de la e-nose.....	54
5.2.2.	Campañas de muestreo.....	56
5.2.3.	Calibrado y validación del prototipo.....	57
5.3.	Conclusiones.....	60
5.4.	Agradecimientos.....	61
5.5.	Referencias.....	62
6.	LA IMPORTANCIA DE LA INFORMACIÓN AL USUARIO SOBRE LAS VARIABLES AMBIENTALES INTERIORES QUE LE RODEAN.....	63
	<i>Alejandro Payán de Tejada</i>	
6.1.	Introducción.....	63

6.2.	Metodología.....	65
6.3.	Resultados.....	68
6.4.	Conclusiones.....	71
6.5.	Agradecimientos.....	72
7.	PROPUESTA PARA UN PLAN NACIONAL DE VIGILANCIA DEL CICLO DE CARBONO ATMOSFÉRICO BASADO EN SENSORES.....	73
	<i>Marta Ruiz Llata, Pedro Martín Mateos y Pablo Acedo</i>	
7.1.	Introducción.....	73
7.2.	Radiometría heterodina láser (Laser Heterodyne Radiometry, LHR).....	74
7.3.	Espectroscopia fotoacústica (Photo Acoustic Spectroscopy, PAS).....	76
7.4.	Espectroscopia con peines duales de frecuencias ópticas (Dual-Comb Spectroscopy, DCS).....	78
7.5.	Discusión y conclusiones.....	80
7.6.	Bibliografía.....	83
8.	REDUCCIÓN DE CHATARRA ESPACIAL MEDIANTE LA INSTALACIÓN DE ANTENAS DE TECNOLOGÍA IMPRESA EN SATÉLITES.....	84
	<i>José Daniel Martínez de Rioja del Nido y Eduardo Martínez de Rioja del Nido</i>	
8.1.	La basura espacial.....	84
8.2.	Comunicaciones vía satélite.....	86
8.3.	Antenas en tecnología impresa para satélites.....	89
8.4.	Conclusiones.....	94
8.5.	Bibliografía.....	95
9.	HUELLA DE CARBONO, SEQUESTRO DE CO ₂ , MERCADO DE DERECHOS, CÁLCULO DE DERECHOS, ACTIVIDADES RURALES.....	97
	<i>Pedro Oñorbe de Torre</i>	
9.1.	Generalidades. Cálculo de huella de CO ₂ . Secuestro de CO ₂ . Derechos de emisión.....	97
9.1.1.	¿Qué son los gases de efecto invernadero (GEI) según el Protocolo de KIOTO (1997)?.....	97
9.1.2.	Concepto de “huella de carbono”.....	97
9.1.3.	Cálculo de huella de carbono.....	97
9.1.4.	Normativa.....	98
9.1.5.	Plan de Reducción de Huella de Carbono.....	98
9.2.	Proyectos de compensación de emisiones.....	99
9.2.1.	¿Qué son los proyectos de compensación emisiones?.....	99
9.3.	Cálculo de proyectos de absorciones de GEIs.....	100
9.3.1.	Nuevas metodologías de cálculo.- Uso de cámaras hiperespectrales.....	100
9.4.	El mercado de venta de derechos.....	101

9.4.1.¿Cómo funciona la compra de emisiones entre empresas?	101
9.4.2.¿Cómo se regula el comercio de los derechos de emisión del CO2?	102
9.5. Otros proyectos de reducción de emisiones.	102
10. UNA PRIMERA APROXIMACIÓN AMBIENTAL AL COCHE ELÉCTRICO.....	103
<i>Eduardo Martínez de Rioja del Nido, José Daniel Martínez de Rioja del Nido y José Javier Martínez Vázquez.</i>	
10.1. Objetivos.	103
10.2. Introducción.....	103
10.3. Breve descripción de la batería de iones de litio.....	105
10.3.1. Circuito equivalente de una celda.	108
10.3.2. Tipos de celdas.....	109
10.4. Las baterías de los coches eléctricos.	110
10.4.1. Potencia, energía y autonomía de los vehículos eléctricos de batería.	126
10.5. Los procesos de carga rápida y ultra-rápida.....	127
10.6. Campos eléctricos y magnéticos estáticos.	130
10.6.1.Legislación y normativa empleada.	132
10.6.2.Valores de inducción magnética (B) establecidos en la legislación española.....	132
10.6.3. Resultados obtenidos.....	134
10.6.4. Apantallamiento de campos magnéticos estacionarios.....	135
10.7. Seguridad en caso de accidente.	137
10.7.1. Algunas consideraciones de interés sobre los reglamentos 94 y 95 del CEPE.....	139
10.7.2. Estimaciones en relación con los reglamentos 94 y 95 del CEPE.	140
10.8. Red de sensores de la batería.....	142
10.8.1. Sensores de tensión.....	144
10.8.2. Sensores de corriente.....	146
10.8.3. Sensores de temperatura.	151
10.8.4. Gestión de la temperatura.....	154
10.8.5. Equilibrado.....	160
10.9. Conclusiones.	163
10.10. Bibliografía.	164

Introducción: Sobre la Trazabilidad del Suministro Eléctrico

José Javier Martínez Vázquez. Coordinador

En todo el mundo ya se usan bombillas de tecnología LED. La reducción de consumo respecto a las antiguas bombillas de incandescencia puede ser mayor de 14 a 1. La tecnología LED se ha implantado, también rápidamente, en el alumbrado público, por el considerable ahorro que supone para las administraciones locales y autonómicas.

Desde hace algún tiempo las CCAA aconsejan la instalación en las edificaciones unifamiliares, de placas solares térmicas que recortan en un 60 % la factura de la energía eléctrica para el agua caliente sanitaria. En Australia, probablemente el país del mundo donde está más extendido el uso de energía solar, se venden actualmente unos módulos del tamaño de una nevera, para ser utilizados con tecnología solar fotovoltaica. La energía sobrante de los paneles fotovoltaicos se emplea en la obtención de hidrógeno por medio de unos dispositivos denominados electrolizadores que producen la electrolisis del agua con un buen rendimiento. El hidrógeno extraído se almacena en pequeñas bombonas a una presión de 30 barías. Durante la noche o los días de cielo cubierto, se pone en marcha la pila de hidrógeno como fuente de energía eléctrica de la vivienda y el propio sistema de refrigeración de la batería de hidrógeno cubre el servicio de agua caliente y calefacción. Las reservas de hidrógeno pueden proporcionar autonomía para varios días en una casa de tipo medio.

En los últimos años, ha salido a la venta una amplia gama de coches híbridos. Sin embargo, no se ha llegado a la situación que inicialmente se planteó: gran cantidad de usuarios recargando la batería de su automóvil y extenuando las redes de distribución y suministro de energía eléctrica en horario nocturno. Se ha dado el salto, antes de lo esperado, al coche eléctrico que, de entrada, presenta algunos inconvenientes graves: es muy caro, tiene poca autonomía, los puntos de recarga son escasos, la recarga ultra-rápida está por estandarizar y se debate la posibilidad de elevar la tensión de las baterías de los turismos de 400 a 800 voltios. Puede añadirse que la inversión para poner en servicio un punto de recarga rápida rondaba los 70.000 € antes de la pandemia y la guerra en Ucrania.

El coche de hidrógeno es un 50% más caro que el coche eléctrico de batería y tiene serios problemas de recarga. Sin embargo, la Agencia Espacial Alemana ha diseñado un prototipo de vehículo de hidrógeno con un precio estimado de 15 mil euros y Toyota también desarrolla para 2030 un vehículo lunar de hidrógeno. El repostaje con bombonas seguramente resolverá buena parte de los inconvenientes de operación que tienen estos automóviles y más si el hidrógeno llega a producirse y almacenarse en casa del usuario.

Estamos ante un escenario de poco kwh y mucha candela, con el precio de la energía eléctrica y del combustible fósil disparado y, no por casualidad, en el horizonte asoma el kwh de generación doméstica, combinado con tecnología solar térmica. La alimentación de suministradora en nuestros hogares quedará para ser utilizada cuando no haya más remedio, después de que fallen la energía solar fotovoltaica y la batería de hidrógeno. En el apartado de automoción con **cero emisiones**, es muy probable que algunos de los automóviles que vayan a salir a carretera, no pertenezcan a modelos de recarga eléctrica. La última pieza del puzzle es el proyecto de un futuro gasoducto Marsella-Barcelona-Lisboa, que parece transportará hidrógeno verde en 2030, lo que podría provocar la sustitución de algunas tecnologías de gas y electricidad por otras de hidrógeno. Las compañías eléctricas han de sopesar cuál será la situación del suministro eléctrico a medio y largo plazo. A lo mejor, ya están en ello.

1. GESTIÓN DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO TENIENDO EN CUENTA LAS DIRECTRICES DE LA O.M.M. PARA CONTROLAR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO.

José Antonio Delgado-Penín

Dr. Ing. de Telecomunicación. Catedrático Emérito UPC. Grupo GTDS del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación.

1.1. Introducción.

En las circunstancias actuales de un cambio climático galopante que ya está produciendo efectos meteorológicos catastróficos en todo el planeta, la ingeniería de Telecomunicación pasa a ser un agente importante para prevenir y paliar las catástrofes naturales en la Tierra. La Organización Meteorológica Mundial (OMM/WTO) posee un panel de expertos en Telecomunicaciones que se ocupan entre otros aspectos de cómo les puede afectar la gestión del espectro radioeléctrico regulado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT/ITU) en determinados ámbitos de su control del cambio climático.

Vista la situación se puede formular una pregunta: ¿Cómo puede la gestión del espectro radioeléctrico ayudar a mitigar el cambio climático? Esta pregunta está relacionada con el trabajo que lleva a cabo la OMM mediante los sistemas meteorológicos que son implementados en la superficie terrestre y en el espacio por sistemas activos/pasivos. Los diferentes sistemas y servicios de radiocomunicaciones terrestres y espaciales tienen regulados sus espectros radioeléctricos respectivos; pero debido a los nuevos problemas originados por el cambio climático es necesario redistribuir y redimensionar los diferentes servicios de radiocomunicaciones teniendo en cuenta lo que está sucediendo en la Tierra.

La respuesta a la pregunta antedicha tiene que ver con el estudio de las diferentes bandas del espectro de frecuencias propuestas para el futuro y sin olvidar las que ya están reguladas hoy en día por parte de la UIT-R.

La OMM propone a la UIT-R estudiar y quizás modificar las diferentes bandas del espectro que existían hasta ahora. Esto sólo es posible en una discusión técnica mundial en la próxima conferencia mundial del año 2023 y llegando a acuerdos entre la OMM y la ITU en la forma de repartir el espectro radioeléctrico para los Sistemas que soportan los diversos servicios terrestres, espaciales/aeronáuticos y meteorológicos.

La importancia del espectro para la OMM se basa en que los servicios meteorológicos mundiales y nacionales se basan en las TICs y, en donde las Radiocomunicaciones son a base tecnológica del Servicio Meteorológico Mundial. La OMM regula sus sistemas de telecomunicaciones meteorológicos basándose en las recomendaciones de la ITU desde el siglo XIX.

En todo Sistema de Radiocomunicación (activo/pasivo) el parámetro frecuencia es el primero a considerar y, es necesaria su regulación internacional por parte de la ONU a través de la UIT. El

presente y futuro debido a la explosión de servicios de Telecomunicación de tipo diverso puede causar severos problemas a la gestión de los servicios TIC meteorológicos. Por tanto, se necesita llegar a acuerdos entre las OMM e UIT basados en propuestas de ambas partes.

En el apartado 1.2 que sigue, se comentan aspectos relacionados con el Programa de Vigilancia Meteorológica Mundial y el Sistema Mundial de Observación de la OMM. En el apartado 1.3 se comentan los Sistemas Meteorológicos más importantes y su relación con el espectro radioelétrico necesario para su funcionamiento. Sigue el apartado 1.4 en el cual se pormenorizan las propuestas de la OMM para la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de la ONU a través de la UIT-R. Se cierra este documento con unas conclusiones de buenos deseos entre ambas partes para el reparto del espectro para el bien de la humanidad en cuanto al control del cambio climático con los medios técnicos que ofrecen las Radiocomunicaciones.

1.2. Programa de vigilancia meteorológica mundial.

Para analizar, prevenir y predecir el tiempo, la moderna meteorología depende del intercambio casi instantáneo de informaciones meteorológicas a lo largo de todo el mundo. El sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM) que es el núcleo de los programas de la OMM y combina los sistemas de observación, las instalaciones de telecomunicaciones y los centros de procesamiento de datos y de predicción en los diferentes estados posee un gran número de estos sistemas.



Figura 1.1: Sistemas del programa de Vigilancia Meteorológica Mundial.

Las redes de observación proporcionadas por los miembros de la OMM forman la columna vertebral del Sistema mundial integrado de sistemas de observación de la OMM (WIGOS) y dependen en gran medida del uso del espectro para la detección y difusión de datos e información.

Sistema Mundial de Observación (SMO) de la OMM

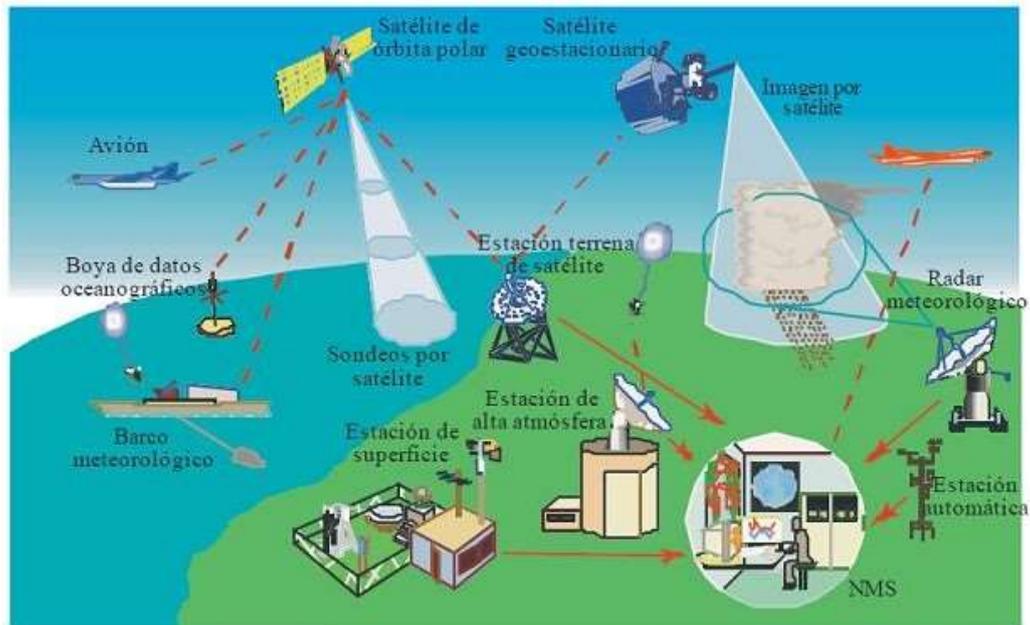


Figura 1.2: Sistema Mundial de Observación de la Organización Meteorológica Mundial.

En el sistema SMO se llevan a cabo las siguientes observaciones:

Observación de la superficie de la Tierra

Observación de la atmósfera superior

Observación mediante Radar de diferentes fenómenos meteorológicos

Estaciones de observación en el mar

Observación desde aviones

Observaciones desde satélites

Además del sistema anterior existen otros Sistemas de observación de otros programas de la OMM:

Vigilancia de la Atmósfera Global por parte de la OMM

Sistema mundial de Observación del Clima

Programa hidrológico y de recursos hídricos

1.3. Sistemas meteo y espectro radioeléctrico.

Desde el punto de vista de los sistemas radioeléctricos se considera que la arquitectura de la ingeniería de sistemas puede tener tres capas conceptuales: Sistemas, Redes y Servicios. La última se apoya en la Red y ésta a su vez está construida por Sistemas.

En este caso concreto los sistemas meteorológicos se apoyan en los siguientes Servicios:

***Servicio de meteorología por satélite (MetSat)** usando satélites geoestacionarios que suelen usar bandas de frecuencias comprendidas entre 137 MHz y 66 GHz para transmitir datos (down /up links).

***Servicio de Ayuda a la meteorología (Met Aids).** Pueden usar radiosondas en paracaídas, cautivas, cohetes sonda, RPAS y UAVs. Usan bandas comprendidas entre 400 MHz y 36 GHz.

Los Servicios anteriores suelen utilizar los siguientes Sistemas:

***Radares meteorológicos y de perfil de viento.** Pueden operar en las Bandas S, C y X (2,7/2,9; 5,25/5,7; 9,3/9,5 GHz).

***Teledetección** pasiva o activa a bordo de vehículos espaciales para actividades meteorológicas.

-**Pasiva:** solamente recepción de señales procedentes de sensores. Radiometría pasiva de microondas. Bandas desde 1,37 GHz a 989,9 GHz.

-**Activa** (Sensores activos): Radares SAR; Altimetros; Dispersímetros; Radares de precipitación; Radares de perfil de nubes. Bandas desde 5,3/13,6GHz; hasta 946 GHz.

***Otros Sistemas de Radiocomunicaciones** para actividades meteorológicas.

1.4. Propuestas de la OMM a la UIT para CMR-23.

El desarrollo de nuevos servicios de radiocomunicaciones está ejerciendo una presión cada vez mayor sobre las bandas de frecuencia utilizadas con fines meteorológicos. Esto presenta riesgos potenciales de limitar las aplicaciones meteorológicas, pero también oportunidades para mejorar las observaciones.

La OMM tiene un grupo de expertos sobre temas del espectro radioeléctrico que trabajan en aspectos que pueden afectar a los instrumentos de control del cambio climático. A la vista de la próxima Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (Noviembre - Diciembre 2023 en Dubai) hay 18 temas técnicos relacionados con las bandas de frecuencias y/o asuntos de interés primordial y, que inciden en la gestión técnica de los servicios meteorológicos y campos relacionados. En lo escrito que sigue se resumen los títulos de lo que la UIT denomina Agendas. En dichas Agendas se discutirán las cuestiones técnicas que pueden afectar a los temas que trata la OMM.

1.4.1. Agendas.

-Agenda item 1.2: Identification of bands, including possible mobile service allocations, for International Mobile Telecommunications (IMT).

-Agenda item 1.3: Primary allocation of the band 3600-3800 MHz to the mobile service within Region 1 (Europa, Africa y Middle East).

-Agenda item 1.4: High-altitude platform stations as IMT base stations (HIBS) in frequency bands below 2.7 GHz.

-Agenda item 1.5: Possible regulatory actions in the frequency band 470-694 MHz in Region 1.

-Agenda item 1.6: Regulatory provisions to facilitate Regulatory radio-communications for sub-orbital vehicles.

-Agenda item 1.12: Possible new secondary allocation to the Earth exploration-satellite service (active) around 45 MHz.

-Agenda item 1.13: Upgrade of the space research service allocation to primary in the frequency band 14.8-15.35 GHz.

-Agenda item 1.14: Possible adjustments of the existing or possible new allocation to the EESS (passive) in 231.5-252 GHz.

-Agenda item 1.15: Harmonization of the use of the frequency band 12.75-13.25 GHz (Earth-to-space) by earth stations on aircraft and vessels communicating with geostationary space stations in the fixed-satellite service globally.

-Agenda item 1.16: Use of the frequency bands 17.7-18.6 GHz (s-E), 18.8-19.3 GHz (s-E), 19.7-20.2 GHz (s-E), 27.5-29.1 GHz (E-s) and 29.5-30 GHz (E-s) by Earth stations in motion (ESIM).

-Agenda item 1.17: Regulatory actions for the provision of inter-satellite links in specific frequency bands.

-Agenda item 1.18: Potential new allocations to the MSS in the frequency bands 1695-1710 MHz, 2010-2025 MHz, 3300-3316 MHz and 3385-3400 MHz for future narrowband MSS systems.

-Agenda item 7: Satellite regulatory procedures.

-Agenda item 9 on Article 21: Applicability of Article 21.5 for IMT base stations that use an antenna that consists of an array of active elements and notification of such systems.

-Agenda item 9.1.

- a) : Appropriate recognition and protection in the Radio Regulations for space weather sensors, without placing additional constraints on incumbent services.
- b) : Amateur service and amateur-satellite service allocations in 1,240-1,3 GHz.
- c) : Study use of IMT for fixed wireless access in bands allocated to the fixed service.
- d) : Protection of EESS (passive) in the frequency band 36-37 GHz from non-GSO FSS space stations.

1.5. Conclusiones.

Se considera que el control del cambio climático no puede hacerse si se prescinde de la herramienta de las Radiocomunicaciones (gestión del espectro radioeléctrico). Las Radiocomunicaciones forman parte del sistema para la Vigilancia Global del calentamiento de la Tierra y sus efectos sobre la vida en el planeta.

Es necesario identificar los problemas que se plantean en el uso de las herramientas para controlar los fenómenos atmosféricos y el cambio climático. Algunos ya han sido identificados y destacan entre ellos: las interferencias entre frecuencias reguladas/regulables actuales /futuras; el nuevo reparto del recurso frecuencia radioeléctrica y su relación con la demanda de otros nuevos servicios terrestres, espaciales, aeronáuticos, y marítimos. Las soluciones están en manos de la UIT y OMM, ambos organismos de la ONU y, su posterior cumplimiento por parte de los 193 Estados representados en las Naciones Unidas en lo que se refiere a todas las Recomendaciones del WRC-23 cuando se produzcan.

Sería deseable que en el año 2030 se haya llegado a soluciones parciales en estos temas y quizás en el año 2040 se hayan producido cambios definitivos en estos aspectos y se haya arreglado el tema del espectro radioeléctrico y su incidencia en el cambio climático. OJALÁ.

1.6. Referencias bibliográficas.

- [1] <https://public.wmo.int/en/our-mandate/what-we-do/wmo-contributing-sustainable-development-goals-sdgs>. (Consultado 10.11.2022)
- [2] <https://library.wmo.int>. Global Framework for Climate Services (GFCS) as identified at the Eighteenth World Meteorological Congress (Geneva, June 2019).
- [3] <http://oscar.wmo.int/space>.
- [4] <https://www.itu.int/en/myitu/Publications/2020/09/02/14/23/Radio-Regulations-2020>. World Radiocommunication Conference Resolutions are contained in Volume 3 of the in-force version of the Radio Regulations.
- [5] Resolution 811 (WRC-19)
- [6] “Agenda for the 2023 World Radiocommunication Conference” (Consultado 10.11.2022)

2. ERUPCIÓN DEL VOLCÁN DE LA PALMA: CARACTERIZACIÓN DE AEROSOLES VOLCÁNICOS Y EMISIONES DE GAS DESDE UNA PERSPECTIVA SINÉRGICA.

Barreto¹, M. Sicard², O.E. García¹, R. Román³, V. Rizi⁴, R. Roininen⁵, P.M Romero-Campos¹, Y. González^{6,1}, S. Rodríguez⁷, R.D. García^{8,1}, C. Torres¹, M. Iarlori⁴, E. Cuevas¹, D. Suárez⁹, R. Ramos¹, C. Córdoba-Jabonero¹⁰, J. de la Rosa¹¹, A. Rodríguez-Gómez², C. Muñoz-Porcar², A. Comerón², A. Bedoya- Velásquez¹², J.C. Antuña-Sanchez³, V. Neustroev¹³, E. Pietropaolo⁴, Y. Lopez-Darias^{7,14}, M.A. López- Cayuela¹⁰, C. Carvajal-Pérez¹⁰, J.J. Bustos¹, O. Álvarez¹, C. Toledano³, C. Aramo⁴, J. Vilches¹⁵, R. González³, F.A. Almansa^{6,1}, R. Ceolato¹², N. Taquet⁷, Thomas Boulesteix⁷, M. Martínez⁹, N. Prats¹, A. Redondas¹, C. Bayo¹, V. Carreño¹, C. López¹⁶, S.L. León^{8,1}, P.P. Rivas¹, A. Alcántara¹, F. Parra¹, P. Martín³.

(1) Izaña Atmospheric Research Centre (IARC), State Meteorological Agency of Spain (AEMet), Santa Cruz de Tenerife, Spain; (2) CommSensLab, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain; (3) Group of Atmospheric Optics (GOA-UVa), Universidad de Valladolid, Valladolid, Spain; (4) INFN-GSGC L'Aquila and CETEMPS-DSFC, Università degli Studi dell'Aquila, L'Aquila, Italy; (5) Vaisala Oyj, Helsinki, Finland; (6) Cimel Electronique, Paris, France; (7) Instituto de Productos Naturales y Agrobiología, IPNA, CSIC, Tenerife, Spain; (8) TRAGSATEC, Madrid, Spain; (9) Delegación de AEMet en Canarias (DTCAN), Las Palmas de Gran Canaria/Santa Cruz de Tenerife, Spain; (10) Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Atmospheric Research and Instrumentation Branch, Torrejón de Ardoz, Spain; (11) Center for Research in Sustainable Chemistry - CIQSO, University of Huelva, Associate Unit CSIC-University of Huelva "Atmospheric Pollution", Huelva, Spain; (12) The French Aerospace Lab, ONERA, Toulouse, France; (13) Space Physics and Astronomy Research Unit, University of Oulu, Finland; (14) Departamento de Química, Unidad Departamental de Química Analítica, Universidad de La Laguna (ULL), Tenerife, Spain; (15) Viceconsejería de Medio Ambiente. Gobierno de Canarias, Tenerife, Spain; (16) Sieltec Canarias, S.L.

Presenting author e-mail: michael.sicard@upc.edu

Resumen-Este trabajo presenta las líneas generales de la caracterización sinérgica de los aerosoles volcánicos y los gases traza emitidos en la erupción del volcán de La Palma (Islas Canarias, España) entre el 19 de septiembre y el 25 de diciembre de 2021. Varios grupos de investigación y organizaciones privadas de diferentes países europeos, en un esfuerzo colaborativo sin precedentes, dispusieron instrumentación científica en el área de la erupción para estudiar de manera coordinada las características de los aerosoles volcánicos y gases traza recién emitidos a la atmósfera. La instrumentación desplegada en varias ubicaciones de La Palma durante la erupción consistió en medidores del perfil vertical de aerosoles (Vaisala CL51, Vaisala CL61, Lufft CHM15k, MPL-4B y el lidar Raman CTA-IFNF ARCADE), fotómetros solares (CE318-TS, Calitoo, ZEN-RS52), espectrómetro FTIR EM27/SUN, cámaras de cielo total, analizadores in-situ (aerosoles - SMPS, OPS, etalómetros, muestreadores-, IMDS, SO₂ y O₃) y sensores meteorológicos. La información local proporcionada por estos instrumentos se complementó con información adicional extraída de otras dos estaciones de AEMET en la

cercana isla de Tenerife: Santa Cruz de Tenerife y la estación del Global Atmospheric Watch (GAW) de alta montaña del Observatorio de Izaña, situadas a unos 140 km del volcán. Estas observaciones complementarias proporcionaron robustez al análisis llevado a cabo en La Palma, dada su proximidad al lugar de la erupción y la amplia variedad de técnicas de medida de aerosol y gases disponibles en ambas estaciones.

2.1. Introducción.

Durante la erupción del volcán de Cumbre Vieja, en la isla de La Palma en 2021, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), en calidad de Servicio Nacional y Autoridad Meteorológica del Estado, prestó diferentes servicios de apoyo al Comité Científico y al Comité Asesor del Plan de Emergencias Volcánicas de Canarias (PEVOLCA). Parte de sus actividades, coordinadas con una multitud de otros centros nacionales e internacionales colaborados habituales de AEMET, abarcaron la vigilancia y predicción meteorológica, la monitorización y predicción del transporte del penacho volcánico, y la valoración del impacto de las emisiones de gases y cenizas de la erupción volcánica en la calidad del aire en la isla de la Palma y en la región de Canarias.

Una de las principales funciones de AEMET es la vigilancia continua de las condiciones meteorológicas, climáticas y de la composición físico-química de la atmósfera sobre todo el territorio nacional, especialmente de aquellos factores que puedan perturbar las mismas. En este sentido, AEMET participó activamente en el seguimiento de la crisis de emergencia volcánica en la isla de La Palma, tanto proveyendo productos meteorológicos operacionales como a nivel de investigación. Desde un punto de vista operacional, AEMET en su condición de Autoridad Meteorológica suministró predicciones específicas y realizó la vigilancia de la dispersión de las cenizas volcánicas en la atmósfera en coordinación con el Centro de Avisos de Cenizas Volcánicas (VAAC) de Toulouse, que es el que tiene competencias sobre la región de Canarias. Para ello, AEMET participó en las reuniones diarias del comité científico del PEVOLCA, realizando labores de asesoría meteorológica durante todo el proceso eruptivo, así como en las reuniones de la Célula de coordinación y seguimiento de cenizas volcánicas de La Palma, establecida por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, para el asesoramiento de los gestores de tráfico aéreo, gestores aeroportuarios y las autoridades militares. Por otra parte, a nivel de investigación, AEMET ha dedicado especial atención a aspectos claves como el transporte de la nube de dispersión volcánica en la región subtropical del Atlántico Norte, su composición físico-química y su impacto en la calidad del aire y el clima.

2.2. Modelización de la nube de dispersión volcánica a través de MOCAGE.

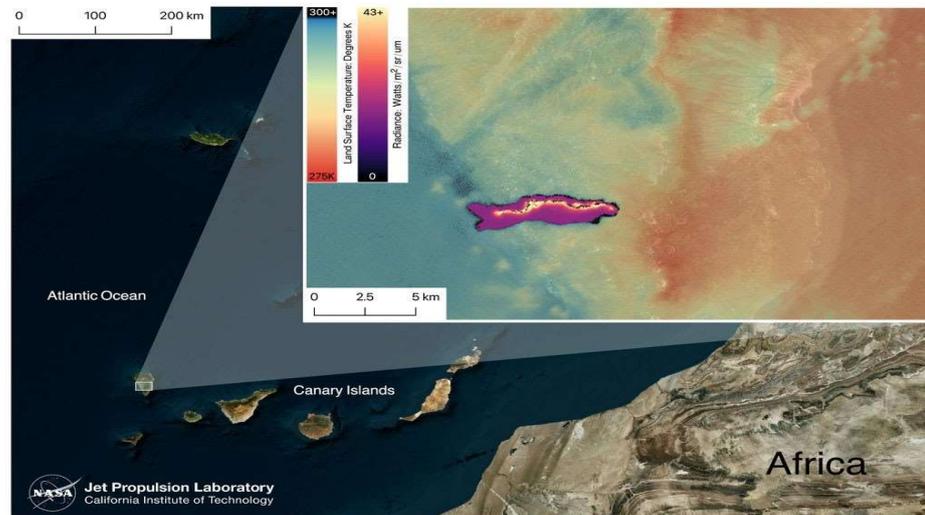


Figura 2.1: Imagen extraída de la página web del JPL, que muestra la ubicación de La Palma, en el Océano Atlántico, cerca de la costa africana. En la figura insertada se ve una imagen superpuesta de la radiancia (que permite discernir la extensión de la colada) y de la temperatura de la superficie del suelo hacia el final de la erupción.

AEMET emplea operativamente el modelo de transporte químico MOCAGE para suministrar predicciones de la composición química de la atmósfera enfocadas a calidad del aire [1]. No obstante, para la crisis de emergencia volcánica de La Palma, AEMET proporcionó diariamente simulaciones especializadas de la dispersión de la nube de cenizas volcánicas en diferentes niveles de presión (desde 950 hasta 300 hPa), así como deposición en 12 horas y total en columna, con diferentes alcances temporales (hasta 72 horas). Para ello, MOCAGE fue ejecutado en el superordenador Cirrus de AEMET en modo accidente, desactivando el módulo de química del modelo y funcionando como un modelo de dispersión. La Figura 2.1 muestra la ubicación del volcán y una imagen de satélite hacia el final de la erupción.

2.3. Despliegue de instrumentación científica en la isla de La Palma.

Para complementar las labores de observación y seguimiento de la evolución de la nube de cenizas volcánicas, AEMET realizó, a través del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (CIAI), de la Delegación Territorial de AEMET en Canarias (DTCAN) y en colaboración con numerosas instituciones nacionales e internacionales, un despliegue de instrumentación científica en La Palma con un doble objetivo (Figura 2.2). El primero es caracterizar la estructura vertical del penacho eruptivo, y monitorizar en tiempo real cambios que se produzcan en dicha estructura, así como perimetrar la salida de la nube de dispersión. El

segundo objetivo es el de contribuir en la implantación de una red de calidad del aire de emergencia que permita conocer el impacto de las emisiones volcánicas en la salud de la población de La Palma. Esta red destinada a las autoridades de emergencias y Protección Civil está básicamente soportada por la Unidad Militar de Emergencias (UME), el Gobierno de Canarias y el Cabildo Insular de La Palma.



Figura 2.2: Localización e instrumentación instalada en las siete estaciones (estrellas) desplegadas en La Palma para seguir el proceso volcánico por diferentes organizaciones en colaboración con AEMET. El punto azul representa la ubicación del centro emisor, el área roja la zona afectada por el flujo de lava, y los círculos representan la ubicación aproximada de los diferentes sismos asociados al proceso eruptivo (Fuente: Instituto Geográfico Nacional, www.ign.es). Figura tomada de [3].

2.4. Red de perfiladores verticales.

La red de perfiladores verticales instalada exprofeso en La Palma para el seguimiento del proceso eruptivo tenía como objetivo la medida en tiempo real de la altura de la nube de dispersión volcánica, así como la caracterización de los aerosoles volcánicos emitidos, y fue desplegada en el contexto de la infraestructura europea ACTRIS (Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infraestructure) [3]. Esta red constaba de cinco instrumentos (tres ceilómetros y dos sistemas lidar), que fueron instalados perimetrando el centro emisor (ver detalles en Figura 2.2). Los datos de esta nueva red de emergencia se proporcionaron en tiempo real al PEVOLCA y se han incorporado en la red EUMETNET e-Profile (www.eumetnet.eu/activities/observations-programme/current-activities/e-profile/), que apoya al VAAC de Toulouse y al programa de observación de Copernicus. Un mapa detallado de la ubicación de todos los perfiladores verticales instalados durante la erupción se presenta en la Figura 2.3. En general, los aerosoles volcánicos no superaron casi nunca los 5 km de altura afectando el nivel de superficie debido a procesos de deposición de la capa de ceniza.



Figura 2.3: Ubicación de las cinco estaciones con perfiladores de aerosoles en La Palma (estrellas blancas), algunos de ellos con un fotómetro sol/luna co-ubicado. Se desplegaron tratando de rastrear la altitud de la capa de dispersión en todas las ubicaciones posibles, respecto al volcán, dependiendo de la dirección del viento. Los círculos rosas indican estaciones de superficie de la AEMET. Los círculos más pequeños al sureste del volcán y de color amarillo/naranja/rojo indican posición/fuerza de terremotos detectados.

2.5. Calidad del aire.

La monitorización continua y en tiempo real de la calidad del aire en toda la isla de La Palma fue una de las prioridades del PEVOLCA, del Gobierno de Canarias y del Cabildo Insular de La Palma. Por ello, desde el comienzo del proceso eruptivo se desplegó expresamente una red de estaciones de calidad del aire, que monitorizó las concentraciones superficiales de los principales contaminantes esperados durante el mismo (material particulado y compuestos de azufre, SO₂ y H₂S). La Figura 2.4 muestra las concentraciones superficiales de SO₂ de la red de calidad del aire de La Palma para un evento donde el penacho volcánico se desplazó hacia el oeste de la isla, afectando a los municipios de El Paso, Los Llanos de Aridane y Tazacorte, principalmente. Durante este episodio no se superaron los valores límite horarios (VLH) o diarios (VLD) de 350 µg/m³ y 125 µg/m³, respectivamente, establecidos por la legislación vigente en calidad de aire (Directiva 2008/50/EC, [4]). No obstante, durante el proceso eruptivo, sí se detectaron eventos puntuales excediendo estos umbrales (e.g. el VLH se excedió el 4.2%, 1.2% y 1.9% de los promedios horarios para Los Llanos, El Paso y Tazacorte, respectivamente).

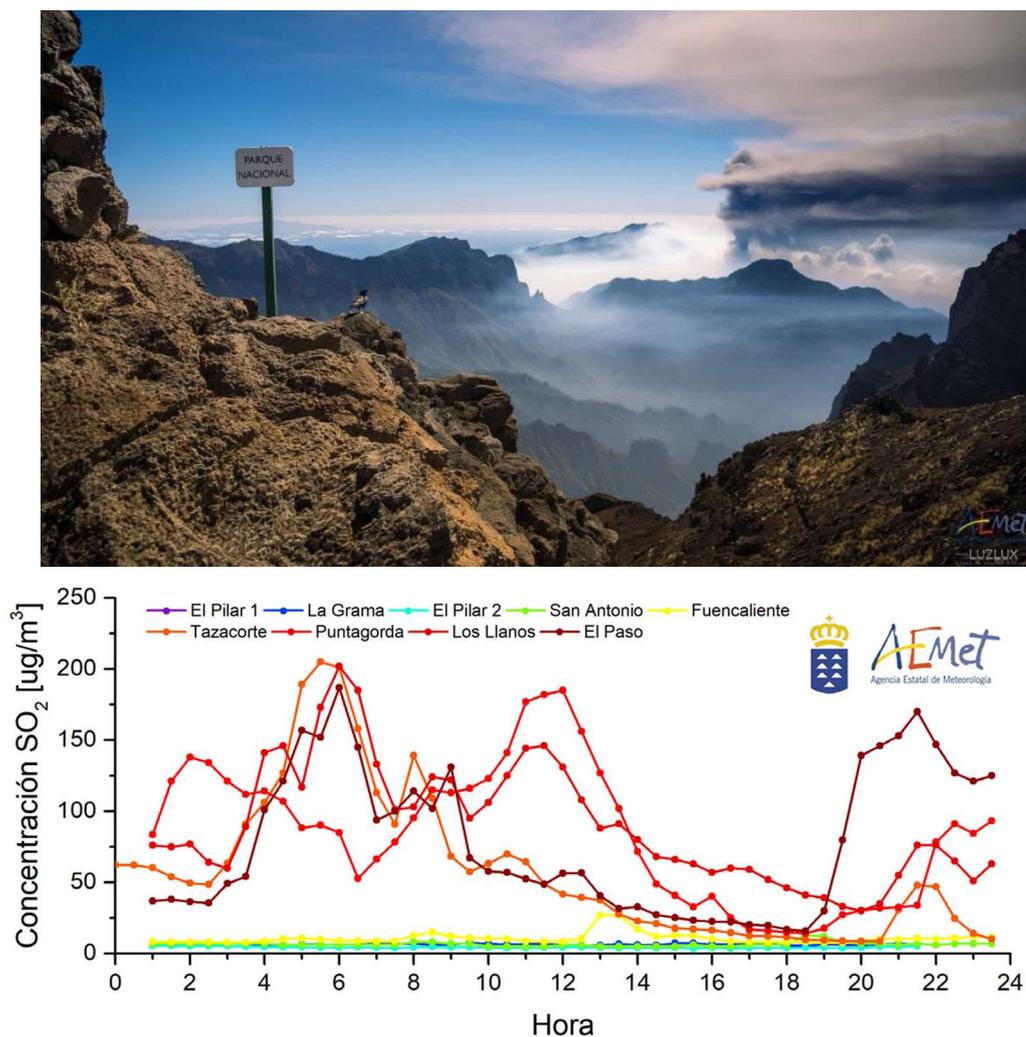


Figura 2.4: Imagen del penacho volcánico, tomada desde el Pico Fuente Nueva (30/11/2021), donde se observó desplazamiento hacia el oeste de la isla (imagen superior). Evolución temporal de las concentraciones superficiales de dióxido de azufre (SO_2) registradas en la red de estaciones de calidad del aire del Gobierno de Canarias y AEMET para ese mismo día (imagen inferior).

2.6. Sondeos meteorológicos.

Con el objetivo de reforzar la observación y monitorización de la estructura vertical de la atmósfera en la principal zona de afectación de la erupción volcánica, AEMET instaló y operó, en colaboración con la UME, una base de radiosondeos en las cercanías del volcán (estación de Los Llanos en la Figura 2.2). Desde esta base se realizó un sondeo diario, a las 12 UTC, que permitió la determinación y detección temprana de inversiones térmicas en niveles bajos, lo cual es de suma importancia desde el punto de vista de la calidad del aire, ya que favorecen la acumulación de gases y aerosoles emitidos por el proceso volcánico o por otras fuentes, como la quema de biomasa o episodios de polvo sahariano. Los radiosondeos permiten además obtener una caracterización detallada de la distribución vertical del viento, crítico para conocer el desplazamiento de la nube de dispersión volcánica y sus posibles impactos en navegación aérea.

2.7. Observatorio atmosférico de Izaña.

La circulación en las capas bajas y medias de la atmósfera favoreció que las nubes de cenizas y gases volcánicos se dispersaran sobre el Atlántico subtropical, permitiendo que el Observatorio Atmosférico de Izaña (IZO, AEMET), situado en la isla de Tenerife a 2.4 km s.n.m. y a una distancia de 140 km del volcán, registrara numerosos impactos directos de la nube de dispersión volcánica durante todo el proceso eruptivo. Dado el complejo programa para la monitorización e investigación de la composición atmosférica que dispone esta estación de Vigilancia Atmosférica Global (VAG, Organización Meteorológica Mundial, [6]), la composición físico-química de los aerosoles y gases presentes en la nube de dispersión pudo ser detalladamente caracterizada.

En la Figura 2.5 se muestra, a modo de ejemplo, la serie temporal de medidas in-situ de SO₂, CO₂ y CO en Izaña. Se pueden ver 5 eventos importantes de impacto directo de la pluma volcánica que afectan al SO₂ pero también a las concentraciones de gases de efecto invernadero.

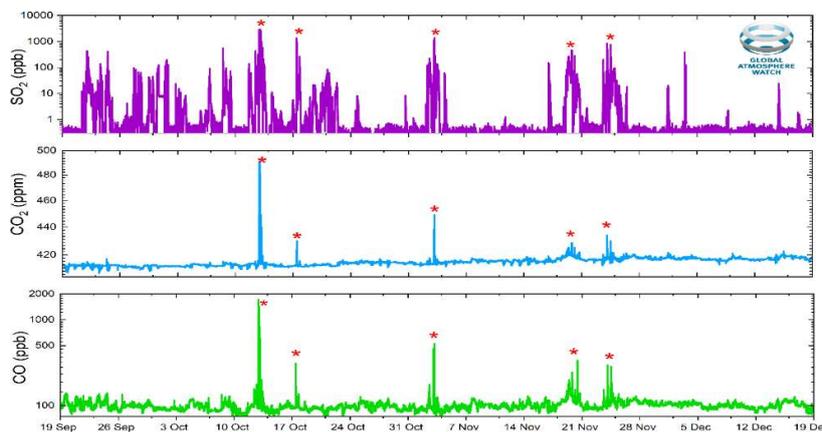


Figura 2.5: Imagen desde Observatorio Atmosférico de Izaña, donde se observa el impacto del penacho volcánico en tonos blanquecinos junto al Teide (imagen superior). Evolución temporal de las concentraciones superficiales de SO₂, CO₂ y CO registradas en el Observatorio Atmosférico de Izaña durante la erupción.

2.8. Conclusión.

El proceso eruptivo del volcán de Cumbre Vieja supuso un desafío para la sociedad palmera, pero también para todas las instituciones y organizaciones que prestaron su apoyo en diferentes

aspectos de esta crisis. La colaboración y coordinación entre todas las organizaciones involucradas fue clave para la gestión de esta crisis y es un ejemplo claro del servicio de la Ciencia para la Sociedad.

2.9. Referencias.

- [1] Josse B., Simon P. and V.-H. Peuch, Rn-222 global simulations with the multiscale CTM MOCAGE, Tellus, 56B, 339-356, 2004.
- [2] Informe técnico de AEMET sobre el “Servicio meteorológico a la navegación aérea durante la erupción volcánica en La Palma”, Comunicación interna, 2022.
- [3] <https://www.actris.eu/news-events/news/actris-spain-coordinating-unprecedented-actions-cumbre-vieja-volcanic-emergency>, 2021
- [4] Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe.
- [5] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008L0050#d1e89-30-1>, 2008.
- [6] <https://aemetblog.es/2022/03/22/sinergia-entre-medidas-superficiales-y-en-columna-en-la-estacion-de-vigilancia-atmosferica-global-de-izana-aplicacion-a-la-erupcion-volcanica-de-la-palma/>
- [7] Cuevas, E., Milford, C., Bustos, J. J., R., García, O. E., García, R. D., Gómez-Peláez, A. J., Guirado- Fuentes, C., Marrero, C., Prats, N., Ramos, R., Redondas, A., Reyes, E., Rivas-Soriano, P. P., Rodríguez, S., Romero-Campos, P. M., Torres, C. J., Schneider, M., Yela, M., Belmonte, J., del Campo-Hernández, R., Almansa, F., Barreto, A., López-Solano, C., Basart, S., Terradellas, E., Werner, E., Afonso, S., Bayo, C., Berjón, A., Carreño, V., Castro, N. J., China, N., Cruz, A. M., Damas, M., De Ory-Ajamil, F., García, M.I., Gómez-Trueba, V., Hernández, C., Hernández, Y., Hernández-Cruz, B., León-Luís, S. F., López-Fernández, R., López-Solano, J., Parra, F., Rodríguez, E., Rodríguez-Valido, M., Sálamo, C., Sanromá, E., Santana, D., Santo Tomás, F., Sepúlveda, E., and Sosa, E.: Izaña Atmospheric Research Center Activity Report 2017-2018. (Eds. Cuevas, E., Milford, C. and Tarasova, O.), State Meteorological Agency (AEMET), Madrid, Spain and World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, WMO/GAW Report No. 247, 2019.

3. LANDSAT: 50 AÑOS OBSERVANDO LA VEGETACIÓN DESDE EL ESPACIO.

Victoriano Moreno (Colegio Oficial de Físicos) y Carmelo Alonso (Indra Sistemas S.A.)

3.1. Introducción.

El 23 de julio de 1972 se puso en órbita el primer satélite Landsat. Este satélite llevaba embarcado un innovador sensor para el estudio de la vegetación: el Multi-Spectral Scanner (MSS). Este sensor se basaba en un dispositivo desarrollado 3 años antes en los Laboratorios Bell: el dispositivo de carga acoplada (CCD). Se iniciaba así la “era digital” en el campo de la observación de la Tierra.

A lo largo de este último medio siglo, el seguimiento de la cobertura vegetal ha sido una de las principales aplicaciones de la teledetección espacial. Hoy día, los productos relacionados con la vegetación, procedentes de los satélites de observación de la Tierra, se encuentran entre los más utilizados. Basados en índices, que se obtienen de las imágenes, proporcionan mediciones clave sobre su productividad, su biodiversidad o su fenología, convirtiéndose en una herramienta indispensable en aplicaciones agrícolas y de gestión de recursos naturales.

Gracias a estos satélites es posible una continua monitorización del estado y la salud del medio ambiente. Su importancia ha ido creciendo a lo largo de su medio siglo de vida debido, principalmente, al impacto del cambio climático global sobre los ecosistemas y la vida de las personas. La capacidad que proporcionan las imágenes de disponer, de manera inmediata, de datos históricos sobre la cobertura vegetal es una de las piedras angulares para comprender las amenazas climáticas y mitigar los efectos relacionados.

En estos cincuenta años, las imágenes de la superficie terrestre obtenidas por los satélites han ido mejorando en detalle (resolución espacial), en frecuencia de adquisición (resolución temporal), en regiones del espectro electromagnético (resolución espectral) y en rango dinámico de valores digitales (resolución radiométrica).

En la presente comunicación, aprovechamos este cincuentenario para analizar la evolución tecnológica experimentada por los satélites de observación de la Tierra en relación con su aplicación en el seguimiento de la cobertura vegetal.

3.2. El Programa LANDSAT.

Los satélites del programa Landsat son ya un clásico en los satélites de observación de la Tierra con sus 50 años de observación continua de la superficie terrestre.

El primero de los satélites, denominado en un principio como ERTS-1¹ y renombrado posteriormente como Landsat-1, se puso en órbita el 23 de julio de 1972. Fue desarrollado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) como un sistema experimental para la investigación de la observación de la Tierra desde el espacio. Como sistema experimental, su principal valor residía en los datos de imágenes digitales adquiridos por el sensor *Multi-Spectral Scanner* (MSS). Este sensor se basaba en un dispositivo desarrollado 3 años antes en los Laboratorios Bell por George Smith y Willard Boyle, el dispositivo de carga acoplada (CCD). Se iniciaba así la “era digital” en el campo de la observación de la Tierra.

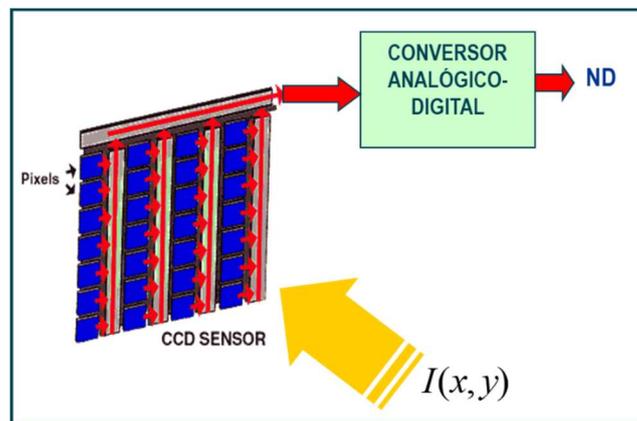


Figura 3.1: Esquema de funcionamiento del dispositivo de carga acoplada (CCD).

El grupo en el que trabajaban Smith y Boyle estaba interesado en crear un nuevo tipo de memoria de semiconductores para los ordenadores. En octubre de 1969 desarrollaron un pequeño dispositivo que utiliza una cantidad de carga eléctrica para representar una cantidad analógica, como la intensidad de la luz, muestreada en momentos discretos. La función de memoria proviene de cambiar estas cargas, simultáneamente, en una fila de celdas, también en tiempo discreto. El CCD es, por lo tanto, un dispositivo de tiempo discreto, es decir, una señal continua o analógica muestreada en momentos discretos.

Sin embargo, las aplicaciones más importantes y universalmente reconocidas de este dispositivo se encuentran en los sensores de imágenes. En ellos, los CCDs se encuentran en todo, desde cámaras digitales de menos de 50 euros hasta telescopios espaciales de cientos de millones. Como sensor de imagen, un CCD generalmente tiene una matriz de celdas para capturar luz procedente de un objeto mediante el efecto fotoeléctrico. Los paquetes de carga no se convierten inicialmente en una señal eléctrica, sino que se mueven de una celda a otra mediante el acoplamiento y el

¹ Earth Resources Technology Satellite

desacoplamiento de los posibles pozos dentro del semiconductor que constituye el CCD. Al final de la línea, las cargas, de todos los diferentes elementos de imagen (píxeles), pueden convertirse en señales eléctricas. La idea aquí es tener un gran número (millones) de celdas de detección para lograr una buena resolución (Figura 3.1). Por este trabajo, Smith y Boyle recibieron el premio Nobel de Física en 2009.

Hacia 1970 la NASA estaba interesada en obtener imágenes multiespectrales de la Tierra desde el espacio porque quería poner en órbita un satélite de observación de la Tierra, para el estudio de los recursos naturales. Virginia T. Norwood, que trabajaba entonces en la División de Espacio y Comunicaciones de Hughes Aircraft Company, se interesó por el tema. Trabajando en campo con Ingenieros Agrónomos y utilizando el recién inventado CCD pudo determinar las especificaciones técnicas que tendría que cumplir la cámara multiespectral que buscaba la NASA. Norwood estaba convencida de que un escáner multiespectral era la forma más adecuada de cumplir los requisitos que su análisis previo había determinado. Así se convirtió en “la madre del Landsat”, desarrollando el sensor MSS.

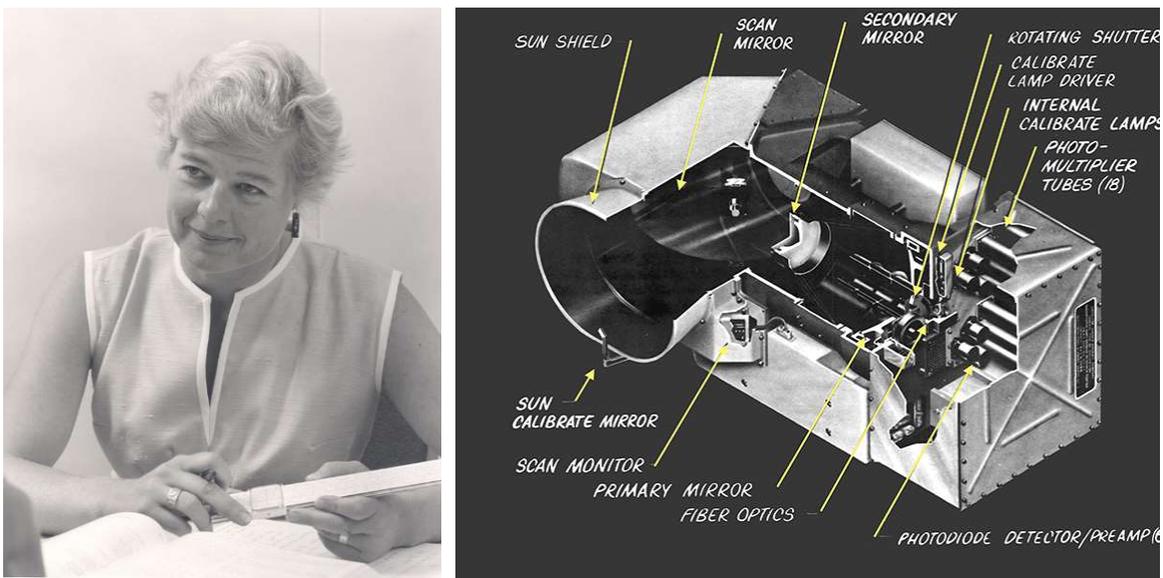


Figura 3.2: Virginia T. Norwood (izquierda) y sensor MSS (derecha). Fuente: NASA.

El programa Landsat evolucionó de un programa experimental a uno operativo a medida que la NASA desarrolló los sensores MSS y puso en órbita los siguientes satélites: el Landsat-2 en enero de 1975 y el Landsat-3 en marzo de 1978, ambos también con el sensor MSS, entre otros. Estos primeros satélites Landsat orbitaban la Tierra a una altitud de alrededor de 910 km, con un período de revisita de 18 días.



Figura 3.3: Cronograma del programa Landsat. Fuente: NASA

El sensor MSS proporcionaba imágenes de la superficie terrestre con una resolución espacial de 80 m, una resolución espectral de 4 bandas distribuidas en el visible e infrarrojo cercano y con una resolución radiométrica de 6 bit, con lo que la radiancia que recibía el sensor se codificaba en 64 niveles de gris.

La siguiente generación de satélites Landsat llegó en la década de los 80 con el Landsat-4 y el Landsat-5. El primero de ellos puesto en órbita el 16 de julio de 1982 y el segundo el 1 de marzo de 1984. Esta segunda generación se caracterizó por órbitas más bajas, situadas a una altitud de 705 km, lo que permitía reducir el período de revisita a 16 días y mejorar la resolución espacial.



Figura 3.4: Imagen multispectral de Madrid y alrededores tomada por el sensor MSS del Landsat-1 el 7 de marzo de 1973.

Como instrumentos, además del MSS que garantizaba la continuidad de datos con los anteriores, estos satélites iban equipados con una nueva generación de sensores para la observación de la Tierra: el *Thematic Mapper* (TM). Este nuevo instrumento tenía la capacidad de producir imágenes

digitales de la superficie terrestre con una resolución espacial de 30 m y una mayor resolución espectral: 7 bandas distribuidas en el visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio. Además, contaba con una banda en el infrarrojo térmico que permitía registrar la temperatura de la superficie terrestre con una resolución de 120 m (ver Cuadro 3.1). Todas ellas codificadas con una resolución radiométrica de 8 bit transformando, por tanto, en 256 niveles de gris la radiancia recibida en el sensor y en cada una de las bandas.



Figura 3.5: Imagen multiespectral de Madrid y alrededores tomada por el sensor TM del Landsat-5 el 18 de agosto de 1984.

Tras el lanzamiento fallido del Landsat-6 en octubre de 1993, el programa encaró el acceso al siglo XXI con la tercera generación de satélites. Con sensores más desarrollados, con mejores resoluciones y, lo que resultó más trascendental, un cambio de paradigma en la distribución de los datos a los usuarios desde 2008: una distribución libre, abierta y gratuita de los mismos.

El Landsat-7, similar en su diseño al fallido Landsat-6, se puso en órbita en abril de 1999 manteniendo los mismos parámetros orbitales que el Landsat-5: altitud de la órbita de 705 km con una inclinación de 98.2º y un período de revisita de 16 días.

Este satélite, a diferencia de sus predecesores, ya no llevará embarcado el sensor MSS. El nuevo sensor embarcado era un TM mejorado, el *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+). Con este sensor, el Landsat-7 recoge imágenes con 8 bandas espectrales: una pancromática que cubre todas las longitudes de onda del visible e infrarrojo cercano y con 15 m de resolución, 6 bandas distribuidas en el visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio y con 30 m de resolución y, finalmente, una banda en el infrarrojo térmico y con 60 m de resolución (ver Cuadro 3.1). Todas ellas codificadas con una resolución radiométrica de 8 bits y con un ancho de imagen de unos 180 km.

Banda	Landsat-5 TM		Landsat-7 ETM+	
	Longitud de onda (nm)	Resolución espacial (m)	Longitud de onda (nm)	Resolución espacial (m)
1	450 – 520	30	450 – 520	30
2	520 – 600	30	520 – 600	30
3	630 – 690	30	630 – 690	30
4	760 – 900	30	770 – 900	30
5	1550 – 1750	30	1550 – 1750	30
6	10400 – 12500	120	10400 – 12500	60
7	2080 – 2350	30	2090 – 2350	30
8			520 – 900	15

Cuadro 3.1: Características de las bandas espectrales de los sensores TM y ETM+.



Figura 3.6: Imagen pancromática de Madrid tomada por el sensor OLI del Landsat-8 el 7 de mayo de 2022.

El satélite Landsat-8, puesto en órbita en febrero de 2013, lleva embarcados a bordo los sensores OLI (*Operational Land Imager*) y TIRS (*Thermal InfraRed Sensor*). Entre estos dos sensores se reparten las 11 bandas que componen las imágenes que, de la superficie terrestre, captura este satélite. Sus características espectrales y resolución espacial se muestran en el Cuadro 3.2. A diferencia de sus predecesores, estas bandas espectrales están codificadas con una resolución radiométrica de 12 bits.

Sensor	Banda	Longitud de onda (nm)	Resolución (m)
OLI	B1 - <i>Coastal aerosol</i>	430 – 450	30
	B2 - <i>Blue</i>	450 – 510	30
	B3 - <i>Green</i>	530 – 590	30
	B4 - <i>Red</i>	640 – 670	30
	B5 - <i>Near Infrared (NIR)</i>	850 – 880	30
	B6 - <i>SWIR 1</i>	1570 – 1650	30
	B7 - <i>SWIR 2</i>	2110 – 2290	30
	B8 - <i>Panchromatic</i>	500 – 680	15
	B9 - <i>Cirrus</i>	1360 – 1380	30
TIRS	B10 - <i>Thermal Infrared 1</i>	10600 – 11190	100
	B11 - <i>Thermal Infrared 2</i>	11500 – 12510	100

Cuadro 3.2: Características de las bandas espectrales de los sensores OLI y TIRS.

Finalmente, el satélite más reciente de la serie, el Landsat-9 fue puesto en órbita el 27 de septiembre de 2021 llevando a bordo los mismos sensores que su predecesor, el Landsat-8.

3.3. Cincuenta años de aplicaciones usando las imágenes del satélite LANDSAT.

Las aplicaciones o servicios de usuario que se han desarrollado a lo largo de la vida del programa Landsat durante los últimos 50 años constituyen el uso que se han dado a los datos (imágenes) captados por los diferentes satélites Landsat desde el espacio. Cubren la mayoría de las áreas temáticas en que podemos englobar las actividades del ser humano con el planeta Tierra, que van desde procesos que tienen ver con el medioambiente hasta procesos industriales. También los datos tomados por el Landsat han contribuido para alimentar los modelos de cambio climático y poder predecir las consecuencias del mismo.

Los usuarios de estos servicios son amplios: las agencias medioambientales, gestores del territorio, gerencias de urbanismo, instituciones cartográficas, instituciones de obra pública, instituciones de gestión forestal, instituciones agrícolas, agencias de protección civil, agencias de seguridad, instituciones culturales/arqueológicas, institutos oceanográficos, institutos geológicos, etc.

Dado que aplicaciones puestas en marcha a lo largo de la vida del programa Landsat son innumerables vamos a describir y poner ejemplos de un subconjunto de estas que según nuestro criterio son unas de las más extendidas y representativas: Cartografía de usos y ocupación del suelo, Contaminación, Impacto Ambiental por obra civil, Recursos Hídricos para uso agrícola, procesos de deforestación, Incendios Forestales, Nieve/Glaciación.

3.3.1. Cartografía de usos y ocupación de suelo.

Las imágenes capturadas son una excelente base para crear y actualizar cartografía digital de una forma precisa, y por lo tanto del catastro y la ordenación del territorio, así como de los usos y ocupación de suelo. Dicho sistema permite hacer una evaluación continua de las infraestructuras locales y regionales, el crecimiento urbano, el retroceso de los hábitats naturales, las transformaciones agrarias o la necesidad de nuevas vías de comunicación.

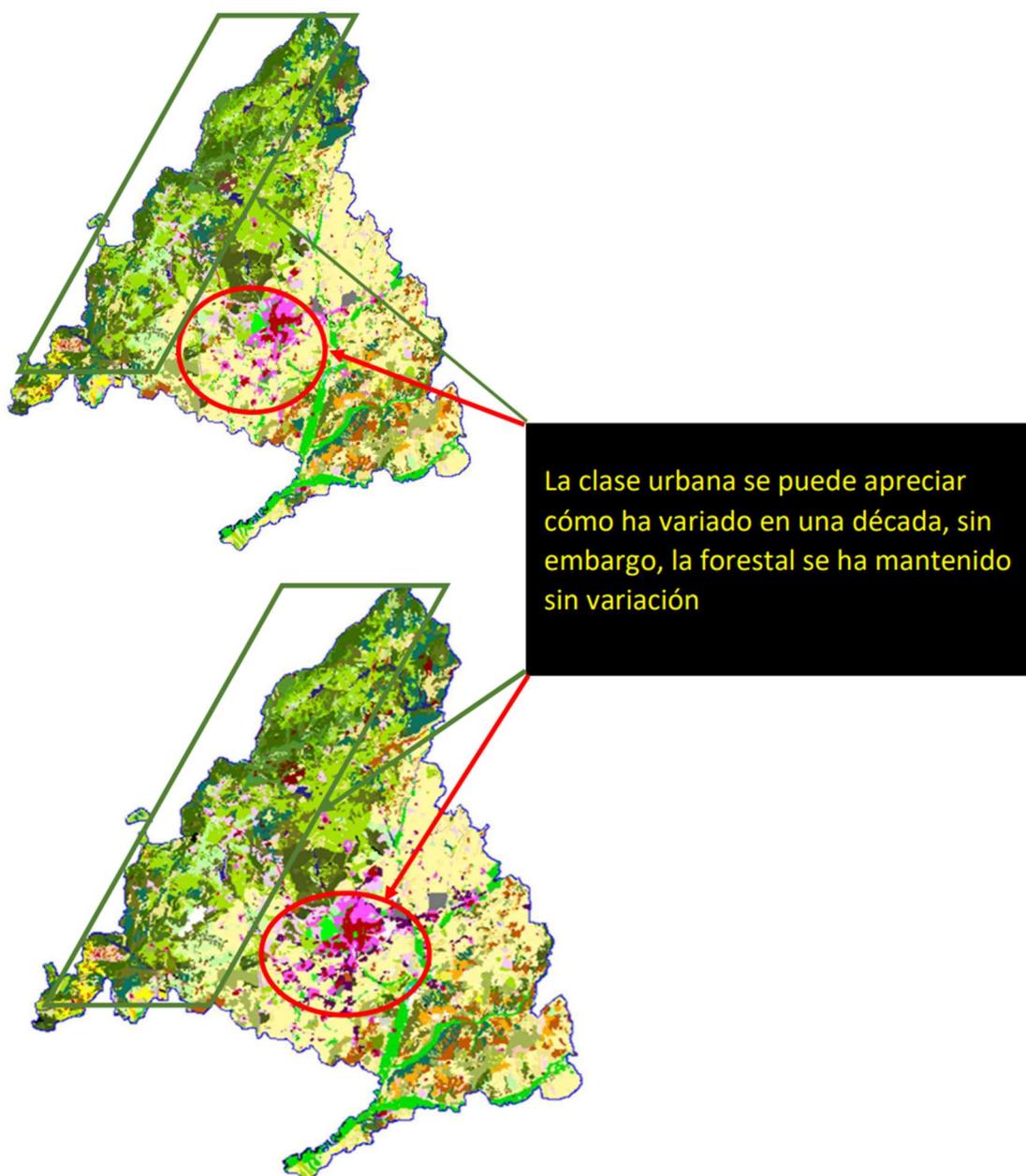


Figura 3.7: Ocupación del suelo de la C.A. de Madrid entre 1990 y 2000.

No sólo permite identificar las áreas sometidas a procesos de cambio, sino identificar las causas del mismo. Con un sistema de estas características (satélite Landsat), los urbanistas pueden planificar las inversiones en infraestructuras de todo tipo, viales, de comunicación, de servicios asistenciales y comerciales, de estacionamiento. Los responsables del mantenimiento y gestión de las zonas verdes tendrán también una información detallada y precisa de la extensión de esas zonas, así como el estado de salud de las plantas o especies verdes que constituyen los parques y jardines, así como los bosques que rodeen los núcleos urbanos y ciudades.

Dentro de esta actividad en el año 1985 la UE lanzó el proyecto **CORINE Land Cover**. El proyecto **CORINE Land Cover** de la Unión Europea es una de las iniciativas pioneras en la realización de mapas de usos del suelo a escalas continentales a partir de imágenes de satélite, entre ellas las del Landsat. En la Figura 3.7. podemos ver un mapa de usos de suelo de la Comunidad Autónoma de Madrid fruto de la iniciativa **CORINE** que se viene desarrollando desde 1985, en este caso se muestra las diferencias de uso de suelo que existen entre los años 1990 y 2000.

3.3.2. Contaminación.



Figura 3.8: Vertidos en zona portuaria.

Tomando en un sentido muy amplio el término contaminación, la Teledetección 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 multispectrales 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.

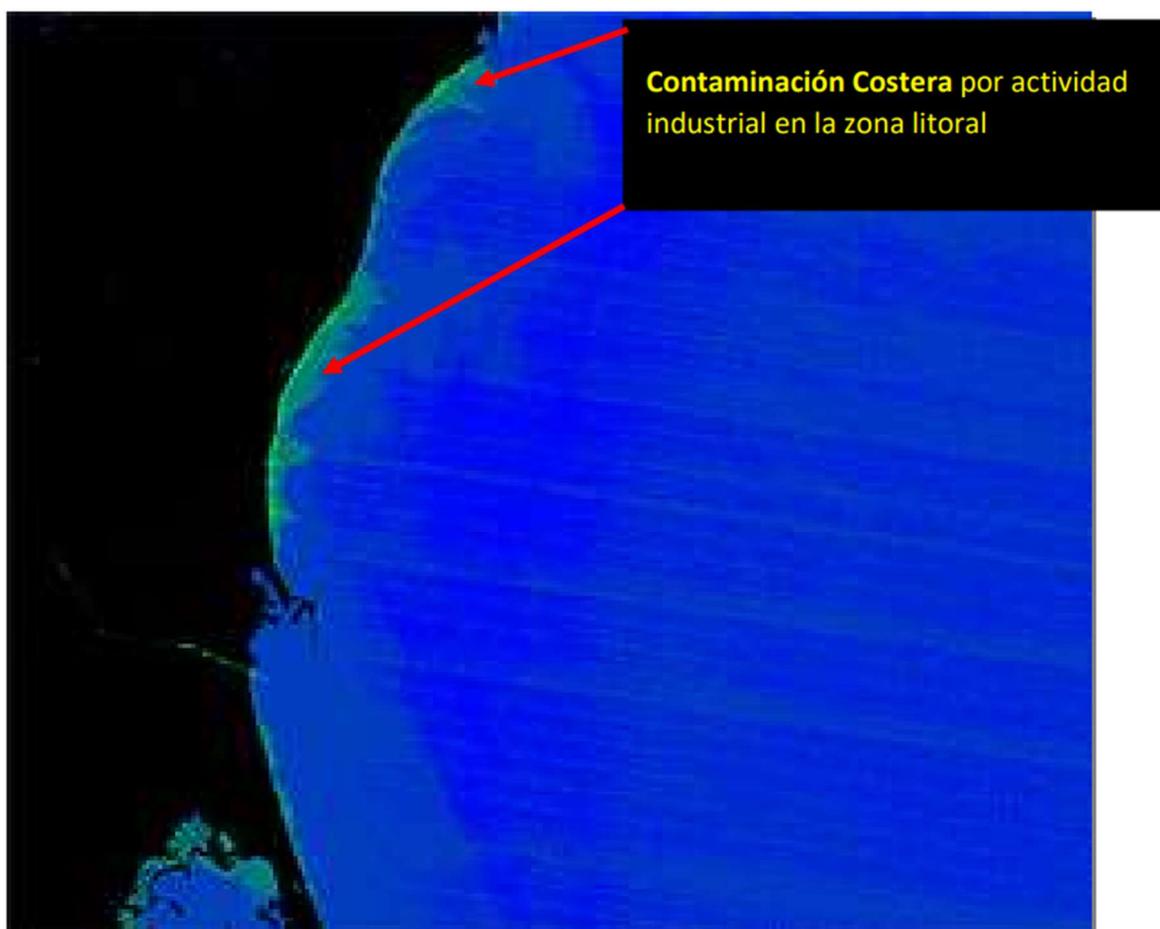


Figura 3.9: Contaminación costera industrial.

3.3.3. Impacto ambiental por obra civil.

El Impacto Ambiental ocasionado por el trazado de una carretera, ferrocarril, etc., puede ser abordado por el uso de imágenes tomadas por satélites de Observación de la Tierra como el Landsat. 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.

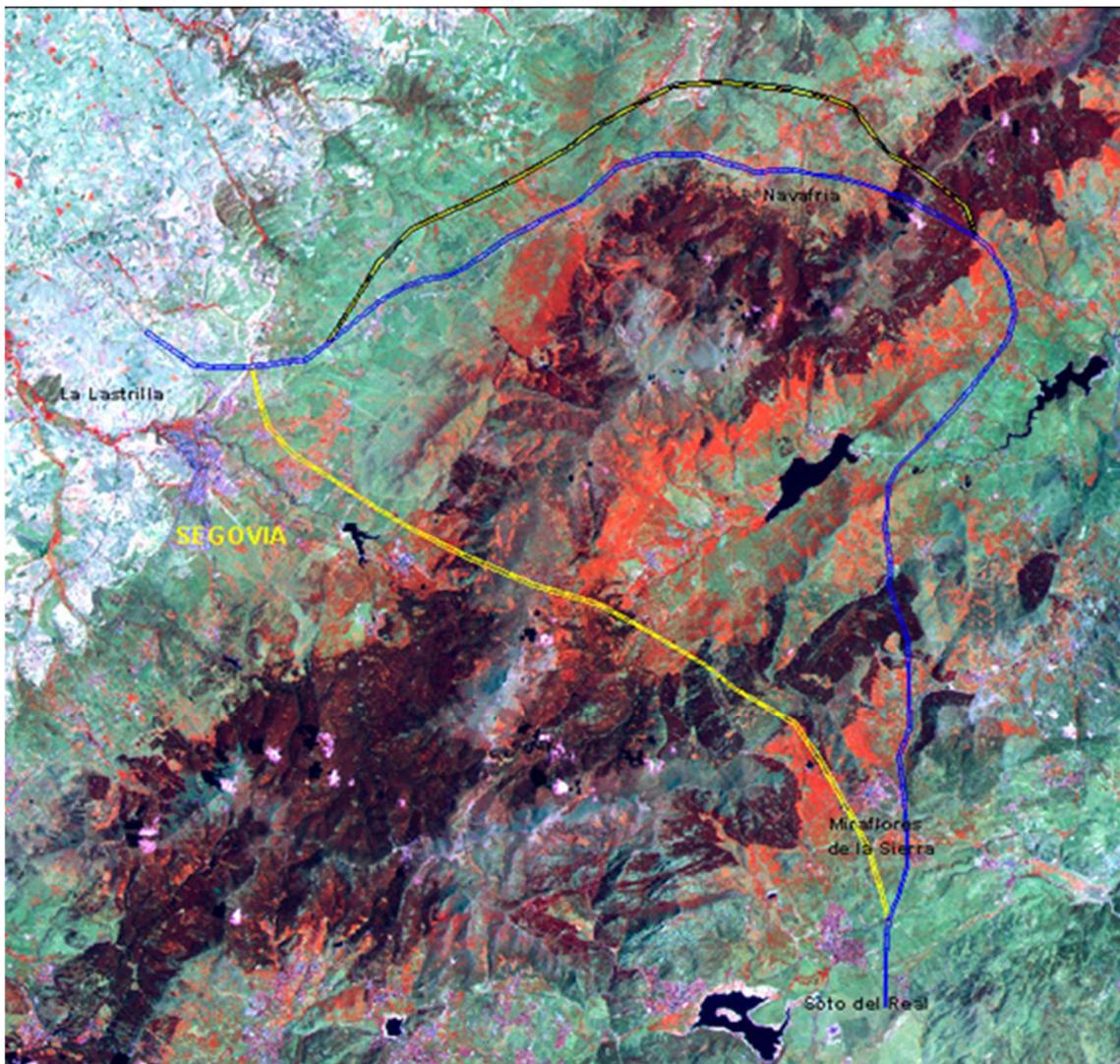


Figura 3.10: Diferentes trazados de una línea de ferrocarril entre Soto del Real y Segovia, atravesando la sierra de Guadarrama.

3.3.4. Hidrología-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 sobreexplotación 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.

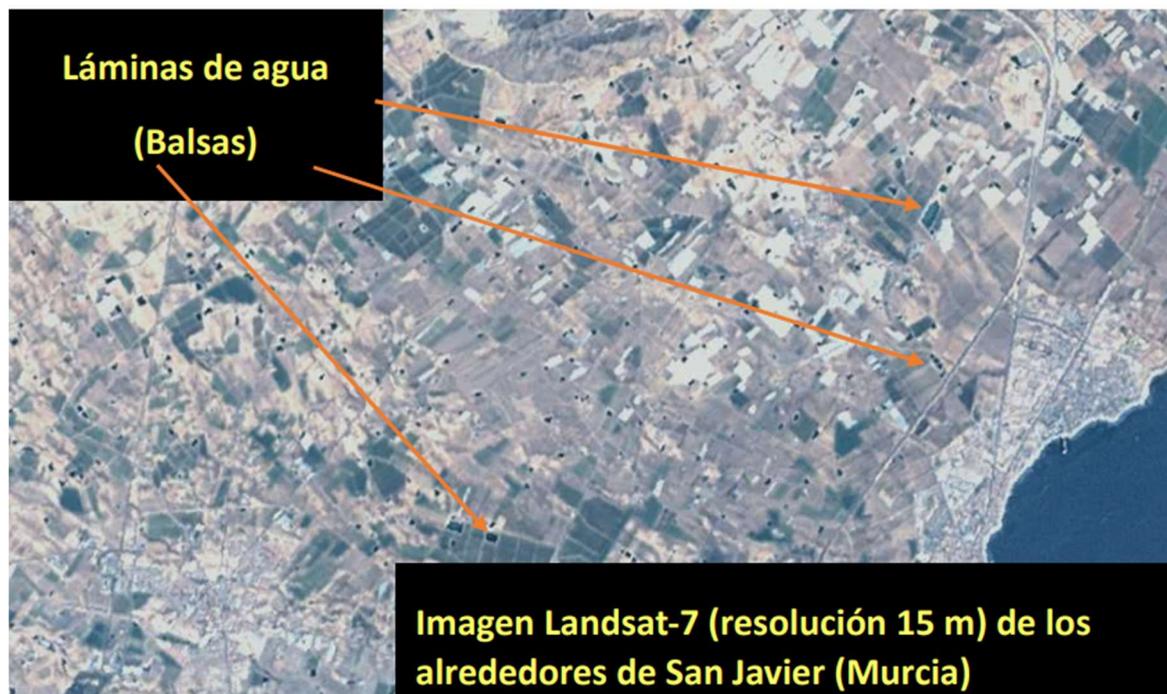


Figura 3.11: Detección de láminas de agua en zona agrícola.



Figura 3.12: Mapa de zonas de regadío.

3.3.5. Gestión forestal.

A partir de las imágenes captadas por el satélite en sus diferentes pasos por un determinado territorio se pueden extraer información y determinar desde ellas tipos de especies arbóreas, estado de la salud de la cobertura forestal, realizar una cartografía precisa y actualizada, detectar talas incontroladas, estimar el valor maderero de esas masas forestales; y todo ello en diferentes periodos de tiempo, lo que nos permite hacer un seguimiento actualizado de la evolución de los recursos forestales.

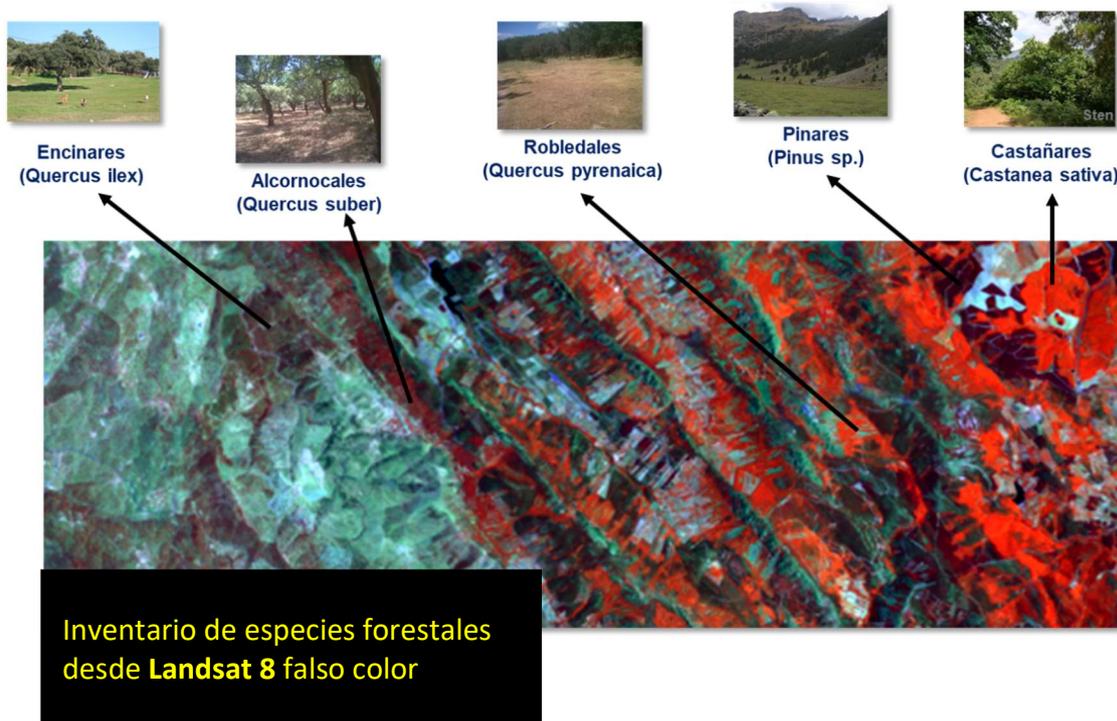


Figura 3.13: Inventario forestal.

3.3.6. Gestión de incendios forestales.

La Teledetección, mediante datos obtenidos por satélites de observación de la Tierra, concretamente el Landsat en sus bandas (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, también tendremos información rápida para poder evaluar daños causados por el incendio y cartografiar las afectadas. Posibilitar el establecimiento de planes de lucha contra el incendio y planes de ayuda/rescate. Aunque entre dentro de una fase posterior a la extinción del incendio con estas técnicas de teledetección temporal usando las imágenes en diferentes periodos de toma podremos realizar estudios de recuperación de las zonas afectadas.



Figura 3.14: Incendio forestal sobre imagen en 3D.

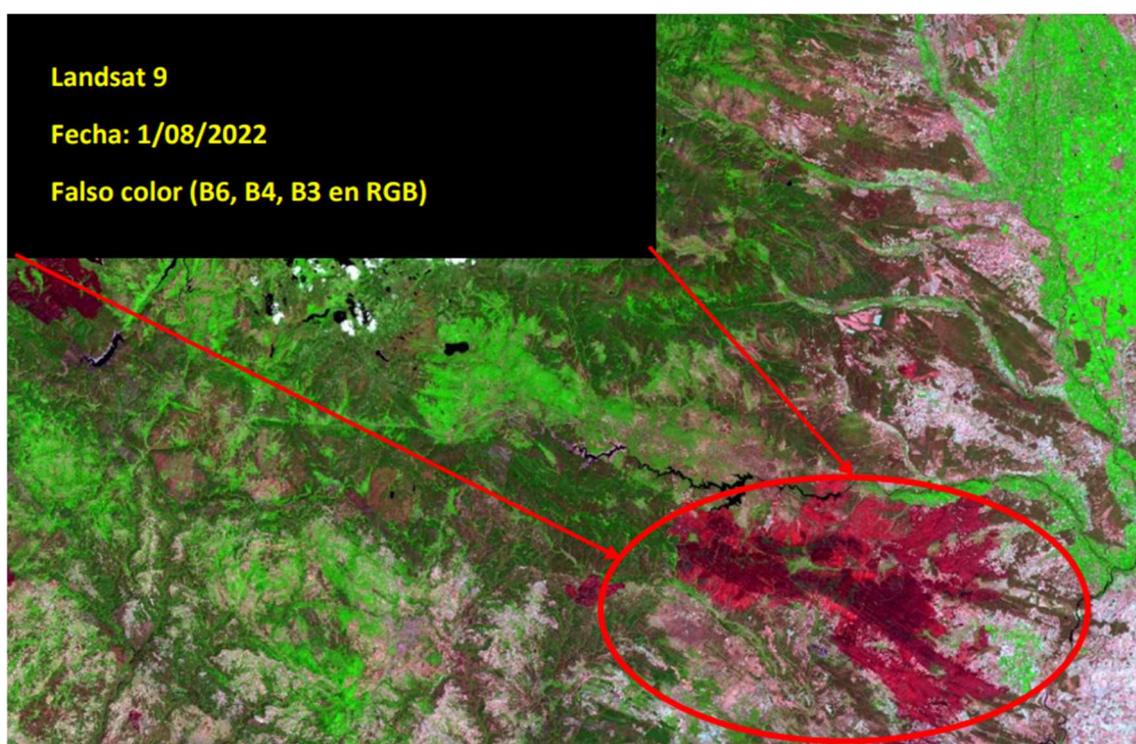


Figura 3.15: Huella de incendio forestal en la Sierra de la culebra de Zamora.

3.3.7. Nieves y glaciares.

En la nieve, el valor de la constante dieléctrica, y por tanto el coeficiente de dispersión, varía en función de su contenido en agua líquida. Cuanto mayor es el contenido de humedad de la nieve, mayor es su coeficiente de dispersión. En este comportamiento nos basamos para separar la nieve seca, cuyo coeficiente es similar al de las superficies libres de nieve, de la nieve húmeda. Podemos así precisar el comienzo de la fase de fusión nival y, mediante un seguimiento multitemporal, evaluar la cantidad de agua disponible en los ríos en diferentes períodos de tiempo.

La observación de los glaciares de montaña y de la cubierta de nieve desde el espacio ha de hacer frente a un problema singular: coinciden con regiones con una cobertura nubosa persistente, lo que dificulta la toma de datos, en especial por los sensores ópticos pasivos. Por eso, los sensores activos resultan imprescindibles en este tipo de observaciones. Parece estar cada día más clara la influencia que las actividades humanas tienen sobre el clima. Con el fin de poder emprender medidas correctoras es necesario conocer el alcance de dicha influencia. En ese camino, la observación de la Tierra desde el espacio desempeña un importante papel. La toma continua de datos por parte de los satélites permite un seguimiento permanente de la evolución de aquellos procesos cuya dinámica está ligada al clima. Tal es el caso de las cubiertas de hielo y nieve sobre el planeta.

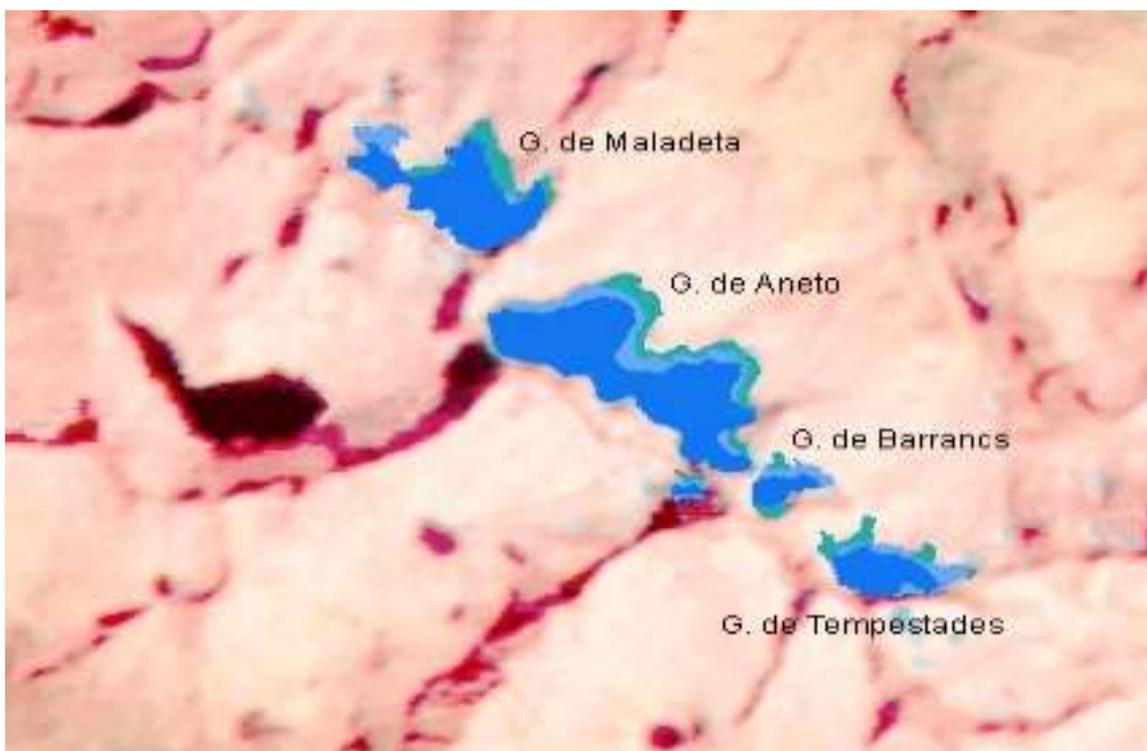


Figura 3.16: Evolución de los glaciares del Aneto Pirineos.

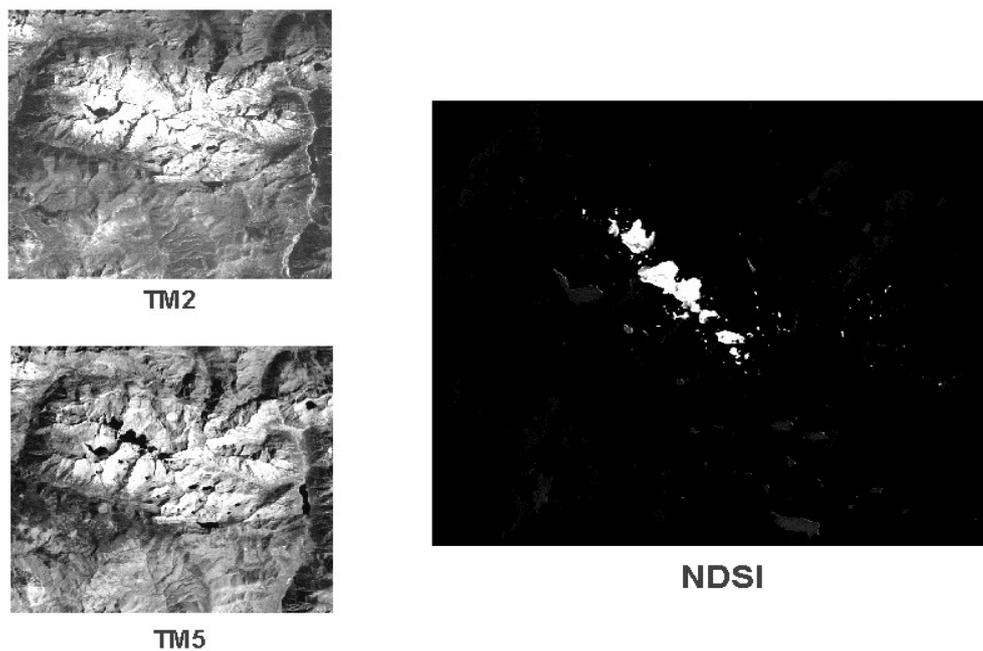


Figura 3.17: Vista de los glaciares del Aneto en las bandas 2 y 5 de Landsat 5.

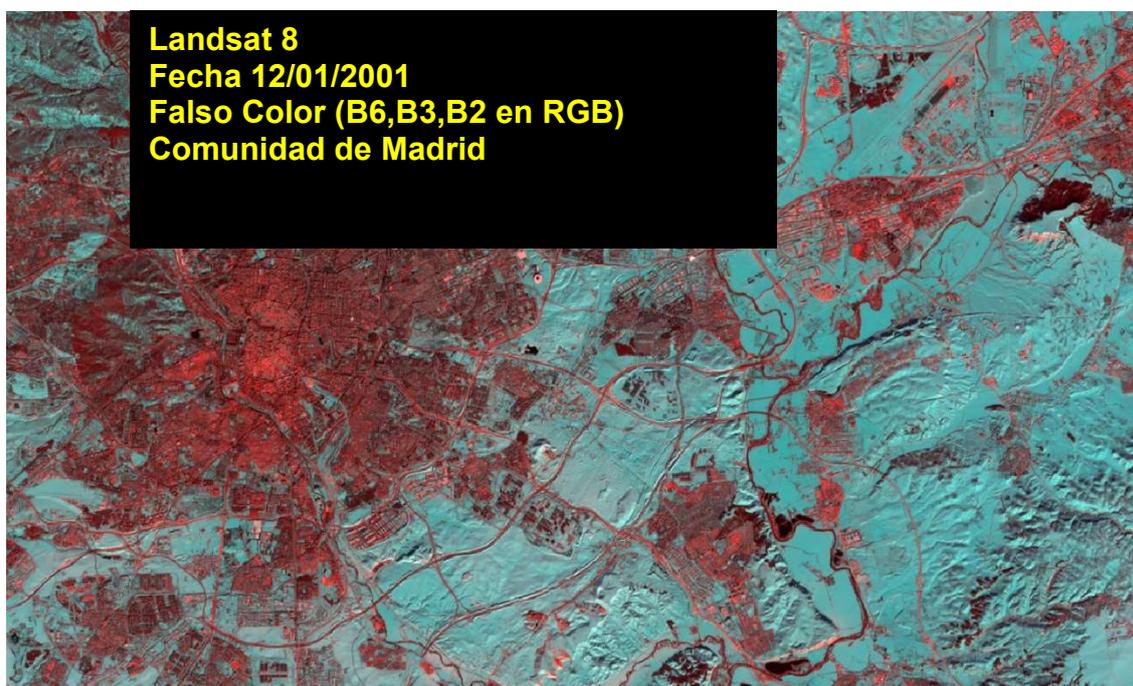


Figura 3.18: Cobertura de nieve sobre la Comunidad de Madrid.

3.4. Conclusiones de los últimos 50 años del programa LANDSAT.

De forma muy resumida podemos reflejar el impacto y lo que ha significado hasta el presente el programa Landsat en las actividades de Observación de la Tierra desde el espacio:

- Hace 50 años se inició, con el programa Landsat, el paradigma digital de la Observación de la Tierra desde el espacio.
- Hoy día y nueve satélites después, el programa Landsat constituye la base de datos más extensa y homogénea de la superficie terrestre adquirida desde el espacio.
- Uno de los hitos más importantes del programa es el cambio a una **distribución libre, abierta y gratuita** de los datos.
- El actual programa europeo **Copernicus** se apoya en una filosofía de **distribución completa, abierta y gratuita** de los datos de observación de la Tierra.
- La ingente cantidad de datos de Observación de la Tierra en la actualidad abre nuevas formas de procesarlos a través de la **Inteligencia Artificial (IA)**.

4. VEHÍCULO ELÉCTRICO. PLANIFICACIÓN OPTIMIZADA DE LA RED DE CARGA. OPTIMIZACIÓN Y BALANCEO DE CARGA PARA LA GESTIÓN DE CARGADORES.

Jorge del Valle Arias

Smart City Solutions & SW Business Development Manager Spain in ITRON

El futuro de la movilidad pasa, entre otras cosas, por la electrificación de los vehículos. Esto nos enfrenta a una serie de retos relacionados con la infraestructura de carga, no solo desde el punto de vista de las redes de generación y distribución, sino también desde el punto de vista de la infraestructura para los usuarios finales, especialmente cuando nos referimos a flotas de vehículos eléctricos, del tipo que sea, que necesitan disponer de depósitos de carga múltiple y, en ocasiones, distribuidos geográficamente en una ciudad o región.

Los retos a los que se enfrenta la electrificación de flotas se pueden resumir en dos:

- **Planificación de la electrificación:** Un enfoque sistemático para la transición a una flota eléctrica, con el diseño optimizado del sistema de electrificación de la flota, considerando tanto aspectos técnicos (potencia, periodos de carga) como financieros. Las decisiones tomadas en la fase de planificación tendrán un alto impacto en el rendimiento del sistema. Aspectos como análisis de las rutas y tamaños de baterías, entre otros, se tienen en cuenta para generar una planificación optimizada de la red de recarga.
- **Operación optimizada de la carga:** Un control activo del proceso de carga en tiempo real, que gestione las potencias requeridas para la carga conviviendo con el resto de “consumidores” de energía del edificio o del depósito de carga.

Se describe a continuación cómo afrontar cada uno de estos retos y cómo se resuelven desde la industria.

4.1. Planificación de la electrificación.

La forma tradicional de realizar una planificación de la electrificación ha sido el encargo de largos estudios, que llevan periodos de realización incluso superiores a 3 meses. Pero los costes de la energía, la red eléctrica y la tecnología de los vehículos eléctricos cambian con tanta rapidez que, para cuando llegaban los resultados, el plan podía haber quedado obsoleto.

Además, es práctica común que la electrificación de una flota no se acometa en su totalidad de una vez, sino a lo largo incluso de varios años (es común encontrarse con grandes corporaciones, con miles de vehículos en flota, que proponen una electrificación en periodos de 4 o 5 años).

Por lo tanto, las condiciones del entorno pueden haber cambiado tanto que los estudios preliminares que se hicieron dejen de tener validez rápidamente, y es necesario repetir dichos estudios con cierta periodicidad, incrementando los costes del proceso.

Itron ha trabajado en una solución que mitigue los problemas citados, desarrollando una plataforma que permite iterar múltiples planificaciones de la electrificación en periodos realmente cortos, con un enfoque repetible que se pueda actualizar casi en tiempo real, tan a menudo como sea necesario según vayan cambiando las variables del entorno. De este modo una flota que se va a electrificar puede actualizar continuamente las consideraciones de precios, rutas u otros parámetros del entorno, y asegurarse de que está perfeccionando continuamente sus planes de electrificación a medida que evoluciona el negocio.

Se trata en definitiva de una plataforma que aporta capacidades de modelado, simulación y optimización, generando un gemelo digital de la infraestructura de carga con resultados enfocados tanto en la parte técnica como en un enfoque financiero, que tiene en cuenta todas las complejas interacciones que hay entre los distintos factores que intervienen en la planificación:

- Los horarios y calendarios de operación de cada vehículo
- El dimensionamiento de las baterías de los vehículos
- La propia infraestructura de carga
- Las opciones de generación de energía distribuida
- La estrategia de carga



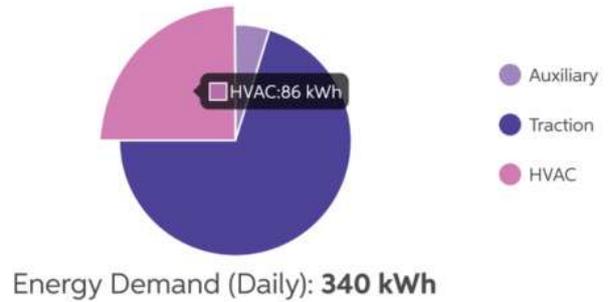
Figura 4.1: Resumen de todas las variables y factores considerados para la planificación de la electrificación.
Fuente: Itron

En los siguientes cuadros se indican todas las variables y elementos de salida (resultados) que la plataforma tiene en cuenta y genera para realizar la planificación, con un ejemplo de cada uno:

Cuadro 4.1: Variables y salidas relacionadas con el análisis energético de rutas
Fuente: Itron

Análisis energético de rutas

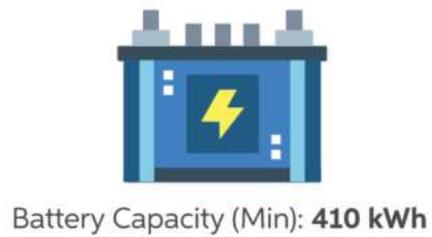
- Demanda diaria de energía
- Carga de tracción
- Carga HVAC
- Otras cargas



Cuadro 4.2: Variables y salidas relacionadas con dimensionamiento de las baterías.
Fuente: Itron

Dimensionamiento de la batería

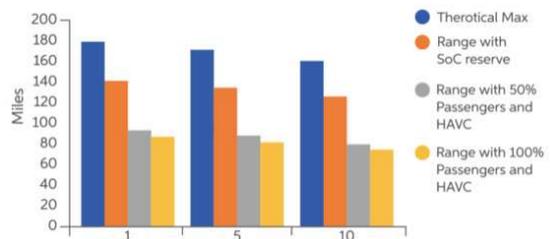
- Capacidad de la batería
- Degradación de la batería
- Gama SoC (State of Charge) operativa
- Capacidad útil



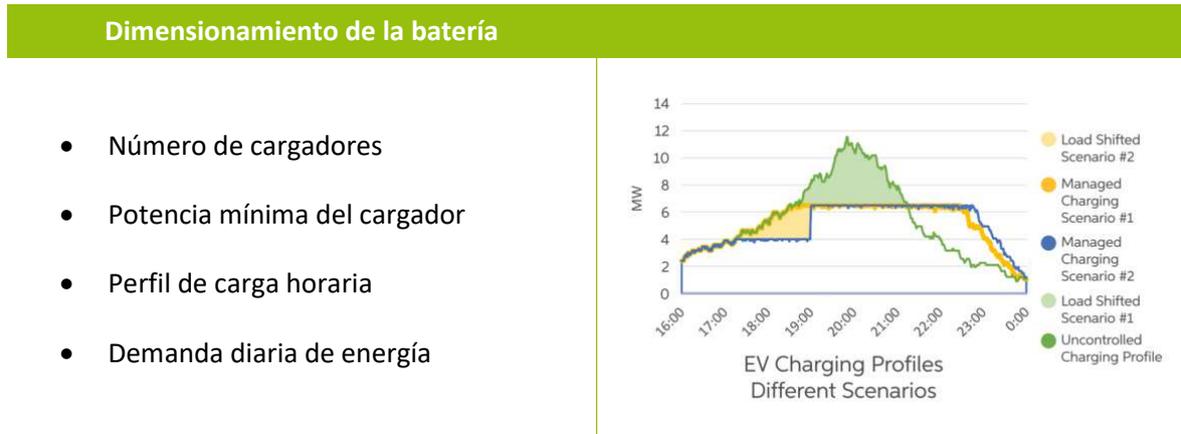
Cuadro 4.3: Variables y salidas relacionadas con estimación de autonomía
Fuente: Itron

Dimensionamiento de la batería

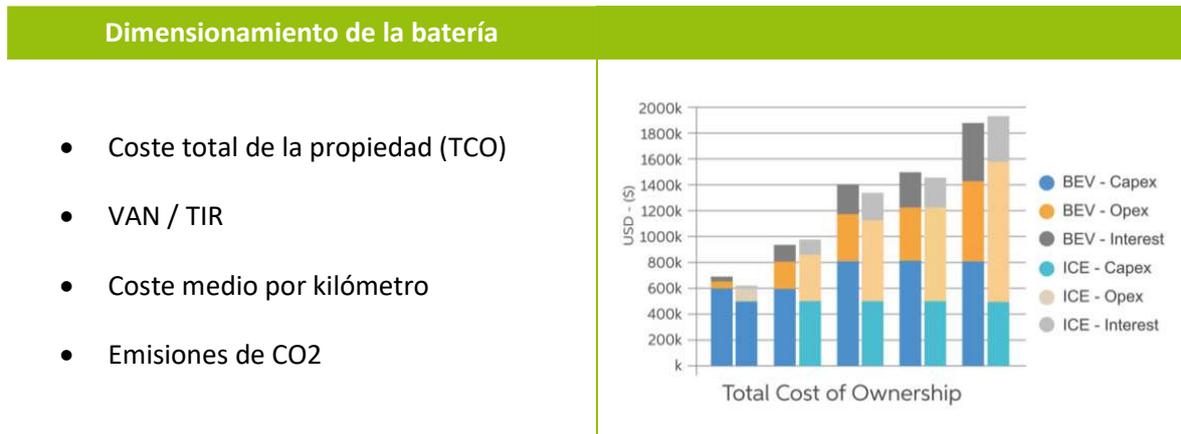
- Alcance teórico
- Alcance útil
- Alcance específico de la ruta
- Impacto pasajeros / carga útil



Cuadro 4.4: Variables y salidas relacionadas con el dimensionamiento de la infraestructura de recarga
Fuente: Itron



Cuadro 4.5: Variables y salidas relacionadas con la modelización financiera
Fuente: Itron



4.2. Operación optimizada de las cargas.

Una vez que la flota ya está electrificada y la infraestructura de carga implantada, se pueden gestionar y orquestar de forma centralizada las operaciones de carga, con sistemas que sean compatibles con el protocolo abierto OCPP de los puntos de carga, mediante una plataforma que permita cargar los vehículos de forma inteligente, fiable y rentable, que garantice que cada vehículo estará cargado en el momento y cantidad que se le necesite, al menor coste posible. De este modo se puede:

- Supervisar y gestionar de forma centralizada todos los cargadores
- Programar dinámicamente la carga entre vehículos y cargadores, para reducir la demanda total de energía
- Gestionar las cargas

- Realizar un seguimiento del consumo energético de la flota durante la carga
- Interactuar con eventuales sistemas de generación energética distribuida (plantas solares, etc.), de apoyo a la recarga, para balancear de forma inteligente las cargas sin exceder las potencias contratadas.

Para ello el sistema procesa diferentes parámetros en tiempo real, como la potencia total disponible, la carga del edificio (si aplica), las tarifas eléctricas, el estado de carga de las baterías de los vehículos y los horarios de uso de cada vehículo, para optimizar cuándo y cuánto cargar cada vehículo. El objetivo es suavizar los picos de carga (“peak shaving”) y aprovechar las ventanas de carga de bajo coste, lo que reduce significativamente el gasto en electricidad (e-fueling).

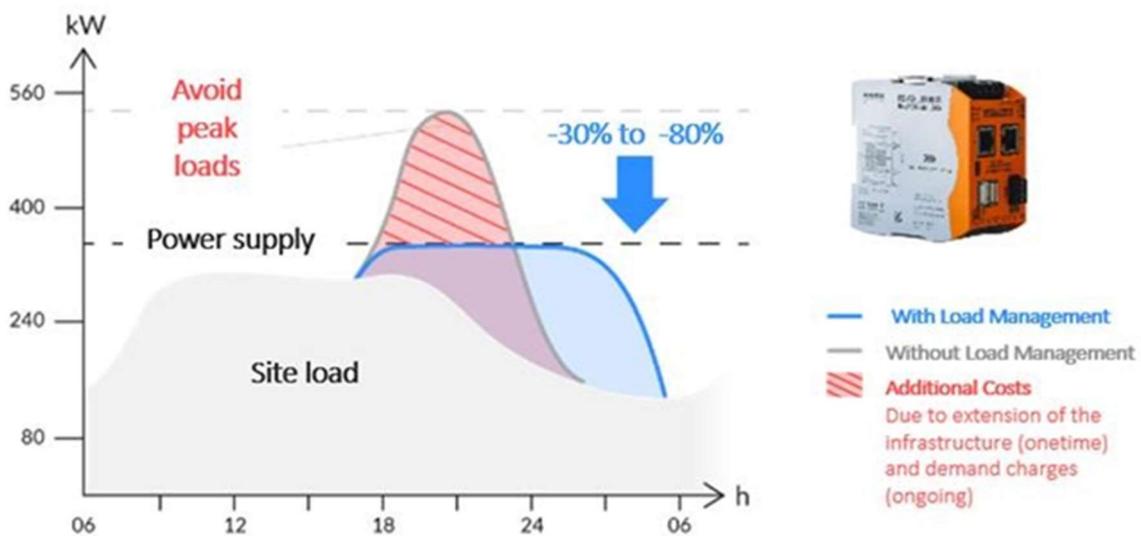


Figura 4.2: Gestión de carga inteligente para suavizar los picos de carga
Fuente: Itron

Si además la plataforma de gestión optimizada de carga tiene una arquitectura abierta, con APIs públicas, se podrá integrar con sistemas de terceros, como sistemas de gestión de flotas, controladores de microrredes o ERP de transporte para la integración dinámica de calendarios y horarios de uso.

5. MONITORIZACIÓN AMBIENTAL CON DRONES.

^(1,2)M^a Deseada Esclapez, ⁽³⁾Javier Burgués, ⁽²⁾Silvia Doñate Hernández, ⁽²⁾Lidia Saúco Bozic y ⁽³⁾Santiago Marco

⁽¹⁾Plataforma Tecnológica Española del Agua (PTEA), ⁽²⁾ Depuración de Aguas del Mediterráneo (DAM), ⁽³⁾ Instituto de Bioingeniería de Cataluña (IBEC).

5.1. Introducción.

Las metodologías actuales de evaluación de olores en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs) se basan en campañas de mediciones olfatométricas costosas y poco frecuentes que involucran paneles humanos junto con el monitoreo continuo de pocos gases utilizando detectores de gas fijos instalados en la planta. Esto conduce a mediciones de olores con baja resolución temporal y espacial, que no permiten una caracterización precisa de los eventos que provocan la de emisión de olores.

El uso de drones con permite proporcionar medidas de concentración de olor en entornos espacialmente densos y localizar de forma autónoma la fuente de molestias por olores en entornos industriales complejos, tales como las EDAR. El desarrollo de un primer prototipo ha implicado una serie de retos de investigación, a saber: (i) Diseñar un sistema electrónico capaz de predecir la concentración de olores a partir de las lecturas de los sensores en mezclas complejas de gases olorosos y variables en el tiempo utilizando algoritmos de aprendizaje automático, (ii) Integrar la sensorica necesaria en un dron minimizando el impacto negativo que el flujo de aire descendente producido por las hélices del dron pueda tener en las mediciones; y (iii) Desarrollar algoritmos que produzcan mapas de la distribución de los olores promediados en el tiempo, a pesar de la conocida complejidad de la distribución de la concentración en penachos turbulentos.

5.2. Proyecto SNIFFDRONE.

El proyecto SNIFFDRONE, financiado por la Unión Europea a través del programa H2020 (GA 777222) surge de la necesidad de encontrar nuevas soluciones para monitorizar el impacto por olor de las estaciones de gestión de residuos, y concretamente en este caso de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs). El objetivo principal de SNIFFDRONE, en el que participan Depuración de Aguas del Mediterráneo (DAM) y el Instituto de Bioingeniería de Cataluña (IBEC), fue desarrollar un dron con capacidades olfativas que adquiriese mediciones de concentración de olor en tiempo real para entornos industriales complejos con varios focos de olor emitiendo diferentes mezclas de gases de manera simultánea. El uso de drones permite proporcionar medidas de concentración de olor en entornos espacialmente densos y localizar de forma autónoma la fuente de molestias por olores en entornos industriales complejos, tales como las EDAR.



⇒ Se diseñó, construyó y testeó una nariz electrónica para determinar la concentración de olor (uo_E/m^3) en EDARs a partir de concentraciones de gases

⇒ El prototipo integra la nariz electrónica desarrollada y un sistema de recogida de muestras en un dron

⇒ El prototipo ha sido testado y calibrado en una EDAR real con resultados preliminares satisfactorios para la el mapeo de olores instantáneo de las instalaciones

Ambición del proyecto

Proporcionar medidas de concentración de olor en tiempo real y localizar los focos de emisión, en entornos industriales complejos con varios focos de emisión

Figura 5.1: Ambición y principales retos del proyecto SNIFFDRONE.

Para alcanzar el objetivo principal de proyecto fue necesario superar varios retos. Por una parte, se diseñó, construyó y testeó una nariz electrónica para determinar la concentración de olor (uoE/m^3) en EDARs a partir de concentraciones de gases empleando algoritmos de aprendizaje automático.

El segundo paso, consistió en la integración de la nariz electrónica en un dron, junto con un sistema de recogida de muestras para calibrar y validar las predicciones de concentración de olor obtenidas con el prototipo. Uno de los principales desafíos supuso el evitar que la corriente descendente de las hélices que afecta a las lecturas de los sensores, al interferir en la zona de muestreo.

Finalmente, se ha obtuvo un sistema capaz de producir mapas de distribución de olores promediados en el tiempo, revelando los puntos más relevantes de emisión de olores en cada momento.

5.2.1. Diseño y construcción de la e-nose.

La e-nose o nariz electrónica portátil desarrollada en el proyecto, registra parámetros ambientales, como la temperatura, la humedad relativa, la presión y el caudal. Integra un conjunto de 21 sensores para la medida de concentraciones de gases de tres tecnologías (semiconductores de óxido metálico o MOX, celdas electroquímicas e infrarrojo no dispersivo) capaces de medir la concentración de los principales compuestos olorosos de las EDAR, entre los que destaca el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el amoníaco (NH_3), el dióxido de azufre (SO_2), los mercaptanos, las aminas y los principales compuestos orgánicos volátiles (COVs). La e-nose mide también la concentración de algunos gases inodoros como son el dióxido de carbono (CO_2) y el monóxido de carbono (CO), debido a su relación con la actividad bacteriana y la degradación de los residuos orgánicos, respectivamente.

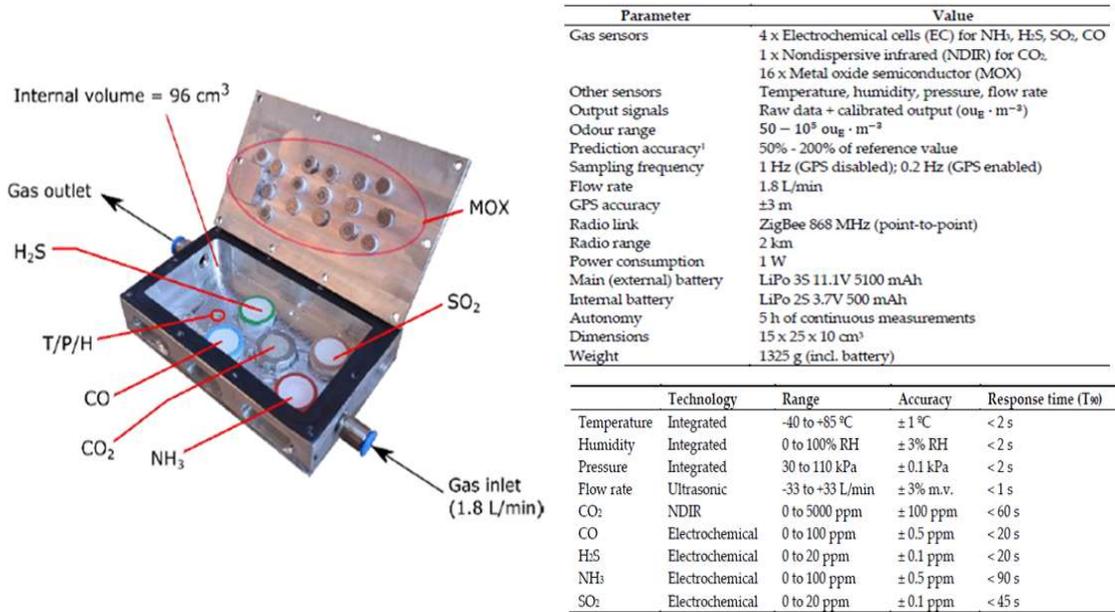


Figura 5.2: Principales especificaciones de la e-nose construída.

La interfaz de usuario permite mostrar la información que el prototipo recoge y transmite a un ordenador portátil con una antena radio USB. Se ha desarrollado un software propio con una interfaz gráfica que permite al operador visualizar las señales de la e-nose en tiempo real, registrar los datos medidos y obtener la medida calibrada de la e-nose (ou_E·m⁻³) en un mapa de concentración. Además, la interfaz permite al operador activar remotamente un dispositivo de muestreo específicamente diseñado para recoger muestras ambientales en bolsas de Nalophan, conforme a la norma EN1372. Este dispositivo de muestreo se emplea tan solo cuando es necesario la calibración de los modelos y la validación de los resultados obtenidos por el prototipo.

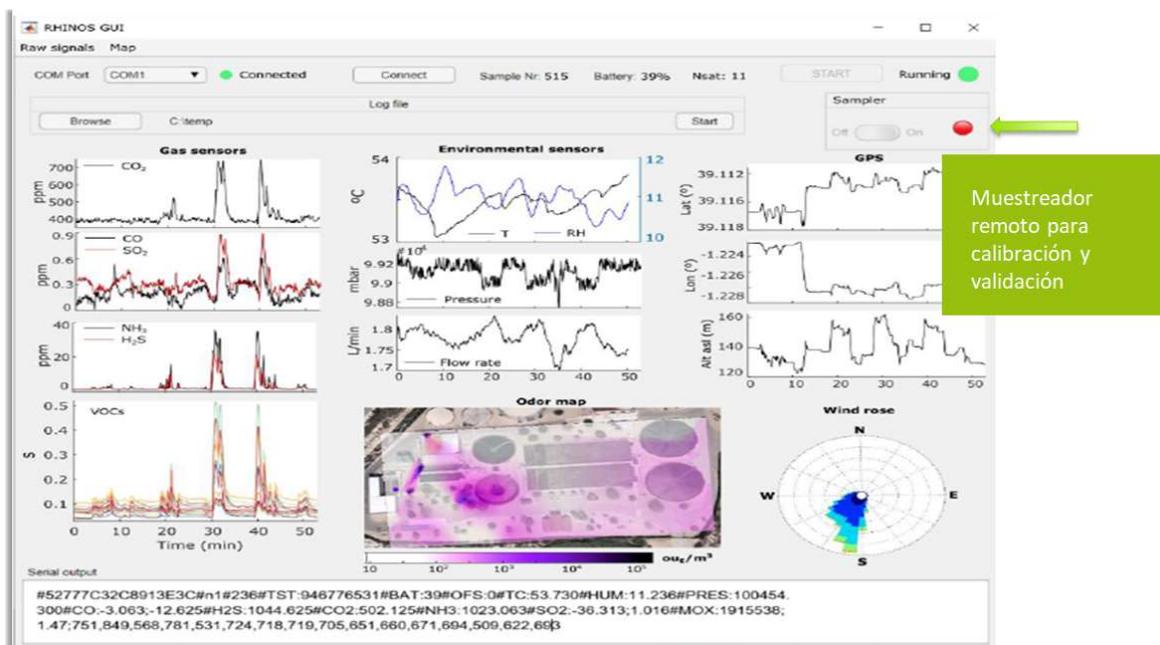


Figura 5.3: Interfaz de usuario del prototipo.

La nariz electrónica fue expresamente diseñada para ser acoplada a pequeños drones con capacidad de carga limitada, con una carga útil total de 1,8 Kg. Como prueba de concepto, se montó la nariz en un dron DJI Matrice 600 para mapear la concentración de olores en una EDAR y la entrada de la e-nose se conectó a un tubo de teflón de 10 m suspendido verticalmente del dron con tal de tomar muestras sin la influencia de las hélices. El retraso introducido por el tubo en el transporte de la muestra a la cámara de detección, el cual se corrigió con el firmware de la e-nose.

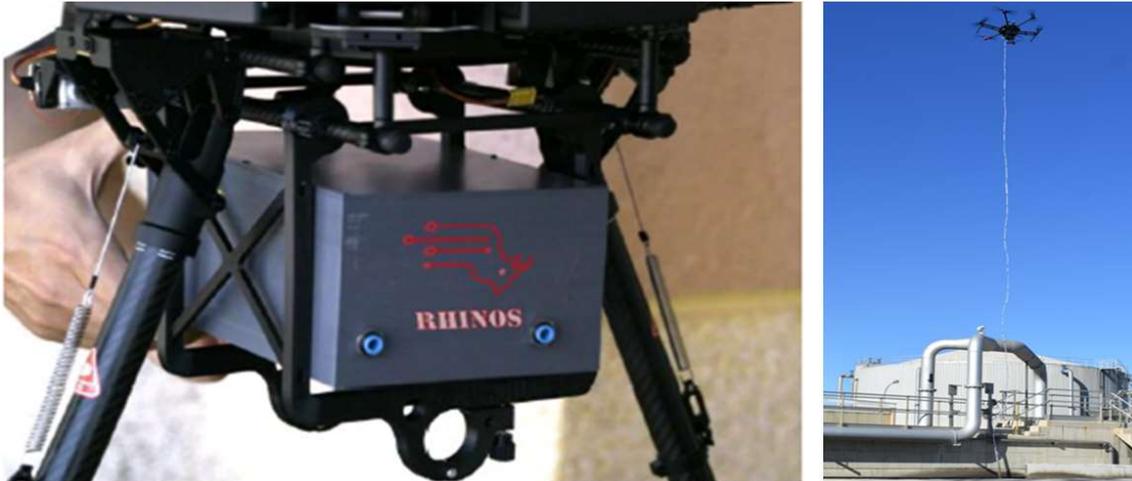


Figura 5.4: Acoplamiento de la e-nose con el dron DJI Matrice 600 pro.

5.2.2. Campañas de muestreo.

El prototipo fue testado en condiciones de trabajo real en una EDAR de tamaño medio situada en la región de Murcia (EDAR de Molina del Segura). Para ello se analizaron las 6 principales fuentes de emisión de olor de la EDAR. Cada una de las fuentes de emisión, fue muestreada a varias alturas (0,5 m, 2,0 m y 5,0 m) con el prototipo tomando datos en continuo y el muestreador montado también en el dron, en diferentes días y condiciones de operación con tal de disponer de gran variedad de situaciones experimentales. Como resultado de las campañas se obtuvieron un total de 34 muestras que fueron analizadas por un laboratorio certificado para olfatometría dinámica conforme a la norma EN13725.

⇒ Campañas de muestreo para la calibración y validación en la EDAR de Molina del Segura, Murcia (España)

⇒ Toma de muestras con sistema Olfasense montado en el dron + medidas en paralelos con la e-nose

⇒ Diversas alturas, condiciones meteorológicas condiciones operativas y fuentes de olor

Fecha	Fuentes						
	BLK	MHL	PRE	BIO	SET	SLT	CHI
28/01/20	2	1	0	1	1	1	0
25/06/20	2	0	3	3	3	0	3
15/07/20	2	0	3	3	3	0	3
TOTAL	6	1	6	7	7	1	6



Figura 5.5: Resumen del procedimiento de muestreo realizado en la EDAR Molina de Segura (Murcia) para el calibrado y validación del prototipo.

5.2.3. Calibrado y validación del prototipo.

Para la construcción de los modelos de calibrado de la e-nose, se testaron dos estrategias por un lado se emplearon condiciones controladas de laboratorio y en una segunda aproximación se tomaron como medidas de trabajo las adquiridas por el prototipo en condiciones de vuelo sobre la EDAR. En ambos casos en primer lugar un panel humano analizó tanto las muestras originales como las diluciones de las mismas siguiendo las especificaciones establecidas en la norma UNE 13725 en el laboratorio de olfatometría dinámica de Odournet en Barcelona.

⇒ Dilución de las muestras a 1/10; 1/100 and 1/1000

⇒ Análisis por olfatometría dinámica de las muestras conforme a la norma EN13725 por duplicado (Odournet, Barcelona)

⇒ Paso de todas las muestras gaseosas (originales y diluidas) por la e-nose y medida con los 21 sensores

⇒ Construcción de los modelos de calibrado

Bag ID	Date	Source	Distance	Odour concentration (ou _e · m ⁻³)			
				Original	1/10	1/100	1/1000
1-1	28/01/20	Bioreactor	0.5m	76,111	7,611	761	76
1-2	28/01/20	Sludge thickener	0.5m	6,222	622	62	6
1-3	28/01/20	Settler	0.5m	2,165	216	21	2
1-4	28/01/20	Influent manhole	0.5m	477	47	4.7	0.47
2-1	25/06/20	Settler	0.5m	9,742	974	97	-
2-2	25/06/20	Settler	2m	3,069	-	-	-
2-3	25/06/20	Settler	5m	304	-	-	-
2-4	25/06/20	Bioreactor	0.5m	96,653	9,665	966	-
2-5	25/06/20	Bioreactor	2m	2,896	289	-	-
2-6	25/06/20	Bioreactor	5m	483	-	-	-
2-7	25/06/20	Pretreat	0.5m	3,444	344	-	-
2-8	25/06/20	Pretreat	2m	323	-	-	-
2-9	25/06/20	Pretreat	5m	256	-	-	-
2-10	25/06/20	Chimney	0.5m	91,952	9,195	919	91
2-11	25/06/20	Chimney	2m	3,649	365	-	-
2-12	25/06/20	Chimney	5m	40	-	-	-
3-1	15/07/20	Settler	0.5m	609	61	-	-
3-2	15/07/20	Settler	2m	76	-	-	-
3-3	15/07/20	Settler	5m	91*	-	-	-
3-4	15/07/20	Bioreactor	0.5m	1,722	172	-	-
3-5	15/07/20	Bioreactor	2m	72*	-	-	-
3-6	15/07/20	Bioreactor	5m	912	-	-	-
3-7	15/07/20	Chimney	0.5m	1,290	-	-	-
3-8	15/07/20	Chimney	2m	32,254	3,225	322	-
3-9	15/07/20	Chimney	5m	3,069*	-	-	-
3-10	15/07/20	Pretreat	0.5m	362	-	-	-
3-11	15/07/20	Pretreat	2m	2,048	205	-	-
3-12	15/07/20	Pretreat	5m	1,085	108	-	-

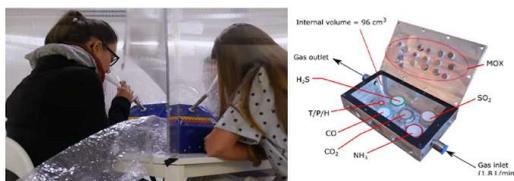


Figura 5.6: Resumen de muestras analizadas por olfatometría dinámica en laboratorio externo y con la e-nose en el propio laboratorio.

Para obtener el modelo de calibrado en condiciones de laboratorio, la e-nose fue expuesta también a estas mismas mezclas gaseosas, de modo que se obtuvieron 21 valores de concentración de gases de los sensores para cada una de las muestras gaseosas, que constituyó junto con los resultados de concentración de olor obtenidos por el panel humanos los datos necesarios para la construcción y validación del modelo.

Se empleó la regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR), como modelo de calibrado para obtener para la predicción de la concentración de olor a partir de las señales de los sensores y se evaluó el rendimiento de los modelos con el error medio cuadrático en la validación cruzada.

- ⇒ Calibrado basado en **regresión por mínimos cuadrados parciales**
- ⇒ Dos campañas para la construcción del modelo y la tercera para su validación
- ⇒ Los modelos se optimizaron a través de la evaluación del error cuadrático medio en la validación cruzada (RMSE)

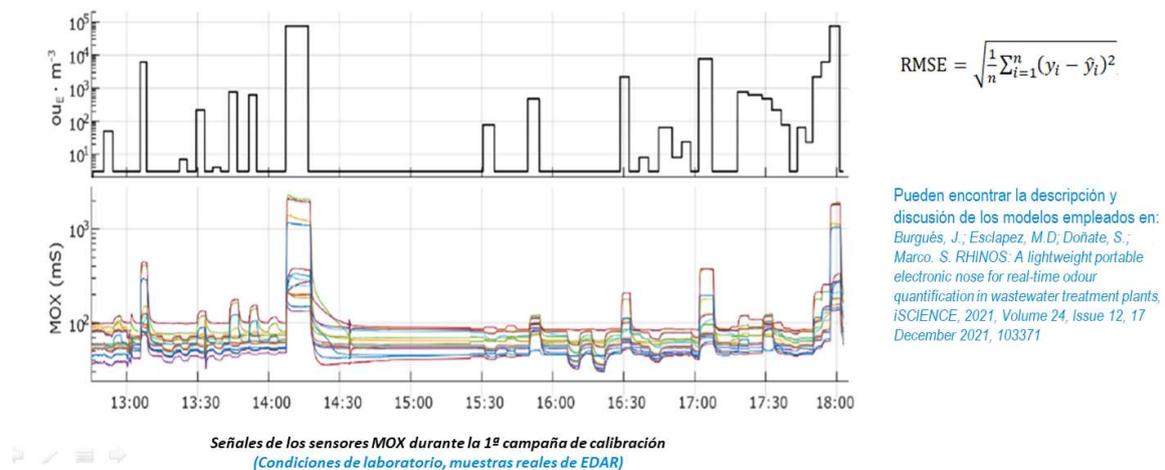


Figura 5.7: Perfil de las señales obtenidas con los sensores MOX en condiciones de laboratorio, comparadas con los valores de olfatometría dinámica obtenidas con paneles humanos.

En la Figura 5.7 se muestra el perfil obtenido por las señales de los sensores MOX al presentar las muestras a la e-nose, de modo que se observa una buena correlación entre las respuestas del sensor y la concentración de olor de las muestras obtenida con el panel humano. También se observa una rápida estabilización y recuperación de la línea base de las señales de los sensores, excepto para la muestra de mayor concentración de olor donde algunos de los sensores alcanzaron su nivel de saturación.

Sin embargo, este perfil es muy diferente del que se obtiene en condiciones de vuelo sobre la depuradora. En la Figura 5.8, se muestran las señales proporcionadas por los sensores de la e-nose durante un vuelo sobre la EDAR, junto con los valores de olfatometría medidos para cada fuente de emisión, mostrando también una alta correlación entre sí. Las respuestas más fuertes ocurrieron durante el muestreo a corta distancia de las fuentes de emisión de la chimenea, el biorreactor y las tolvas de lodo.

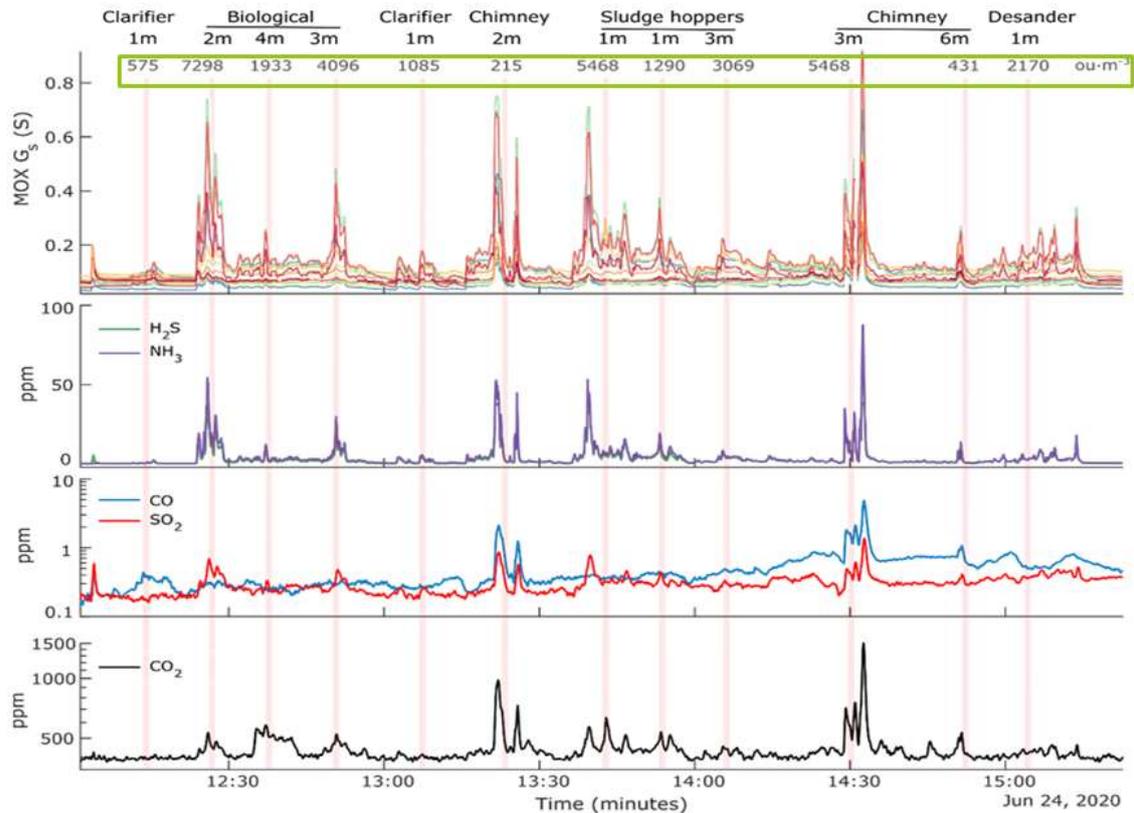


Figura 5.8: Señales de los sensores MOX registradas durante la 1ª campaña de calibración durante el vuelo sobre la EDAR.

La tercera campaña de medición se utilizó para validar externamente el modelo de calibración final. Para calcular el RMSEP (error cuadrático medio de las predicciones) utilizamos la olfatometría dinámica como valor real. Sin embargo, debemos tener en cuenta que la concentración medida por olfatometría, ya tiene un gran error que se cuantifica típicamente como un factor dos del valor verdadero. Utilizamos la metodología de Bland-Altman, diseñada específicamente para comparar una nueva técnica de medición con una técnica establecida que no está exenta de errores. En la Figura 5.9 podemos ver la comparación entre los resultados de la e-nose y los de la olfatometría, en unidades logarítmicas.

La e-nose proporciona una sensibilidad lineal en el rango de 50 a 100.000 $\text{ou}_E \cdot \text{m}^{-3}$, una correlación más alta del 97%, y un error cuadrático medio RMSEP de las predicciones más bajo del 51%. Podemos ver que las peores predicciones se producen en concentraciones $< 50 \text{ ou}_E \cdot \text{m}^{-3}$ donde los sensores operan cerca de su límite de detección y la olfatometría dinámica es más propensa a errores, y en el rango de concentraciones de olor más altas donde la única muestra disponible se utilizó para la validación externa.

Dado que, idealmente, cualquier sistema de medición química debería calibrarse en condiciones similares a las esperadas en el escenario operativo, también calibramos la e-nose utilizando los datos adquiridos por el dron en fuentes de emisión seleccionadas de una EDAR. Por ejemplo, aquí mostramos el modelo basado en los cuatro mejores sensores. El error cuadrático medio RMSEP de las predicciones es de 1,98 y los límites de aceptación son [0,25x, 3,91x] con una confianza del 95%. Aunque estos límites son un factor de dos más amplios que los de la olfatometría dinámica ([0,5x, 2x]), y peores que los obtenidos con el modelo construido con la e-nose midiendo en condiciones de laboratorio, esta leve degradación de la precisión se ve compensada con creces por la reducción

de costes y el aumento de la resolución espacial y temporal de las mediciones basadas en drones y además el procedimiento de calibración se simplifica claramente.

⇒ La relación entre los valores obtenidos con el modelo y las medidas de laboratorio es lineal en el intervalo $50\text{-}10^5 \text{ ou}_E \cdot \text{m}^{-3}$, con una correlación del 97% y RMSEP del 51%

⇒ El modelo empleando medidas de los sensores obtenidas en condiciones de operación tiene un mayor error, aunque simplifica en gran medida la operativa, mejorando en gran medida la **resolución temporal y espacial**, así como los **costes** asociados

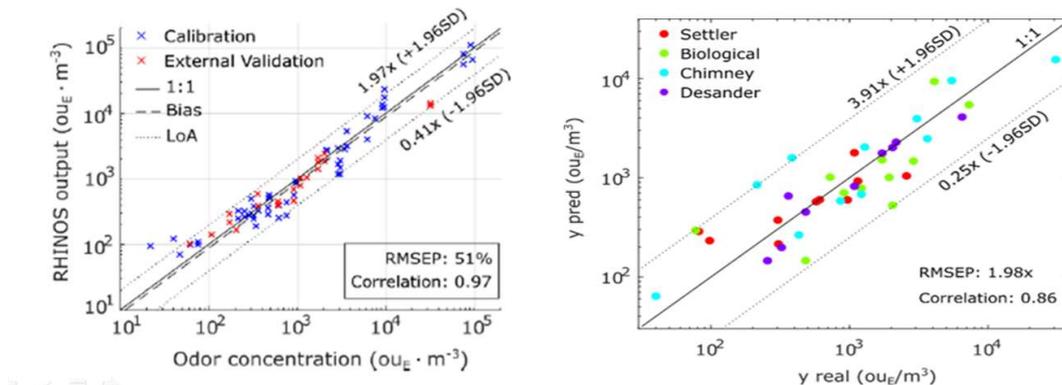


Figura 5.9: Validación de las medidas obtenidas con el prototipo calibrado en condiciones de laboratorio (izquierda) y empleando señales de los sensores durante vuelos sobre la EDAR (derecha).

Finalmente se realizaron mediciones de validación con el dron en condiciones de vuelo haciéndolo planear a varias alturas por encima de las fuentes de emisión seleccionadas durante aproximadamente 1 minuto, proporcionando una estimación de la concentración de olor cada 5 segundos. Se tomaron muestras olfatómetricas paralelas durante este periodo de un minuto para su comparación.

Para la comparación entre ambos métodos evaluamos el rendimiento de la e-nose basándonos en el porcentaje de veces que las predicciones de la e-nose caían dentro de las bandas de incertidumbre de las mediciones olfatómetricas. En general, existe una buena concordancia cualitativa entre ambos métodos de medición. Estos resultados ilustran lo importante que es validar la e-nose sobre el terreno, ya que la correlación observada sobre el terreno (72%) fue considerablemente inferior a la obtenida en el laboratorio (97%). Además, podemos representar los resultados interpolados en un mapa con la representación espacial de la salida calibrada de la e-nose (ou_E/m^3) en diferentes lugares de medición a una velocidad de vuelo aproximada de $\sim 1 \text{ m/s}$.

5.3. Conclusiones.

Como principal conclusión, se deduce que el prototipo desarrollado es capaz de predecir la concentración de olor en tiempo real con una precisión ligeramente peor que el método de referencia (olfatometría dinámica).

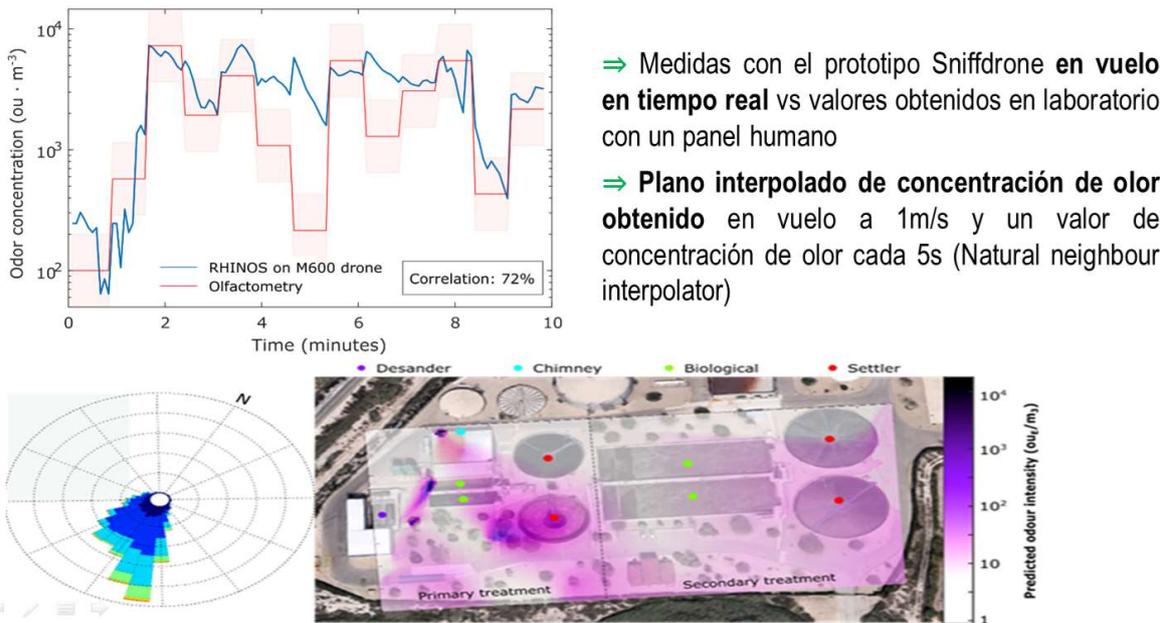


Figura 5.10: Medidas del prototipo en condiciones de trabajo reales.

Los prometedores resultados obtenidos en este estudio animan al desarrollo y aplicación de este tipo de narices electrónicas portátiles a otras industrias preocupadas por problemas de olores, como vertederos, plantas de compostaje o explotaciones ganaderas. A corto plazo, se espera que los responsables de las plantas lo puedan emplear para medir olores en lugares de difícil acceso o peligrosos, identificar las principales fuentes de olor en sus plantas, monitorizar los sistemas de desodorización y para cartografiar de forma autónoma la concentración de olores en amplias zonas e identificar las principales fuentes de emisión.

5.4. Agradecimientos.

DAM agradece a la Entidad de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de la Región de Murcia (ESAMUR) por el interés y la colaboración. Este proyecto ha recibido financiación del proyecto ATTRACT financiado por la CE en virtud del Acuerdo de subvención 777222.



Este proyecto ha recibido financiación del Programa de Investigación e Innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea según el Acuerdo de Subvención N° 777222



5.5. Referencias.

- [1]. Burgués, J.; Esclapez, M.D.; Doñate, S.; Pastor, L.; Marco, S. Aerial Mapping of Odorous Gases in a Wastewater Treatment Plant Using a Small Drone. *Remote Sens.* 2021, 13, 1757
- [2]. Burgués, J.; Esclapez, M.D; Doñate, S.; Marco. S. RHINOS: A lightweight portable electronic nose for real-time odour quantification in wastewater treatment plants, *iSCIENCE*, 2021, 24, 12
- [3]. Burgués, J.; Esclapez, M.D; Doñate, S.; Saúco L; Marco S. Characterization of odour emissions in a wastewater treatment plant using a drone-based chemical sensor system, *STOTEN*, 846, 24, 12, 2022
- [4]. European Patent Presented: EP21382389.1

6. LA IMPORTANCIA DE LA INFORMACIÓN AL USUARIO SOBRE LAS VARIABLES AMBIENTALES INTERIORES QUE LE RODEAN.

Alejandro Payán de Tejada
Consejo General de la Arquitectura Técnica de España

***Resumen-** El cuerpo humano es una máquina prácticamente perfecta que utiliza nuestro cerebro para adaptarse a las condiciones ambientales que nos rodean día a día en nuestra rutina. Esta adaptación que, a priori, puede considerarse un beneficio, puede jugar en nuestra contra ya que dejamos de percibir ambientes que, a largo plazo, pueden ser dañinos para nuestra salud. Esto sucede con variables como el ruido, los parámetros higrotérmicos o la iluminación entre otros.*

La exposición al que en estos casos nuestro cuerpo se somete, puede suponer perjuicios en nuestra salud de cuyos procesos no somos conscientes. Es por tanto necesaria una ayuda objetiva para poder cuantificar, verificar y tener la posibilidad de controlar estos parámetros, estudiados por varias normativas tanto a nivel nacional como internacional.

Esto es posible gracias a los avances producidos en las últimas décadas en los llamados sistemas de monitorización, que posibilitan la captación y visualización de las variables deseadas gracias a la evolución de dispositivos de sensorización, cada vez más precisos y duraderos.

Palabras clave: Edificios saludables, usuarios, calidad del aire interior, monitorización.

6.1. Introducción.

a) Antecedentes

El reto que la Unión Europea se ha propuesto en el año 2050 sobre la descarbonización completa ha cambiado en cierta manera todo el paradigma de todos los sectores económicos, más aún aquellos con más responsabilidad en el impacto medioambiental como son el del transporte y el de la construcción.

Esto ha activado una faceta que era residual como es el de la medición continua de los parámetros de consumo energético. Si bien, es mucha la literatura científica que estudia el comportamiento energético, concretamente en el sector AEC (Architecture, Engineering & Construction), sobre procesos de fabricación, construcción y consumos durante las fases de uso, los sistemas de monitorización no son algo común de encontrar en la mayor parte de estas.

Este apartado se vuelve aún más desfavorable si se observa el sector de edificación, y todavía más crítico en el subsector residencial donde, prácticamente, ninguna vivienda cuenta con este tipo de sistemas.

Este estado actual de la integración de los sistemas de monitorización choca directamente con la ya anticuada Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios en la que se podía leer en su artículo 8 sobre “Instalaciones técnicas de edificios”:

“Los Estados miembros fomentarán la introducción de sistemas de medición inteligentes cuando se construya un edificio o se efectúen en él reformas de importancia [...]”

Esto era ampliado en el preartículo de la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética en la que se redactaba:

*(33) “Con objeto de reforzar la capacitación de los clientes finales en cuanto al acceso a la información de la medición y facturación de su consumo individual de energía, teniendo en mente las oportunidades conexas al proceso de los sistemas de medición inteligentes y la provisión de contadores inteligentes en los Estados miembros, es importante que las disposiciones del Derecho de la Unión en este ámbito sean más claras. **Esto debe contribuir a reducir los costes de la aplicación de los sistemas de medición inteligentes equipados con funciones que potencien el ahorro de energía y a respaldar el desarrollo de los mercados de los servicios energéticos y de la gestión de la demanda.** [...]”*

Pero se dio un paso más, en este caso concreto y específico a la edificación residencial en la Directiva 2018/844 sobre eficiencia energética en edificios en la que explícitamente se habla lo siguiente en los artículos referentes a consumos de calefacción y aire acondicionado:

“[...] 5. Los Estados miembros podrán establecer requisitos destinados a garantizar que los edificios residenciales estén equipados con lo siguiente:

- a) la funcionalidad de monitorización electrónica continua que mida la eficiencia de las instalaciones e informe a los propietarios o a los administradores del inmueble cuando esta disminuya significativamente y cuando sea necesario reparar la instalación, y*
- b) funcionalidades eficaces de control para optimizar la producción, la distribución, el almacenamiento y el consumo de energía.” [...]*

b) La salubridad en edificios residenciales

Esta transición se debe aprovechar para incluir otros parámetros que están tomando una alta importancia entre los clientes gradualmente, a veces incluso de manera inconsciente. Estos parámetros responden a proveer a los usuarios de unas condiciones saludables que no solo no perjudiquen su salud, sino que les provean de un ambiente confortable.

Para ello, estos sistemas de monitorización son esenciales dada una característica del cuerpo humano que en muchas ocasiones se olvida, su adaptabilidad a las condiciones ambientales que nos rodean.

Esto se da, por ejemplo, en los usuarios de edificios situados en núcleos de población urbanos concentrados en los que un nivel intenso sonoro o una calidad del aire precaria es algo habitual y de la que no son conscientes hasta que no se trasladan a otro lugar. Sin embargo, aunque el cuerpo se haya *adaptado* a estas condiciones, no es sinónimo de que no nos afecten, seguramente lo hagan a largo plazo provocando problemas de salud.

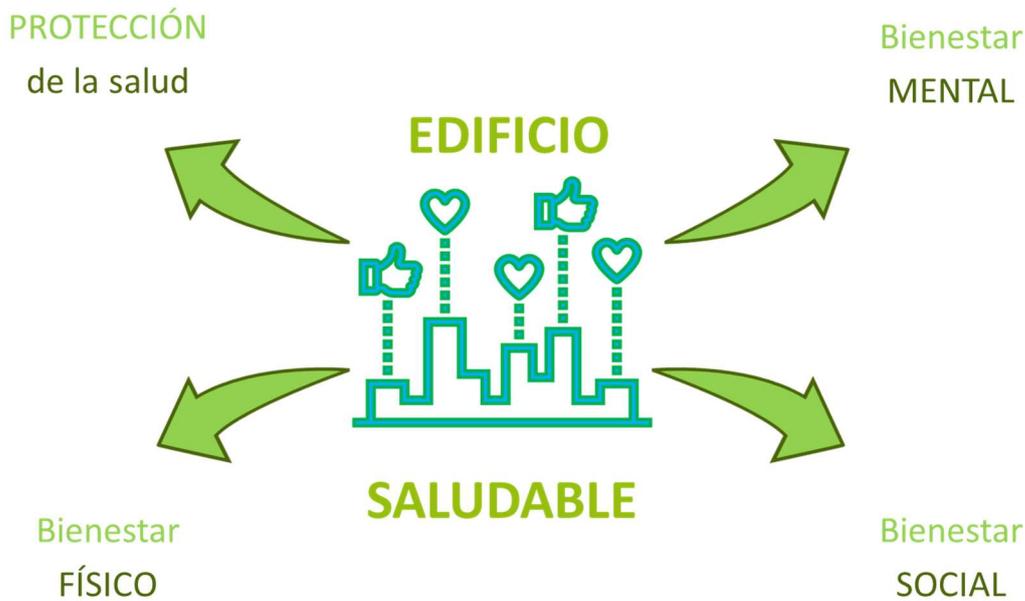


Figura 6.1: Principios básicos de un edificio saludable.

Los sistemas de monitorización nos permiten tener consciencia de las circunstancias que nos rodean y hacernos tomar decisiones mediante interfaces de información que nos recomiende actuaciones para evitar esas condiciones insalubres.

Esto toma más relevancia cuando ya está acuñándose el término “Indoor generation” para una generación (o generaciones) que cada vez pasamos más tiempo en interiores, llegando según algunas fuentes hasta el 90% de nuestra vida, ya sea por ocio, trabajo o, simplemente, en nuestro hogar.

Asimismo, ya se incluyó en el recién publicado Plan Estratégico de Salud y Medio Ambiente, PESMA, un capítulo específico sobre “Calidad de Ambientes Interiores” provocando la fusión del sector de la edificación y el sanitario. En este se recomienda “Desarrollar un sistema de vigilancia de Calidad de Ambientes de Interiores contando con MSAN (Ministerio de Sanidad), MITERD (Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico), MITMA (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana), CCAA y otros agentes implicados para monitorizar los avances y necesidades en la CAI”.

6.2. Metodología.

Áreas saludables

Para desarrollar esta vigilancia y diseñar un protocolo de monitorización útil y completo, se puede dividir la salubridad de los edificios en las siguientes áreas:

1. **Confort higrotérmico:** referido principalmente a las condiciones térmicas e higrométricas y todas las variables que afectan a nuestro bienestar térmico.
2. **Calidad del aire y salubridad:** mide la concentración de elementos químicos y biológicos en suspensión en el aire y que, al respirarlos, pueden ser perjudiciales al rebasar los límites establecidos.

3. **Materiales:** área transversal. Afecta al resto de áreas de una manera más o menos importante según las características de los elementos instalados en obra o utilizados en las rehabilitaciones.
4. **Confort acústico:** con cada vez más importancia, dado el modelo de concentración que aúna a cada vez más personas en sitios más reducidos y que tiene como una de sus desventajas la cercanía a fuentes emisoras como puede ser el tráfico continuo, afectando a una mayor cantidad de usuarios.
5. **Iluminación:** no solo referido a la cantidad de luz sino a su influencia sobre nuestro ritmo circadiano.
6. **Ergonomía, movilidad y accesibilidad:** no sería una transición justa si no se tiene en cuenta este apartado que, si bien no necesita de una monitorización continua en muchos de sus aspectos, si tiene una influencia definitiva en otros apoyado por la comunicación diferente a personas con diversidad funcional.
7. **Calidad del agua:** a priori satisfecha en España, es un elemento tan básico que necesita de su vigilancia continua.
8. **Electroclima:** cada vez más rodeados de señales de baja y alta frecuencia, existen valores límites que se deben vigilar para no incurrir en condiciones insalubres a largo plazo.

Normativa relacionada con los edificios saludables

En el aspecto legal, teniendo en cuenta el interés suscitado en el sector de la investigación, son varias las disposiciones que se han ido creando a lo largo de los años que, en alguna ocasión, se han traspuesto a las normativas obligatorias.

Así, en la legislación obligatoria, el Código Técnico de la Edificación, CTE, y el Reglamento de Instalaciones Térmicas de la Edificación, RITE, son las dos normas centrales en las que se recogen criterios de salubridad.

En el primero de ellos, en su Documento Básico DB HS sobre salubridad se encuentran criterios para asegurar las condiciones de calidad del aire interior necesarias. Esto se redacta en el DB HS3 "Calidad del aire interior", en el que, tras la modificación incluida según la Orden FOM/588/2017 se indica que *"En los locales habitables de las viviendas debe aportarse un caudal de aire exterior suficiente para conseguir que en cada local la concentración media anual de CO₂ sea menor que 900 ppm y que el acumulado anual de CO₂ que exceda 1.600 ppm sea menor que 500.000 ppm·h"*.

A este documento, se le añade el DB HS6, de reciente introducción en el CTE y en el que se regulan las condiciones constructivas necesarias para evitar altos niveles de radón.

A estos se les suman el texto íntegro del DB HR de protección contra el ruido y el DB SUA en el que se abordan distintos aspectos de la accesibilidad en la edificación. Por último, es de destacar el capítulo 2 del Documento Básico sobre Ahorro de Energía, DB HE2, en el que se hace referencia a la otra normativa central que se citaba en el inicio de este apartado, el RITE. La regulación, modificada en marzo de 2021, incluye las condiciones mínimas de diseño para asegurar no sobrepasar los límites relacionados con las variables termohigrométricas. Asimismo, también se hace referencia a la calidad del aire interior, en este caso, con referencia a la calidad del aire exterior, concretamente al nivel de concentración de CO₂.



I. DISPOSICIONES GENERALES

MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA,
RELACIONES CON LAS CORTES Y MEMORIA DEMOCRÁTICA

4572 Real Decreto 178/2021, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.

Figura 6.2: Normativas principales obligatorias relacionadas con aspectos saludables en los edificios.

Por otra parte, también existen varias normativas voluntarias, principalmente publicadas por el organismo UNE, Asociación Española de Normalización, que han recopilado del trabajo de expertos que forman parte de los distintos Comités pautas para crear ambientes saludables.

La serie de normas genérica que hace referencia a todos los campos de salud en edificios es la conformada por las tres partes de la UNE 171330. Calidad Ambiental en Interiores:

- UNE 171330-1. Diagnóstico de calidad ambiental interior.
- UNE 171330-2. Procedimientos de inspección de calidad ambiental interior.
- UNE 171330-3. Sistema de gestión de los ambientes interiores.

Específicamente, en su parte 2 se enuncian los parámetros mínimos y complementarios a tener en cuenta para asegurar un buen ambiente interior. Estos quedan resumidos en el Cuadro 6.1:

Parámetros mínimos	Parámetros complementarios
<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación higiénica de los sistemas de climatización • Temperatura • Humedad relativa • Dióxido de carbono • Monóxido de carbono • Partículas en suspensión, PM 2.5 • Conteo de partículas en suspensión (0,5 y 5µm) • Bacterias en suspensión • Hongos en suspensión 	<ul style="list-style-type: none"> • Iluminación ambiental • Ruido ambiental • Campo electromagnético • Campo eléctrico • Electricidad estática • Formaldehído • Ozono • Compuestos Orgánicos Volátiles • Confort térmico según UNE EN ISO 7730 • Fibras en suspensión • Olores • Óxido de nitrógeno • Dióxido de azufre • Gas radón

Cuadro 6.1: Parámetros mínimos y complementarios a tener en cuenta para asegurar un buen ambiente interior.

Además, se muestra la metodología de muestre para los sistemas de monitorización sensibles a cada parámetro, incluyendo la ecuación:

$$P=0,15 \times \sqrt{S}$$

donde,

P es el número de puntos de muestreo

S es la superficie a monitorizar

También se indican las precauciones que se deben tener en cuenta para evitar falsos valores, resumidos en el Cuadro 6.2:

Ubicación			Distancia (cm)
Pared exterior con ventanas o puertas			100
Pared exterior sin ventanas o puertas y pared interior			50
Suelo	Límite inferior		10
	Límite superior	Sentado	130
		De pie	200

Cuadro 6.2: Distancias mínimas a elementos para evitar falsas mediciones.

Complementando a esta norma, existen otras más específicas que hacen referencia a parámetros que ya se recogen en la UNE 171330 como pueden ser la UNE EN 12464 sobre iluminación en los lugares de trabajo, o la UNE EN ISO 7730 que recoge una metodología de determinación sobre la ergonomía del ambiente térmico.

Sin embargo, pese a que todas estas normas, obligatorias o no, abarcan la mayor parte de los campos a tener en cuenta en los edificios saludables, tienen la limitación de uso conforme a sus ámbitos de aplicación.

Las normativas obligatorias hacen alusión a las condiciones de diseño, sin tener en cuenta la fase de uso y la necesidad de control y verificación durante la misma. Por otra parte, los textos de normalización voluntarios se han reducido a servir para posibles inspecciones. Así se enfocaron las normas citadas como la UNE 171330 que respeta la metodología habitual Diagnóstico – Procedimiento de inspección – Evaluación, forzando a la medición puntual y no a una monitorización continua.

Si bien es verdad que abren posibles vías junto a la deriva de las Directivas Europeas sobre la vigilancia antes citada, de que los sistemas de monitorización se hagan más comunes, basados en el conocimiento ya redactado y publicado por entidades de importancia.

6.3. Resultados.

Partiendo de la normativa antes descrita, desde el Consejo General de la Arquitectura Técnica de España, CGATE, hemos diseñado una campaña de monitorización alrededor de todo el territorio nacional poniendo el foco en la calidad del aire en los interiores de las viviendas.

La campaña ha recogido los datos de niveles de CO₂, PM_{2.5}, temperatura y humedad relativa de 32 viviendas de 7 comunidades autónomas diferentes. Estos fueron recopilados durante 9 días con una frecuencia de 2,5 minutos, almacenando, de cada vivienda, más de 5.000 líneas de datos para su posterior análisis.

El período temporal se ubicó en la estación invernal, la más desfavorable debido a la falta de ventilación natural que existe al no abrirse las ventanas en muchas ocasiones por la baja temperatura exterior.

En cada una de las viviendas se instalaban dos equipos de monitorización PCE AQD 20 (Figura 6.3) que cuentan con tarjeta de memoria y conexión a corriente además de alimentación por baterías

que hacía segura la recopilación de datos, evitando la pérdida por interrupciones de suministro eléctrico que en ocasiones accidentales se pueden dar en algunas viviendas.



Figura 6.3: Equipo de monitorización PCE AQD 20 utilizado en la campaña.

Los dos equipos se repartían entre las dos estancias con más uso de las viviendas: el salón y el dormitorio principal.

El análisis posterior se centró en la evolución y tendencias del parámetro CO₂, que si bien no es perjudicial para la salud hasta altas concentraciones (> 30.000 ppm), sí es indicador de las tasas de ventilación de las estancias. Esto representa que una tendencia creciente de los valores de concentración de este contaminante también indica un aumento de otros presentes en las estancias, como el formaldehído, presente en el mobiliario de madera, chapas de melamina o contrachapados que existen en nuestras casas. También otros posibles contaminantes son la materia particulada PM_{2.5}, proveniente de fuentes comunes como el tráfico rodado o la calefacción del hogar, o el monóxido de carbono, que se puede producir por malas combustiones de los equipos de producción de gas con mal funcionamiento o chimeneas.

A continuación, se presentan varios gráficos representativos, Figuras 6.4 – 6.6, del estudio completo que se puede encontrar en la publicación [“Estudio sobre la calidad del interior en viviendas”](#).

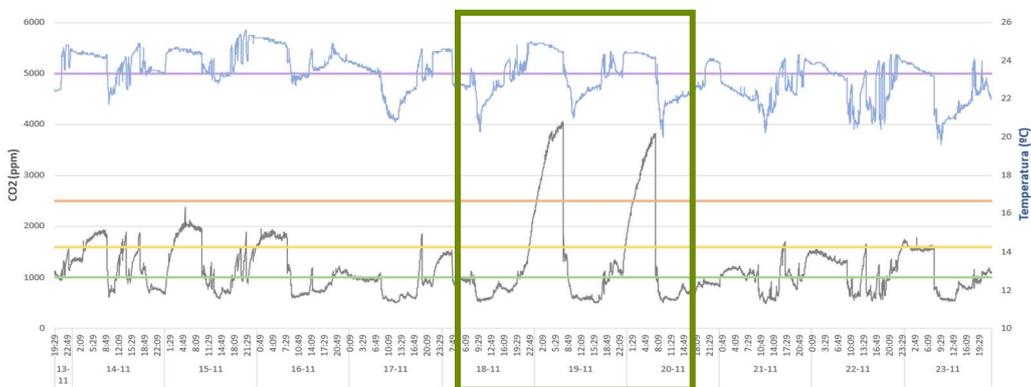


Figura 6.4: Evolución durante los 9 días de monitorización de las variables citadas.

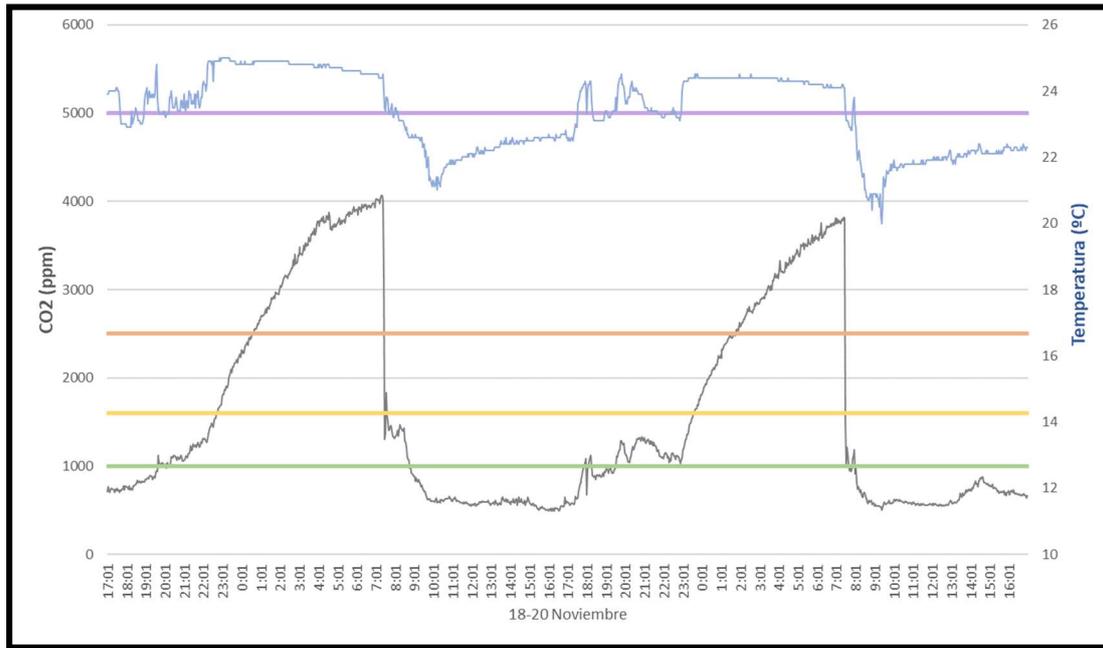


Figura 6.5: Detalle de concentración máxima de CO₂ en dormitorio.

En estos dos primeros gráficos se pueden observar la evolución de la variable CO₂ (Línea gris) durante el transcurso de la monitorización en uno de los dormitorios con las viviendas. La línea azul representa las temperaturas de aire registradas. Las horizontales verde, amarilla, naranja y morada muestran los valores límite de los rangos establecidos en el estudio (Cuadro 6.3).

Destacados sobre estas líneas (Figura 6.4), los días 19 y 20 de noviembre en los que, a diferencia del resto de campaña, el usuario dormía con la puerta cerrada. Esto ocasionó un aumento de la concentración por la disminución drástica de la tasa de ventilación de la estancia. Como se comentaba anteriormente, el riesgo no está en el CO₂ mismo, sino en el resto de los contaminantes existentes que no se estaban monitorizando y que podían estar por encima de los niveles saludables recomendados durante la pernocta.

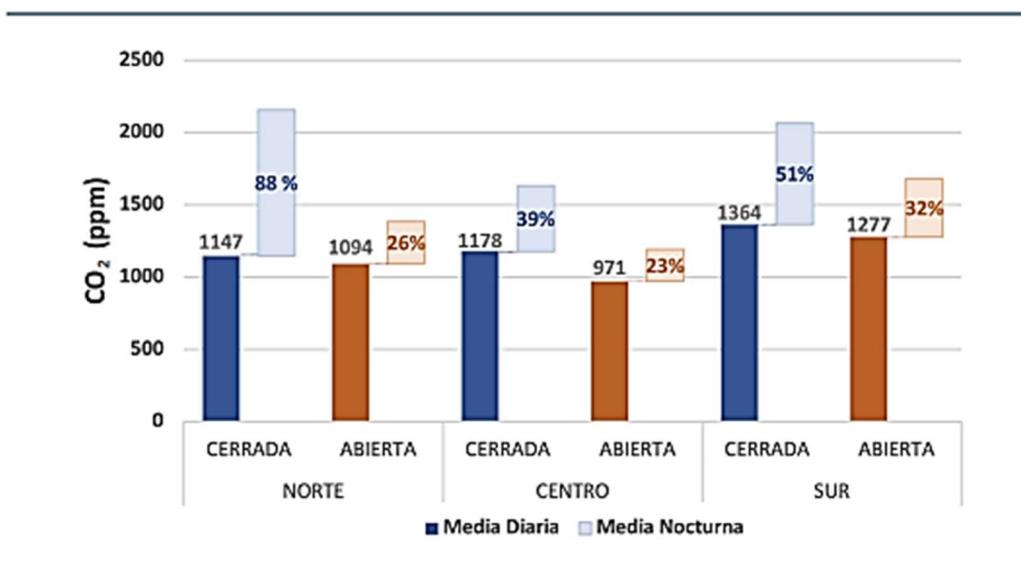


Figura 6.6: Concentraciones promedio por zona geográfica de niveles de CO₂ en dormitorios principales. Puerta abierta o cerrada.

En este último gráfico, se muestran las concentraciones promedio que se calcularon por zona geográfica, siendo la más desfavorable inicial la existente en la zona sur. Sin embargo, la media nocturna, calculada durante la estancia del usuario en los dormitorios tenía su valor más desfavorable en la zona norte con un promedio superior a los 2.000 ppm.

En el estudio, de acuerdo a diversas fuentes como el Instituto Nacional de la Seguridad y Salud en el Trabajo, INSST, o la misma UNE 171330, se establecieron los siguientes límites referidos a la concentración de dióxido de carbono (Cuadro 6.3).

Concentración de CO ₂ (ppm)	Consideración
Menos de 900	Saludable
900 – 1.600	Desfavorable
1.600 – 2.500	Preocupante
2.500 – 5.000	Grave
Más de 5.000	Muy grave

Cuadro 6.3: Cuadro de rangos de concentraciones considerados en el estudio.

6.4. Conclusiones.

En muchas ocasiones, no somos conscientes de las condiciones ambientales que nos rodean por la adaptabilidad de la que nuestro cuerpo humano nos provee. Esto adquiere aún más importancia por la cantidad de tiempo que pasamos en recintos interiores ya sea por trabajo, ocio o en nuestro propio hogar.

Esta situación hace esencial la vigilancia continua de los ambientes interiores en todas las áreas saludables que existen para procurar nuestro bienestar físico, mental y social. Esta vigilancia se puede realizar a través de sistemas de monitorización, impulsados por las últimas Directivas Europeas, con la base de conocimiento ya redactado y publicado en la normativa obligatoria y voluntaria existente.

Se ha constatado, por último, de acuerdo a los resultados de la campaña de monitorización de la calidad del aire interior en viviendas, la falta en muchas ocasiones de unas condiciones de ventilación mínimas para asegurar el buen estado de salud a largo plazo de los ocupantes.

Se considera que si los usuarios de las viviendas tuvieran acceso a estos datos, como ya sucede con otras variables en otros ámbitos (lugares de trabajo, ocio...), las decisiones para preservar su salud podrían ser inmediatas y evitar posibles perjuicios procurándose el confort físico y mental a largo plazo.

6.5. Agradecimientos.

Esta campaña no podría haber sido posible sin el interés del Consejo General de la Arquitectura Técnica en la transición del parque inmobiliario hacia los edificios saludables y la colaboración de la Universidad Politécnica de Madrid a través de su Escuela Técnica Superior de Edificación.

7. PROPUESTA PARA UN PLAN NACIONAL DE VIGILANCIA DEL CICLO DE CARBONO ATMOSFÉRICO BASADO EN SENSORES.

Marta Ruiz Llata, Pedro Martín Mateos y Pablo Acedo
Departamento de Tecnología Electrónica. Universidad Carlos III de Madrid.

7.1. Introducción.

El calentamiento global, asociado principalmente al aumento de los niveles de gases de efecto invernadero en las últimas décadas, es una de las principales preocupaciones internacionales y por ello se han desplegado diferentes redes de seguimiento de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero para la caracterización de sus fuentes y sumideros a escala planetaria. Las estrategias actuales de observación combinan infraestructuras espaciales y terrestres cada una con marcados puntos débiles y puntos fuertes. Aunque las misiones por satélite han hecho avanzar enormemente nuestra comprensión de los ciclos de CO₂, CH₄ y otros gases, la existencia de errores sistemáticos hace imprescindible la validación cruzada de los datos mediante mediciones en tierra. En este sentido, varias redes terrestres recogen y archivan actualmente mediciones atmosféricas de alta calidad y relevantes relacionadas con estos gases de efecto invernadero: por ejemplo, concentraciones puntuales, isótopos y flujos turbulentos (“Integrated Carbon Observation System” - ICOS); promedio de abundancia en columna (“Total Carbon Column Observing Network” - TCCON); y medida de perfiles verticales utilizando globos aerostáticos (AirCore). Sin embargo, estas redes e infraestructuras de investigación se crearon originalmente para centrarse en las observaciones de gases de efecto invernadero en entornos de fondo y tienen una cobertura geográfica muy dispersa e irregular. Esto, sumado a la escasa resolución espacial y temporal de las infraestructuras basadas en satélites, hace que las zonas altamente pobladas y otros puntos calientes de emisión estén críticamente infra-muestreados. Este punto ha sido subrayado en el informe verde de la Comisión Europea en el marco de la capacidad operativa de seguimiento y verificación de las emisiones antropogénicas de CO₂ (MVS), destacando que las redes terrestres existentes no cumplen todos los requisitos operativos necesarios en programa para la capacidad MVS de Copernicus CO₂ (principal programa europeo para el estudio y la mitigación de los efectos del cambio climático). Desgraciadamente, estas deficiencias de las actuales redes de seguimiento de gases de efecto invernadero son muy difíciles de abordar con las tecnologías tradicionales, que son voluminosas, caras, y muy exigentes desde el punto de vista técnico del operador.

En este escenario, aparece la necesidad de abordar estas debilidades actuales mediante el desarrollo de una nueva generación de instrumentos que permitan una capacidad de monitorización sin precedentes del CO₂, el mayor contribuyente al calentamiento global causado por emisiones de origen antropogénico, y de otros gases de efecto invernadero. Estos nuevos sensores deben proporcionar una medición precisa de la concentración del gas, no sólo a nivel del suelo, sino también en las diferentes capas de la atmósfera para una caracterización completa de la distribución del CO₂. Es muy importante destacar que el diseño de estos instrumentos debe estar dotado también de una importante característica adicional como es la capacidad de determinar la huella isotópica estable del CO₂, ya que es el parámetro que permite discernir entre fuentes de

CO₂ antropogénicas (como la combustión de combustibles fósiles) y naturales. Además, los sistemas de detección deben estar diseñados para un sencillo despliegue in situ en diferentes áreas de interés estratégico, como en ciudades, proporcionando una cobertura completa de los puntos ciegos más importantes existentes en la actualidad. Así, la nueva generación de sensores podría establecer la base necesaria para orientar las políticas de toma de decisiones en el proceso de transición verde que se avecina.

En este documento se analizan tres tecnologías novedosas de interés para el despliegue de redes de vigilancia locales y distribuidas del ciclo de carbono. En primer lugar, el método de Radiometría Heterodina Láser (LHR), que permite obtener el perfil vertical (con resolución en altitud) de la concentración de CO₂ operando desde la superficie de la Tierra analizando el efecto en el espectro de la luz solar recibida de los componentes atmosféricos para encontrar con precisión la distribución vertical de la concentración de CO₂ en la atmósfera. En segundo lugar, se presentan soluciones basadas en el método de espectroscopia fotoacústica que combinan tamaño reducido, alta sensibilidad y un despliegue de campo sencillo, permitiendo la posibilidad de proporcionar un mapa exacto, y potencialmente libre de huecos, de la concentración de gases a nivel del suelo mediante una red de sensores distribuida. En tercer lugar se describe la espectroscopia por doble peine de frecuencias ópticas, como técnica de espectroscopia de absorción de espectro expandido y camino abierto, que actualmente se ha convertido en una alternativa a la espectroscopia por transformada de Fourier (FTIR) para despliegue en campo debido a su diseño compacto y a la ausencia de partes móviles en el diseño óptico del espectrómetro.

Finalmente, una vez descritas estas tres técnicas de espectroscopia, se resumen en el apartado de discusión y conclusiones, los avances obtenidos en cada una de ellas por el Grupo de Sensores y Técnicas de Instrumentación (SITec) de la Universidad Carlos III de Madrid, así como las expectativas de desarrollo y aplicación a corto plazo en redes de vigilancia atmosférica.

7.2. Radiometría heterodina láser (Laser Heterodyne Radiometry, LHR).

La técnica de Radiometría Heterodina Láser (LHR) permite la implementación de sistemas portátiles que, operando desde la superficie de la tierra, analizan la luz del sol que atraviesa la atmósfera para determinar con exactitud su composición. El tamaño reducido y la capacidad de operar desde la superficie terrestre son dos de las características fundamentales que permitirán la rápida adopción de estos sistemas por parte de las redes de monitorización atmosférica. Como presenta la Figura 7.1, el sensor, que opera a nivel del suelo, analiza el espectro de la luz procedente del sol tras haber atravesado la atmósfera y, mediante técnicas de análisis espectral, identifica las líneas de absorción infrarroja inducidas por las particulares vibraciones moleculares de los contaminantes atmosféricos de interés. Estas vibraciones, o líneas de absorción, son características de cada molécula y tienen ocurrencia en un conjunto de frecuencias muy concretas (conocidas como firma espectral) que permiten diferenciar entre distintos compuestos gaseosos, incluyendo distintos isotopólogos de una misma molécula. Mientras que el máximo valor de dichas líneas de absorción (absorbancia) permite cuantificar la concentración de cada molécula, la anchura espectral de la resonancia permite estimar la presión a la que se encuentra y, por lo tanto, su altitud en la atmósfera. Un sensor emplazado en una localización fija y siguiendo la posición del sol proporcionaría, a lo largo del día, un corte transversal completo de la distribución de contaminantes y su evolución temporal. Sin embargo, unas pocas unidades móviles desplegadas,

por ejemplo, en vehículos municipales permitirían reconstruir el mapa tridimensional de contaminación con una cobertura geográfica prácticamente completa, redefiniendo con ello nuestras capacidades actuales de monitorizar la huella de carbono.

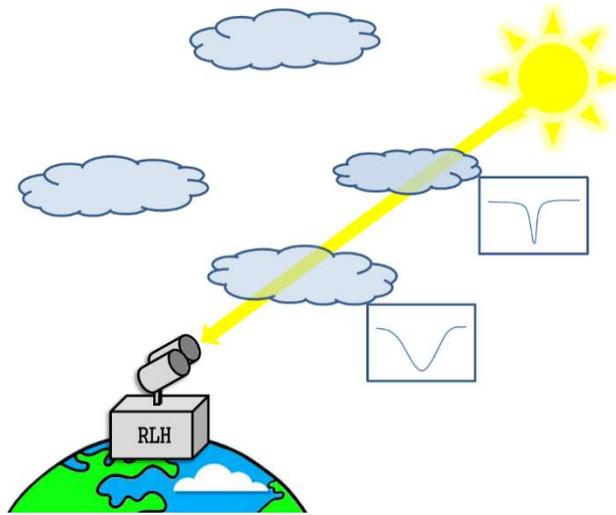


Figura 7.1: Principio de funcionamiento de un sistema basado en la técnica de radiometría.

En términos generales, la Radiometría Heterodina Láser (LHR) tiene unos fundamentos muy similares a los de un analizador de espectro de radiofrecuencia, con la salvedad de que el oscilador local es un láser y que el mezclado con la señal cuyo espectro se desea analizar se hace directamente en un fotodetector. La Figura 7.2 muestra un esquema de bloques general de esta técnica de medida, donde la señal es la radiación solar captada que se mezcla con la de un emisor láser. Cuando se barre la frecuencia de emisión del láser, un medidor de potencia de radiofrecuencia conectado al fotodetector (tras una cadena de amplificación y filtrado) permite recuperar el espectro de la señal óptica incidente.

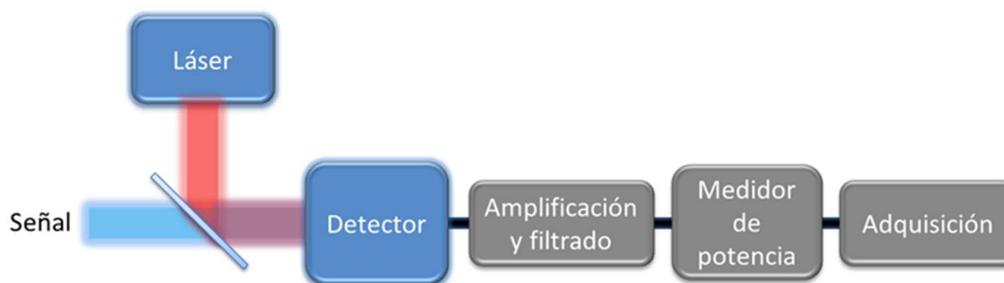


Figura 7.2: Diagrama de bloques de un radiómetro láser heterodino.

En comparación con las tecnologías tradicionales utilizadas para la construcción de espectrómetros, como son el espectrómetro de transformada de Fourier y los basados en la utilización de elementos dispersivos, esta técnica proporciona una resolución en longitud de onda enormemente alta, de muy pocas decenas de MHz. Esta característica es la que permite a un espectrómetro resolver con un alto nivel de detalle el espectro analizado y será de vital importancia a la hora de determinar la concentración de CO₂ con gran resolución y a cada altura, además de permitir la identificación del origen antropogénico del CO₂ a través del ratio isotópico. Como referencia, solamente los espectrómetros de transformada de Fourier con dimensiones de brazo de varios metros pueden llegar a proporcionar resoluciones ópticas comparables a las de los RLH, teniendo estos últimos tamaños de unos pocos centímetros. Además, los RLH proporcionan

una sensibilidad teórica muy superior fruto del proceso de mezclado de la señal de entrada con la señal del oscilador local en el que se produce la amplificación de la señal incidente. Igualmente, los RLH no basan su operación en componentes mecánicos móviles, por lo que poseen una gran consistencia y un altísimo potencial de miniaturización y robustez. En contrapartida cabe mencionar que un RLH presenta rangos espectrales mucho más reducidos que los rangos proporcionados por los espectrómetros de transformada de Fourier y los dispersivos. No obstante, en su aplicación a la espectroscopia de gases y teniendo en cuenta que el foco se encuentra en la monitorización del CO₂, dicho rango es sobradamente suficiente para analizar las estrechas transiciones moleculares que permitirán estimar la concentración y el perfil vertical de este contaminante atmosférico.

La RLH fue desarrollada en los años 70 por el Jet Propulsion Laboratory de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y, durante décadas, su utilización ha estado restringida a alguno de los principales laboratorios de metrología y a la medida, casi exclusivamente, de CO₂ y CH₄, sin que su arquitectura sufriera cambios relevantes, por lo que es una técnica ampliamente contrastada y robusta. Afortunadamente, ha habido importantes desarrollos tecnológicos recientes en términos de las prestaciones de los componentes necesarios para su implementación que han comenzado a hacer viable su utilización en campo. Dentro de estos desarrollos cabe destacar la disponibilidad de fuentes láser robustas y de tamaño reducido y de detectores altamente eficientes y de muy bajo ruido. Asimismo, la amplia disponibilidad de amplificadores de radiofrecuencia de bajo ruido y de detectores de potencia de gran rango dinámico ha tenido un impacto muy positivo en las prestaciones de los actuales RLH. En lo referente a la mejora de prestaciones cabe también mencionar el incremento de rendimiento posibilitado por una nueva aproximación a la RLH, conocida como radiometría láser heterodina con modulación en longitud de onda, que fue propuesta por nuestro grupo de investigación a principios del año 2018. Nuestro método fue rápidamente adoptado por el Key Laboratory of Environmental Optics and Technology de la Academia China de Ciencia para medir la concentración de CO₂ sobre la ciudad de Hefei. Aunque se trata de una versión muy básica del sistema que no permite discernir isotopólogos del CO₂ ni proporciona información en altura, su caracterización ha sido de enorme utilidad a la hora de corroborar la viabilidad tecnológica de la técnica propuesta.

7.3. Espectroscopia fotoacústica (Photo Acoustic Spectroscopy, PAS)

En segundo lugar, se describe un nuevo concepto de sensor móvil para la caracterización de las concentraciones de CO₂ basado en la técnica fotoacústica (PA). Esta técnica permite la implementación sensores de muy alta sensibilidad utilizando muestras de gases de un volumen muy reducido, por lo que serían ideales para ser instalados de manera distribuido en zonas de altas emisiones, como ciudades o determinados tipos de industrias.

La detección por respuesta fotoacústica es una técnica rutinaria en algunas aplicaciones, incluyendo el análisis de trazas de gases y la monitorización de procesos industriales. Consiste en iluminar una muestra de gas a una longitud de onda a la que el gas que se quiere detectar presenta un pico de absorción. Cuando la fuente de luz es modulada en amplitud, se genera una onda acústica a la frecuencia de modulación debido al calentamiento, expansión y relajación de la muestra. Esta onda acústica se puede detectar por un micrófono o por medio de otro tipo de

sensores acústicos de mayor sensibilidad. Además, midiendo la respuesta de la señal acústica frente a la longitud de onda de excitación, es posible identificar y cuantificar las sustancias en función de sus características únicas de absorción. Este último método se denomina espectroscopia fotoacústica (PAS). Las ventajas de esta técnica con respecto a otras técnicas de espectroscopia óptica son: (1) la señal detectada es directamente proporcional a la intensidad de la luz absorbida en lugar de a la luz transmitida, lo que reduce los efectos del ruido de la fuente de luz y también permite disponer de celdas de gas de muy bajo volumen, (2) no se necesita ningún fotodetector para la señal principal, lo que mejora el rendimiento y reduce el coste, y (3) la detección fotoacústica puede aplicarse en combinación con otras técnicas espectroscópicas, como la modulación de la longitud de onda con detección armónica y las técnicas basadas en cavidades ópticas resonantes, para aumentar la potencia óptica en la muestra de gas. Esta técnica se ha consolidado con una tecnología madura con algunos productos comerciales disponibles, como analizadores de niveles de fondo ambiental de gases de efecto invernadero como el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), y como sensores integrados de CO_2 de bajo coste. Sin embargo, los sensores comerciales de CO_2 de bajo coste ofrecen niveles discretos de rendimiento (entre 50 y 100 ppm de precisión para las mediciones de CO_2), lo que los hace inadecuados para su uso como referencia en las mediciones de calibración.

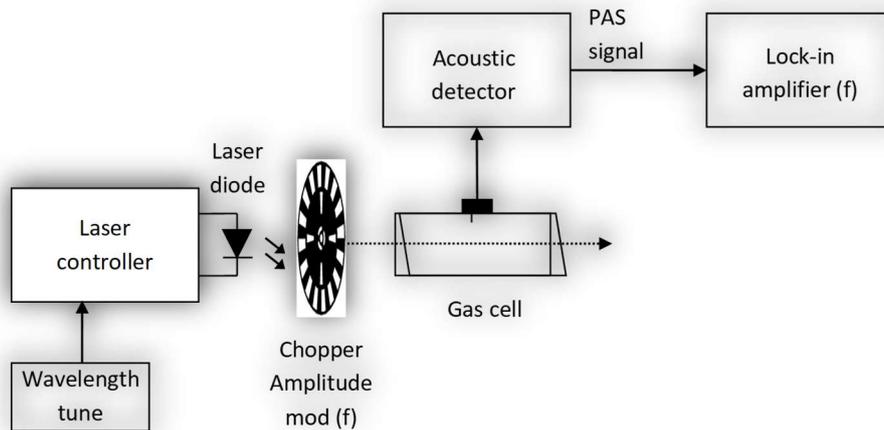


Figura 7.3: Diagrama de bloques de un sensor de gas basado en la técnica fotoacústica.

Una característica única de la técnica PA es que permite amplificar la señal de salida (mejorando así la sensibilidad) utilizando cavidades acústicamente resonantes como células de gas o detectores acústicos resonantes, lo que aumenta enormemente el rendimiento del sistema. Uno de los métodos más conocidos para mejorar el rendimiento del PAS, la espectroscopia fotoacústica mejorada con cuarzo (QEPAS), es un enfoque para la detección fotoacústica de gases basado en la utilización de un diapasón de cuarzo (QTF) como transductor acústico fuertemente resonante. Acústicamente, un QTF es un cuadrupolo, que proporciona una buena inmunidad al ruido ambiental. Las cifras típicas de estos QTF son resonancias en torno a 32 kHz y valores Q del orden de 10.000 a presión atmosférica. La Figura 7.3 muestra una configuración estándar para QEPAS. Una fuente láser, sintonizada con una característica de absorción del gas objetivo, pasa a través de las puntas del QTF. La amplitud o la longitud de onda del láser se modula a la mitad de la frecuencia de resonancia del QTF para producir ondas sonoras debido a la absorción entre las dos puntas y así se excita su resonancia. La señal amplificada del QTF se demodula a la frecuencia de resonancia utilizando un amplificador lock-in, siendo la amplitud de esta señal directamente proporcional a la concentración de gas objetivo en la célula. Por último, es importante señalar que la sensibilidad de un sistema PAS es directamente proporcional a la potencia del láser y a la intensidad de la línea de absorción, por lo que en los últimos años se han propuesto fuentes láser de alta potencia en el

infrarrojo medio para mejorar la sensibilidad y el límite de detección de estos sistemas, ya que los principales modos vibracionales de las moléculas objetivo existen en esta región del espectro óptico.

Muy recientemente, los sistemas QEPAS se han utilizado para lograr la detección ultrasensible de varias especies de gases de efecto invernadero con límites de detección en el rango sub-ppb y se han utilizado experimentalmente para la discriminación de isótopos objetivo. Estos desarrollos recientes demuestran la viabilidad de esta técnica PAS para la obtención de información extremadamente relevante de la distribución de CO₂ y de otros gases de efecto invernadero a nivel del suelo en zonas urbanas y otros puntos calientes de emisiones, permitiendo obtener la concentración isotópica (relación ¹³CO₂/¹²CO₂) con una precisión objetivo superior al 0,1 %.

7.4. Espectroscopia con peines duales de frecuencias ópticas (Dual-Comb Spectroscopy, DCS).

En este apartado se presenta la técnica de espectroscopia con peines duales de frecuencias ópticas (DCS), técnica que, en base a nuestra experiencia, podemos afirmar que se presenta como la mejor alternativa tecnológica para introducir un instrumento fotónico compacto y portátil que realice la monitorización continua de las emisiones fugitivas de gases contaminantes en amplias zonas abiertas.

Por ejemplo, en la actualidad las emisiones fugitivas en instalaciones asociadas a la industria del petróleo y del gas natural son difíciles de detectar e implican procesos largos y elevados costes de ejecución. Como consecuencia, los programas de inspección están espaciados en el tiempo y, a su vez, las actividades de control y prevención sirven para aplicar medidas correctoras más que para evitar fugas perjudiciales. Las fugas de gas de las instalaciones industriales se deben a la pérdida gradual de estanqueidad de los equipos y no son fácilmente detectables. Se calcula que el 90% de las emisiones reducibles proceden de aproximadamente el 0,1% de los componentes y equipos utilizados en el proceso (bridas, válvulas, bombas, tanques de almacenamiento, etc.) que se clasifican como fugas importantes.

Otra fuente de gases nocivos son los vertederos de residuos sólidos urbanos y las plantas depuradoras de aguas residuales, que presentan numerosos problemas ambientales, sociales, visuales y sanitarios. Las dos cuestiones más acuciantes en la gestión diaria de un vertedero son la producción de lixiviados y la generación de gases. En Europa, hoy en día, un gran porcentaje de los residuos (alrededor del 40%) se eliminan en vertederos, lo que implica que actualmente existen multitud de vertederos de residuos urbanos (aproximadamente 40.000 en toda Europa) con gran cantidad de materia orgánica en proceso de descomposición, o lo que es lo mismo, gran cantidad de gases almacenados en el interior del vertedero o que se filtran de forma incontrolada a la atmósfera o al subsuelo. En el caso de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) hay unas 18.000 en funcionamiento en todo el continente. Además, algunas de estas instalaciones cuentan con sistemas de tratamiento de lodos por digestión anaerobia con el objetivo de generar biogás para su posterior uso en la industria, lo que supone una fuente adicional de emisiones de gases fugitivos de estas instalaciones.

El biogás es una mezcla gaseosa compuesta por un 45-60% de metano (CH₄), un 40-50% de dióxido de carbono (CO₂), un 2-5% de nitrógeno (N₂), un 1% de oxígeno (O₂), pequeñas cantidades de

amoníaco (NH_3) y monóxido de carbono (CO), y trazas de otros componentes como sulfuro de hidrógeno (H_2S), mercaptanos, compuestos organoazufrados, siloxanos y muchos otros compuestos orgánicos volátiles (COV). Las emisiones incontroladas de biogás procedentes de ambos tipos de instalaciones (vertederos y EDAR) pueden producir diversos efectos negativos sobre la vegetación y los edificios vecinos, incluyendo, en los casos más extremos, explosiones dentro del vertedero o en su superficie. Además, generan malos olores en el ambiente circundante derivados de la emisión de compuestos orgánicos volátiles y otras sustancias odoríferas como sulfuro de hidrógeno, aminas y otras. Adicionalmente, hay que destacar que el principal componente del biogás, el metano, es un gas de efecto invernadero con un Potencial de Calentamiento Global (PCG) estimado de 28-36 en 100 años y un relevante contribuyente al cambio climático.

Hoy en día no existen tecnologías para el control sistemático y continuado de las emisiones difusas de este tipo de instalaciones, y el estudio recurrente de los puntos de fuga de biogás es complejo debido a la extensión de estas instalaciones. Los procedimientos actuales utilizan técnicas tradicionales como olfateadores de contacto (detectores de fotoionización -PID- o detectores de ionización de llama -FID-) o incluso la aplicación manual de agua jabonosa en las juntas de válvulas y tuberías para encontrar fugas de gas. La aplicación de estas técnicas requiere una gran dedicación de recursos que sólo se realizan de forma correctiva cuando ya se ha identificado un problema. Por si fuera poco, y con la aplicación de los principios de la economía circular, hoy en día estamos viendo cómo muchas plantas de gestión de residuos (EDAR o vertederos) están avanzando en este aprovechamiento de residuos o lodos para generar energía (biogás), por lo que es de esperar que la necesidad de controlar las emisiones fugitivas aumente en el futuro para evitar las emisiones de gases de efecto invernadero. Así, en estos sectores de actividad y en la industria en general, es urgente acceder a tecnologías avanzadas de monitorización capaces de detectar, en tiempo real, las emisiones difusas de forma sistemática y preventiva para evaluar los riesgos potenciales y actuar rápidamente sobre las fugas.

En la Figura 7.4 se resume el concepto general de la espectroscopia de doble peine (dual-comb) para la vigilancia de fugas de gas distribuidas en una gran superficie. En esta figura podemos ver un espectrómetro activo de camino abierto (basado en una fuente óptica de doble peine) cuyo haz de salida se lanza hacia un conjunto de retroreflectores de bajo coste distribuidos por la planta. Cada haz reflejado en el detector del espectrómetro contendrá la información espectral de la mezcla de gases y compuestos orgánicos volátiles que el haz encuentre a lo largo de su trayectoria de propagación, y a partir de esta información espacial y espectral se puede inferir la presencia de un contaminante específico y su distribución espacial.

La espectroscopia de doble peine de frecuencias ópticas es una forma única de detección de gases traza basada en láser que combina una alta resolución espectral y una amplia cobertura espectral. El núcleo de este instrumento es una fuente óptica de doble peine, que consiste en un primer peine de frecuencias ópticas (fuente láser con un espectro de emisión compuesto por múltiples tonos equiespaciados en frecuencia), el peine de medición, y que utiliza un segundo peine de frecuencias ópticas, el peine de referencia, con un espaciado de frecuencias ligeramente diferente, para la detección multiheterodina. Desde el punto de vista espectroscópico, la espectroscopia de doble peine puede considerarse equivalente a la espectroscopia por transformada de Fourier (FTS), pero sin necesidad de partes móviles en el diseño del instrumento, ya que, gracias a la detección multiheterodina, se consigue un mapeo exacto del espectro de absorción en frecuencias ópticas a frecuencias en el rango de radiofrecuencias.



Figura 7.4: Monitorización distribuida de una planta de tratamiento de aguas mediante un espectrómetro dual-comb.

Para la generación de los dual-comb existen en la actualidad varias tecnologías, pero la generación mediante la modulación electroóptica de láseres semiconductores de onda continua es la que se presenta como mejor alternativa para este tipo de aplicaciones por diferentes motivos. En primer lugar, la detección de las sustancias derivadas de los procesos de tratamiento de residuos requiere diversos grados de resolución espectral para su resolución. Las moléculas simples, como el metano (CH_4) y el amoníaco (NH_3), presentan una firma espectral bien definida, con picos de absorción estrechos en posiciones determinadas del espectro, por lo que su identificación requiere una alta resolución espectral a lo largo de zonas estrechas del espectro. Por otro lado, las moléculas de gran tamaño de los compuestos orgánicos volátiles, como los hidrocarburos aromáticos y alifáticos, los BTEX, las aminas o los mercaptanos, presentan firmas espectrales amplias poco definidas, por lo que requieren una menor resolución, una mayor cobertura espectral y una alta sensibilidad por línea de peine. La generación electro-óptica de dual-combs consiste en la modulación de fase y/o amplitud de una fuente semilla de láser de onda continua, por tanto, la frecuencia óptica central es la misma que la del láser y se puede sintonizar fácilmente y además el espaciado de las frecuencias se determina por la frecuencia RF utilizada para la modulación, lo que permite el control de la cobertura y de la resolución espectral del dual-comb resultante. Así, aparte del uso más eficiente de la potencia óptica, que se concentra en las bandas reales de interés, y de la posibilidad de configurar y adaptar la resolución espectral y la banda de interrogación, se suman a las ventajas de la generación de peines electroópticos la madurez tecnológica de los dispositivos necesarios y su compatibilidad con la integración fotónica a corto plazo.

7.5. Discusión y conclusiones.

El calentamiento climático es una de las mayores amenazas para nuestra sociedad y las técnicas de medida propuestas en este documento pretenden precisamente proporcionar alternativas para paliar algunas de las principales deficiencias de los sensores que integran las redes actuales de

monitorización de los gases de efecto invernadero. Las deficiencias detectadas en las redes actuales han sido puestas de manifiesto por el “Green Report” de 2019 de la Comisión Europea, en el que se afirma que las redes de monitorización de gases de efecto invernadero en funcionamiento no cumplen los requisitos del programa Copernicus. Los requisitos no cumplidos están asociados principalmente a que no hay capacidad para monitorizar puntos calientes de emisiones, como zonas altamente pobladas. En comparación con las alternativas de medición actuales, como el uso de torres de monitorización, los nuevos instrumentos aquí propuestos serían notablemente fáciles de desplegar en cualquier entorno y muy económicos de operar. Además, van a proporcionar a la comunidad investigadora y a los distintos actores interesados nuevas herramientas de altas prestaciones para monitorizar las emisiones de gases de efecto invernadero y, en el caso del CO₂, los sistemas LHR y PAS, podrán cuantificar el ratio isotópico de CO₂ in situ y en tiempo real, proporcionando unas enormes ventajas ya que van a permitir estudiar los flujos de CO₂ provenientes específicamente de combustibles fósiles.

El desarrollo de estas tecnologías para la construcción y calibración de instrumentos que operen en campo está actualmente en proceso. En la Figura 7.5 se muestran fotografías de prototipos que están siendo evaluados y calibrados en los laboratorios del grupo de investigación en Sensores y Técnicas de Instrumentación (SITec) de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M).



Figura 7.5: Equipos para radiometría y espectroscopia desarrollados en el SITec de la UC3M.

La fotografía de la izquierda muestra el prototipo de LHR desarrollado para la medida de CO₂ atmosférico. Actualmente incorpora un único canal y está prevista a lo largo del próximo año la incorporación de otros dos canales, uno para la detección de O₂ como referencia y el otro para la determinación de ratio isotópico ¹³CO₂/¹²CO₂. La calibración del instrumento, así como el desarrollo de los algoritmos de inversión para determinar el perfil vertical de la concentración del gas se van a realizar en colaboración con el Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (IARC) de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Esta colaboración entre el IARC y el SITec se ha materializado en el marco del proyecto de investigación titulado “Hacia la próxima generación de sensores de vigilancia del ciclo del carbono atmosférico” con acrónimo “CarbonSurvey” que recibe financiación dentro de la convocatoria Proyectos de Transición Ecológica y Digital 2021 de la Agencia Estatal de Investigación (AEI). En el marco del mismo proyecto también se está desarrollando un sensor basado en la técnica fotoacústica para el cual nos proponemos demostrar un sistema que funcione fuera del laboratorio capaz de medir concentraciones de CO₂ muy por

debajo de las partes por millón-ppm (el objetivo son 50 partes por billón-ppb), compacto y rentable. Además, el sistema se ha concebido para poder obtener la concentración isotópica (ratio $^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$) con una precisión objetivo mejor que el 0,1 %, lo que lo convierte en un sistema único para obtener información extremadamente relevante de la distribución de gases de efecto invernadero a nivel del suelo en zonas urbanas y otros focos de emisiones puntos calientes.

La fotografía de la derecha (Figura 7.5) muestra un prototipo de generador electroóptico de peines de frecuencias ópticos duales con rango de sintonía en las bandas S, C y L del infrarrojo. Este sistema, que ha sido diseñado e implementado dentro del grupo de investigación, se emplea de manera recurrente en diversas técnicas de espectroscopia para la monitorización de gases en diferentes proyectos de investigación aplicada. Su desarrollo se ha llevado a cabo en el marco de los proyectos de investigación financiados por la AEI “Fuentes Fotónicas Multimodo para Espectroscopia e Interrogación de Sensores de Fibra Óptica (MOSSI)” y “Evaluación en tiempo real de parámetros de calidad de aguas utilizando nuevas arquitecturas y componentes fotónicos (PARAQUA)”. La utilización de este generador y de prototipos previos ha dado lugar a numerosas publicaciones y a tres patentes europeas. En la actualidad se están investigando nuevas arquitecturas para la generación de peines de frecuencias ópticos para extender las longitudes de onda de operación desde el visible hasta el infrarrojo medio dentro del proyecto de investigación “Espectroscopia Lineal y no Lineal de Peines de Frecuencia Ópticos Duales para Aplicaciones Biomédicas, Medioambientales e Industriales (Lolicomb)”.

En conclusión, las tecnologías y los nuevos instrumentos aquí propuestos se van a diseñar para ser fáciles de desplegar en cualquier entorno y muy económicos de operar. En este sentido, el potencial impacto es enorme ya que podrían proporcionar a la comunidad investigadora y a los distintos actores interesados nuevas herramientas de altas prestaciones para monitorizar las emisiones de gases de efecto invernadero. Este no es el único impacto potencial relevante ya que pretendemos diseñar instrumentos portátiles que permitan estimar los flujos de CO_2 provenientes específicamente de combustibles fósiles. La detección de $^{13}\text{CO}_2$ es generalmente aceptada como el estándar de referencia para dicha estimación, sin embargo, las técnicas de medición actuales requieren de un proceso complejo y largo basado en la recogida de muestras de gas y su análisis en laboratorio. Los sistemas actualmente en desarrollo por el grupo de investigación SITec de la UC3M podrán cuantificar el ratio isotópico de CO_2 in situ y en tiempo real, proporcionando unas enormes ventajas con respecto a los sistemas actuales.

El impacto de la propuesta de incluir sensores basados en LHS, en PAS y dual-combs en las redes de monitorización ambiental va mucho más allá de los aspectos científicos y técnicos presentados anteriormente. La Unión Europea, tras el Acuerdo de París, está elaborando un sistema basado en mediciones que permitan controlar de forma independiente las emisiones de CO_2 provenientes de combustibles fósiles en cada Estado miembro, las grandes ciudades e incluso en grandes plantas industriales. Además de cumplir con las especificaciones necesarias para abordar estas tareas, estos sensores contribuirían a definir cómo podrían integrarse las mediciones in situ de emisiones urbanas de gases de efecto invernadero en los sistemas de seguimiento. Así, los avances en la monitorización de las emisiones urbanas de CO_2 que sería permitido por nuestros instrumentos puede impulsar la adopción de estos métodos por parte de los municipios locales para mejorar sus sistemas de monitorización de emisiones, algo que es fundamental dada tanto la importancia de la mitigación del cambio climático urbano como las incertidumbres en los inventarios de emisiones a escala de las ciudades. No en vano, es evidente que las tecnologías propuestas en este informe podrían posibilitar la precisa evaluación de la eficacia de las distintas políticas de reducción de emisiones, facilitando proceso de toma de decisiones para una transición ecológica más eficiente y fluida.

7.6. Bibliografía.

- [1]. Contribuciones del grupo de Sensores y Técnicas de Instrumentación de la Universidad Carlos III de Madrid (<http://sitec-uc3m.com/>)
- [2]. Buchwitz M. et al. "The Greenhouse Gas Climate Change Initiative (GHG-CCI): Comparison and quality assessment of near-surface-sensitive satellite derived CO₂ and CH₄ global data sets", Remote Sensing of Environment, 162, 344-362 (2015).
- [3]. Castrillo A., "Measuring the ¹³C/¹²C isotope ratio in atmospheric CO₂ by means of laser absorption spectrometry: a new perspective based on a 2.05-microm diode laser". Isotopes Environ Health Stud. 42(1), 47-56 (2006). Coddington, I.; Newbury, N.; Swann, W. Dual-Comb Spectroscopy. Optica 2016, 3 (4), 414–426

8. REDUCCIÓN DE CHATARRA ESPACIAL MEDIANTE LA INSTALACIÓN DE ANTENAS DE TECNOLOGÍA IMPRESA EN SATÉLITES.

José Daniel Martínez de Rioja del Nido¹, Eduardo Martínez de Rioja del Nido²

¹ Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

² Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Rey Juan Carlos (URJC)

Resumen – *En las órbitas descritas por los satélites alrededor de la Tierra, existen miles de toneladas de basura espacial generada por el hombre. Actualmente existe una clara tendencia hacia el empleo de satélites de menor tamaño, tanto por el ahorro económico que supone (en términos de fabricación y de costes de lanzamiento), como por su capacidad para desintegrarse de forma natural al reentrar en la atmósfera al acabar su vida útil. Sin embargo, existen factores que limitan una posible reducción del tamaño de los satélites, como ocurre en el caso de los satélites geoestacionarios encargados de proporcionar acceso a internet de banda ancha, que necesitan llevar a bordo un voluminoso sistema de antenas reflectoras. La sustitución de este sistema de antenas reflectoras por otro basado en antenas de tecnología impresa haría posible la fabricación de satélites de menor tamaño, así como una reducción del número de satélites necesarios en órbita, lo que ayudaría a reducir la chatarra espacial.*

8.1. La basura espacial.

La basura o chatarra espacial es un concepto empleado para referirse a todos aquellos fragmentos, piezas o componentes generados por el ser humano y que orbitan sin control alrededor de la Tierra. Desde el lanzamiento del satélite Sputnik en 1957, se han lanzado miles de cohetes al espacio, generando unas 9.000 toneladas de basura espacial (desde pequeños tornillos hasta satélites inactivos del tamaño de un vehículo).



Figura 8.1: Ilustración de la basura espacial que orbita alrededor de la Tierra (fuente: Agencia Espacial Europea [1]).

A pesar de que el espacio suele percibirse como un medio de dimensiones infinitas, es importante aclarar que las órbitas que describen los satélites alrededor de la Tierra constituyen un recurso natural limitado y compartido. El aumento de la basura espacial está llevando a que estas órbitas se encuentren cada vez más saturadas de desechos, como puede apreciarse en la imagen de la Figura 8.1 [1].

En la Figura 8.2 se presenta una clasificación de la basura espacial en función del tamaño de los fragmentos, realizada a partir de datos recabados por la Oficina de la ONU para Asuntos del Espacio Exterior a finales de 2020 [2]. Llamen la atención los casi 2000 fragmentos de cohetes desechados, los casi 3000 satélites inactivos y los millones de partículas y piezas de tamaños comprendidos entre 1 mm y 10 cm. El número de objetos que conforman la chatarra espacial es cada vez mayor, hasta el punto de que se prevé que la principal fuente de basura sean las colisiones entre los actuales desechos espaciales y los satélites en funcionamiento.

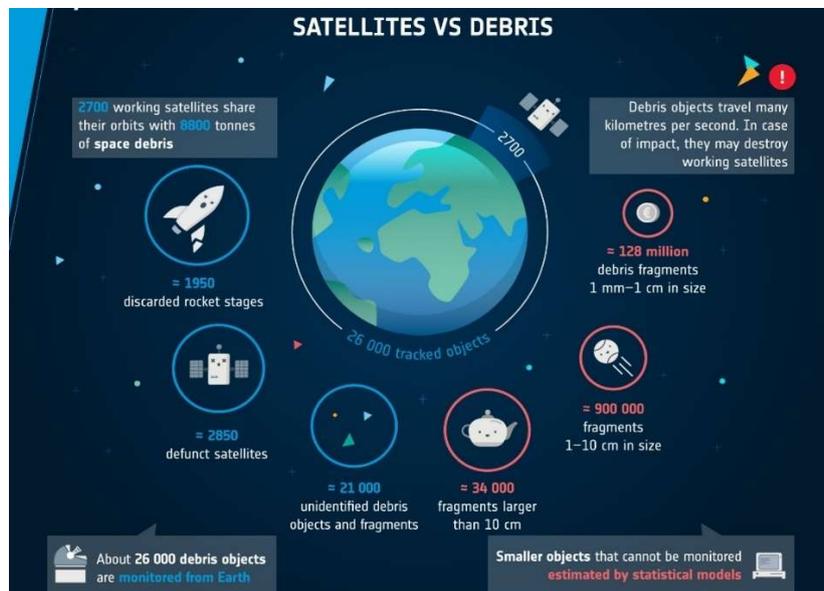


Figura 8.2: Clasificación y cuantificación de la basura espacial en función del volumen de las piezas (fuente: Oficina de la ONU para Asuntos del Espacio Exterior [2]).

En la Figura 8.2 se presenta una clasificación de la basura espacial en función del tamaño de los fragmentos, realizada a partir de datos recabados por la Oficina de la ONU para Asuntos del Espacio Exterior a finales de 2020 [2]. Llamen la atención los casi 2000 fragmentos de cohetes desechados, los casi 3000 satélites inactivos y los millones de partículas y piezas de tamaños comprendidos entre 1 mm y 10 cm. El número de objetos que conforman la chatarra espacial es cada vez mayor, hasta el punto de que se prevé que la principal fuente de basura sean las colisiones entre los actuales desechos espaciales y los satélites en funcionamiento.

Según la ONU, la basura espacial pone en peligro no solo las futuras misiones espaciales, sino también las actuales telecomunicaciones terrestres (desde el acceso a Internet vía satélite hasta la monitorización del cambio climático, la previsión meteorológica, etc.). Actualmente existen alrededor de 2700 satélites activos que tienen que compartir sus órbitas con toda esta chatarra. Los objetos de mayor tamaño pueden detectarse y monitorizarse desde la Tierra, lo que permite

evitar las colisiones con los satélites activos. Sin embargo, las partículas más pequeñas no pueden ser monitorizadas y es casi imposible evitar que se produzcan choques con los satélites activos.

Las colisiones con la basura espacial pueden producir desde la degradación gradual de algunos componentes del satélite hasta su completa destrucción. Por muy pequeños que puedan parecer algunos fragmentos, hay que tener en cuenta que estas partículas pueden viajar a velocidades cercanas a los 10 km/s [1]. En estas condiciones, una colisión con una pieza de 1 cm libera la misma energía que un accidente de coche a 40 km/h. Como ejemplo, en la Figura 8.3 se muestra una imagen de los paneles solares del Telescopio Espacial Hubble, donde pueden apreciarse los daños causados por los impactos de pequeños trozos de basura espacial.



Figura 8.3: Impactos en los paneles solares del Telescopio Espacial Hubble producidos por pequeños trozos de basura espacial (fuente: Agencia Espacial Europea [1]).

8.2. Comunicaciones vía satélite.

Actualmente existe una clara tendencia hacia el desarrollo de satélites pequeños. Frente a los satélites convencionales de mayor tamaño, los satélites pequeños ofrecen un importante ahorro económico en los costes de fabricación y de lanzamiento. Además, presentan la importante característica de desintegrarse por completo de manera natural al reentrar en la atmósfera terrestre, al final de su vida útil, sin generar fragmentos que alcancen la superficie terrestre. Esto permite también que no se aumente la cantidad de basura espacial que orbita alrededor de a Tierra.

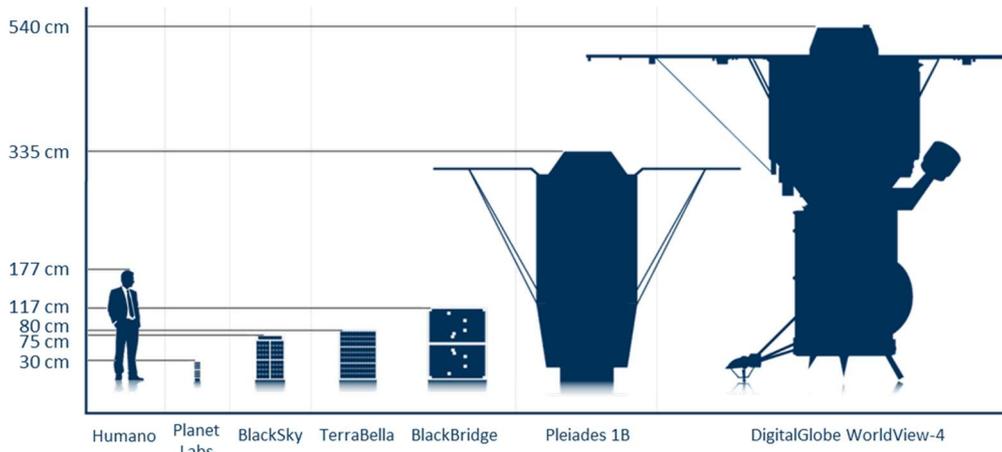


Figura 8.4: Comparativa de tamaño entre distintos modelos de satélite.

Sin embargo, existen factores limitantes a la hora de reducir el tamaño de los satélites convencionales. Uno de estos factores es la necesidad de llevar a bordo antenas de alta ganancia, para poder establecer enlaces de comunicaciones con la Tierra u otros satélites. Los satélites geoestacionarios de alta capacidad que operan en banda Ka (a 20 y 30 GHz), encargados de proporcionar comunicaciones de banda ancha, suelen dividir el área de servicio en pequeñas celdas, cada una de las cuales es iluminada por un haz generado desde el satélite, como se ilustra en la Figura 8.5(a). Por ejemplo, el satélite KA-SAT de Eutelsat divide Europa en 82 pequeñas celdas [3]. Para reducir la interferencia entre celdas vecinas de la cobertura, los haces suelen generarse empleando un esquema de reutilización de frecuencia y polarización, de manera que las celdas vecinas corresponden a haces generados en distinta frecuencia y/o polarización. Lo más habitual es utilizar un esquema de reutilización de cuatro colores (combinando dos frecuencias y dos polarizaciones), como el mostrado en la Figura 8.5(b).

Para generar todos los haces de la cobertura, estos satélites necesitan llevar a bordo un voluminoso sistema de antenas, típicamente formado por cuatro antenas reflectoras (de más de dos metros de diámetro cada una) y un centenar de alimentadores (fuentes de alimentación primarias de las antenas reflectoras) [4]. El motivo es que cada antena reflectora genera todos los haces asociados a un mismo color, por lo que para generar una cobertura completa de cuatro colores se requiere un total de cuatro antenas reflectoras a bordo del satélite, como se aprecia en la Figura 8.5(a). Este sistema de antenas requiere un elevado volumen de almacenamiento en el satélite, haciendo inevitable el uso de grandes satélites para poder soportarlo.

Las antenas reflectoras se componen de una superficie metálica curva iluminada por un alimentador externo, de manera que la superficie genera un haz colimado de alta ganancia, como se muestra en la Figura 8.5(c). Cada alimentador que ilumina una de las antenas reflectoras a bordo del satélite genera un haz asociado a una celda de cobertura, por lo que para cubrir 80 celdas es necesario superponer las coberturas generadas por los cuatro reflectores, estando cada uno iluminado por 20 alimentadores.

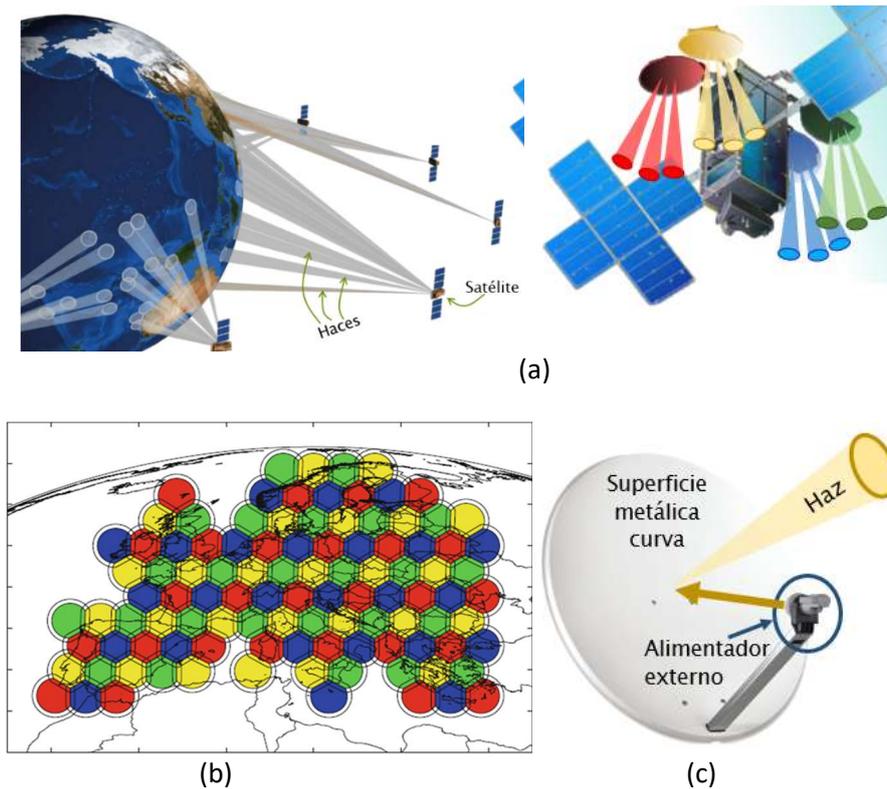


Figura 8.5: (a) Ilustración de los satélites que orbitan alrededor de la Tierra y emplean un sistema de cuatro antenas para generar una cobertura celular. (b) Cobertura generada sobre Europa empleando un esquema de cuatro colores [4]. (c) Antena reflectora convencional, capaz de generar un haz por cada alimentador.

La tecnología de antenas reflectoras empleada actualmente en los satélites presenta dos ventajas principales: su madurez (llevan empleándose desde el lanzamiento de los primeros satélites) y su eficiencia energética (baja potencia requerida). Por otro lado, este sistema de antenas tiene el inconveniente del elevado volumen que ocupa, que es consecuencia de la necesidad de tener que emplear cuatro reflectores. Debe tenerse en cuenta que el volumen y el peso son dos recursos limitados a bordo de un satélite, que son cruciales a la hora de determinar qué equipamiento puede embarcarse (antenas, transpondedores, etc.) y qué misiones va a poder realizar el satélite (comunicaciones, meteorología, etc.).

En los últimos años, se ha llevado a cabo una importante labor de investigación para desarrollar nuevas tecnologías de antenas para satélites que ofrezcan unas prestaciones más avanzadas que los reflectores actuales. En particular, se ha tratado de reducir el número de antenas necesario para proporcionar cobertura desde el satélite, ya que esto haría posible la fabricación de satélites de menor tamaño, así como una reducción del número de satélites necesarios en órbita, lo que a su vez ayudaría a reducir la chatarra espacial. Entre las tecnologías estudiadas, se encuentran las antenas con múltiples alimentadores por haz [5]-[6], las antenas *array* [7]-[9], las lentes activas [10] y las antenas en tecnología impresa [11]-[13]. De todas ellas, las antenas en tecnología impresa son las que presentan la menor complejidad de fabricación y el coste más bajo, con una eficiencia similar a la de los reflectores y la posibilidad de reducir el número de antenas necesarias a bordo del satélite.

8.3. Antenas en tecnología impresa para satélites.

Las antenas reflectoras en tecnología impresa, también conocidas como *reflectarrays*, se componen de una agrupación plana de elementos resonantes (parches, dipolos, anillos, etc.) impresos sobre un sustrato dieléctrico respaldado por un plano metálico. La superficie con los elementos impresos se ilumina utilizando una bocina que actúa como alimentador primario, como se muestra en la Figura 8.6 [14]. El diseño de los elementos impresos se realiza de manera que cada elemento introduce el desplazamiento de fase requerido en el campo incidente para generar un haz enfocado o conformado. La forma más común de conseguir el desplazamiento de fase necesario es ajustando las dimensiones de los elementos impresos. Esto permite diseñar antenas de bajo coste con las mismas técnicas de fabricación de los circuitos impresos.

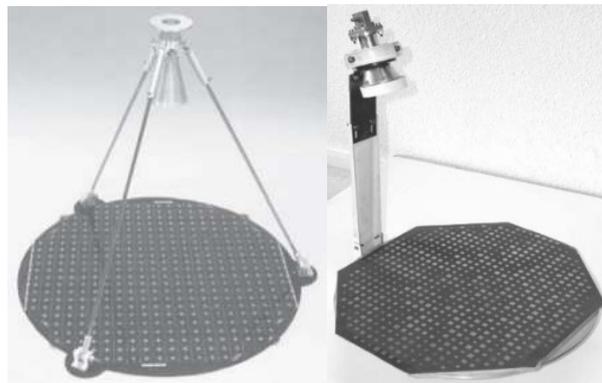


Figura 8.6: Dos ejemplos de antenas reflectarray [14].

La alimentación por medio de una bocina, al igual que en el caso de los reflectores, evita la complejidad y las pérdidas de las redes de alimentación de las antenas *arrays*. De esta manera, las antenas en tecnología impresa pueden alcanzar eficiencias de radiación similares a las de un reflector (>50%), siendo adecuados para sistemas de comunicaciones que requieren de antenas de alta ganancia, como es el caso de los satélites.

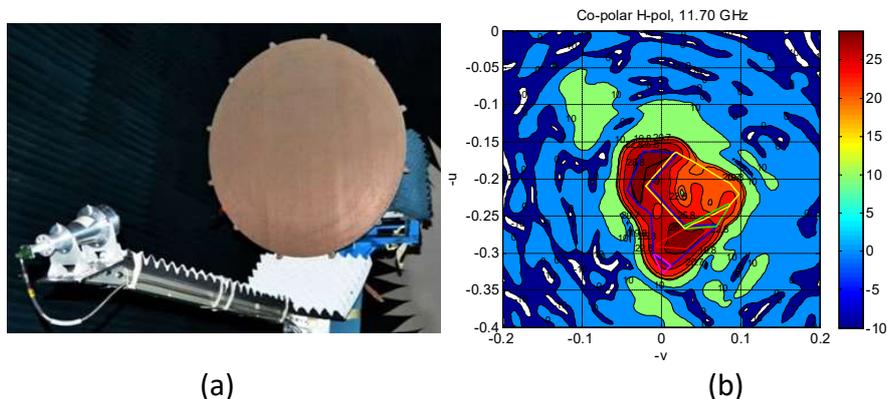
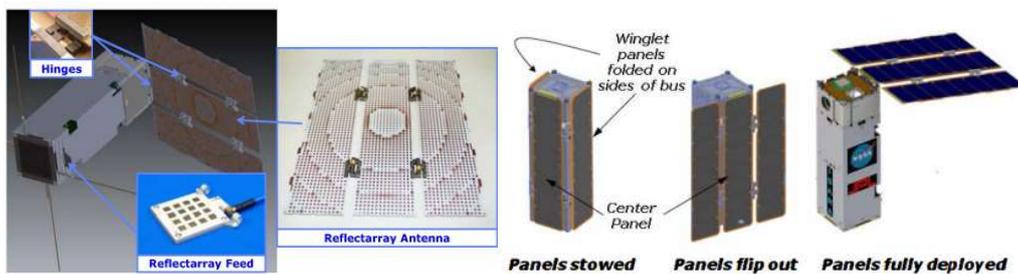


Figura 8.7: Antena *reflectarray* de haz conformado para proporcionar cobertura en la región de Sudamérica [15]: (a) prototipo en la cámara anecoica de la Universidad Politécnica de Madrid, (b) diagrama de radiación medido a 11.7 GHz.

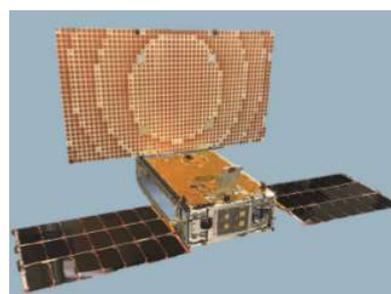
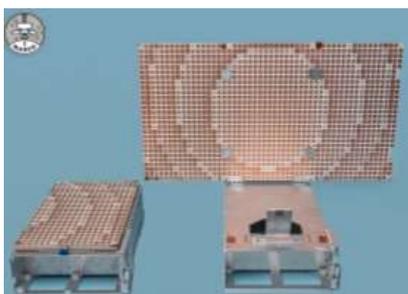
Otra característica importante de los *reflectarrays* es que son capaces de conformar formas de haz muy precisas por medio de un ajuste adecuado de la fase introducida en cada uno de los elementos

impresos. Esto permite que puedan ser utilizados para proporcionar cobertura a una cierta área geográfica (ver Figura 8.7). La ventaja es que el proceso de fabricación de un *reflectarray* de haz conformado es el mismo que para uno de haz pincel (sólo cambian las dimensiones de los elementos impresos), lo que conlleva una importante reducción de costes para este tipo de antenas, normalmente reflectores con la superficie metálica conformada, que se fabrican empleando unos moldes *ad-hoc* que tienen un coste muy elevado.

La superficie plana de los *reflectarrays* permite que puedan ser fácilmente integrados en un satélite o vehículo aeroespacial, permitiendo mecanismos eficientes de despliegue en órbita o una vez iniciado el vuelo. Un ejemplo reciente de aplicación de antenas *reflectarray* desplegables en sistemas reales puede encontrarse en los proyectos ISARA [16] y MarCO [17] desarrollados por la NASA. En ambos proyectos, los *reflectarray* se utilizan como antena de alta ganancia para comunicaciones con la Tierra desde un nanosatélite o *CubeSat*. En el caso de ISARA (*Integrated Solar Array and Reflectarray*), la antena se encuentra integrada en el mismo panel que las células solares utilizadas para proporcionar energía al *CubeSat*. En ambos proyectos se diseñaron antenas en tecnología impresa formadas por tres paneles que se pliegan adosados a las paredes del *CubeSat* durante la fase de lanzamiento y se despliegan más tarde cuando el dispositivo está en órbita, como se muestra en la Figura 8.8. Estos proyectos han supuesto un paso adelante muy importante para la madurez tecnológica de los *reflectarrays*, ya que han conducido a que estas antenas hayan sido probadas en espacio en misiones reales.



(a)



(b)

Figura 8.8: Dos ejemplos de antenas *reflectarray* de paneles desplegables para *CubeSats*: (a) el proyecto ISARA [18] y (b) el proyecto MarCO [17].

Las características de las antenas en tecnología impresa han hecho que en los últimos años se haya investigado su aplicación al diseño de nuevas configuraciones de antenas multi-haz para generar coberturas celulares desde satélites de comunicaciones [12]-[13], [19]-[20], como las descritas en la sección 2. Estos trabajos se han desarrollado en el marco de los proyectos de investigación: “*Multiple Beam Antennas based on Reflectarrays and Transmitarrays (MARTA)*”, financiado por la

Agencia Espacial Europea, y “*Subsistemas Avanzados de Antenas Múltiples para Comunicaciones de Banda Ancha Terrestres y por Satélite (MIRYADA)*”, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad. El objetivo principal de estos proyectos ha sido el de desarrollar nuevos sistemas de antenas que permitan reducir el número de antenas y alimentadores requeridos a bordo de los satélites.

Con el fin anterior, se han propuesto dos nuevos principios de operación para antenas *reflectarray*, de forma que por primera vez un mismo alimentador pueda generar la cobertura asociada a múltiples celdas de cobertura, mediante la operación independiente de la antena *reflectarray* a distintas frecuencias y polarizaciones, algo imposible de lograr con los reflectores convencionales [19]. De acuerdo con la primera estrategia, el satélite emplearía únicamente dos antenas, de forma que cada antena generaría la cobertura celular completa en la banda de frecuencias de Transmisión (Tx) o Recepción (Rx), como se muestra en la Figura 8.9(a). Esto es posible gracias a un nuevo método de diseño de antenas *reflectarray* que permite que con un mismo alimentador se puedan generar 4 haces, en la banda de Tx o en la de Rx. En la segunda estrategia, el satélite emplearía igualmente dos antenas, pero ahora cada una de ellas se encargaría de generar la mitad de la cobertura tanto en Tx como en Rx, como se describe en la Figura 8.9(b). En este caso, el método de diseño desarrollado permite que la antena *reflectarray* pueda generar 2 haces, tanto en la banda de Tx como en Rx, con un mismo alimentador.

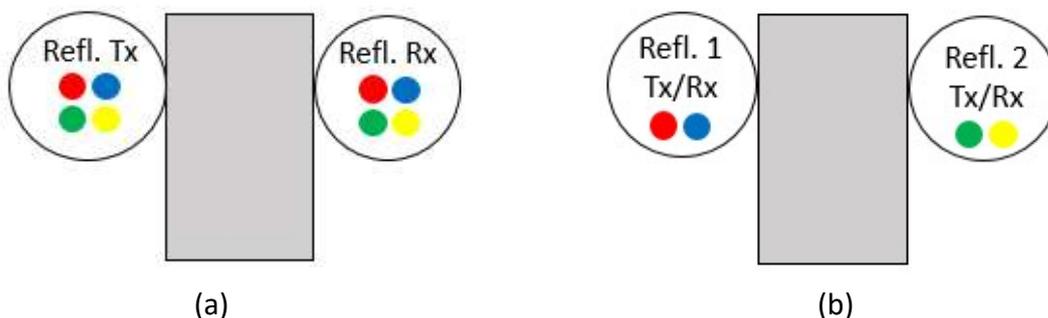


Figura 8.9: Configuraciones de antena propuestas basadas en: (a) dos *reflectarrays* generando la cobertura completa, uno operando en Tx y otro en Rx, (b) dos *reflectarrays* operando en Tx y Rx, generando la mitad de la cobertura cada uno.

Los dos métodos de diseño desarrollados han sido validados experimentalmente mediante el diseño, fabricación y medida de dos antenas *reflectarray* (ver Figura 8.10): un prototipo de 43 cm de diámetro capaz de generar 4 haces con un mismo alimentador en la banda de Tx [13] y un demostrador de 25 cm capaz de generar 2 haces con un mismo alimentador tanto en la banda de Tx como en la de Rx [20]. Los excelentes resultados obtenidos tras la medida de los prototipos han demostrado por primera vez la capacidad de las antenas de tecnología impresa para generar hasta cuatro celdas de cobertura mediante un único alimentador.

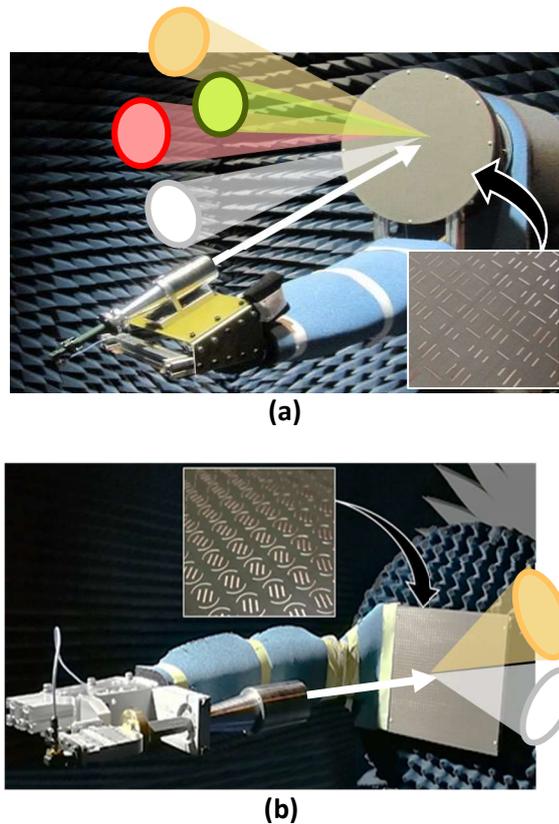


Figura 8.10: Prototipos desarrollados para validar los métodos de diseño: (a) antena de 43 cm de diámetro para generar 4 haces con un mismo alimentador en la banda de Tx, y (b) antena de 25 cm para generar 2 haces con un mismo alimentador tanto en Tx como en Rx.

Una vez validados experimentalmente los nuevos métodos de diseño, se han diseñado y simulado las antenas reflectarray de 1.8 metros de diámetro que irían a bordo del satélite, para cada principio de operación propuesto. Los resultados de las simulaciones, mostrados en la Figura 8.11, han demostrado que es posible generar la cobertura celular terrestre empleando sólo dos antenas reflectarray en lugar de cuatro antenas reflectoras, usando además la mitad de los alimentadores requeridos actualmente.

Por último, se ha diseñado, fabricado y medido un prototipo escalado en un factor de 1/2 de la antena reflectarray de 1.8 metros que iría a bordo del satélite, para demostrar experimentalmente la generación de dos celdas de cobertura por cada alimentador [12]. En la Fig. 9-12 pueden verse algunas imágenes de la antena en la cámara anecoica de la Universidad Politécnica de Madrid. Este reflectarray de 0.9 metros de diámetro, cuyo proceso de fabricación es compatible con el utilizado en los reflectores de fibra de carbono empleados en espacio, ha sido el demostrador final del proyecto MARTA, financiado con 500.000 € por la Agencia Espacial Europea. Los resultados del demostrador han sido altamente satisfactorios, destacando una novedosa técnica protegida mediante una patente que permite simplificar notablemente la fabricación de las antenas a bordo del satélite, reduciendo significativamente sus costes.

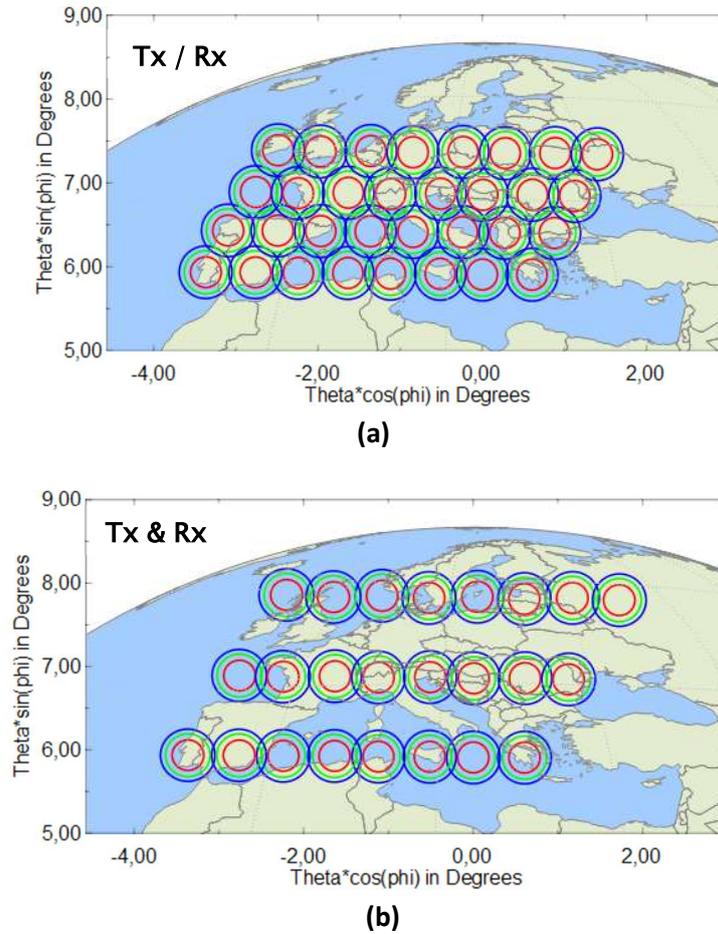
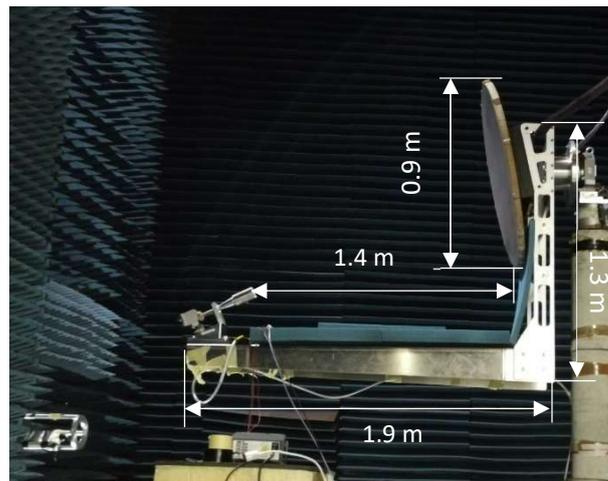
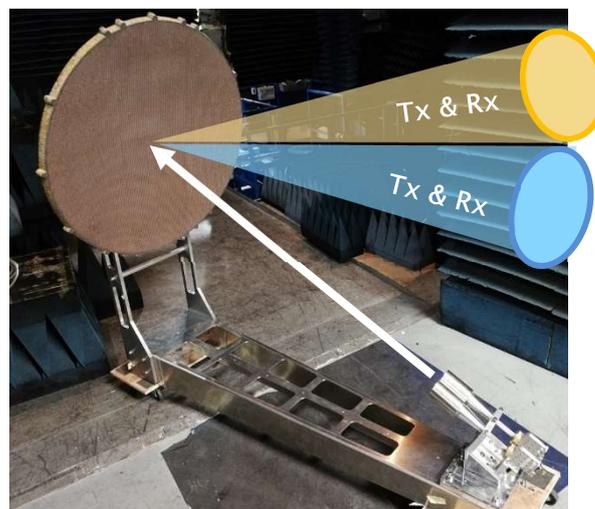


Figura 8.11: Cobertura celular generada sobre Europa con: (a) un *reflectarray* de 1.8 m diseñado según la primera estrategia (cobertura completa en Tx o Rx), (b) un *reflectarray* de 1.8 m diseñado según la segunda estrategia (la mitad de la cobertura tanto en Tx como en Rx).

La reducción a la mitad del número de antenas y alimentadores a bordo de los satélites geoestacionarios de alta capacidad, además de proporcionar un importante ahorro económico (estimado en unos 3 millones de euros) en los costes de fabricación del satélite, permitirá la fabricación de satélites geoestacionarios de menor tamaño y con menos componentes a bordo. Alternativamente, también será posible incorporar otro tipo de equipamiento a bordo para que el satélite pueda realizar múltiples misiones simultáneamente (control del medio ambiente, meteorología, difusión de TV, etc), lo que permitiría reducir el número de satélites necesarios. Ambas consecuencias son beneficiosas desde el punto de vista medioambiental, ya que conducirían a una reducción de los lanzamientos de cohetes espaciales (cada lanzamiento puede llegar a ser cientos de veces más contaminante que un vuelo transoceánico), así como de la chatarra espacial, al requerirse menos satélites y tener éstos un menor tamaño (los satélites pequeños pueden desintegrarse por completo al reentrar en la atmósfera).



(a)



(b)

Figura 8.12: Prototipo de antena *reflectarray* para satélite: (a) dimensiones del demostrador, (b) ilustración del principio de operación (segunda estrategia).

8.4. Conclusiones.

En las órbitas descritas por los satélites alrededor de la Tierra, existen miles de toneladas de basura espacial generada por el hombre. La tendencia actual es a reducir el tamaño de los satélites, tanto por el ahorro económico que supone (en términos de fabricación y de costes de lanzamiento), como por su capacidad para desintegrarse de forma natural al reentrar en la atmósfera al acabar su vida útil.

Uno de los factores limitantes a la hora de reducir el tamaño de los satélites es su sistema de antenas. En el caso de los satélites geoestacionarios, se trata de un sistema muy voluminoso

formado por cuatro antenas reflectoras y un centenar de alimentadores. La sustitución de este sistema de antenas reflectoras por otro basado en antenas de tecnología impresa haría posible la fabricación de satélites de menor tamaño, así como una reducción del número de satélites necesarios en órbita, lo que ayudaría a reducir la chatarra espacial.

Recientemente se han desarrollado varios prototipos que demuestran que la capacidad de las antenas impresas para realizar las mismas misiones que las antenas reflectoras, empleando un número significativamente menor de componentes. La tecnología, desarrollada en primer lugar para satélites geoestacionarios, puede ser fácilmente adaptada para su uso en satélites de órbita baja o en misiones científicas basadas en nanosatélites CubeSat, manteniendo el objetivo de reducir los componentes a bordo de los satélites.

8.5. Bibliografía.

- [1] European Space Agency (ESA): <https://www.esa.int> (fecha de acceso: 19/12/2022).
- [2] United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA): <https://www.unoosa.org> (fecha de acceso: 19/12/2022).
- [3] H. Fenech, S. Amos, A. Tomatis, and V. Soumholphakdy, "High throughput satellite systems: An analytical approach," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 51, no. 1, pp. 192-202, Jan. 2015.
- [4] M. Schneider, C. Hartwanger and H. Wolf, "Antennas for multiple spot beams satellites", *CEAS Space Journal*, vol. 2, pp. 59-66, Dec. 2011.
- [5] M. Schneider, C. Hartwanger, E. Sommer, H. Wolf, "Test results for the multiple spot beam antenna project Medusa", 4th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP), Barcelona, Spain, Apr. 2010.
- [6] P. Bosshard et al., "Thales Alenia Space HTS/V-HTS Multiple Beam Antennas Sub-systems on the Right Track", 10th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP), Davos, Switzerland, Apr. 2016.
- [7] G. Toso, P. Angeletti and C. Mangenot, "Multibeam antennas based on phased arrays: An overview on recent ESA developments", 8th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP), The Hague, The Netherlands, Apr. 2014, pp. 178-181.
- [8] O. M. Bucci, T. Isernia, S. Perna and D. Pinchera, "Isophoric sparse arrays ensuring global coverage in satellite communications", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 4, pp. 1607-1618, Apr. 2014.
- [9] T. N. Kaifas, D. G. Babas, G. Toso and J. N. Sahalos, "Multibeam antennas for global satellite coverage: theory and design", *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 10, no. 4, pp. 1475-1484, 2016.
- [10] G. Ruggnerini, G. Toso and P. Angeletti, "An aperiodic active lens for multibeam satellite applications: From the design to the breadboard manufacturing and testing", in *Proc. 5th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, Rome, Italy, Apr. 2011, pp. 3697-3701
- [11] M. Zhou, S. B. Sørensen, Y. Brand, G. Toso, "Doubly Curved Reflectarray for Dual-Band Multiple Spot Beam Communication Satellites", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 3, pp. 2087-2096, March 2020.
- [12] D. Martinez-de-Rioja et al., "Transmit-receive parabolic reflectarray to generate two beams per feed for multi-spot satellite antennas in Ka-Band", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 69, no. 5, pp. 2673-2685, May 2021.
- [13] D. Martinez-de-Rioja, E. Martinez-de-Rioja, J. A. Encinar, R. Florencio, G. Toso, "Reflectarray to Generate Four Adjacent Beams per Feed for Multispot Satellite Antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 2, pp. 1265-1269, Feb. 2019.
- [14] J. Huang and J. A. Encinar, "Reflectarray Antennas", *IEEE Press/Wiley-Interscience*, Piscataway, NJ/New York, 2008.

- [15] J. A. Encinar, M. Arrebola, L. F. de la Fuente, G. Toso, "A Transmit–Receive Reflectarray Antenna for Direct Broadcast Satellite Applications", *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 59, no. 9, pp. 3255-3264, Sep. 2011.
- [16] R. E. Hodges, M. J. Radway, A. Toorian, D. J. Hoppe, B. Shah and A. E. Kalman, "ISARA: Integrated Solar Array and Reflectarray CubeSat Deployable Ka-band Antenna", in *Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. (APSURSI)*, Vancouver, BC, Canada, July 2015, pp. 2141-2142.
- [17] R. E. Hodges, N. Chahat, D. J. Hoppe and J. D. Vacchione, "A deployable high-gain antenna bound for Mars: Developing a new folded-panel reflectarray for the first CubeSat mission to Mars", *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 59, no. 2, pp. 39-49, Apr. 2017.
- [18] R. Hodges, D. Hoppe, M. Radway, and N. Chahat, "Novel deployable reflectarray antennas for CubeSat communications (Invited)," in *Proc. IEEE Microwave Theory and Techniques Society Int. Microwave Symp.*, Phoenix, AZ, 2015.
- [19] E. Martinez-de-Rioja et al., "Advanced multibeam antenna configurations based on reflectarrays: Providing multispot coverage with a smaller number of apertures for satellite communications in the K and Ka bands", *IEEE Antennas Propag. Magaz.*, vol. 61, no. 5, pp. 77-86, Oct. 2019.
- [20] D. Martinez-de-Rioja, R. Florencio, E. Martinez-de-Rioja, M. Arrebola, J. A. Encinar, R. R. Boix, "Dual-band reflectarray to generate two spaced beams in orthogonal circular polarization by variable rotation technique", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 6, pp. 4617-4626, 2020.

9. HUELLA DE CARBONO, SECUESTRO DE CO₂, MERCADO DE DERECHOS, CÁLCULO DE DERECHOS, ACTIVIDADES RURALES.

Pedro Oñorbe de Torre
Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid (COIIM)

9.1. Generalidades. Cálculo de huella de CO₂. Secuestro de CO₂. Derechos de emisión.

9.1.1. ¿Qué son los gases de efecto invernadero (GEI) según el Protocolo de KIOTO (1997)?

Gases que se encuentran en la atmósfera y reflejan parte de las radiaciones que la tierra a su vez ha reflejado.

Esta retención de radiación puede reflejarse en un aumento de la temperatura del planeta entre 1 y 3º.

CO₂, CH₄, NO₂, HFCs (Clorofluorcarbonos), PFCs (Perfluorcarbonos), SF₆ (Hexafluoruro de azufre), NF₃ (Trifluoruro de nitrógeno).

9.1.2. Concepto de “huella de carbono”.

Se entiende como “huella de carbono” la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto. Es, por tanto, un inventario de GEI de la actividad de una organización, un producto o un servicio, cuya unidad de medida universal es la tonelada de CO₂ equivalente (tCO₂ eq).

9.1.3. Cálculo de huella de carbono.

Es el parámetro que define el nivel de actividad de las emisiones de GEI tanto para un proceso como para una organización empresarial, también llamada inventario de GEIs corporativo, Por

ejemplo, los litros de combustible consumidos por los vehículos de la empresa y así para cada uno de los GEI y para cada uno de los parámetros de la producción empresarial.

El cálculo de la huella de carbono se realizará multiplicando el dato de una determinada actividad por el factor de emisión, es por tanto muy importante la identificación de fuentes de emisiones y remociones de GEIs.

Uno de los estándares más utilizados para el cálculo de la huella de carbono de un producto o servicio es la norma británica PAS 2050 "Specification for the assessment of the life cycle of greenhouse gas emissions of goods and services", que se apoya en las normas internacionales de análisis de ciclo de vida ISO 14044, ISO 14040 e ISO 14067/TS.

9.1.4. Normativa.

UNE EN ISO 14064-1. "Gases de Efecto Invernadero. Especificaciones y orientaciones, a nivel de la organización, para la cuantificación y la declaración de las emisiones y reducciones de gases de efecto invernadero".

UNE EN ISO 14064-2. "Gases de Efecto Invernadero. Especificaciones y orientaciones, a nivel de proyecto, para la cuantificación, la monitorización y la declaración de las reducciones y de las mejoras en la eliminación de gases de efecto invernadero".

UNE EN ISO 14064-3. "Gases de Efecto Invernadero. Especificaciones y orientaciones para la validación y la verificación de declaraciones de gases de efecto invernadero".

9.1.5. Plan de Reducción de Huella de Carbono.

Una vez calculada la huella de carbono, la organización debe elaborar un "Plan de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero", que deberá presentar para su inscripción en el Registro junto con el informe de la huella de carbono. Para la inscripción en el Registro, se debe utilizar la norma UNE EN ISO 14064-1.

ORGANISMO DE VERIFICACIÓN: Entidad que realiza actividades de verificación de la huella de carbono con arreglo al presente decreto y que está acreditada conforme a la norma UNE EN ISO 14065 «Gases de efecto invernadero. Requisitos para los organismos que realizan la validación y la verificación de gases de efecto invernadero, para su uso en acreditación "A"».

9.2. Proyectos de compensación de emisiones.

9.2.1. ¿Qué son los proyectos de compensación emisiones?

Determinadas empresas y corporaciones están obligadas a presentar un proyecto de inventario de GEI y un plan de reducción de emisiones. Otras empresas pueden acogerse voluntariamente a este inventario obteniendo bonificaciones en concursos públicos, así como beneficios financieros.

El régimen obligatorio solo afecta a determinados sectores industriales, fundamentalmente generación de energía eléctrica, cemento, cerámica y plantas de cogeneración de más de 20MW. Con la modificación de 2013, fue obligatorio también para la aviación. Se conocen como sectores ETS (Emission Trading System) o sectores regulados.

La Administración asigna anualmente y de forma gratuita a cada instalación una determinada cantidad de derechos de emisión que se reduce cada año y que solo cubre una parte de las emisiones reales.

Desde el año 2005 las empresas afectadas por esta obligación legal deben:

9.2.1.1.

Obtener una autorización de emisión de gases de efecto invernadero de la Comunidad Autónoma correspondiente.

9.2.1.2.

Solicitar derechos de emisión al Ministerio competente en materia de medio ambiente.
Un derecho de emisión equivale al derecho a emitir una tonelada de CO₂.

9.2.1.3.

Presentar a la Comunidad Autónoma para su aprobación, antes del 28 de febrero de cada año, un informe anual verificado sobre las emisiones que realmente se han realizado en el año precedente.

9.2.1.4.

La administración ambiental de la respectiva Comunidad Autónoma valora el informe y, si da su conformidad, inscribe antes del 31 de marzo en el Registro Público Europeo de Derechos de Emisión las emisiones reales producidas por cada centro de actividad.

9.2.1.5.

Una vez inscritas las emisiones reales realizadas, cada empresa debe entregar antes del 30 de abril de cada año un número de derechos de emisión equivalentes al dato de emisiones verificadas (emisiones realizadas del año anterior) inscritas por la Comunidad Autónoma en el citado Registro público.

9.2.1.6.

Las empresas que por su eficiencia puedan vender derechos de emisión sobrantes obtendrán con esta venta la financiación necesaria para avanzar en la reducción de emisiones.

Aparecen por tanto empresas con excedentes de derechos de emisión y empresas con déficit y que pueden ser objeto de transacción entre ellas.

9.3. Cálculo de proyectos de absorciones de GEIs.

Para realizar los cálculos de las absorciones de los proyectos a inscribir en el Registro, la Consejería competente en materia de Cambio Climático de la correspondiente Autonomía ha desarrollado una "Calculadora de absorciones de dióxido de carbono" tomando como referencia la herramienta que el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) pone a disposición de los interesados en la inscripción en la sección B del Registro Estatal.

Para ello se comparan los valores de absorciones obtenidas para las distintas especies y años en la Autonomía con los resultados de las distintas metodologías empleadas en el estudio de los valores en la calculadora de CO2 del Ministerio a nivel nacional.

También pueden utilizarse otras herramientas para el cálculo de absorciones, previa presentación de la misma y aceptación por el organismo competente.

<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/comercio-de-derechos-de-emision/CCAA.aspx>

9.3.1. Nuevas metodologías de cálculo.- Uso de cámaras hiperespectrales.

Dentro de lo anteriormente dicho, la Calculadora, se basa en datos del inventario forestal nacional, teniendo como medición principal el diámetro. Además, haciendo un análisis de los datos con los que se ha construido la calculadora, no se han tomado datos de varias Comunidades Autónomas lo que deja fuera un relevante número de calidades de estación y situaciones.

Por otro lado, hay nuevas herramientas basadas en sensores espectrales que permiten obtener una gran información de los procesos fisiológicos que se desarrollan en la planta y que esté regidos

por lo que ocurre en las hojas de los árboles. Junto a esto en los últimos años la gran explosión de procesos basados en inteligencia artificial, permiten analizar más variables y datos de forma eficiente y rápida. Por ello cuantas más bandas tengan estos sensores espectrales más información se obtendría de la planta y mejor se podrá modelar la tasa de fijación de carbono de las plantaciones, **destacando para esta función las cámaras hiperespectrales**, con las cuales ya hay empresas como IGM, Ingeniería y Gestión Medioambiental, que están desarrollando una herramienta en base a estas técnicas que permita hacer mediciones más precisas y adaptadas a la realidad de cada localización, dando más seguridad al valor real de este activo que serían los derechos de CO2 generados por una reforestación concreta o por la masa forestal objeto de certificación.

9.4. El mercado de venta de derechos.

9.4.1. ¿Cómo funciona la compra de emisiones entre empresas?

Las empresas inscritas en el registro de huella de carbono pueden compensar su huella mediante la compra de créditos de los proyectos de absorción inscritos en el registro.

Esta compra se realizará mediante un acuerdo privado entre partes. Finalmente, el MITECO aprobará y reconocerá oficialmente esta reducción de emisiones.

Las subastas y las interacciones entre las empresas que necesitan comprar y las que pueden vender derechos sobrantes dan lugar a un precio que, como otros muchos valores, se refleja en la Bolsa.

Hasta hace unos años, la desaceleración económica había favorecido el incremento de la oferta en el mercado, lo que significó precios del CO2 muy bajos.

Actualmente hay un proceso especulativo con fondos de inversión pujando en las subastas de derechos de emisión que ha disparado los precios.

El precio del derecho de emisión se ha multiplicado casi por 4 en pocos años. En enero de 2020 estaba a 24,75 euros y en diciembre de 2021 a 80 euros.

Ante esta escalada de los precios del derecho de emisión, un ejercicio interesante es valorar el coste de la aplicación del comercio de derechos de emisión (aplicación del principio el que contamina paga).

9.4.2. ¿Cómo se regula el comercio de los derechos de emisión del CO2?

La Unión Europea para las grandes instalaciones emisoras aprobó una normativa especial “régimen de comercio de derechos de emisión RCDE-EU”.

El RCDE-EU está regulado por la Directiva 2003/87, que fue incorporada a derecho interno en el conjunto de los Estados Miembros en 2005.

En España la trasposición se realizó mediante la Ley 1/2005, modificada por la Ley 13/2010.

9.5. Otros proyectos de reducción de emisiones.

Aparte de los proyectos de sumideros de captación de CO2 como las repoblaciones forestales o los criaderos de algas marinas, se plantean otros proyectos que no son sumideros pero si sustituyen tecnologías fuertes emisoras de GEIs por otras de menor incidencia.

La mayoría de estos proyectos van ligados a sustitución de combustibles fósiles o a utilización de tecnologías limpias de producción energética.

Aunque no es objeto de esta charla, mencionamos únicamente la producción de energía solar de autoconsumo y la formación de Comunidades Solares y Cooperativas Energéticas, en gran auge en estos momentos.

10. UNA PRIMERA APROXIMACIÓN AMBIENTAL AL COCHE ELÉCTRICO.

Eduardo Martínez de Rioja del Nido (URJC), José Daniel Martínez de Rioja del Nido (UPM) y José Javier Martínez Vázquez. Coordinador

10.1. Objetivos.

Las diferencias entre una batería de un vehículo con motor de combustión interna y la batería de un coche eléctrico son muchas: potencia, capacidad, tamaño, peso, coste, funciones que desempeña, etc. La batería de un coche convencional de combustible fósil básicamente sirve para el arranque del motor y para el funcionamiento de algunos servicios como el cierre centralizado: las luces que alumbran la calzada, la iluminación del habitáculo interior y del cuadro de indicaciones situado en el salpicadero. La batería de un coche eléctrico es un elemento esencial para el movimiento y operación del vehículo y pesa aproximadamente la cuarta parte del peso total del automóvil. Se trata por tanto de un dispositivo que no solo debe funcionar, también hay que mantenerlo en un estado adecuado para que su vida útil sea lo más larga posible.

Por otra parte, la necesidad de ir acortando los tiempos de carga de las baterías obliga al aumento de los niveles de corriente empleados en cada recarga, con lo que entran en juego valores de campo magnético que deben contrastarse con la regulación nacional en esta área. Si bien algunos fabricantes han optado por rebajar las corrientes en la recarga elevando la tensión nominal de las baterías, este punto no ha llegado a estandarizarse en la actualidad.

10.2. Introducción.

Cuando un conductor de un vehículo de combustible fósil tiene una avería en carretera, lo primero que suele hacer es parar el coche en el arcén, en los últimos tiempos señalizar su posición para evitar que otros automóviles choquen con él o se origine un percance, y levantar el capó para observar o tratar de intuir dónde está el problema. Esta escena, que se ha venido repitiendo a lo largo de los últimos cincuenta o sesenta años, es el punto de ruptura con la nueva cultura del coche eléctrico. En un vehículo de tracción eléctrica con batería, las tensiones de alimentación oscilan entre los 360 y los 850 voltios, sólo levantar el capó supone un riesgo elevado de tocar algún elemento en tensión y por lo tanto, no parece ni acertado ni aconsejable.

El coche eléctrico es silencioso. Los que tenemos una cierta edad, solemos cruzar la calle “de oído” asociando la ausencia de coches a la ausencia del ruido que producen los motores de combustión interna. Hoy en día, las nuevas formas de movilidad urbana, bicicletas, motocicletas, patinetes y automóviles circulan prácticamente en silencio, con un gran peligro para el peatón despistado.

Otro aspecto diferencial es que el vehículo eléctrico consume menos energía en ciudad que en carretera, con una diferencia de un 50% más de autonomía en los entornos urbanos. Por el

contrario, un coche de combustión interna donde tiene un consumo elevado es en ciudad y no en ruta. Así pues, nos encontramos en un escenario nuevo, una situación distinta, una cultura diferente y probablemente, unas rutinas que van pasando de un estatus a otro sin solución de continuidad.

Desde un punto de vista mecánico, la batería de un coche eléctrico no tiene nada que ver, o muy poco, con la batería de un auto convencional de combustible fósil. Suele pesar la cuarta parte del peso total del automóvil por lo que es un elemento determinante en la localización del centro de gravedad del vehículo y, en consecuencia, en su estabilidad. La operación de extracción de la batería para su puesta a punto no es sencilla. Mover, en un taller de reparación, un peso entre 250 y 600 kg de forma segura para los mecánicos es una maniobra muy compleja. Hay que suponer, por tanto, que una actuación de este tipo en un coche eléctrico tendrá un coste considerable.

Una de las características más importantes de una batería es la energía almacenada. Los valores de energía almacenada determinan junto con la potencia, la autonomía del vehículo. Un modelo pequeño, p.e. Citroën ZERO, tiene una potencia de 30 Kw y una energía máxima almacenada de 15 Kwh. Si el consumo medio es de 12 Kwh/100 Km, la autonomía se sitúa en unos 150 km. Un coche de gran tamaño, v.g. el Porsche Taycan, tiene una potencia de 500 Kw y una capacidad de almacenamiento de energía de 94 Kwh. Con un consumo medio de 23 Kwh/100 Km, la autonomía ronda los 400-500 Km. Conviene observar que mientras la potencia se multiplica por 15, la energía almacenada se multiplica por 6.

Antes de la pandemia y de la guerra de Ucrania, se había conseguido que el precio de una batería de iones de litio se situara en unos 110 €/Kwh, lo que significa que una batería media de 60 Kwh hubiera costado, en aquel tiempo, alrededor de 7.000 euros. A esto hay que añadir el armazón de acero y los herrajes para fijarlo a una parte del chasis de fácil acceso para su mantenimiento. Dicho de otro modo, si antes se podía adquirir un coche pequeño-medio de combustión interna por 10.000 euros, eso es lo que cuesta sólo la batería de un modelo eléctrico.

Con estas estimaciones de costes, parece obligada la comprobación de buen funcionamiento de todas las celdas que componen la batería a través de un Sistema de Gestión (BMS) con el objetivo de minimizar el precio de reparación de las averías, tratando de evitar la posibilidad de tener que sustituir todo el conjunto de alimentación del coche. El BMS consiste básicamente en una red de sensores de tensión, de corriente y de temperatura de cada uno de los elementos de la batería. En el momento en el que se observa alguna anomalía por pequeña que sea, el BMS envía una indicación al conductor a través de la interfaz de comunicación en el salpicadero del vehículo.

Desde un punto de vista técnico, la energía almacenada por encima de los 100 Kwh y la reducción de los tiempos de carga por debajo de los 20 minutos de las baterías, son los dos puntos fundamentales para el desarrollo y la penetración en los mercados del coche eléctrico. Ambos están relacionados: a mayor capacidad de almacenamiento, mayor tiempo de carga o mayor potencia de carga.

Por último, el coche eléctrico en viajes de larga distancia necesita recargar la batería con la consiguiente pérdida de tiempo que el vehículo de combustión interna no tiene. En el trayecto de Oviedo a León por la carretera del Huerna, desde Campomanes hasta La Magdalena, son subidas con pendiente de un 4%. Media hora o tres cuartos de hora para recorrerlas. Con un coche de 150 Kw de potencia y consumiendo 100 Kw, supone un gasto de energía de 50 a 75 Kwh. Si se hace el viaje Madrid – Oviedo en cualquiera de los sentidos, hay obligación de recargar la batería, bien antes de la autovía del Huerna o después, según sea el sentido de la marcha. Hay que planificar el viaje y saber exactamente dónde conviene repostar.

10.3. Breve descripción de la batería de iones de litio.

Aunque convencionalmente, en los componentes eléctricos y electrónicos, en las fuentes de alimentación, etc, el ánodo es el electrodo positivo y el cátodo es el negativo, en el caso de las baterías, históricamente, es al revés: el ánodo es el terminal negativo y el cátodo el positivo.

El litio es el elemento sólido más ligero. El litio puro es bastante inestable, pero el litio en forma de ion (cargado positivamente, debido a la pérdida de un electrón) es más común. Y es esta partícula cargada positivamente la base de las baterías, dispositivos densos en energía que pueden recargarse muchas veces sin perder eficacia.

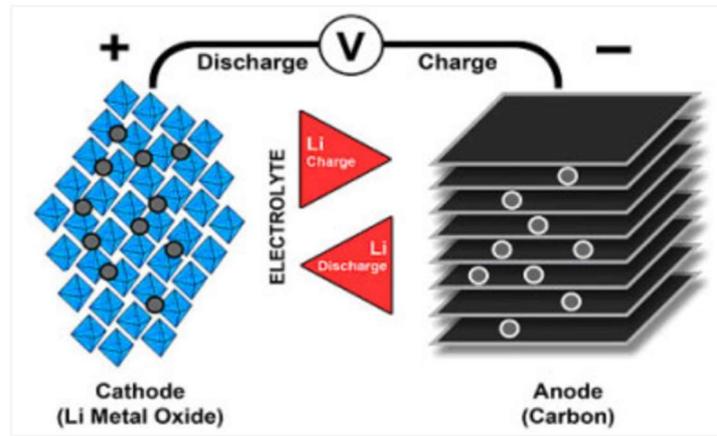


Figura 10.1: Representación esquemática de una batería de iones de Litio.

La estructura de una celda de iones de Litio está formada por un ánodo de grafito o de carbono poroso, un cátodo fabricado sobre un compuesto de litio y oxígeno y un óxido metálico (de cobalto o de cobalto níquel y manganeso), el electrolito y un separador sólido que evita un posible cortocircuito de la celda.

Cuando se carga la batería, los iones de litio se mueven del electrodo positivo al negativo a través del electrolito, uniéndose al carbono. Durante la descarga, se realiza el proceso opuesto, los iones de litio se separan del carbono para unirse de nuevo al cátodo. Este movimiento de iones de litio es el que genera la energía en las baterías.

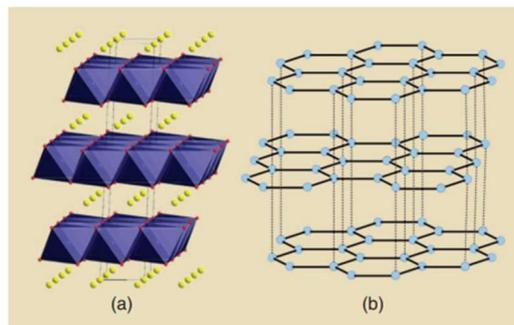


Figura 10.2: Estructura molecular del cátodo estratificado y del ánodo de grafito.

Prácticamente la totalidad de las baterías de los turismos con tracción eléctrica o híbridos utilizan baterías con celdas de iones de litio. Tienen un cátodo estratificado en capas y un ánodo de grafito. Las composiciones de cátodo que permiten unos niveles de almacenamiento de energía más elevados son el óxido de cobalto, manganeso, níquel y litio (LiNiCoMnO_2) también reseñada habitualmente como (NCM) y el óxido de cobalto, níquel, aluminio y litio (LiNiCoAlO_2) en la literatura del sector (NCA). Ambas tienen una estructura cristalina en la que se apilan alternadamente capas de MO_2 y de litio, donde M es un átomo de un metal de transición. El litio se mueve como una lanzadera hacia el ánodo o de vuelta al cátodo, según se trate de un proceso de carga o de descarga respectivamente. La energía específica de estos sistemas es de 150-200 mAh/gr y una tensión de celda entre 3,6 y 4,2 voltios. Otras estructuras de litio como el fosfato de hierro y litio (LFP) tienen una energía específica similar, pero tensiones más bajas.

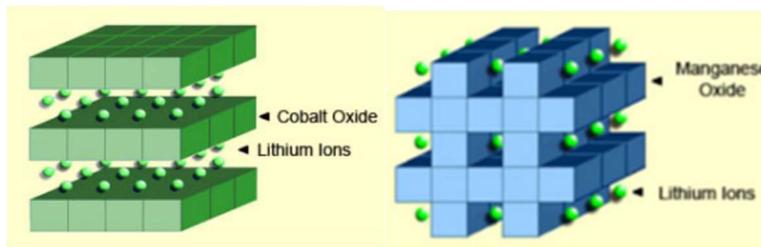


Figura 10.3: Estructura de los cátodos (NCA) y (NCM).

El precio de los metales de transición y el aluminio utilizados en la composición del cátodo, a fecha de hoy es el siguiente:

ELEMENTO	PRECIO
Níquel	11.000 € / Tm
Cobalto	22.000 € / Tm
Manganeso	2.000 € / Tm
Aluminio	2.250 € / Tm

Cuadro 10.1: Precios de los elementos empleados para la fabricación del cátodo.

En una estructura de Níquel, Manganeso y Cobalto, el Níquel y el Cobalto son los materiales que aportan potencia y energía a la batería, razón por la cual son los más caros. El Manganeso es electroquímicamente inactivo, pero es necesario para darle al cátodo una estructura estratificada.

El ánodo es de carbón o de grafito. El grafito, que tiene también una estructura cristalina en capas y una vida útil prolongada, es actualmente el material elegido para el ánodo de las celdas que conforman las baterías de los coches eléctricos. El grafito mineral se extrae de las explotaciones mineras y tiene un bajo coste. Tiene una capacidad teórica de 370 mAh/gr que, de acuerdo con lo aquí expuesto, indica que la capacidad de una celda está limitada por el material del electrodo positivo.

El grafeno es otra forma alotrópica del carbón igual que el grafito. Los ánodos de grafeno son en principio, mejores en cuanto a la capacidad de almacenamiento de energía y se cargan en un tiempo 10 veces menor que las de grafito. También se espera que tengan una mayor vida útil. Los iones de litio pasan a través de los pequeños poros, 10-20 nm, de las láminas de grafeno. Esta característica proporciona una zona de almacenamiento y de fácil extracción para los iones de litio, por lo que se estima que podrá almacenar 10 veces más energía que las celdas con ánodo de grafito. El

grafeno también se está estudiando para ser utilizado en la fabricación de supercondensadores con la intención de mejorar su densidad de energía específica.

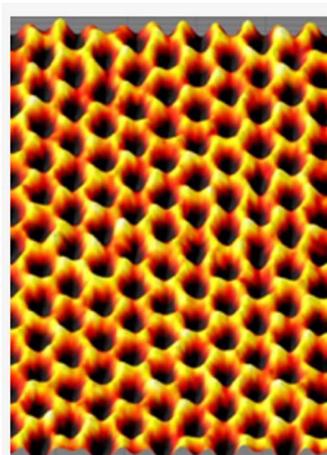


Figura 10.4: Imagen al microscopio de una lámina de grafeno.

La carga rápida de las celdas de iones de litio está muy condicionada por el movimiento de difusión de los iones de litio dentro de la estructura del grafito. Potencias de carga elevadas producen movimientos rápidos de los iones. Sin embargo, más allá de la tasa de iones de litio que se pueden intercalar y difundir por el ánodo de grafito, los iones que llegan a la superficie del ánodo se depositan como litio metálico. Este litio metálico depositado reacciona con el electrolito disminuyendo el litio disponible y produciendo un desvanecimiento de la capacidad de la celda.

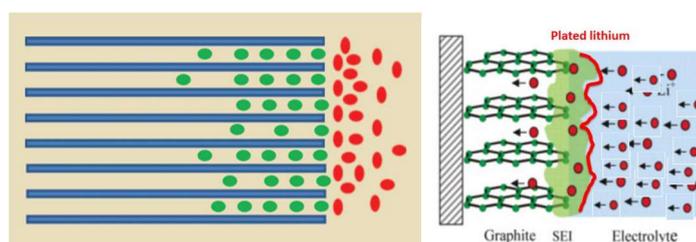


Figura 10.5: Representación esquemática de la metalización del ánodo.

El electrolito sólido SEI (Solid Electrolyte Interface), tiene la función de separador y evita que ánodo y cátodo entren en contacto. También, permite el trasiego en ambos sentidos de iones de litio, pero no de otras partículas de ánodo o cátodo. El SEI se recubre de un gel que mejora la conductividad del conjunto a temperatura ambiente. Este gel es altamente contaminante como residuo y es también muy inflamable. A partir de este año 2022, empieza la producción masiva de baterías de estado sólido, que sustituyen el gel que actúa como electrolito por silicio, evitando el carácter contaminante e inflamable del electrolito líquido o viscoso.

De igual manera el separador de electrolito sólido ha sido sustituido por un polímero de litio que permite aumentar ligeramente la energía específica de las celdas y disminuir el espesor del separador con relación al de las baterías de iones de litio convencionales. Las celdas de iones de litio-polímero se fabrican en bolsas (pouch) mientras que las de iones de litio convencionales necesitan un encapsulado rígido. Otra ventaja de las bolsas es que tienen un 20% menos de peso que otros tipos de encapsulado. No obstante, la fabricación en bolsas parece ser más cara que la de celdas de tipo cilíndrico.

10.3.1. Circuito equivalente de una celda.

Se vienen utilizando hasta la fecha dos circuitos equivalentes. El más sencillo es suponer la celda como un generador de continua con una resistencia interna. El segundo consiste en el circuito equivalente de Thevenin de la propia celda, añadiendo una red RC paralelo a la impedancia interna del circuito.

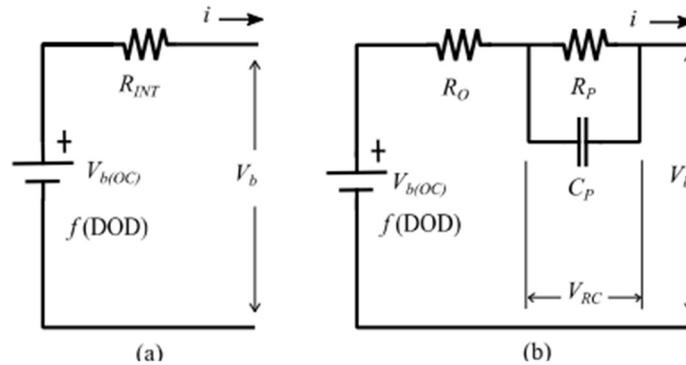


Figura 10.6: Circuitos equivalentes. a) Resistencia interna. b) Equivalente de Thevenin.

De hecho, una celda vista como un sistema de cargas es una distribución de carga negativa en el ánodo y una distribución equivalente de carga positiva en el cátodo, algo muy parecido a un condensador. Se trata, por tanto, de una capacidad de polarización y de una resistencia de polarización. La resistencia entre electrodos se ha reseñado como R_o . Al ser la separación entre electrodos muy pequeña, la capacidad tiene un valor elevado y habrá de considerarse a la hora de calcular la tensión útil entre electrodos. Algunas medidas sobre diferentes baterías actualmente en el mercado indican los siguientes resultados para el primer modelo de circuito equivalente de celda:

Vehículo	R_{INT} de la celda (m Ω)
Focus	99
Leaf	135
Fortwo	188
i3	135
Spark	135
eGolf	91
Soul	104
Mercedes clase B	149

Cuadro 10.2: Resistencia interna de la celda para distintos vehículos.

Mientras que para el segundo modelo de circuito equivalente:

Vehículo	R_o (m Ω)	R_P (m Ω)	C_P (F)
Focus	55	30	165
Leaf	75	55	90
Fortwo	75	155	50
i3	50	80	90
Spark	55	75	95
eGolf	50	30	165
Soul	40	60	115
Mercedes clase B	85	40	175

Cuadro 10.3: Valores del circuito equivalente de Thevenin para distintos vehículos.

Una vez se ha superado el tiempo del régimen transitorio del circuito puede observarse que se cumple:

$$R_{INT} \approx R_0 + R_P$$

10.3.2. Tipos de celdas.

Básicamente existen tres tipos de celdas: prismática, cilíndrica y de bolsa. Los primeros vehículos eléctricos utilizaron celdas prismáticas como las de la Figura 7. Un consorcio entre PSA – Citroën y Mitsubishi permitió la fabricación de 3 modelos idénticos, uno por cada marca, a principios de siglo. Según lo estudiado, a día de hoy no han vuelto a utilizarse este tipo de baterías.



Figura 10.7: Celdas con envoltorio de tipo prismático y módulo de 8 celdas.

El fabricante Tesla monta sus vehículos eléctricos con pilas o acumuladores que podríamos denominar domésticos. Estas celdas cilíndricas son comerciales y se venden en cualquier tienda del ramo.



Celdas 18650 del Model S comparadas con las celdas 2170 del Model 3 y del Model Y y con las nuevas celdas 4680 que formarán parte de las próximas baterías estructurales.

Figura 10.8: Celdas de tipo cilíndrico.

Tesla es el único fabricante de coches eléctricos que emplea este tipo de baterías formando matrices de 96 conjuntos seriados de 46 celdas en paralelo (96s46p). Actualmente se tiende a celdas de mayor tamaño y capacidad con una configuración de 96 s por 10 p elementos.



Figura 10.9: Celdas de tipo bolsa y módulo de 8 bolsas utilizado por Nissan.

En general, los fabricantes de vehículos eléctricos suelen utilizar las celdas de tipo bolsa, son ligeramente más caras que las de tipo cilíndrico, pero presentan una vida útil más larga.

Por último, algunos fabricantes como Nissan utilizan las celdas de bolsa, pero agrupadas en módulos de 8 unidades.

10.4. Las baterías de los coches eléctricos.

a) MITSUBISHI i-MiEV, CITROEN C-Zero Y PEUGEOT iOn.



Figura 10.10: Peugeot iOn y Citroën C-Zero.

BATERÍA: CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Modelo/ Fabricante	Celdas	Configuración	Peso	Volumen	Peso vehículo	% Peso vehículo
C-ZERO i-ION i-MiEV YUASA	1,65 kg 11,1x4.4 x17.1 cc	10 mód. de 8 celdas: 80 celdas	257 kg	68 litros	1140 kg	22,5 %
i-iMiEV YUASA	1,65 kg 11,1x4.4 x17.1 cc	10 módulos de 8 celdas + 2 módulos de 4 celdas: 88 celdas	264 kg	75 litros	1140 kg	23,1 %

Cuadro 10.4: Características mecánicas de la batería de Citroën C-Zero, Peugeot i-ION, Mitsubishi i-MiEV.

BATERÍA: CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Modelo	Celdas	Configuración	Capacidad	I en descarga	Imáx descarga	Imax carga
C-ZERO i-ION i-MiEV	LEV-50 Nom.:3,75 V máx.:4,2 V mín.: 2,75 V	80 serie (3,75x80=300V)	15 kwh 300 V x 50 Ah	50 A 1C:1h	300 A 6C:10 min	125 A
i-iMiEV	LEV-50	88 serie (3,75x88=330V)	16.5 kwh 330 V x 50 Ah	50 A 1C:1h	300 A 6C:10 min	125 A

La descarga provoca la caída de la tensión de las celdas por debajo del mínimo de funcionamiento: 2,75 v.

Cuadro 10.5: Características eléctricas de la batería de Citroën C-Zero, Peugeot i-ION, Mitsubishi i-MiEV.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL VEHÍCULO

C-ZERO/i-ION/ i-MiEV	Valor mínimo	Valor Nominal	Valor máximo
Funcionamiento			
Tensión	220 v	300 v	328 v
Potencia		35 kw	50 kw
Intensidad de corriente		100 A	300 A
Arranque		150 A	450 A
Capacidad (Energía)	14.5 Kwh	14.5 Kwh	16 Kwh
Consumo medio		12.6 Kwh/100Km	
Carga rápida			
Potencia			40 kw
Corriente continua			125A (10-40°C)
Tiempo de carga	60 min.		
Puerto de carga rápida		CHAdEMO	
Carga doméstica			
Potencia		3.7 kw	
Corriente monofásica		16 A	
Tiempo de carga		6 horas	
Temperatura			
Rango de temperaturas		20 a 60 °C	
Refrigeración de la batería		Conexión al A/A	
Fabricación			
Composición del cátodo		Li-ion	
Dinámica en ruta			
Velocidad			100 km/h
Autonomía		100 km	

Cuadro 10.6: Características eléctricas del Citroën C-Zero, Peugeot i-ION, Mitsubishi i-MiEV.



Figura 10.11: Conjunto ensamblado de las celdas y el Sistema de Gestión de la Batería, así como disposición de las baterías en los modelos Peugeot iOn, Mitsubishi i-MiEV y Citroën C-Zero.

b) DACIA Spring-RENAULT City K-ZE-RENAULT Kwid.



Figura 10.12: Renault City K-ZE y Dacia Spring y disposición de la batería.

BATERÍA: CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Modelo/ Fabricante	Celdas	Configuración	Peso	Volumen	Peso vehículo	% Peso vehículo
RENAULT CITY SVOLT	310x114 x15 mm	3 módulos de 24 celdas.	200 kg	38 litros	1045 kg	18 %

Cuadro 10.7: Características mecánicas de la batería del Renault Zity K-ZE y Dacia Spring.

BATERÍA: CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Modelo	Celdas	Configuración	Capacidad	I en descarga	Imáx descarga	Imax carga
RENAULT CITY	E78 Nom.:4,7 V Máx.:5 V Mín.: 3,75 V NMO	72s1p 3 módulos de 24 elementos 10 kw c.u.	72 x 4,7 V x 78 Ah = 26,8 kWh	78 A 1C:1h	125 A	150 A

La descarga provoca la caída de la tensión de las celdas por debajo del mínimo de funcionamiento: 3,75 v.

Cuadro 10.8: Características eléctricas de la batería del Renault Zity K-ZE y Dacia Spring.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL VEHÍCULO

RENAULT CITY Z.E.-DACIA SPRING	V. mínimo	Valor Nominal	Valor máximo
<i>Funcionamiento</i>			
Tensión	260 v	340 v	395 v
Potencia		33 kw	
Intensidad de corriente	83 A	97 A	125 A
Arranque	124 A	145 A	187 A
Capacidad (Energía)		26,8 kwh	
Consumo medio		13.9 kwh/100km	
<i>Carga rápida</i>			
Potencia			50 kw
Corriente continua			150 A (10-40°C)
Tiempo de carga		30 min.	
Puerto de carga rápida			
<i>Carga doméstica</i>			
Potencia		2,3 kw	
Corriente monofásica		10 A	
Tiempo de carga		14 h	
<i>Carga doméstica 2</i>			
Potencia		3,7 kw	
Corriente monofásica		16 A	
Tiempo de carga		10 h	
<i>Carga doméstica 3</i>			
Potencia		7,4 kw	
Corriente monofásica		32 A	
Tiempo de carga		4 h 45 m	
<i>Temperatura</i>			
Rango de temperaturas		-20 a 60 °C	
Refrigeración de las baterías		Conexión al A/A	
<i>Fabricación</i>			
Composición del cátodo		NM0	
<i>Dinámica en ruta</i>			
Velocidad máxima			125 km/h
Autonomía	200 km		
Mixta WLTP		230 km	
Ciudad WLTP.ZE			305 km

Cuadro 10.9: Características eléctricas del Renault City K-ZE y Dacia Spring.

c) **RENAULT Zoe**

Figura 10.13: RENAULT Zoe, disposición de las baterías en el vehículo y conjunto ensamblado de las celdas y el Sistema de Gestión de la Batería (BMS).

BATERÍA: CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Modelo/ Fabricante	Celdas	Configuración	Peso	Volumen	Peso vehículo	% Peso vehículo
RENAULT ZOE LG Chem	0,425 litros 1070 grs	96s2p NCM 712 NCMA en próximas versiones	326 kg	82 litros	1502 kg	22 %

Cuadro 10.10: Características mecánicas de la batería del Renault Zoe.

BATERÍA: CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Modelo	Celdas	Conf	Capacidad	I en descarga	Imáx descarga	Imax carga
RENAULT ZOE	E66 / E66A / E78 Nom.:3,657 V Máx.:4,2 V Mín.: 2,65 V	96s2p	350 V x 65 x 2 Ah = 45,5 kWh 350 x 78 V x 2 Ah = 55,5 kWh	65A ó 78 A 1C:1h	200A / 250A	150 A

Cuadro 10.11: Características eléctricas de la batería del Renault Zoe.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL VEHÍCULO

RENAULT ZOE	Valor mínimo	Valor Nominal	Valor máximo
<i>Funcionamiento</i>			
Tensión	260 v	350 v	400 v
Potencia		100/80 kw	
Intensidad de corriente	200 A		285 A
Arranque	300 A		425 A
Capacidad (Energía)		45,5 kwh	
Consumo medio		15 kwh/100km	
<i>Carga rápida</i>			
Potencia			50 kw
Corriente continua			150 A (10-40°C)
Tiempo de carga		70 min.	
Puerto de carga rápida			
<i>Carga doméstica</i>			
Potencia		3,7 / 7,4 kw	
Corriente monofásica		16 / 32 A	
Tiempo de carga		15 / 7 horas	
<i>Carga con dispensador colectivo</i>			
Potencia		11 / 22 kw	
Corriente trifásica equilibrada		16 A / 32 A	
Tiempo de carga		15 h / 7 h	
<i>Temperatura</i>			
Rango de temperaturas		-20 a 60 °C	
Refrigeración de las baterías		Conexión al A/A	
<i>Fabricación</i>			
Composición del cátodo		NCM 712	
<i>Dinámica en ruta</i>			
Velocidad máxima			125 km/h
Autonomía	200 km		
Mixta WLTP a 100 km/h		230 km	
Ciudad WLTP.ZE 50 km/h			340 km

Cuadro 10.12: Características eléctricas del Renault ZOE.

d) **TESLA Modelo 3 Long Range**



Figura 10.14: Tesla Modelo 3 Long Range y disposición de la batería y BMS en el vehículo.

BATERÍA: CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Modelo/ Fabricante	Celdas	Configuración	Peso	Volumen	Peso vehículo	% Peso vehículo
TESLA MODEL3 LR PANASONIC	21700 Cilíndrica NCA 811 75 grs	96s46p	480 kg	160 litros	1600/1800 kg	25-30 %
	46800 Cilíndrica NCM811 355 grs	96s10p	490 kg	160 litros		25-30%

Cuadro 10.13: Características mecánicas de la batería del Tesla Modelo 3 LR.

BATERÍA: CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Modelo	Celdas	Config.	Capacidad	I en descarga	Imáx descarga	I máx carga
TESLA MODELO 3 LONG RANGE	21700/46800 Cilíndrica	96s46p 96s10p	345 v x (5x46) Ah= 80 kwh	230 A 1C: 1H	1000 A	625 A
	5000/23000 mAh Nom.:3,6V Máx.:4,2V Mín.: 2,6V		345 v x (23x10) Ah= 80 Kwh			

Cuadro 10.14: Características eléctricas de la batería del Tesla Modelo 3 LR.



Figura 10.15: Conjunto de batería y BMS desmontado para mantenimiento del Tesla Modelo 3.

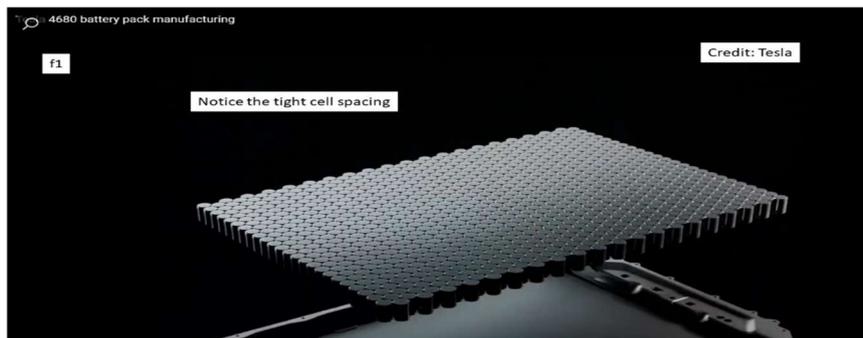


Figura 10.16: La batería 46800 de Tesla, configuración de 96s10p, 84 Kwh de energía para Modelo 3 y Modelo Y.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL VEHÍCULO

TESLA MODEL 3 LONG RANGE	V. Mínimo	Valor Nominal	Valor máximo
<i>Funcionamiento</i>			
Tensión		345 v	400 v
Potencia		258 / 340 kw	
Intensidad de corriente		740 / 1000 A	
Arranque		1110 / 1500 A	
Capacidad (Energía)	78,3 kwh	80 kwh	
Consumo medio		16 kwh/100km	
<i>Carga rápida, ultra-rápida y extrarrápida</i>			
Potencia	50 kw	100 kw	250 kw
Corriente continua	125 A	250 A	631 A
Tiempo de carga	130 min	75 min	28 min
Puerto de carga		TESLA	
<i>Carga con dispensador colectivo</i>			
Potencia		11 kw	
Corriente trifásica equilibrada		3 x 16 A	
Tiempo de carga		26 horas	
<i>Carga doméstica 1</i>			
Potencia		3.7 kw	
Corriente monofásica		16 A	
Tiempo de carga doméstica		30 horas	
<i>Temperatura</i>			
Rango de temperaturas		15 °C a 45 °C	
Refrigeración de las baterías		liquido refrig.	
<i>Fabricación</i>			
Composición del cátodo		NCA ó NCM 811	
<i>Dinámica en ruta</i>			
Velocidad máxima		265 km/h	
Autonomía		547 km	

Cuadro 10.15: Características eléctricas de la batería del Tesla Modelo 3 LR.

e) *NISSAN Leaf*.

Figura 10.17: Nissan Leaf y disposición de la batería y BMS en el vehículo.

BATERÍA: CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Modelo/ Fabricante	Celdas	Configu ración	Peso	Volumen	Peso vehículo	% Peso vehículo
Nissan LEAF AESC	NCM 523 914 gr Módulos de 8 celdas	96s3p	410 kg 263 kg de las celdas 147 kg cajas, BMS y TMS	30 x 22,2 x 6,8 cc = 4,5 litros / mod 36x4,5=162	1580 kg	26%

Cuadro 10.16: Características mecánicas de la batería del Nissan Leaf.

BATERÍA: CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Modelo	Celdas	Configuración	Capacidad	I descarga	Imáx descarga	I máx carga
Nissan LEAF	56,3 Ah	288 elementos 96s 3p (3,65x96=350V)	350 v x (56,3 x 3) Ah= 60 kwh	169 A 1C: 1H	450 A	150 A

Cuadro 10.17: Características eléctricas de la batería del Nissan Leaf.



Figura 10.18: Detalle de la batería y BMS del Nissan Leaf.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL VEHÍCULO

Nissan LEAF	Valor mínimo	Valor Nominal	Valor máximo
<i>Funcionamiento</i>			
Tensión		350 v	400 v
Potencia		160 kw	
Intensidad de corriente		450 A	
Arranque		675 A	
Capacidad (Energía)		60 kwh	
Consumo medio		17 kwh/100km	
<i>Carga rápida y ultrarápida</i>			
Potencia		50 kw	100 kw
Corriente continua		150 A	300 A (10-40°C)
Tiempo de carga		90 min	45 min
Puerto de carga		CHAdeMO	
<i>Carga doméstica 1</i>			
Potencia		3.7 kw	
Corriente de carga monofásica		16 A	
Tiempo de carga doméstica		18 horas	
<i>Carga doméstica 2</i>			
Potencia		7,4 kw	
Corriente de carga monofásica		32 A	
Tiempo de carga doméstica		10 h	
<i>Carga con dispensador colectivo</i>			
Potencia		11 kw	
Corriente trifásica equilibrada		3 x 16 A	
Tiempo de carga		18 horas	
<i>Temperatura</i>			
Rango de temperaturas			
Refrigeración de las baterías		A/A	
<i>Fabricación</i>			
Composición del cátodo	NCM 523		
<i>Dinámica en ruta</i>			
Velocidad máxima			
Autonomía		350 km	

Cuadro 10.18: Características eléctricas del Nissan Leaf.

f) **VOLKSWAGEN id4**



Figura 10.19: Volkswagen ID4 y disposición de la batería y BMS en el vehículo.

BATERÍA: CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Modelo	Celdas	Configuración	Peso	Volumen	Peso vehículo	% Peso vehículo
Volkswagen ID.4	NCM 712 12 Módulos de 24 celdas LG Chem	288 bolsas 96s3p	320 kg	145 Litros	1965 kg	17%

Cuadro 10.19: Características mecánicas de la batería del Volkswagen ID4.

BATERÍA: CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Modelo	Celdas	Configuración	Capacidad	I descarga	Imáx descarga	I máx carga
Volkswagen ID.4	LGX E78 78 Ah Nom.:3,65 V Máx.:4,25 V Mín.: 2,65 V	288 elementos 96s 3p 3,65x96=350V 4,25x96=408V 2,65x96=255V 34 V por módulo	408 V x (78 x 3) Ah= 95 kwh Capacidad útil: 80% (77 kwh)	195 A 1C: 1h	350 A	250 A

Cuadro 10.20: Características eléctricas de la batería del Volkswagen ID4.

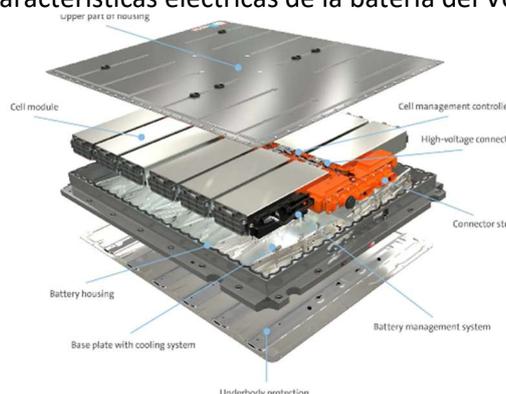


Figura 10.20: Detalle de la estructura modular de la batería y BMS del Volkswagen ID-4.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL VEHÍCULO

Volkswagen ID.4	Valor mínimo	Valor Nominal	Valor máximo
<i>Funcionamiento</i>			
Tensión	330 V	350 V	408 V
Potencia		150 kw	
Intensidad de corriente	375 A	430 A	450 A
Arranque	560 A	645 A	675 A
Capacidad (Energía)		77 kwh	
Consumo medio		17 kwh/100km	
<i>Carga rápida y ultra-rápida</i>			
Potencia		50 kw	100 kw
Corriente continua		130 A	350 A
Tiempo de carga		4h	50 min
Puerto de carga		CHAdEMO	
<i>Carga doméstica 1</i>			
Potencia		7,2 kw	
Corriente de carga monofásica		32 A	
Tiempo de carga doméstica		14 horas	
<i>Carga con dispensador colectivo</i>			
Potencia		11 kw	
Corriente trifásica equilibrada		3 x 16 A	
Tiempo de carga		28 horas	
<i>Carga con dispensador colectivo</i>			
Potencia		22 kw	
Corriente trifásica equilibrada		3 x 32 A/ 6 x 16 A	
Tiempo de carga		14 / 28 horas	
<i>Temperatura</i>			
Rango de temperaturas	-20 a 60 ° C		
Refrigeración de las baterías	Refrigerante líquido		
<i>Fabricación</i>			
Composición del cátodo	NCM 712		
<i>Dinámica en ruta</i>			
Velocidad máxima			160 km/h
Aceleración 0-100 km/h			8,5 seg
Autonomía			500 km

Cuadro 10.21: Características eléctricas del Volkswagen ID4.

g) AUDI e – tron



Figura 10.21. Audi e-tron y disposición de la batería y BMS en el vehículo.

BATERÍA: CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Modelo / Fabric.	Celdas	Configuración	Peso	Volumen	Peso vehículo	% Peso vehículo
Audi e-tron LG Chem	NCM 622 36 Módulos de 12 celdas	432 bolsas 108s4p	700 kg	30 x 22,2 x 6,8 cc = 4,5 litros / mod 36x4,5=162 litros	2565 kg	27%

Cuadro 10.22: Características mecánicas de la batería del Audi e-tron.

BATERÍA: CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Modelo	Celdas	Configuración	Capacidad	I descarga	Imáx descarga	I máx carga
Audi e-tron	56,3 Ah	432 elementos 108s 4p (3,65x108=400V)	400 V x (60 x 4) Ah= 95 kwh Capacidad útil: 86,5 kwh	240 A 1C: 1H	750 A (135 kw +165 kw) *	125A/50 kw 375 A/150 kw

(*) Motor delantero + motor trasero

Cuadro 10.23: Características eléctricas de la batería del Audi e-tron.

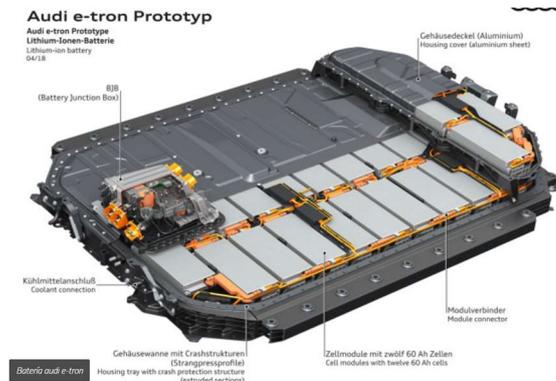


Figura 10.22: Detalle de la estructura modular de la batería y BMS del AUDI e-tron.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL VEHÍCULO

Audi Quattro e-tron	Valor mínimo	Valor Nominal	Valor máximo
<i>Funcionamiento</i>			
Tensión		400 v	450 v
Potencia		300 kw (135 +165)	
Intensidad de corriente			
Arranque con motor delantero		500 A	
Arranque de motor trasero		950 A	
Sólo motor delantero		340 A	
Con los dos motores		750 A	
Capacidad (Energía)		95 kwh	
Consumo medio		23 kwh/100km	
<i>Carga rápida y ultra-rápida</i>			
Potencia		50 kw	150 kw
Corriente continua		125 A	375 A (10-40°C)
Tiempo de carga rápida		120 min	40 min
Puerto de carga			
<i>Carga doméstica 1</i>			
Potencia		3.7 kw	
Corriente de carga monofásica		16 A	
Tiempo de carga doméstica		28 horas	
<i>Dispensador de carga colectivo 1</i>			
Potencia		11 kw	
Corriente trifásica equilibrada		3 x 16 A	
Tiempo de carga		28 horas	
<i>Dispensador de carga colectivo 2</i>			
Potencia		22 kw	
Corriente trifásica equilibrada		6 x 16 A / 3 x 32 A	
Tiempo de carga		28 / 14 horas	
<i>Temperatura</i>			
Rango de temperaturas			
Refrigeración de la batería	Refrigeración líquida activa		
<i>Dinámica en ruta</i>			
Velocidad máxima			200 km/h
Autonomía			530 km

Cuadro 10.24: Características eléctricas del Audi e-tron.

h) PORSCHE Taycan

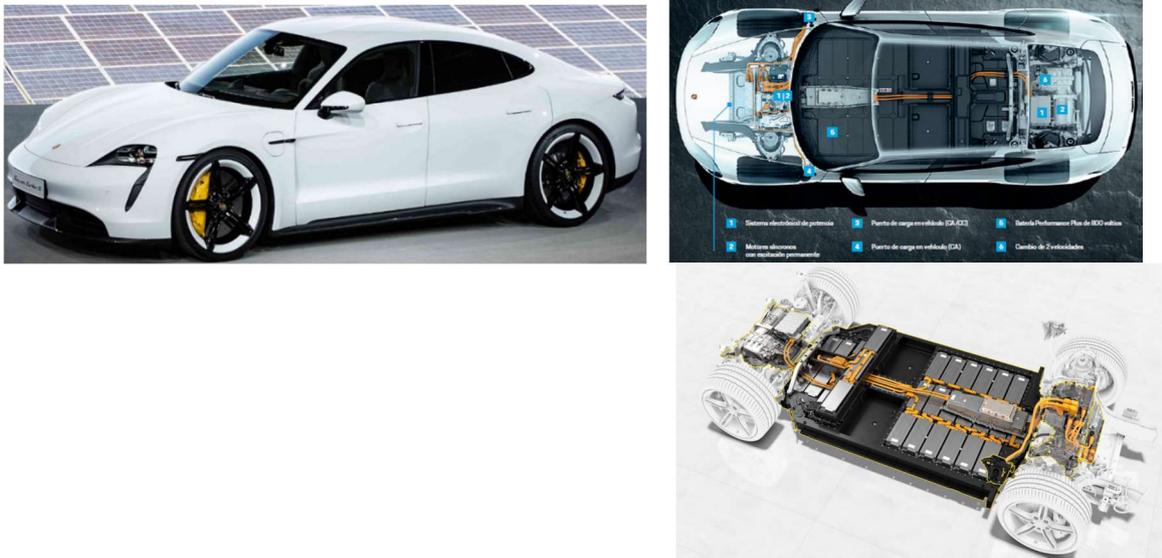


Figura 10.23: Porsche Taycan y disposición de la batería y BMS en el vehículo.

BATERÍA: CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Modelo / Fabric.	Celdas	Configuración	Peso	Volumen	Peso vehículo	% Peso vehículo
Porsche Taycan Turbo-S LG Chem	NCM 811 36 Módulos de 12 celdas	396 bolsas 198s 2p	630 kg	190 litros	2300/2400 kg	27%

Cuadro 10.25: Características mecánicas de la batería del Porsche Taycan.

BATERÍA: CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Modelo	Celdas	Configuración	Capacidad	I en descarga	Imáx descarga	I máx carga
Porsche Taycan Turbo-S	LG E66 66 Ah	396 elementos 198s 2p 3,65x198=722 V	722 v x (66 x 2) Ah= 95 kwh	132 A 1C: 1H	575/700 A (460/560 kw s/versión)	340 A/270 kw

Cuadro 10.26: Características eléctricas de la batería del Porsche Taycan.



Figura 10.24: Detalle de la estructura modular de la batería y BMS del Porsche Taycan.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL VEHÍCULO

PORSCHE Taycan Turbo - S	Valor mínimo	Valor Nominal	Valor máximo
<i>Funcionamiento</i>			
Tensión	700 v	800 v	830 v
Potencia		460/560 kw	
Intensidad de corriente		575 / 700 A	
Arranque		860 / 1050 A	
Capacidad (Energía)		95 kwh	
Consumo medio		23 kwh/100km	
<i>Carga rápida, ultra-rápida y extrarápida</i>			
Potencia	50 kw	150 kw	270 kw
Corriente de carga rápida	62.5 A	187 A	340 A
Tiempo de carga rápida	120 min	40 min	22 min
Puerto de carga rápida			
<i>Carga doméstica</i>			
Potencia		3.7 kw	
Corriente de carga monofásica		16 A	
Tiempo de carga doméstica		28 horas	
<i>Dispensador de carga colectivo</i>			
Potencia		22 kw	
Corriente trifásica equilibrada		6 x 16 A / 3 x 32 A	
Tiempo de carga industrial		28/14 horas	
<i>Temperatura</i>			
Rango de temperaturas			
TMS Refrigeración de la batería	Refrigeración líquida activa		
<i>Dinámica en ruta</i>			
Velocidad máxima			260 km/h
Autonomía combinada WLTP		430 km	
Autonomía en ciudad WLTP			530 km

Cuadro 10.27: Características eléctricas del Porsche Taycan.

10.4.1. Potencia, energía y autonomía de los vehículos eléctricos de batería.

De acuerdo con lo reseñado en el apartado anterior puede hacerse una clasificación de los vehículos según los niveles de potencia y energía.

- a) **Baja potencia:** Potencias por debajo de los 80 Kw y energía por debajo de los 40 Kwh. Autonomía entre 100 y 200 km.

MODELO	POTENCIA VEHÍCULO	ENERGÍA	AUTONOMÍA
DACIA Spring	33 Kw	27 Kwh	230 Km
CITROËN Zero	35 Kw	14,5 Kwh	100 Km

Cuadro 10.28: Modelos de potencia y energía bajas.

- b) **Potencia media:** Potencias desde 80 Kw y menores de 150 Kw. Energía entre los 40 y 60 Kwh. Autonomía en torno a los 300 Km.

MODELO	POTENCIA VEHÍCULO	ENERGÍA	AUTONOMÍA
HYUNDAI Kona Maxx	100 Kw	39 Kwh	300 Km
MEGANE E-Tech	97 Kw	40 Kwh	300 Km
RENAULT Zoe	80 Kw	45 Kwh	340 Km

Cuadro 10.29: Modelos de potencia y energía medias.

- c) **Potencia media-alta:** Potencias en el intervalo 150 – 250 Kw con energías entre 60 y 75 Kwh. Autonomía desde 350 Km hasta los 500 Km.

MODELO	POTENCIA VEHÍCULO	ENERGÍA	AUTONOMÍA
CUPRA Born	150 Kw	58 Kwh	425 Km
VOLKSWAGEN ID.3	150 Kw	58 Kwh	425 Km
VOLKSWAGEN ID.4	150 Kw	77 Kwh	500 Km
NISSAN Leaf	160 kw	62 Kwh	350 Km

Cuadro 10.30: Modelos de potencia y energía media-alta.

d) **Potencia alta:** Por encima de 250 Kw y energía entre 75 y 100 Kwh. Autonomía desde 450 Km.

MODELO	POTENCIA VEHÍCULO	ENERGÍA	AUTONOMÍA
AUDI 55 e-tron	300 Kw = (135+165)	95 Kwh	530 Km
TESLA 3 Long Range	258 Kw / 340 Kw	78 Kwh	550 Km
PORSCHE Taycan turbo s	460 Kw /560 Kw	93 Kwh	530 Km

Cuadro 10.31: Modelos de potencia y energía altas.

10.5. Los procesos de carga rápida y ultra-rápida.

Actualmente, la batería de los coches eléctricos tiene una tensión nominal de funcionamiento de 400 v. La carga rápida normalizada se sitúa en una potencia desde 50 kw hasta 100 kw, lo que arroja un nivel de corriente de 125 A a 250 A y tiempos de recarga entre una hora y dos horas para valores típicos de energía almacenada de 60 ó 70 kwh, con un factor C, aproximadamente de 0,5.

Este tiempo de repostaje se considera muy elevado para algunos profesionales como taxistas, empresarios, médicos con atención a domicilio, veterinarios, etc. Utilizando la terminología del sector, se persigue conseguir un factor C = 10, lo que significa cargar una batería en 6 minutos, que sería el tiempo de repostaje de un vehículo de gasolina.

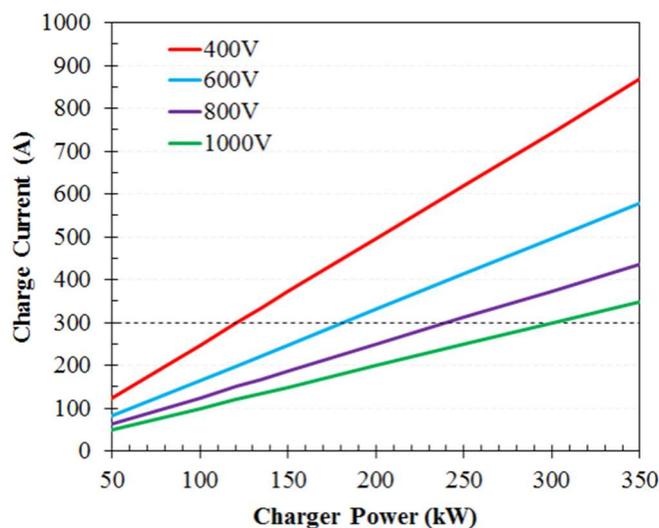


Figura 10.25: Corriente de carga respecto a la potencia de carga en función de la tensión de la batería.

Si se mantiene la tensión de 400 voltios, la reducción del tiempo de carga, obligatoriamente, ha de llevarse a cabo aumentando la corriente. Así, por ejemplo, Tesla tiene cargadores propios de su marca a 150 kw y 250 kw que pueden alcanzar los 625 A en un proceso de carga. Sin embargo, estos niveles de corriente suponen un tiempo de carga de 28 minutos para los 78 kwh de energía

de la batería del Tesla **Model 3 Long Range**, lejos del tiempo de repostaje de 5 minutos de un vehículo de combustible fósil. Con 625 A, se obtiene una mejora insuficiente del factor C que pasaría de un valor 0,5 a 2, muy lejos del objetivo $C = 10$.

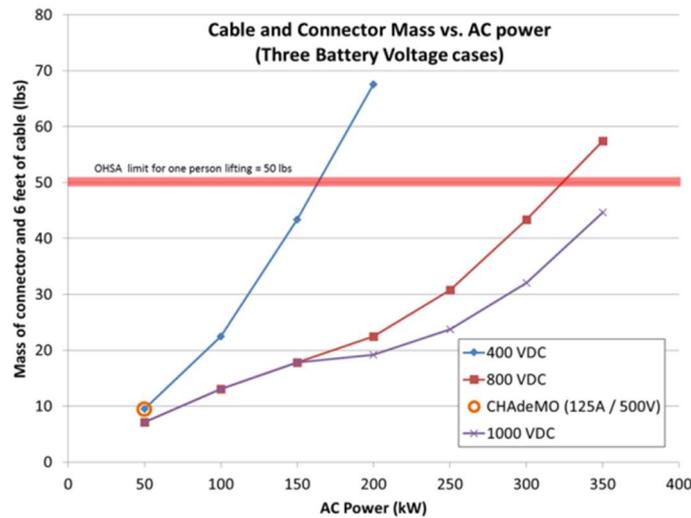


Figura 10.26: Comparación del peso del cable en el equipo dispensador de energía según la tensión de la batería.

Los cables para carga rápida de 50 kw han de tener un calibre mínimo de 4 AWG para vehículos de 400 v permitiendo en el caso peor, corrientes de 118 A, de acuerdo con el Estándar IEEE 835. 2012. Los fabricantes instalan un calibre 3/0 AWG que eleva el caso peor hasta los 371 A, también según la misma norma. Este calibre limitaría la potencia de carga ultra-rápida a 150 kw y no sería suficiente para una carga con 625 A. El calibre de los cables a instalar en el vehículo para la alimentación del automóvil podría aumentarse sin ningún problema, al margen del incremento de peso que se origine. No ocurre lo mismo con el cable de carga de la estación de repostaje.

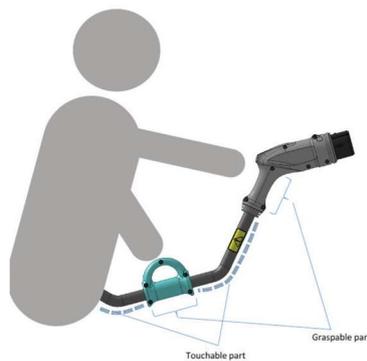


Figura 10.27: Estándar IEEE 2030.1.1. borrador de 2021.

La manguera de repostaje perdería flexibilidad al aumentar la sección de los cables, o bien habría que utilizar cables refrigerados, que tendrían el mismo efecto de falta de flexibilidad y de manejabilidad para el usuario. Según un estudio del Departamento de Transportes (USA), con tensiones de 400 v el cable, el conector y la manguera para repostar, llegarían al límite establecido de 22,5 kg para potencias de recarga de 150 kw.

Si bien la tensión de 800 v estaba reservada hasta ahora a los camiones, un cambio de tensión de 400 v a 800 v podría ser beneficioso para conseguir tiempos de carga más pequeños y elevar el

factor C hasta un valor de 3 ó 4. La corriente disminuiría a la mitad y el cable de calibre 3/0 AWG podría servir para todos los casos.

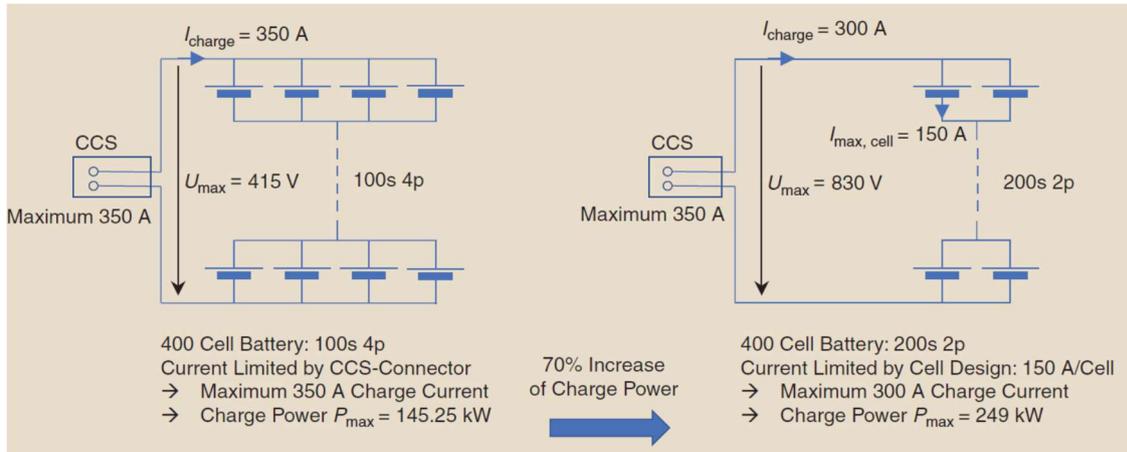


Figura 10.28: Cambio de configuración de celdas al pasar de 400 v a 800 v en una batería.

El paso de una tensión de batería a otra no entrañaría grandes alteraciones del equipamiento: Por un lado, el número de celdas no varía. Como se muestra en la figura, una batería de 100 elementos en serie y 4 en paralelo, se sustituiría por otra de 200 elementos en serie y 2 en paralelo. A igualdad de potencia, la capacidad de corriente es la mitad y la tensión el doble. El cambio de 400 v a 800 v tampoco afectaría en gran medida a la etapa de rectificación del cargador. Por otra parte, el número de sensores de corriente en serie aumentaría al doble.

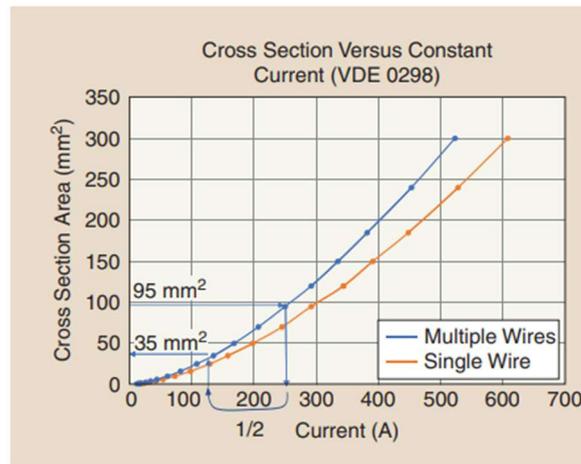


Figura 10.29: Calibre del cableado de la batería con 400 v y con 800 v.

El Porsche **Taycan Turbo S** es el primer modelo de turismo eléctrico que incorpora una batería de 800 v. Para una potencia de carga de 270 kw y una corriente de carga de 340 A, se consigue repostar una batería de 93 kwh de capacidad útil en 22 minutos, muy próximo al C=3.

Según datos del fabricante Porsche, el cableado para 400 v se sitúa entre los calibres 3/0 y 4/0 de la AWG, con una sección de 95 mm^2 . En el caso de los 800 v, la sección disminuiría a 35 mm^2 que se corresponde con un calibre 2 AWG. En consecuencia, la reducción de peso sería proporcional a la reducción de sección, aproximadamente una tercera parte.

10.6. Campos eléctricos y magnéticos estáticos.

Las ecuaciones de Maxwell para campos eléctricos y magnéticos estáticos, en forma diferencial:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \qquad \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \qquad \nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J} \qquad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

En realidad, al ser campos estacionarios, pueden verse como un conjunto de dos sistemas de ecuaciones independientes. Así, la Ley de Ampere que se ha enunciado en forma diferencial como:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J}$$

Puede describirse en forma integral de la siguiente manera:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu \cdot I$$

Para un hilo conductor recto, considerando una distancia R del mismo y una curva de integración circular, se tiene:

$$2 \cdot \pi \cdot R \cdot \mathbf{B} = \mu \cdot I$$

Y, en consecuencia:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot R}$$

De acuerdo con el estándar IEEE 835.2012, el revestimiento de los cables tendrá un espesor de 80 milésimas de pulgada, aproximadamente 2 mm.

Cable type	Voltage	Conductor sizes	Insulation thickness (mils)
1	600 to 5 kV	#12AWG-#10AWG	45
1	600 to 5 kV	#8AWG-#2AWG	60
1	600 to 5 kV	#1AWG-#4/0 AWG	80

Cuadro 10.32: Espesor del revestimiento de los conductores en función de la tensión y el calibre del cable según estándar IEEE 835.2012.

Para una línea bifilar, como la de la figura, y aplicando la Ley de Ampere de nuevo:

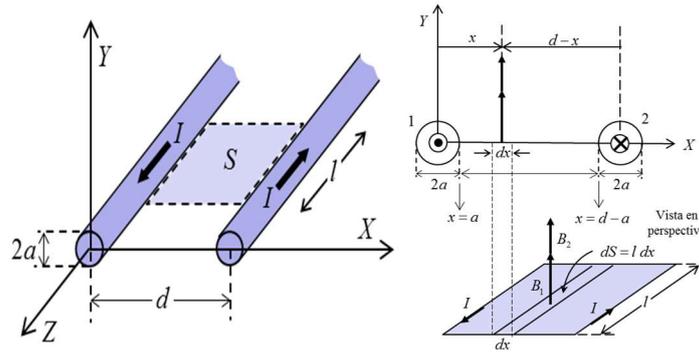


Figura 10.30: Campo en las proximidades de una línea bifilar.

El campo magnético en el espacio existente entre los dos conductores vendrá dado por:

$$B = B_1 + B_2 = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{d-x} \right)$$

En el exterior de los dos conductores, la situación se ha supuesto que será la siguiente:

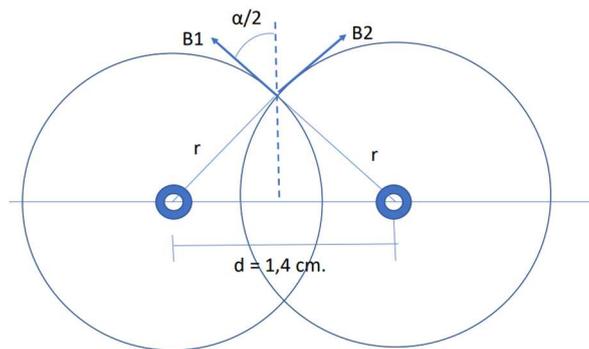


Figura 10.31: Geometría para el cálculo del campo alejado.

Si se utilizan cables de un calibre máximo de 4/0 AWG, supondremos un radio de conductor de 0,5 cm por lo que la distancia entre los centros de los conductores es aproximadamente 1,4 cm.

El campo magnético vendrá dado en este caso por:

$$\overline{B_1} + \overline{B_2} = 2 \mathbf{B} \cos \frac{1}{2}(\alpha) \quad \cos \alpha/2 = \frac{d}{2 \cdot r}$$

Donde:

$$|\overline{B_1}| = |\overline{B_2}| = B$$

Para el cálculo del campo eléctrico en el cable de energía y sus proximidades, haremos las siguientes hipótesis:

- La energía viaja confinada entre los dos hilos del cable.
- Las pérdidas son bajas.
- El campo eléctrico entre los dos conductores es prácticamente constante.

- d) En esta primera aproximación, sólo se calculará el nivel teórico de campo magnético estático debido a las corrientes de alimentación en tensión continua, sin tener en cuenta ningún estado transitorio.

10.6.1. Legislación y normativa empleada.

Se utilizarán para este trabajo, las siguientes leyes y normas:

- a) 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.**
- b) 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.**

10.6.2. Valores de inducción magnética (B) establecidos en la legislación española.

La legislación española define los niveles de referencia como aquellos niveles de campo para los que se cumplirían las restricciones básicas y que por tanto son inocuos para las personas que puedan estar expuestas a ellos.

Igualmente, explica que los valores límites de exposición (VLE) son los límites para un campo magnético estático que no resulta afectado por el tejido corporal. Los VLE relacionados con efectos sensoriales son los valores límite de exposición para condiciones de trabajo normales; están relacionados con los vértigos y otros efectos fisiológicos asociados a alteraciones del equilibrio que aparecen, fundamentalmente, debido al desplazamiento del trabajador dentro de un campo magnético estático. Los VLE relacionados con efectos para la salud en condiciones de trabajo controladas son aplicables temporalmente durante la jornada laboral cuando así lo justifique la práctica o el proceso, siempre que se hayan adoptado medidas preventivas, como el control de los movimientos y la información a los trabajadores

Además, la legislación incluye los denominados Niveles de Acción que garantizan 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.

a) Restricciones básicas y niveles de referencia.

Público en general

	R.D. 1066/2001	R.D. 299/2016
IM en todo el cuerpo	40 mT	

Cuadro 10.33: Niveles de referencia para público en general.

Entorno controlado

	R.D. 1066/2001	R.D. 299/2016
IM en todo el cuerpo	40 mT	
IM en el cerebro	40 mT	

Cuadro 10.34: Niveles de referencia para entornos controlados.**b) Valores límite de exposición.****Entornos laborales**

	R.D. 1066/2001	R.D. 299/2016
Inducción magnética		
Condiciones de trabajo normales		
Máx. en todo el cuerpo		2T
Máx. en extremidades		8T
Condiciones de trabajo controladas		
Máx. en todo el cuerpo		8T

Cuadro 10.35: Valores límite de exposición en entornos laborales (controlados).**c) Casos particulares: Niveles de acción para la inducción magnética.**

	R.D. 1066/2001	R. D. 299/2016
Personas con prótesis metálicas, marcapasos, etc		0.5 mT
Entornos con campos magnéticos intensos > 100 mT		3 mT

Cuadro 10.36: Niveles de acción para casos particulares en entornos laborales (controlados).

En una primera aproximación, y teniendo en cuenta la Ley de Biot-Savart, dos campos de 100 mT y 3 mT podrían dar lugar a fuerzas del orden de algunas decenas, quizás cientos de newtons. No obstante, tendríamos que considerar corrientes con un valor muy por encima de las que manejamos, p.e. elementos con devanados sobre un núcleo, y aun así las corrientes siguen siendo elevadas. Es muy probable que estos valores estén orientados a determinadas máquinas utilizadas en hospitales, por lo que no es un caso que tenga interés para nuestro estudio.

Sobre las prótesis, en general el nivel de 0,5 mT sí que existe la posibilidad de que se alcance por lo que habrá de tenerse en cuenta. Los más afectados serán los ocupantes de un vehículo que tengan implantados marcapasos, bombas de insulina y dispositivos de tipo electromecánico. Las personas con prótesis óseas de materiales ferromagnéticos también pueden verse afectadas por

este nivel de campo magnético. No obstante, las prótesis actualmente se realizan con materiales como el titanio que son paramagnéticos y por tanto, son transparentes para el campo magnético.

10.6.3. Resultados obtenidos.

Se dan los valores de campo a distancias muy pequeñas del cable, lo que puede ser de utilidad para tareas de mantenimiento y reparación o sustitución de la batería. Igualmente, se dan los resultados para el caso utilización del chasis y la carrocería como conductor de retorno. En el caso de campo magnético a 15 cm, se ha supuesto que es la distancia mínima al habitáculo del coche.

- a) **Proceso de carga.** Se han utilizado las corrientes máximas de carga que especifica cada fabricante.

MODELO	I MÁX. (AMP) CARGA	B (mT) r=7mm		B (mT) r=15 cm	
		UN HILO	DOS HILOS	UN HILO	DOS HILOS
CITROEN ZERO	125	3,56	7,02	1,66	0,16
DACIA SPRING	150	4,27	8,54	2	0,2
AUDI E-TRON	375	10,78	21,56	5	0,5
NISSAN LEAF	300	8,54	17,08	4	0,4
TESLA M 3 LR	625	17,8	35,7	8,30	0,8
PORSCHE TAYCAN	340	9,68	19,36	4,51	0,45

Cuadro 10.37: Niveles de campo magnético durante el proceso de carga.

- b) **Proceso de funcionamiento con potencia máxima.** Se han utilizado las corrientes máximas de descarga y los tiempos que especifica cada fabricante.

MODELO	I MÁX. (AMP) DESCARGA	B (mT) r=7mm		B (mT) r=15 cm	
		UN HILO	DOS HILOS	UN HILO	DOS HILOS
CITROEN ZERO	300A 10 min	8,54	17,08	3,98	0,4
DACIA SPRING	125A 25 min	3,56	7,12	1,66	0,16
AUDI E-TRON	750A 15 min	21,4	42,8	9,98	1
NISSAN LEAF	450A 22 min	12,8	25,6	5,97	0,6
TESLA M 3 LR	625A 22 min	17,8	35,6	8,33	0,83
PORSCHE TAYCAN	575/700A 10 min	16,4/20	32,8/40	7,66/9,33	0,75/0,93

Cuadro 10.38: Niveles de campo magnético en funcionamiento a potencia máxima.

- c) **Proceso de funcionamiento normal.** Se han utilizado las corrientes de descarga 1C que especifica cada fabricante.

MODELO	I. MÁX. (AMP) DESCARGA 1C (1h)	B (mT) r=7mm		B (mT) r=15 cm	
		UN HILO	DOS HILOS	UN HILO	DOS HILOS
CITROEN ZERO	50	1,42	2,84	0,66	0,06
DACIA SPRING	78	2,22	4,44	1,04	0,1
AUDI E-TRON	240	7	14	3,2	0,32
NISSAN LEAF	170	4,85	9,7	2,25	0,22
TESLA M 3 LR	230	6,57	13,14	3,06	0,3
PORSCHE TAYCAN	132	3,77	7,54	1,76	0,17

Cuadro 10.39: Niveles de campo magnético durante el funcionamiento normal.

- d) **Proceso de encendido o arranque.** Según establece el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión REBT, durante el arranque se ha de suponer que la potencia de los motores es un 50% mayor que la potencia nominal.

MODELO	I. MÁX. (AMP)	B (mT) r=7mm		B (mT) r=15 cm	
		UN HILO	DOS HILOS	UN HILO	DOS HILOS
	ARRANQUE				
CITROEN ZERO	150	4,3	8,6	2	0,2
DACIA SPRING	187	5,3	10,6	2,47	0,25
AUDI E-TRON	950	27,14	54,28	12,66	1,26
NISSAN LEAF	675	19,28	38,56	9	0,9
TESLA M3 LR	1110 /1500	32/43	64/86	15/20	1,5/2
PORSCHE TAYCAN	860/1050	24,5/30	49/60	11,5/14	1,15/1,4

Cuadro 10.40: Niveles de campo magnético durante el proceso de arranque.

Las estimaciones realizadas indican que durante el arranque y cuando el funcionamiento es con potencia máxima puede superarse el umbral de peligro de los 0,5 mT para personas con aparatos o prótesis implantadas. También, en estos casos de arranque y potencia máxima, en las proximidades del cable, pueden superarse los 40 mT de Nivel de Referencia que fija el R.D. 1066/2001.

10.6.4. Apantallamiento de campos magnéticos estacionarios.

La resolución de las ecuaciones de Maxwell para campos estacionarios junto con las condiciones de contorno:

$$B_{n1} = B_{n2}$$

$$H_{t1} = H_{t2}$$

Utilizando coordenadas esféricas:

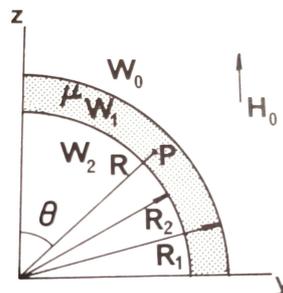


Figura 10.32: Apantallamiento de campo magnético mediante una superficie esférica.

Y siendo S_i la relación entre el campo en el interior de la esfera, campo apantallado, y el campo en el exterior:

$$S_i = H_2 / H_0$$

$$S_i = \frac{1}{1 + \frac{2(\mu - 1)^2}{\mu} \left(1 - \frac{R_2^3}{R_1^3}\right)}$$

Cuya representación en función de μ y para varios valores de la relación R_2 / R_1 es la que se muestra en la siguiente figura:

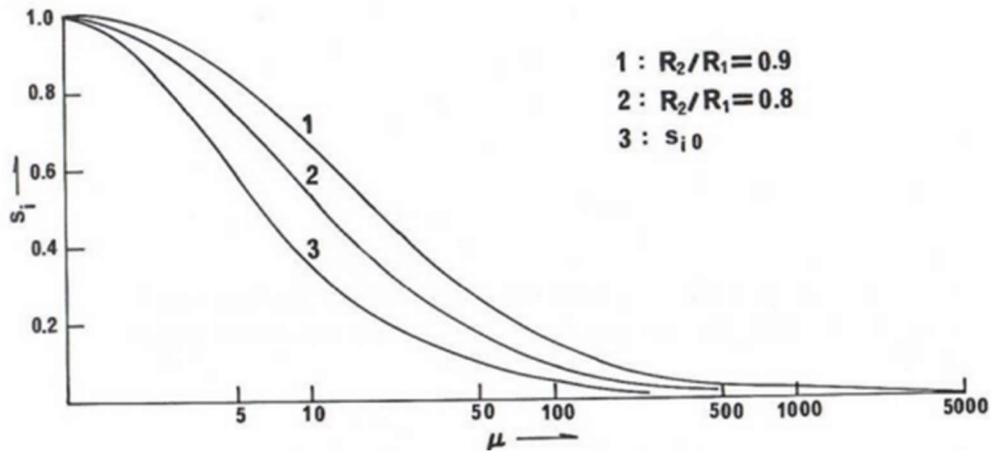


Figura 10.33: Relación entre el campo apantallado por una superficie esférica y el campo en el exterior, en función del espesor de la pantalla R_2/R_1 y la permitividad del material empleado. Donde S_{i0} es el valor de S_i cuando $R_2 / R_1 \rightarrow 0$.

Si se utilizan coordenadas cilíndricas, y por tanto una pantalla cilíndrica, se tiene:

$$S_i = \frac{1}{1 + \frac{(\mu - 1)^2}{4\mu} \left(1 - \frac{r_2^2}{r_1^2}\right)}$$

Que representado gráficamente se traduce en:

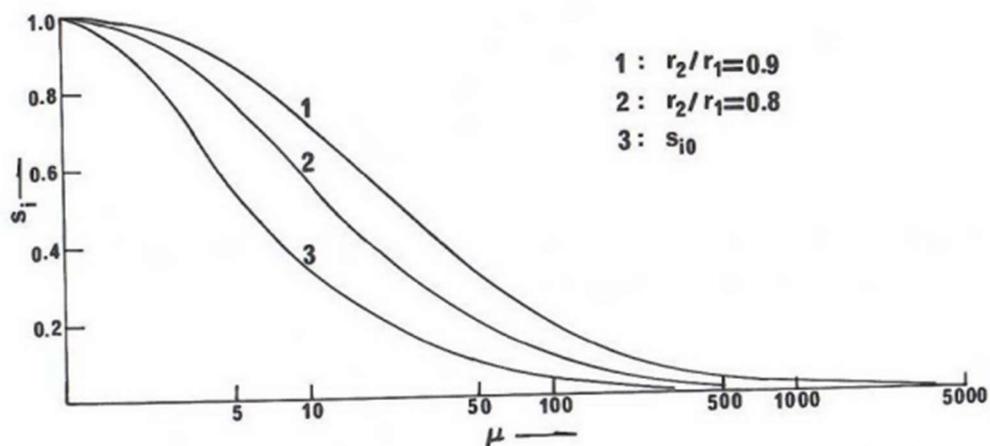


Figura 10.34: Relación entre el campo apantallado por una superficie cilíndrica y el campo en el exterior, en función del espesor de la pantalla R_2/R_1 y la permitividad del material empleado.

En ambos casos se comprueba que el apantallamiento de campo es más efectivo a medida que aumenta la permeabilidad magnética del material empleado como pantalla. Por lo tanto, si se utilizan materiales ferromagnéticos el apantallamiento estará muy próximo a campo nulo en el interior de la pantalla.

Hay que indicar que, si bien en el caso de la esfera el apantallamiento es total, ya que la esfera es una superficie cerrada, en el caso del cilindro, se ha supuesto un cilindro infinito que no es el caso real. Esto implica que, si la carcasa que envuelve la batería tiene orificios de entrada y salida de cables, ahí se producirá una zona sin apantallar y habrá campos en el exterior.

10.7. Seguridad en caso de accidente.

Los Reglamentos 94 y 95 de la Comisión Económica para Europa (CEPE) de las Naciones Unidas contienen las *Prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión frontal* [2018/178] y *lateral* [2021/1861].

Desde el punto de vista de la seguridad a bordo, estos Reglamentos establecen que los vehículos eléctricos, han de cumplir los siguientes requisitos:

- Los Sistemas de Almacenamiento de Energía Eléctrica Recargable (SAEER) ubicados dentro del habitáculo deberán permanecer en su sitio, y sus componentes deberán mantenerse dentro de los límites del SAEER correspondiente.
- Durante o tras el impacto no deberá penetrar en el habitáculo ninguna parte de un SAEER situado fuera para evaluar la seguridad eléctrica.
- El SAEER permanecerá sujeto al vehículo mediante al menos un anclaje, soporte o cualquier estructura que transfiera cargas del SAEER a la estructura del vehículo.
- Durante un período comprendido entre el impacto y 60 minutos después del impacto, no habrá indicios de incendio o explosión que puedan tener su origen en el SAEER.

Si el vehículo dispone de una función de desconexión automática o de uno o más dispositivos que dividen conductivamente el circuito del tren motor eléctrico en condiciones de conducción, el circuito desconectado, o cada uno de los circuitos divididos, por separado, deberán cumplir, una vez que se haya activado la función de desconexión, por lo menos uno de los criterios que se exponen a continuación:

- No antes de diez segundos ni después de sesenta segundos tras la colisión deberá cerrarse el interruptor S1 mientras se miden y registran la tensión V_b y la corriente I_e .
- La tensión de cualquier componente del vehículo, excepto la batería misma, ha de disminuir a un nivel por debajo de 60 voltios, que se considera el valor umbral de la alta tensión.
- Las tensiones V_b , V_1 y V_2 de los buses de alta tensión deberán ser iguales o inferiores a 30 VAC o 60 VDC en los 60 s siguientes al impacto.
- La energía total (TE) en los buses de alta tensión deberá ser inferior a 0,2 J. El producto de la tensión V_b y la corriente I_e se integra en el período de tiempo que va desde el instante t_c de cierre del conmutador de desconexión, no antes de 5 segundos a partir del momento en que se produce la colisión, hasta el momento en que la tensión V_b cae por debajo del

umbral de alta tensión de 60 V DC (t_n), que debe ser antes de 60 segundos después del impacto. La integración resultante equivale a la energía total (TE) en julios.

$$TE = \int_{t_c}^{t_h} V_b \cdot I_e \cdot dt$$

- Alternativamente, la energía total (TE) podrá calcularse por medio de la tensión medida V_b del bus de alta tensión y de la capacidad existente entre bornas de la batería (C_x) y ha de ser inferior a 0,2 julios. La energía almacenada en las capacidades (C_y) entre cada una de las bornas de la batería y el chasis del vehículo, también deberá ser inferior a 0,2 julios.

$$TE = 0,5 \times C_x \times V_b^2$$

$$TE_{y1} = 0,5 \times C_{y1} \times V_1^2$$

$$TE_{y2} = 0,5 \times C_{y2} \times V_2^2$$

- Deberá emplearse el grado de protección IPXXB para evitar el contacto directo con partes activas de alta tensión. Además, como protección contra los choques eléctricos que pudieran producirse por un contacto indirecto, la resistencia entre todas las partes conductoras expuestas y el chasis eléctrico deberá ser inferior a 0,1 ohmios con un flujo de corriente mínimo de 0,2 amperios. Este requisito se dará por satisfecho si la conexión galvánica se ha efectuado mediante soldadura.
- Si los buses de alta tensión de AC y de DC están aislados galvánicamente entre sí, la resistencia de aislamiento entre el bus de alta tensión y el chasis eléctrico deberá tener un valor mínimo de 100 Ω/V de la tensión de trabajo, en el caso de los buses de DC, y de 500 Ω/V de la tensión de trabajo, en el caso de los buses de AC.
- Si los buses de alta tensión de AC y de DC están conectados galvánicamente, la resistencia de aislamiento entre el bus de alta tensión y el chasis eléctrico deberá tener un valor mínimo de 500 Ω/V de la tensión de trabajo. Sin embargo, si todos los buses de alta tensión de AC tienen un grado de protección IPXXB, o si la tensión AC es igual o inferior a 30 V tras el impacto del vehículo, la resistencia de aislamiento entre el bus de alta tensión y el chasis eléctrico deberá tener un valor mínimo de 100 Ω/V de la tensión de trabajo.

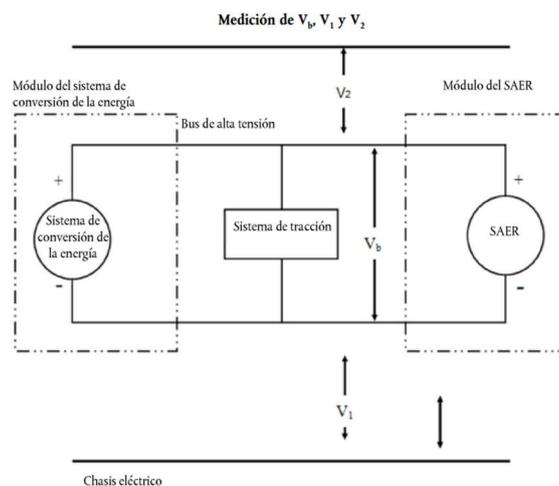


Figura 10.35: Tensiones en el bus de alimentación y entre cada uno de los hilos del bus de alimentación y el chasis del vehículo.

Ejemplo: medición de la energía del bus de alta tensión almacenada en los condensadores X

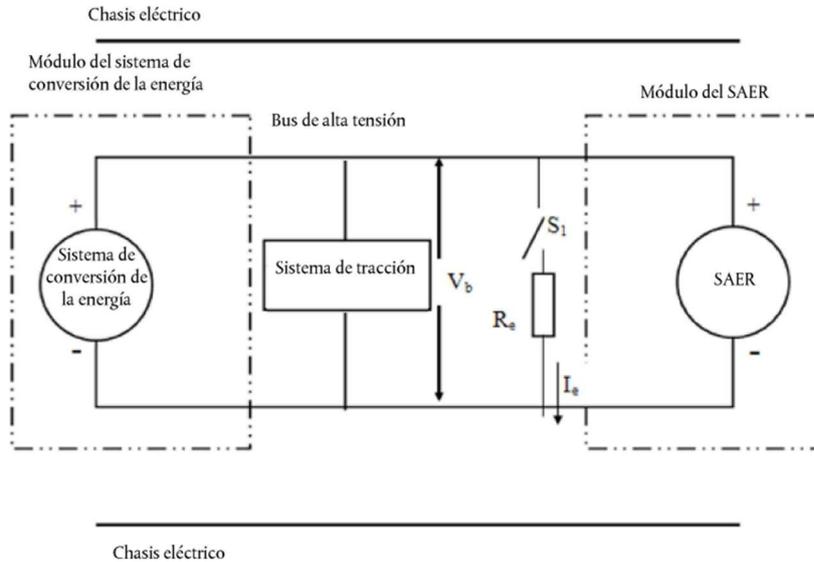


Figura 10.36: Prueba de medición de energía almacenada en el bus de alimentación y entre cada uno de los hilos del bus y el chasis del vehículo en caso de impacto frontal o lateral.

El propio reglamento define «alta tensión», cuando la tensión de trabajo es mayor de 60 V y menor o igual a 1 500 V de corriente continua (DC) y mayor de 30 V y menor o igual a 1 000 V de corriente alterna (AC), siendo estos últimos valores eficaces (rms).

10.7.1. Algunas consideraciones de interés sobre los reglamentos 94 y 95 del CEPE.

El Reglamento número 94 tiene fecha de 2018 mientras el Reglamento número 95 está editado en 2021. Se observan entre ambos Reglamentos algunas diferencias:

- El Reglamento 95 especifica claramente que la desconexión ha de llevarse a cabo no antes de 10 segundos tras la colisión, mientras que el Reglamento 94 dice textualmente, no antes de 5 segundos después de la colisión.
- El Reglamento 95 dice de manera explícita que la tensión ha de caer por debajo de 60 voltios DC antes de que transcurra un minuto. En el Reglamento 94 esta cuestión no queda suficientemente clara.
- Sobre la energía almacenada en el bus de alta tensión, así como en las capacidades correspondientes a los buses de alta tensión, el Reglamento número 94 señala una energía de 2,0 julios y en el Reglamento número 95 este valor es de 0,2 julios.
- En relación con la evaluación de la energía, para el Reglamento 95 los límites de integración t_c y t_h han de cumplir:

$$10 \text{ segundos} \leq t_c \leq 60 \text{ segundos (no antes de 10 segundos)}$$

$$10 \text{ segundos} \leq t_h \leq 60 \text{ segundos (máximo 1 minuto para que la tensión caiga)}$$

$$t_c + t_h \leq 60 \text{ segundos}$$

- e) La energía almacenada en las capacidades del circuito eléctrico según figura en el Reglamento 94 son:

$$TE = 0,5 \times C_x \times (V_b^2 - 3\,600)$$

$$T_{ey1} = 0,5 \times C_{y1} \times (V_1^2 - 3\,600)$$

$$T_{ey2} = 0,5 \times C_{y2} \times (V_2^2 - 3\,600)$$

Estas expresiones evalúan la variación de energía almacenada en las diferentes capacidades con el cambio de tensión, de la tensión nominal de la batería a una tensión de 60 voltios considerada como el umbral de baja tensión. Da por hecho que la tensión en el instante t_h es de 60 voltios, pero podría suceder que fuera menor o que tuviera que ser menor forzosamente para cumplir el requisito de los 2,0 julios.

El Reglamento 95 sin embargo señala para la estimación de las energías almacenadas en las capacidades del bus de alimentación y entre hilos del bus de alimentación y el chasis:

$$TE = 0,5 \times C_x \times V_b^2$$

$$T_{ey1} = 0,5 \times C_{y1} \times V_1^2$$

$$T_{ey2} = 0,5 \times C_{y2} \times V_2^2$$

Esta formulación parece más coherente que la anterior, siendo V_b , V_1 y V_2 las tensiones para las que la energía almacenada es igual o menor que 0,2 julios.

También en el apartado 2.4.5. de Reglamento 95 se incluye la siguiente Nota: Cuando una parte activa de DC de tal circuito eléctrico está conectada al chasis eléctrico y se aplica la condición específica de tensión, la tensión máxima entre cualquier parte activa y el chasis eléctrico es ≤ 30 V CA (rms) y ≤ 60 V DC.

10.7.2. Estimaciones en relación con los reglamentos 94 y 95 del CEPE.

Un trabajo reciente publicado en el 2022 IEEE 12th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE) celebrado durante el mes de septiembre de 2022 en Malaysia, ha estimado en 4.700 μ F la capacidad del bus de alimentación en continua de una batería de 360 voltios complementada con supercondensadores. De acuerdo con la formulación del Reglamento número 95 del CEPE, la energía almacenada en esa capacidad vendría dada por:

$$TE = 0,5 \times C_x \times V_b^2$$

Y ha de ser menor de 0,2 julios.

$$TE = 0,5 \times 4.700 \mu\text{F} \times V_b^2 \leq 0,2 \text{ julios}$$

Lo que significa que la tensión de la batería ha de caer antes de 1 minuto tras la colisión o el impacto, a un valor aproximado:

$$V_b \leq 9 \text{ voltios}$$

Por otra parte, si fijamos la tensión V_b en 60 voltios, se tendría:

$$TE = 0,5 \times C_x \times 3.600 \leq 0,2 \text{ julios}$$

Con lo que el valor de la capacidad en el bus de alimentación habría de ser:

$$C_x \leq 100 \mu\text{F}$$

Para las capacidades entre barras del bus de alimentación y el chasis, puesto que han de cumplir los mismos niveles de tensión, valdrían las mismas estimaciones.

Sobre la evaluación de la energía total después del choque mediante la fórmula:

$$TE = \int_{t_c}^{t_h} V_b \cdot I_e \cdot dt$$

Suponiendo que la tensión y la corriente en el instante de la desconexión t_c han de ser elevadas. De acuerdo con las capacidades en el bus de alimentación estimadas en este mismo apartado, las constantes de tiempo del circuito han de ser del orden de microsegundos, por lo que los niveles de tensión y de corriente caerán muy rápidamente hacia valores por debajo del umbral de los 60 voltios. Dado que se trata de un circuito RC, se puede aproximar la integral de energía por la expresión:

$$TE = \int_{t_c}^{t_h} V_b \cdot I_e \cdot dt = V_b \cdot I_e \cdot 3\tau$$

Donde se ha considerado:

$$\tau = RC$$

$$t_c + 3\tau \approx t_h$$

Para valores de $R = 0,01 \Omega$ (resistencia de cortocircuito de desconexión), $C_x = 10 \mu\text{F}$ y potencia media 100 kw en el instante de la colisión t_c , la energía al cabo de un tiempo 3τ vendrá dada por:

$$\tau = 0,01 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 10^{-7} \text{ s}$$

$$3\tau = 3 \cdot 10^{-7} \text{ s}$$

$$\text{Energía en el intervalo } [t_c, t_c + 3\tau] = 100 \text{ kw} \cdot 3\tau = 0,03 \text{ julios}$$

Con valores dentro de estos órdenes de magnitud se cumpliría lo establecido en los Reglamentos 94 y 95 incluso con potencias elevadas.

10.8. Red de sensores de la batería.

El Sistema de Gestión de Batería (BMS) monitoriza y controla la carga y descarga de una batería para asegurar su correcto funcionamiento y, en su caso, permitir un mantenimiento del sistema al menor coste posible, advirtiendo de un fallo antes de que se produzca una avería grave o irreparable. El BMS se utiliza, por lo general, en vehículos eléctricos, fuentes de alimentación ininterrumpida y en los dispositivos portátiles que empleamos a diario. Un BMS sencillo mediría tensión y pondría fin a la carga cuando se alcance el voltaje especificado. El BMS de un vehículo eléctrico mide voltaje, corriente y temperatura de cada celda de la batería. Los datos medidos son procesados y analizados por la denominada Unidad Maestra del Sistema de una forma fiable y también, segura.

Con carácter general, un Sistema de Gestión de la Batería protege la batería de cualquier tipo de daño, gestiona de forma eficiente los procesos de carga y descarga para prolongar la vida útil de la batería y mantiene la batería en un estado tal que pueda cumplir con todos los requisitos funcionales para los que se ha fabricado. Para conseguir estos objetivos, el Sistema de Gestión de la Batería tiene que incorporar las siguientes funciones:

Medida de la tensión y la corriente de las celdas: Durante la carga ha de informar al equipo que suministra la energía del estado de la carga, así como de la temperatura de la batería. Tensión y corriente con la batería cargada y tensión y corriente en descarga informando al usuario de la autonomía que le queda, lo que se denomina Estado de Salud (SoH) de la batería.

Medida de la temperatura de la batería. Es necesario mantener la temperatura de la batería dentro de los márgenes recomendados para su funcionamiento.

Equilibrado de celdas: Las pequeñas diferencias entre los niveles de carga de celdas debidas a tolerancias de fabricación o a las condiciones de funcionamiento, tienden a ir haciéndose mayores en cada ciclo de carga – descarga causando finalmente el fallo prematuro de la batería.

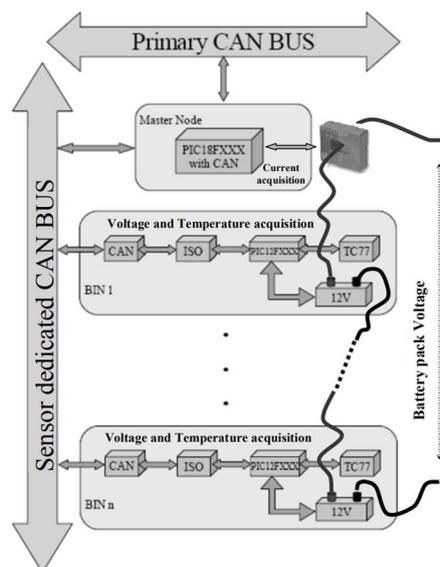


Figura 10.37: Arquitectura de un Sistema de Gestión de la Batería (BMS) del año 2008.

El Sistema de Gestión de la Batería (BMS) asegura el correcto funcionamiento de la batería y transmite a otros sistemas datos como el estado de carga (SoC), temperatura, estado de cada una de las celdas, etc. Es un sistema de carácter distribuido y muy complejo. En el año 2008 se ideó la arquitectura para un BMS que se muestra en la figura anterior.

Se trata de una red de sensores compuesta por una capa física de tipo CAN (Controller Area Network). Los sensores están integrados en un sistema de adquisición de datos basado en un microcontrolador de 8 bits PIC12XXX, formando un nodo inteligente de batería. La batería se divide en bancos, de manera que a cada banco le corresponde un nodo inteligente que controla su tensión y su temperatura. El módulo de comunicación o transceptor CAN de cada uno de los nodos, se conecta con la Unidad de Control en el nodo maestro. El citado módulo de comunicación se encuentra aislado digital y eléctricamente de su microcontrolador correspondiente.

Actualmente, la arquitectura es similar a la que se acaba de describir. El número total de elementos de la batería se divide en módulos para reducir el cableado, estando formado cada módulo por un número de celdas entre 6 y 16 y supervisado por una Unidad de Supervisión de Celdas (CSU). Igual que en la arquitectura anterior, los módulos se encuentran aislados digital y eléctricamente entre sí.

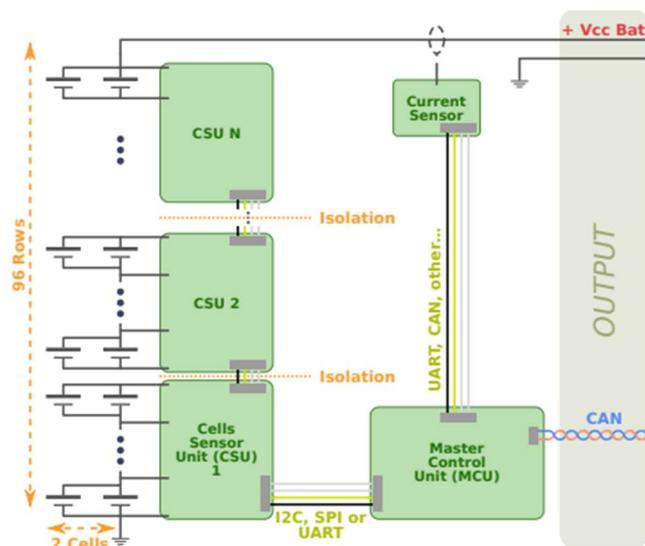


Figura 10.38. Vista simplificada de un Sistema de Gestión de Batería (BMS) para una configuración de elementos 96s2p.

Las CSU's se comunican con una Unidad Maestra de Control (MCU) a través de una topología en cadena por medio de un bus de baja velocidad I2C, SPI (Serial Peripheral Interface) mayor velocidad y menor consumo que el anterior o UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) que se emplea cuando no se requiere que la velocidad sea elevada y funciona convirtiendo los datos serie recibidos de los periféricos en paralelo y transformando la información transmitida por la MCU a los periféricos de paralelo a serie.

En los vehículos eléctricos, el sistema de gestión de la batería BMS, ha de estar dotado de interfaces externas, para enviar información a otros sistemas como los que controlan el funcionamiento de los dispositivos motores y al salpicadero para que el conductor del coche esté informado del estado de la batería de su automóvil. Hoy en día, la interfaz más utilizada en este ámbito es la denominada CAN (Controller Area Network).

El bus CAN (Controller Area Network) es un bus de comunicación serie ampliamente utilizado en aplicaciones de control en tiempo real en el sector de la automoción. Trabaja a velocidades de hasta 1 Mbps. La principal aplicación es establecer intercambio de datos entre sistemas y subsistemas de un mismo vehículo para conseguir un funcionamiento adecuado del mismo. Las redes que usan el bus CAN reducen el cableado entre componentes y facilitan la gestión de los datos. CAN es un protocolo de comunicación serie diseñado para transmisión de datos a alta velocidad en entornos complejos.

El bus SPI es full-duplex y síncrono, sin embargo, presenta el inconveniente de precisar una línea de comunicación para cada dispositivo conectado, lo que no sería práctico en el caso de manejar un número elevado de dispositivos conectados.

10.8.1. Sensores de tensión.

Existen actualmente dos métodos de medida de la tensión de una celda conectada en serie con el resto de las celdas que componen la batería: El método diferencial y el método de corriente.

a) Método de corriente.

Un ejemplo de este método es el montaje siguiente:

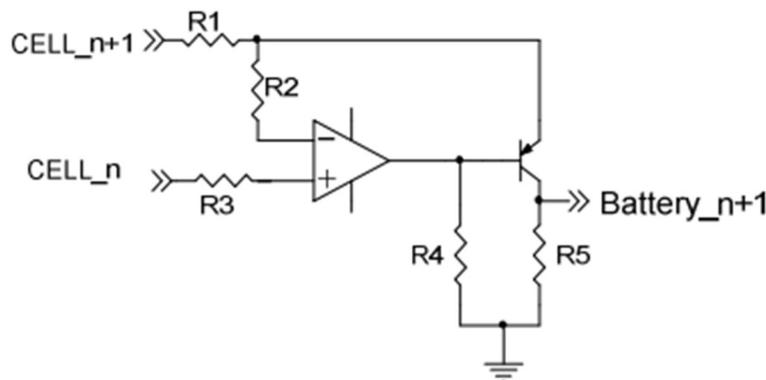


Figura 10.39: Medida de la tensión de una batería por el método de la corriente.

Debido a la realimentación salida - entrada del circuito, la tensión en el nodo R1, R2 es la misma que en el nodo de entrada de R3. Por tanto, si la tensión de la batería en el nivel de la celda ***n+1*** es la correcta, la corriente de emisor del transistor de salida será la siguiente:

$$I_E = \frac{V_{n+1} - V_n}{R_1}$$

Donde:

V_n : Tensión en la batería en el nivel de la celda ***n***

V_{n+1} : Tensión en la batería en el nivel de la celda ***n+1***

Y, en consecuencia, si denominamos Bat_{n+1} a la tensión de la celda n+1, se tiene:

$$Bat_{n+1} = \frac{V_{n+1} - V_n}{R_1} \cdot R_5$$

Si la celda n+1 está en corto, o con tensión próxima a cero voltios, la corriente de emisor será prácticamente nula y el transistor estará en la región de corte, siendo la tensión de la celda $Bat_{n+1} = 0$.

Por otra parte, si las resistencias R1 y R5 son iguales:

$$Bat_{n+1} = V_{n+1} - V_n$$

Que es la tensión real en la celda n+1.

a) Método diferencial.

El montaje muestra un amplificador operacional trabajando en modo comparador, de forma que la salida ataca a un dispositivo realimentado.

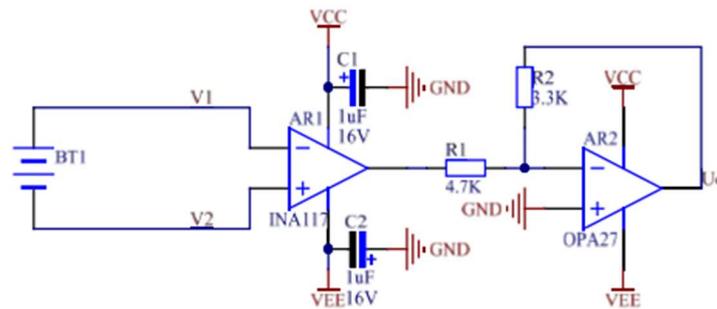


Figura 10.40: Medida de la tensión de una batería por el método diferencial.

La salida de la primera etapa es:

$$U_1 = V_1 - V_2$$

La salida de la segunda etapa del circuito de detección de tensión es:

$$U_0 = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1} = (V_1 - V_2) \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

La segunda etapa aísla eléctricamente la entrada de la salida, evitando una conexión eléctrica directa entre las tensiones de entrada y la salida.

El dispositivo utiliza un circuito integrado OPA27, que es un amplificador operacional de precisión y otro circuito INA117P que integra un amplificador diferencial.

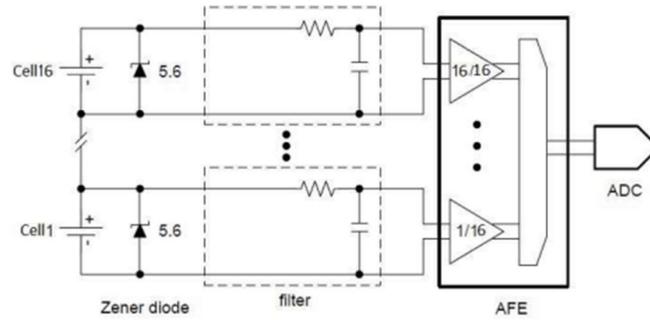


Figura 10.41: Control de tensión de 16 celdas con etapa de conversión A/D.

En ambos métodos, la salida se conecta a un conversor analógico digital, previo filtrado de ruido y aislamiento digital, en este caso con diodo Zener, como se muestra en la figura.

10.8.2. Sensores de corriente.

Los sensores de corriente se disponen normalmente en una corona circular sobre un soporte dieléctrico, como se muestra en la figura. Este tipo de montaje favorece la medida aprovechando al máximo el campo magnético generado por la corriente a medir, que circularía por el centro de la estructura circular.

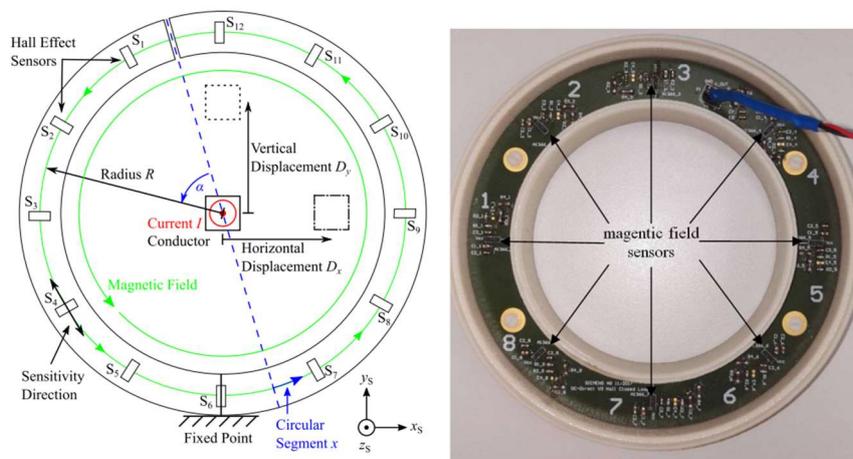


Figura 10.42: Disposición en círculo de los sensores de corriente.

a) Sensores de efecto Hall.

Los sensores de efecto Hall tienen un esquema funcional como el que se muestra en la figura.

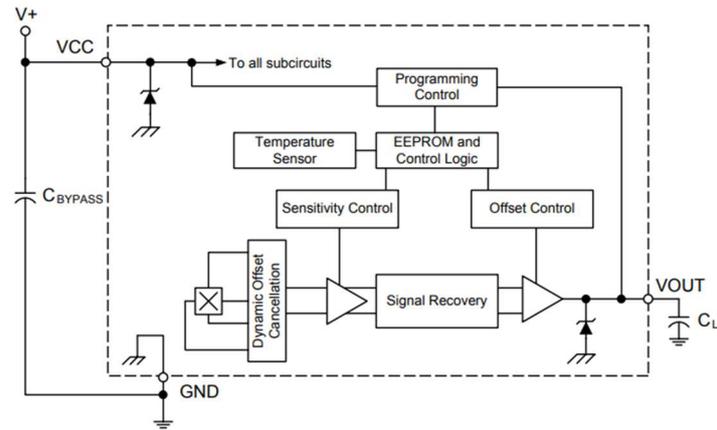


Figura 10.43: Diagrama de bloques de un sensor de corriente de efecto Hall.

El sensor de efecto Hall alojado en el circuito proporciona un voltaje de salida proporcional al campo magnético que incide en la zona sensible del dispositivo. Trabajan dentro de un amplio margen de temperaturas: -40 °C a 85 °C.

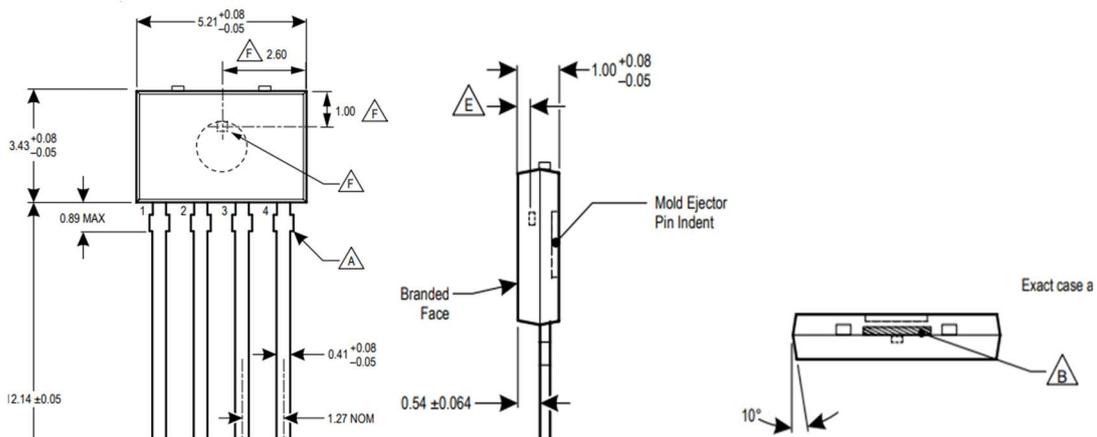


Figura 10.44: Detalle de un circuito integrado para detección de corriente por efecto Hall.

Tienen una sensibilidad máxima de 10 mV/G (A1366) ó 25 mV/G (A1369), y una tensión de salida en reposo de 2,5 V, aproximadamente la mitad de la tensión de alimentación. De acuerdo con la definición de sensibilidad, el campo máximo que se puede medir es:

$$B_{max} = \frac{V_{CC} - V_0}{\text{Sensibilidad}}$$

Donde V_0 es la tensión de salida en estado de reposo o en ausencia de campo externo.

En este caso, para el circuito A1366:

$$B_{max} = \frac{(5 - 2,5) V}{100 \text{ mV/mT}} = 25 \text{ mT}$$

Y para el circuito A1369:

$$B_{max} = \frac{(5 - 2,5) V}{250 mV/mT} = 10 mT$$

Aplicando la ley de Ampere:

$$B_{m\acute{a}x} = \frac{\mu \cdot I_{m\acute{a}x}}{2 \cdot \pi \cdot R}$$

Suponiendo $\mu = \mu_0$ y un radio de 3 cm en la estructura de medida:

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot B_{m\acute{a}x}}{\mu_0}$$

Se obtienen valores para el campo máximo de 1.500 A (A 1366) y 3.750 A (A1369) que es un rango suficiente para los valores de corriente habituales en los vehículos eléctricos. Sin embargo, el mayor inconveniente reside en el bajo nivel de señal obtenido, entre 100 y 250 mV por mT. Estos niveles de señal pueden verse enmascarados o falseados por algunos factores como el ruido de origen térmico o mecánico, lo que se une al elevado valor de la tensión de salida en estado de reposo, pudiendo dar lugar a imprecisiones en las medidas.

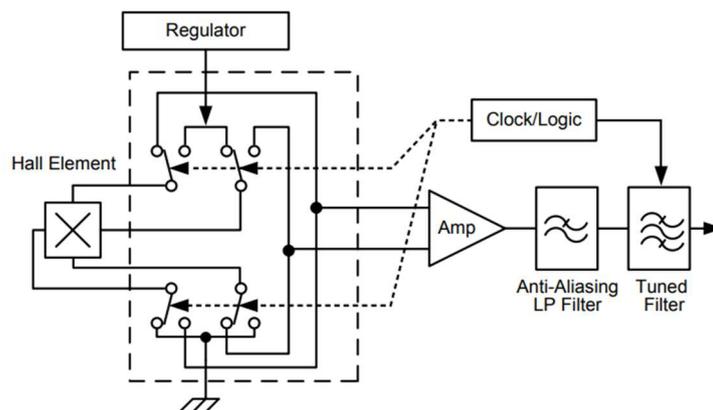


Figura 10.45: Filtrado de ruido en un sensor de corriente de efecto Hall.

El circuito A1366 intenta resolver el problema procediendo a muestrear la señal con impulsos de duración finita y modular la señal resultante en baja frecuencia. Después, se filtra con un filtro paso – bajo que elimina las componentes de ruido de alta frecuencia. Posteriormente, se procede a realizar un filtrado paso – banda y queda la señal proporcional al campo magnético y a la corriente que se pretende medir.

b) Sensores de campo magnético.

El circuito DRV 425 tiene la configuración que se muestra en la figura. La salida integrada del sensor de campo magnético pasa a través de un seguidor y alimenta la bobina de compensación a través de una resistencia R_{shunt} . La situación finaliza cuando el flujo magnético producido por la bobina de compensación anula al generado por el campo externo en el sensor. La tensión en la resistencia de shuntado se amplifica en el operacional con una ganancia de 4 V/V.

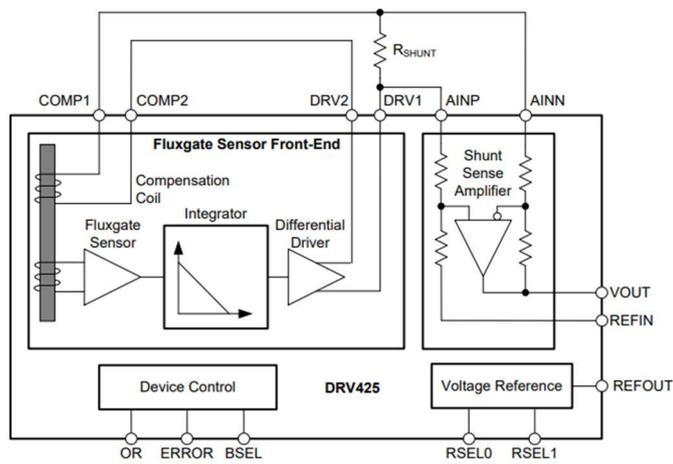


Figura 10.46: Diagrama de bloques de un sensor de campo magnético.

La señal de salida del operacional es proporcional a la corriente y al campo magnético medido. El amplificador operacional cumple las siguientes relaciones:

Para la entrada no inversora AINP:

$$G = \frac{R_2}{R_1} = 4$$

Para que el amplificador funcione en modo diferencial, ha de cumplirse la condición de puente equilibrado, que vendrá dada por:

$$G = \frac{R_4 + R_5}{R_{SHUNT} + R_3} = 4$$

De donde se obtiene:

$$R_5 = 4 \cdot R_{SHUNT}$$

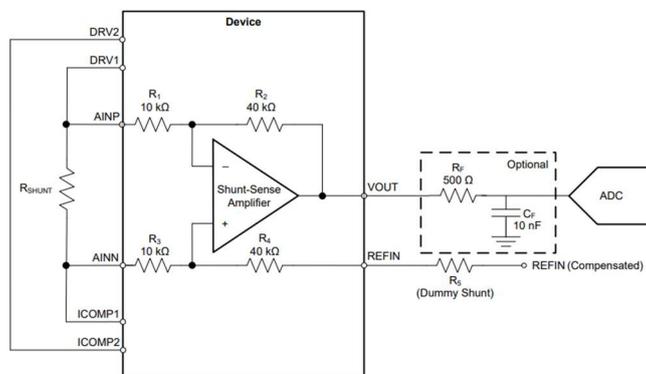


Figura 10.47: Detalle del bloque amplificador de un sensor de campo magnético.

El terminal de tensión de referencia de entrada REFIN, normalmente va unido a la tensión de referencia de salida REFOUT que está programada para dar una tensión igual a la mitad de la tensión de alimentación en continua: $V_{DD}/2$. Esta conexión mejora el coeficiente de rechazo de funcionamiento en modo común. La sensibilidad del dispositivo es de 1.100 mV/mT , la tensión de salida en reposo es nula en este caso y el campo máximo que se puede medir vendrá dado por:

$$B_{max} = \frac{V_{CC}}{\text{Sensibilidad}} = \frac{5 \text{ V}}{1.100 \text{ mV/mT}} = 4,5 \text{ mT}$$

Suponiendo, como en el caso anterior de sensores de efecto Hall, $\mu = \mu_0$ y un radio de 3 cm en la estructura circular para la medida:

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot B_{m\acute{a}x}}{\mu_0} = 675 \text{ A}$$

El DRV puede montarse en la misma barra de cobre que va conectada a los bornes de la batería. Como se indica en la figura:

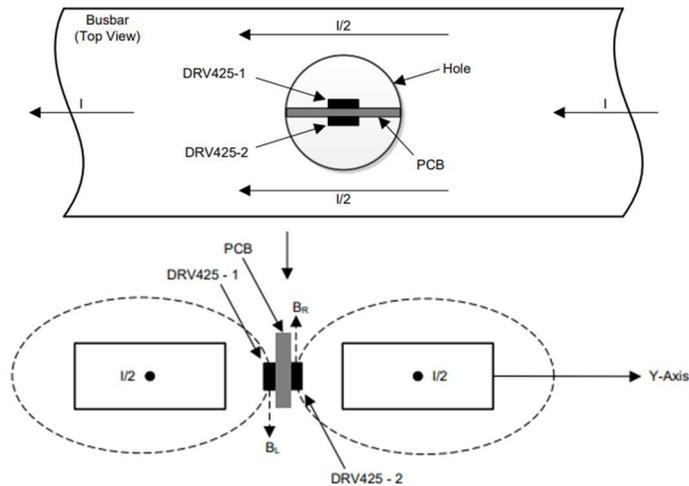


Figura 10.48: Montaje en busbar de sensores de campo magnético.

Para este tipo de montaje, la corriente máxima que se podría medir sería, suponiendo una distancia entre las líneas de campo y el detector de 4 mm:

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot B_{m\acute{a}x}}{\mu_0} = 90 \text{ A}$$

Este montaje sería adecuado para medidas de corrientes parciales dentro del conjunto de pilas o de bolsas de la batería, pero no para la corriente total de la batería.

10.8.3. Sensores de temperatura.

El circuito utiliza una resistencia variable con la temperatura o termistor para medir la temperatura de un dispositivo. La salida del divisor de tensión del que forma parte el termistor va variando con la temperatura y por lo tanto varía la componente continua de la señal a la entrada del sistema de medida. Esto provoca el cambio en la anchura de los impulsos modulados en duración PWM.

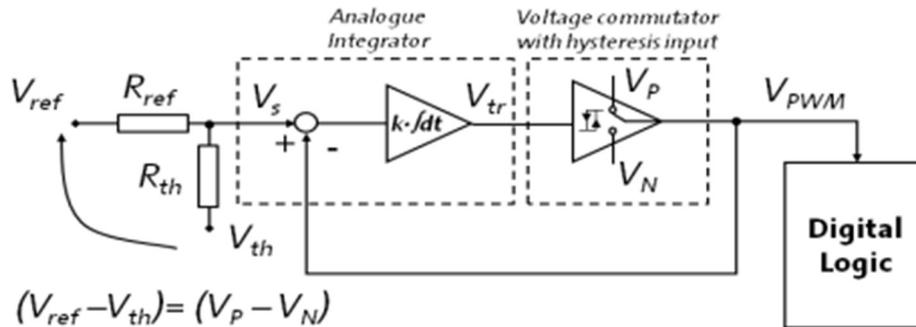


Figura 10.49: Diagrama funcional de un sensor térmico basado en termistores.

El valor medio o componente continua de la señal cuadrada generada por el circuito anterior es:

$$(V_{ref} - V_{th}) \cdot \frac{R_{th}}{R_{th} + R_{ref}} + V_{th}$$

Si se fuerza que la tensión a la entrada del divisor resistivo sea igual a la diferencia de tensiones del conmutador de tensión de salida:

$$(V_{ref} - V_{th}) = (V_P - V_N)$$

La señal continua de entrada en el sumador:

$$V_S = (V_P - V_N) \cdot \frac{R_{th}}{R_{th} + R_{ref}} + V_N$$

Para una señal cuadrada periódica de periodo T , amplitud A y duración t_{on} , el valor de la componente continua viene dado por la expresión:

$$V_S = A \cdot \frac{t_{on}}{T} + V_N$$

Definiendo el ciclo de trabajo como:

$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

Y teniendo en cuenta que la amplitud de la señal en nuestro caso es:

$$A = (V_P - V_N)$$

Se llega a la expresión:

$$V_S = (V_P - V_N) \cdot D + V_N = V_P \cdot D + V_N \cdot (1 - D)$$

En consecuencia, el valor del ciclo de trabajo viene dado por la relación del divisor de tensión resistivo:

$$D = \frac{R_{th}}{R_{th} + R_{ref}}$$

De esta forma, si varía la resistencia del termistor estamos variando el ciclo de trabajo y la duración de los impulsos a la salida del conmutador con histéresis en la respuesta a la señal de entrada.

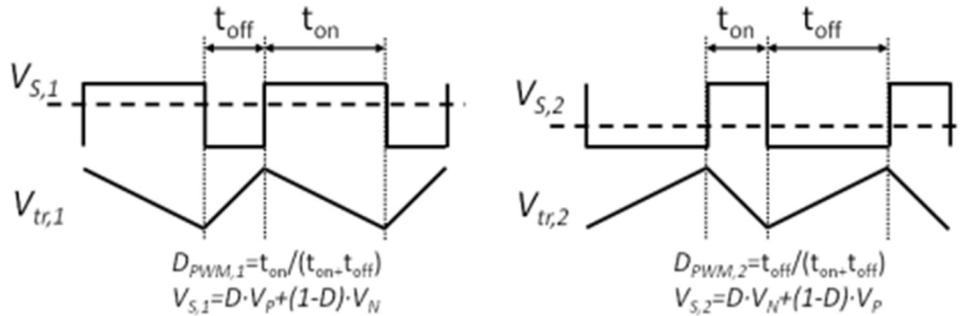


Figura 10.50: Diagrama de señales en funcionamiento normal y complementario.

Con un montaje idéntico, pero invirtiendo las entradas, se obtiene una señal complementaria de la anterior. Las señales obtenidas se comparan con una señal de reloj que dará la magnitud asociada a la variación de la temperatura. La resolución del dispositivo depende de la mínima variación medible del ciclo de trabajo, que viene dada por:

$$\Delta D = \frac{f_{PWM}}{f_{clk}}$$

Para frecuencias de reloj de varios algunos mega hertzios, la resolución es aproximadamente de un 0,1 %.

La implementación de las señales de entrada puede llevarse a cabo mediante el siguiente esquema:

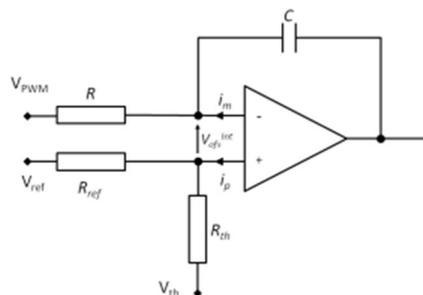


Figura 10.51: Implementación práctica del bloque de entrada del sensor térmico.

La señal PWM está conectada a la entrada inversora del integrador. En la entrada no inversora se aplica una señal de continua $V_P - V_N$ a través de un divisor de tensión. Al variar R_{th} varía la componente continua de la señal integrada y por tanto varían los puntos de conmutación en el amplificador con respuesta en histéresis en la señal de entrada, variando el ancho de los impulsos de la señal modulada PWM.

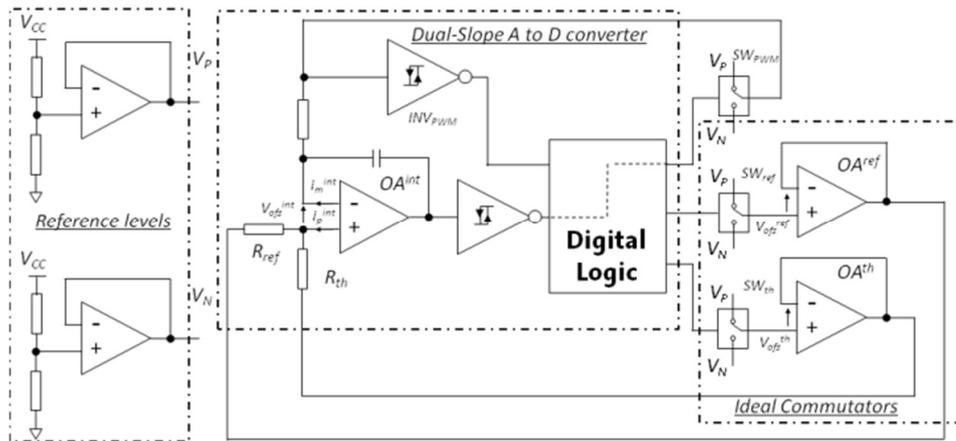


Figura 10.52: Implementación práctica del sensor completo.

Un esquema más detallado del sistema es el que se muestra en la figura anterior. En un primer bloque puede verse como los niveles de referencia V_P y V_N se obtienen de un divisor y un seguidor de tensión. La salida integrada de las dos señales complementarias se conecta a sendos conmutadores con respuesta en histéresis a la señal de entrada y obteniendo dos señales cuadradas moduladas en duración (PWM). Los niveles de tensión V_P y V_N se conectan al termistor y a la resistencia de referencia a través de un seguidor de tensión para evitar que el valor de las tensiones se vea alterado por las resistencias tanto térmica como de referencia.

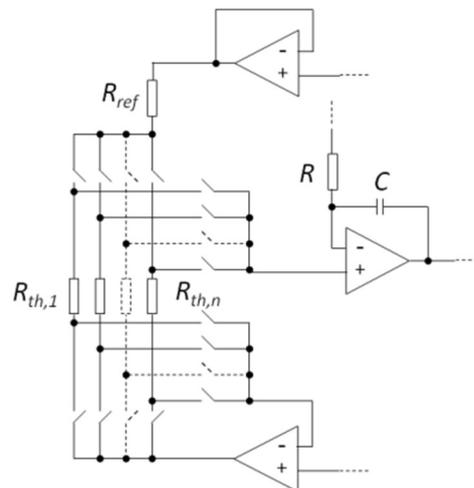


Figura 10.53: Implementación práctica de una arquitectura multicanal.

En la figura anterior puede verse un montaje multicanal del dispositivo descrito en este apartado. A cada canal de medida le corresponde un termistor determinado y se van midiendo secuencialmente a la entrada del integrador las temperaturas en distintos puntos del sistema.

10.8.4. Gestión de la temperatura.

La temperatura es el primer factor que afecta al funcionamiento y al periodo de vida útil de una batería. Las baterías de iones de litio tienen que funcionar entre 15 y 45 grados centígrados para una puesta en servicio óptima.

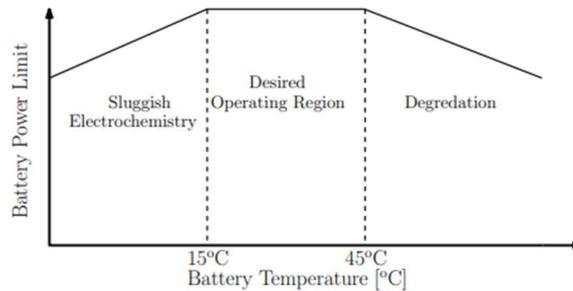


Figura 10.54: Temperatura de funcionamiento de una batería de iones de litio.

La temperatura de las celdas ha de mantenerse dentro de este rango de temperaturas de funcionamiento para conseguir el máximo nivel de operación, seguridad y fiabilidad independientemente de las condiciones de funcionamiento. Una gestión deficiente de la temperatura afecta a la potencia de carga y de descarga, al ciclo de vida útil, al equilibrado de las celdas y a la capacidad tanto en descarga como en carga rápida de la batería. En consecuencia, parece lógica la instalación de un sistema de gestión de la temperatura que mejore el funcionamiento y aumente el ciclo de vida útil de la batería.

La energía almacenada y el ciclo de vida de las celdas se reduce de forma drástica cuando la puesta en marcha de la batería se lleva a cabo fuera de la banda de temperaturas ya mencionada. Las temperaturas situadas por encima de la banda, las temperaturas altas, dan lugar al crecimiento de la capa de electrolito sólido y originan un aumento de la resistencia interna del dispositivo, lo que se traduce en una disminución de la potencia máxima que puede entregarse a la carga. En condiciones extremas de temperatura, la capa de electrolito puede fundirse y provocar el cortocircuito de la celda con el consiguiente calentamiento de esa zona de la batería. En caso de que en las proximidades del vehículo se mantengan durante un tiempo prolongado las altas temperaturas, mayores de 60 grados centígrados, existe riesgo de explosión o de incendio. Para temperaturas muy bajas durante la carga, en torno a los cero grados centígrados, puede depositarse litio metálico en los electrodos, generando una disminución de la capacidad de la batería.

Una gran variación de temperatura puede ocasionar que la carga y descarga de unas celdas se efectúe a distinta velocidad que otras, alterando el funcionamiento correcto de la batería. La variación de temperatura dentro de una celda debe mantenerse entre 5 y 10 grados centígrados, mientras la variación de temperatura en la batería no puede salir de un margen entre 3 y 5 grados. Una diferencia de 5 grados produce una degradación del 10 % en la capacidad de potencia y un 25 % en la dinámica de envejecimiento por efecto térmico. Igualmente, la tasa de autodescarga puede verse afectada para largos periodos de tiempo, reduciéndose el estado de carga efectivo. Un incremento de la temperatura de la celda entre 10 y 15 grados puede reducir la vida de la celda entre un 30 y un 50 %.

En el proceso de carga la temperatura de la batería tiene una gran importancia ya que cuando se superan los 30 grados centígrados, la eficiencia del estado de carga de las celdas disminuye como se muestra en la figura siguiente.

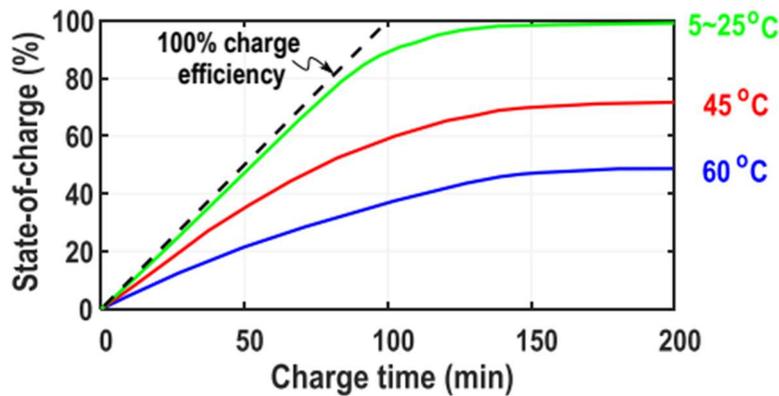


Figura 10.55: Estado de carga en función de la temperatura.

Esta situación justificaría la monitorización de la temperatura de la batería durante el proceso de carga para evitar averías incluso explosiones cuando la batería se somete a temperaturas extremas. Un control térmico de la carga permitiría detener el proceso cuando se alcancen temperaturas elevadas.

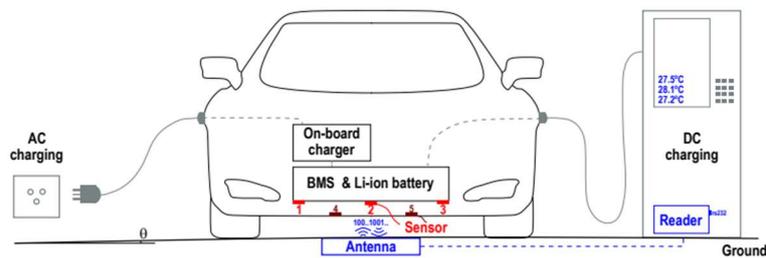


Figura 10.56: Ejemplo de monitorización de la carga de una batería en un dispensador público de energía eléctrica.

Desde el punto de vista comercial, los procesos a velocidad 3C son actualmente los más rápidos. Durante los procesos de carga o descarga el incremento de temperatura varía entre los 10 grados para un proceso 1C y los 25 grados para un proceso 3C.

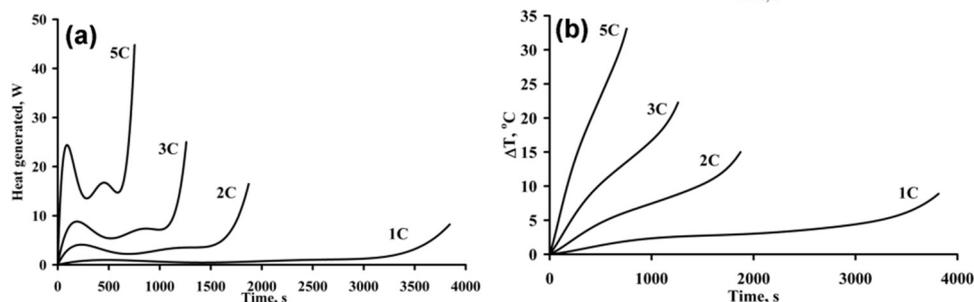


Figura 10.57: Caracterización térmica de los procesos de descarga.

Por esta razón los coches eléctricos actuales, cuando se trata de baterías de capacidad de almacenamiento de energía baja o media, hasta 50 kwh aproximadamente, utilizan el aire acondicionado del vehículo para la refrigeración de las baterías y si la capacidad de almacenamiento de energía es elevada, mayor de 50 kwh, suele emplearse un circuito de refrigeración para las baterías con un fluido líquido, normalmente agua o agua mezclada con algún alcohol.

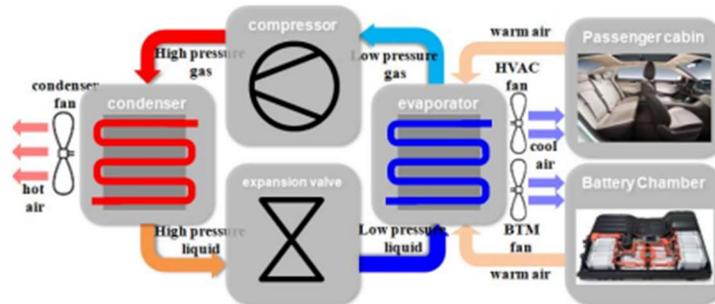


Figura 10.58: Utilización del aire acondicionado del vehículo para refrigerar la batería.

El aire acondicionado de un coche es similar al que puede haber en nuestras casas. Un evaporador intercambia el aire del interior de la estancia o la cabina por aire frío generado en el evaporador, el fluido refrigerante líquido se enfría. Tras el paso por un compresor, el fluido se vuelve gaseoso y su temperatura sube. A su paso por el condensador, pierde temperatura y nuevamente es líquido. Finalmente, al atravesar la válvula de expansión se enfría para volver al evaporador. La válvula de expansión produce un cambio brusco en la sección de la tubería por la que circula el fluido refrigerante, produciendo una disminución de la presión y la temperatura.

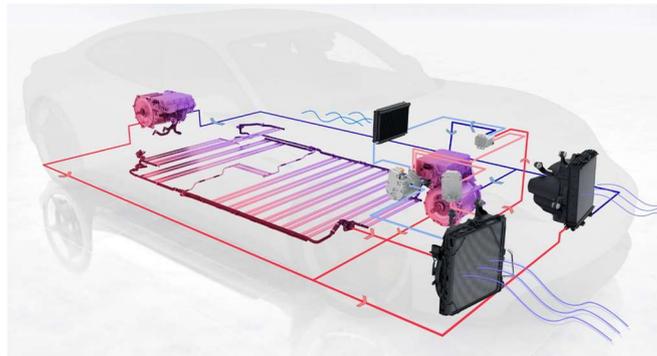


Figura 10.59: Representación esquemática del sistema de gestión de la temperatura de batería en un vehículo Porsche Taycan.

El Porsche Taycan, con una potencia que puede llegar a los 560 kw, va equipado con un sistema de refrigeración sofisticado. El caudal de fluido líquido se regula mediante tres bombas, la temperatura se controla con 10 sensores térmicos y tiene además dos ventiladores y un radiador al exterior.

Un análisis comparativo realizado en 2019 (IEEE Transportation Electrification Conference), muestra las diferencias entre la refrigeración por aire y por líquido refrigerante. El circuito de refrigeración utilizado se muestra en la siguiente figura. Un intercambiador de calor rebaja la temperatura del fluido refrigerante en el momento previo a entrar en el contenedor de la batería e inmediatamente después de que salga de ella. El líquido refrigerante empleado para rebajar la temperatura del fluido, tiene su propia refrigeración basada en un compresor y un intercambiador

de calor con el aire exterior. Una bomba, en el caso de fluido líquido (etanodiol) o un ventilador en el caso de fluido aire, permiten ajustar el caudal de entrada de fluido a la batería.

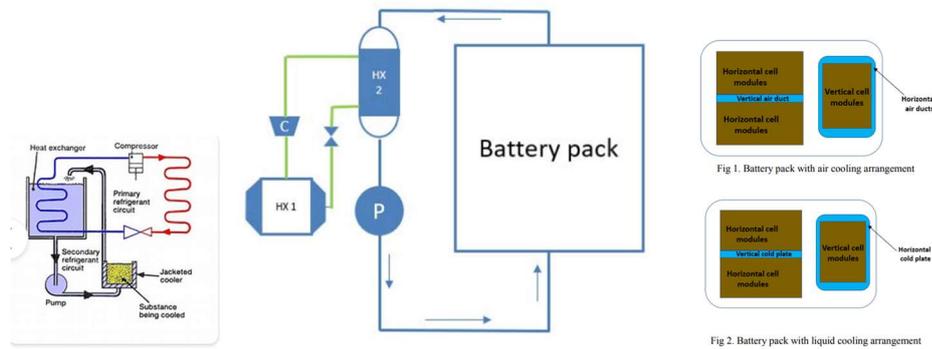


Figura 10.60: Montaje en laboratorio para comparar la refrigeración por aire con la refrigeración por líquido.

Los valores asignados a los parámetros para las pruebas son los que se reseñan en el siguiente cuadro:

PARÁMETRO	AIRE	LÍQUIDO
Temperatura ambiente	45 °C	45 °C
Caudal	57 pies cúbicos por minuto (CFM)	10 litros por minuto (LPM)
Temperatura del refrigerante a la entrada	10 °C	20 °C
Carga de calor	1kW	1kW
Coefficiente de transferencia de calor	6 W/m ² °K	181 W/m ² °K
Variación de la temperatura de las celdas en la batería (°C)	9	5
Variación de la temperatura en el interior de las celdas (°C/mm)	0,05	0,03
Tasa de descenso de la temperatura (°C/min)	0,02	0,07
Consumo adicional de potencia (kW)	1	0,4

Cuadro 10.41: Resultados del análisis comparativo de fluidos refrigerantes.

El coeficiente de transferencia de calor del aire es 30 veces menor que el de agua con etanodiol, pero se podría compensar con el hecho de que un pie cúbico por minuto (CFM) equivale aproximadamente a 30 litros por minuto (LPM) de caudal. Hay que tener en cuenta que el caudal de aire se refuerza 170 veces más que el de etanodiol y la temperatura de entrada del aire al circuito de refrigeración es 10 grados menor que la del agua con etanodiol. A pesar de lo cual, los resultados obtenidos permiten concluir, véase la tabla final, que el fluido líquido es mejor que el aire para la refrigeración de las baterías de los vehículos eléctricos.

Podríamos resumir los resultados de esta prueba diciendo que la velocidad de enfriamiento con líquido es mayor que con aire, la variación de temperatura de las celdas es casi el doble con aire que con refrigerante líquido e igual sucede en el interior de las celdas. También, es importante señalar que el consumo eléctrico del compresor y la bomba es mayor para el circuito de aire que el circuito con etanodiol.

Algún estudio reciente demuestra que la instalación de dispositivos pasivos radiadores de calor mejoran la temperatura de funcionamiento de la batería aumentando la superficie de radiación o incrementando el número de radiadores. Así por ejemplo, se demuestra que con celdas primáticas de 60 Ah es posible mantener la temperatura de las baterías entorno a los 50 grados con un sistema de refrigeración pasivo.

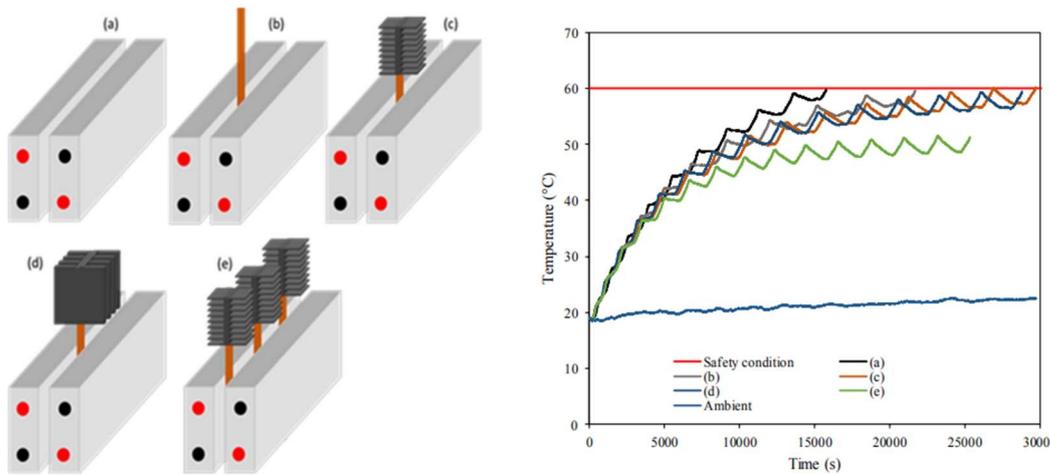


Figura 10.61: Sistema de refrigeración pasivo y evolución temporal de la temperatura en las celdas.

Utilizando fluido líquido como refrigerante, en base a algunos análisis realizados en 2017, se propuso como sistema de regulación de la temperatura una bandeja inferior donde discurre un serpentín con perfil en forma de U y pletina superior con una almohadilla térmica y unas aletas que se intercalan entre las celdas.

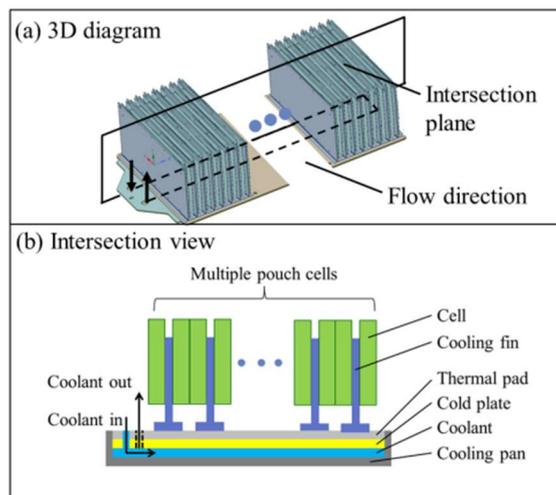


Figura 10.62: Sistema de refrigeración con fluido líquido circulando por la bandeja inferior de la envoltura de las celdas.

Las pruebas se realizaron en celdas de iones de litio, con consumos entre 20 y 60 amperios y se aplicaron incrementos de temperatura para simular el calor generado por los elementos eléctricos del circuito de refrigeración y por otros sistemas como el aire acondicionado del vehículo que puede insuflar aire caliente en la cavidad de las celdas.

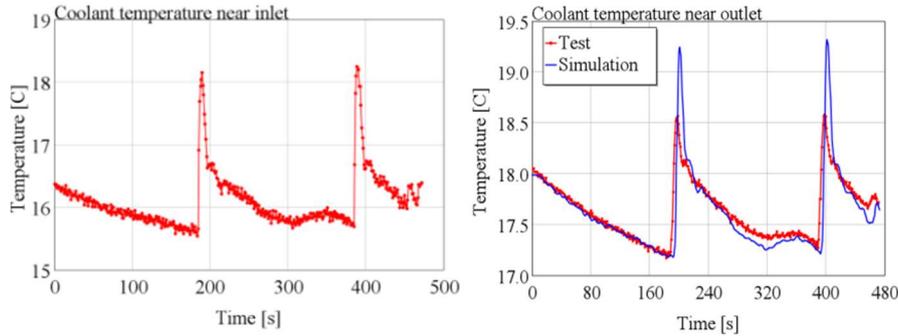


Figura 10.63: Evolución de la temperatura a la entrada y a la salida del circuito de refrigeración.

La figura muestra la temperatura del fluido líquido a la entrada y a la salida del circuito de refrigeración, donde se producen subidas bruscas de calor cada 200 segundos aproximadamente. La diferencia entre ambas gráficas se sitúa entre 1,5 y 2 grados para las zonas de poca pendiente y 0,5 grados para los picos de calor, por lo que desde el punto de vista de la regulación térmica el sistema es efectivo.

Otro estudio más reciente, emplea también un serpentín para que circule líquido refrigerante en el fondo y los laterales de los módulos de la batería de cara a rebajar la temperatura en un proceso de carga 4C. La implementación es más sencilla que en el caso anterior. Cada módulo contiene 12 celdas prismáticas de 37 Ah y 2,8 – 4,2 voltios. Una serie de termopares permiten monitorizar la temperatura en el módulo. Cuando la temperatura del líquido refrigerante baja 5 grados, la temperatura de las celdas baja entre 1 y 3 grados, mientras que la diferencia máxima de temperatura disminuye entre 1 y 2 grados.

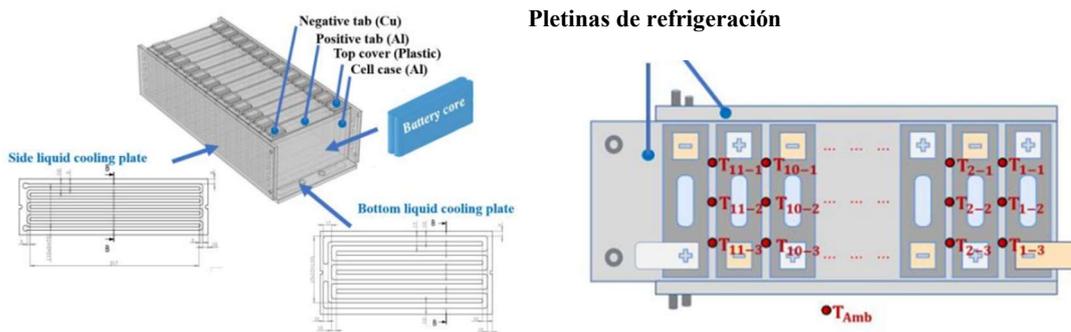


Figura 10.64: Tratamiento experimental para rebajar la temperatura en un proceso 4C.

Los termopares indican que para una temperatura inicial de 25 grados centígrados y un estado de carga inicial del 20 %, durante un proceso de carga 4C, las celdas adquieren un nivel de temperatura situado entre 45 y 50 grados.

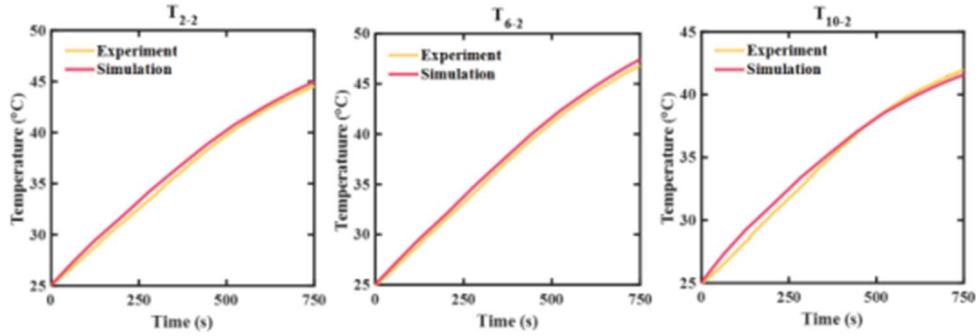


Figura 10.65: Medida de temperaturas de tres de los termopares.

Las conclusiones indican que la temperatura en una carga 4C puede rebajarse de 58 grados centígrados a 49. También, se ha comprobado que en este tipo de refrigeración no es tan importante el caudal como la temperatura del refrigerante. Aunque esta última conclusión podría discutirse dada la dificultad de rebajar la temperatura del fluido líquido no más allá de 20 ó 25 grados centígrados por debajo del valor máximo.

Es conveniente señalar que todos los elementos eléctricos del circuito de refrigeración: compresores, bombas, ventiladores, etc. suponen un consumo eléctrico que sale como es lógico de la batería y, en consecuencia, se traduce en una disminución de la potencia disponible para el sistema motor del vehículo. Este hecho justifica que los coches de energía media o baja aprovechen el aire acondicionado del vehículo para la refrigeración de la batería.

10.8.5. Equilibrado.

Normalmente, el sistema de gestión de la batería (BMS) maneja grupos de celdas con un número mínimo de unidades de 6 celdas y un número máximo de unidades de 16. Un experimento en laboratorio con 16 celdas de iones de litio arroja el siguiente resultado mostrado en el cuadro:

Cell Number	Cell voltage observed in software (V)	Cell voltage observed on multimeter (V)	Difference (mV)
1	3.219	3.221	2
2	3.735	3.737	2
3	3.935	3.937	2
4	3.816	3.818	2
5	3.787	3.788	1
6	3.829	3.830	1
7	3.789	3.790	1
8	3.834	3.836	2
9	3.875	3.876	1
10	3.952	3.953	1
11	3.838	3.839	1
12	3.851	3.852	1
13	4.030	4.031	1
14	3.828	3.830	2
15	3.878	3.880	2
16	3.841	3.842	1

Cuadro 10.42: Tensión de cada una de las 16 celdas de una Unidad de Supervisión de Celdas (CSU).

La celda que se separa más del valor nominal que es la número 1, se prueba con distintas corrientes de carga con el resultado de la figura:

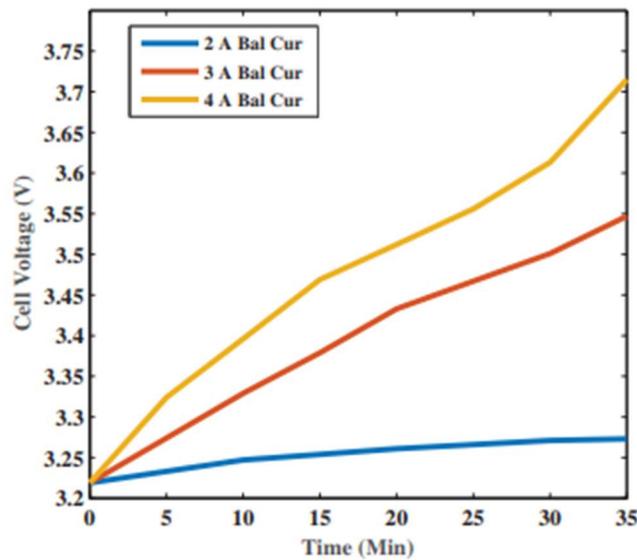


Figura 10.66: Carga de una celda para diferentes niveles de corriente.

Con corriente de carga de 2 A, el nivel de tensión obtenido es similar al de la prueba anterior. Con corrientes de carga de 3 y 4 A, el nivel de tensión al cabo de media hora de carga es mucho mayor: 3,55 y 3,72 voltios respectivamente.

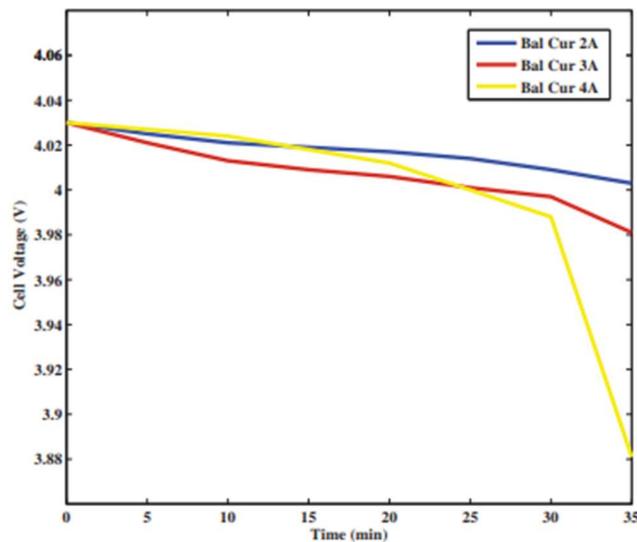


Figura 10.67: Descarga de una celda para diferentes niveles de corriente.

Con la celda que presenta una tensión más positiva, por encima del valor nominal, se procede a efectuar una descarga a distintos niveles de corriente. Con corrientes de 2 A y 3 A la tensión de la celda prácticamente no varía mientras para 4 A, la tensión se aproxima mucho más a la nominal después de media hora de funcionamiento.

La figura muestra un circuito de equilibrado de tensiones por medio de una resistencia fija. Un determinado número de resistencias, n , se conectan en paralelo al mismo número de celdas, n , para evitar que las celdas sean sobrecargadas. Estas resistencias regulan el valor de la tensión en cada una de las celdas. A pesar de tener un elevado valor en ohmios, disipan energía de las celdas

a las que están conectados, aumentando las pérdidas térmicas y disminuyendo la eficiencia de la batería.

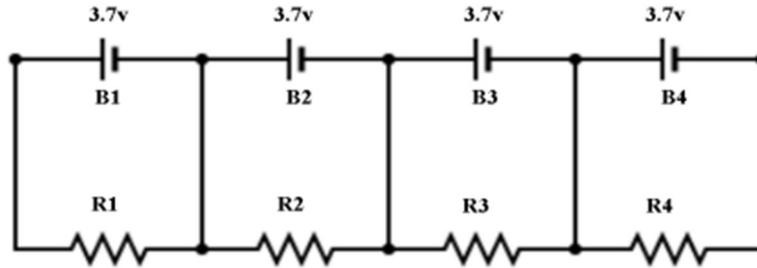


Figura 10.68: Equilibrado de celdas mediante una resistencia fija.

El equilibrado pasivo a pesar de las pérdidas mencionadas, sigue siendo muy utilizado en la actualidad por su sencillez y fiabilidad. Una mejora del equilibrado pasivo puede ser la instalación de interruptores accionados por un microcontrolador de forma que en unas pocas fracciones de segundo se lleva a cabo el equilibrado de las tensiones de cada una de las celdas. El montaje teórico es el que se muestra en la figura siguiente.

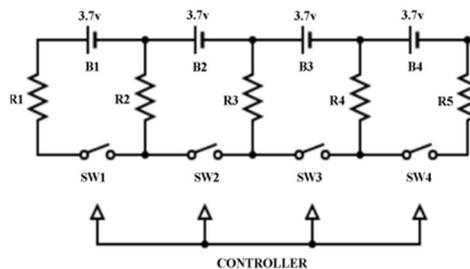


Figura 10.69: Equilibrado de celdas mediante una resistencia fija un microcontrolador.

Los interruptores pueden implementarse por medio de FET o MOSFET operados con un microcontrolador TMS320F28379D. Las resistencias para el equilibrado pueden tener un valor que va desde algunas decenas de ohmios a algunos k Ω . En este caso concreto se han utilizado resistencias de 47 Ω y un MOSFET IRF540N.

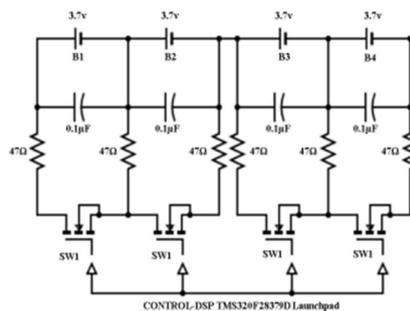


Figura 10.70: Equilibrado de celdas mediante microcontrolador y transistores FET.

Un condensador de 0,1 μF en paralelo con cada una de las celdas evita variaciones bruscas de tensión entre sus bornes. Las corrientes de celda pueden medirse con un transductor de efecto Hall tipo HX03/50P y el equilibrado puede hacerse cada 60 μ segundos. El sistema sigue siendo sencillo y económico, para su empleo en los sistemas de gestión de las baterías de los vehículos eléctricos.

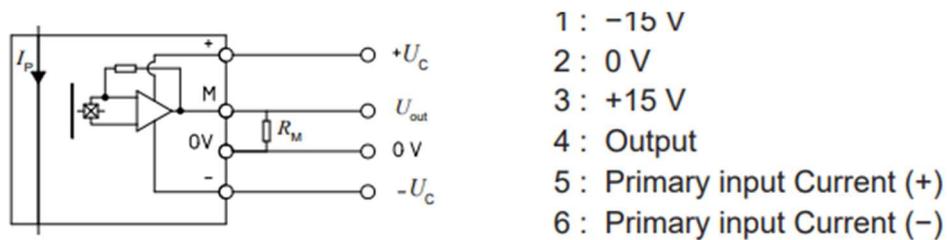


Figura 10.71: Diagrama de bloques de un circuito integrado HX03.

El circuito HX03/50P funciona con corrientes entre 3 y 50 amperios dando una salida proporcional a la corriente, que va de 0 a 4 voltios. La tensión se mide a la salida de un convertidor analógico digital tal y como se mostraba en el apartado 8.1.

10.9. Conclusiones.

- La batería de un vehículo eléctrico pesa aproximadamente una cuarta parte del peso total del vehículo, es por tanto un elemento determinante para la situación del centro de gravedad del coche y, en consecuencia, para su estabilidad.
- El precio de una batería de un vehículo eléctrico se sitúa en unos 110 € por Kwh almacenado, si se tienen en cuenta los herrajes, la plataforma donde ha de ir alojada, la tapa para apantallar los campos y dar consistencia al conjunto, el precio total de una batería media rondará los 12.000 €. Es el precio de un coche pequeño-medio de combustión interna.
- Con carácter general, los niveles de campo magnético que fija la regulación española como niveles de referencia o niveles de acción, se sobrepasan en el apartado del **R. D. 299/2016 de casos particulares**, para personas con marcapasos y otras prótesis. Si bien parece que en funcionamiento normal no hay riesgo para los ocupantes, habrá de tenerse en cuenta para las tareas de mantenimiento de los automóviles. Sobre todo, cuando las potencias de los vehículos son elevadas.
- También, y a efectos de mantenimiento, hay que tener en cuenta que los campos entre conductores calculados suponen un valor mínimo, mientras el campo en las inmediaciones de los conductores tiende a valores muy elevados.
- En relación con los Reglamentos 94 (2018) y 95 (2021) de la Comisión Económica para Europa de Naciones Unidas, hay que reseñar que el Reglamento nº 95 es más exacto que el nº 94 en cuanto al contenido de expresiones para el cálculo de la energía.
- Si en un futuro, más o menos próximo, se produce un cambio en la tensión de alimentación de los turismos, estos reglamentos permitirán dimensionar el valor de las capacidades del bus de alimentación y de la resistencia de cortocircuito a aplicar en caso de accidente.
- El Sistema de Gestión de la Batería (MBS) es un sistema distribuido y complejo para el control de la tensión, la corriente y la temperatura de las celdas de la batería. También, es el encargado de la supervisión de los procesos de carga y descarga de la batería.

- Los vehículos de baja potencia suelen emplear en la gestión de la temperatura, el sistema de aire acondicionado del propio vehículo. Para potencias medias y altas, la gestión de la temperatura se lleva a cabo mediante refrigeración líquida activa. Los sistemas pasivos, mediante dispositivos de radiación de calor intercalados entre las celdas, han sido probados en laboratorio, pero no en vehículos comerciales.

10.10. Bibliografía.

- [1] Saurabh Shah, Meera Murali y Priyanka Gandhi. A Practical Approach of Active Cell Balancing in a Battery Management System. 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)
- [2] Sanket Dalvi and Sushil Thale. Design of DSP Controlled Passive Cell Balancing Network based Battery Management System for EV Application. 2020 IEEE India Council International Subsections Conference.
- [3] Guillaume Le Gall, Nicolas Montavont and Georgios Z. Papadopoulos. Enabling IEEE 802.15.4-2015 TSCH based Wireless Network for Electric Vehicle Battery Management. 2020 IEEE International Symposium on Computers and Communications.
- [4] Hahnsang Kim and Kang G. Shin. DESA: Dependable, Efficient, Scalable Architecture for Management of Large-Scale Batteries. IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 8, No. 2, May 2012.
- [5] IEEE Std 1491™-2012 (Revision of IEEE Std 1491-2005). IEEE Guide for Selection and Use of Battery Monitoring Equipment in Stationary Applications.
- [6] Marco Silva, João P. Trovão, Paulo Pereirinha y Luís Marques. Multiple Energy Sources Monitoring System for Electric Vehicle. 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion.
- [7] S.Saraf, A.V.Giridhar, S. Jahagirdar. A design solution to reduce electrical/electronic complexity with secured CAN architecture for an automotive power system. 2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC).
- [8] S. Shah, M. Murali y P. Gandhi. A Practical Approach of Active Cell Balancing in a Battery Management System. 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems.
- [9] Ranjith Pawar G., Praveen L. S. and Nagananda S. N. Implementation of Lithium-Ion Battery Management System with an Efficient SOC Estimation Algorithm. 5th International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology (RTEICT-2020), November 12 and 13 2020.
- [10] Yun Wu, Xiaofei Liao, Wen Chen, Dao Chen. A Battery Management System for Electric Vehicle Based on Zigbee and CAN. 2011 4th International Congress on Image and Signal Processing.

- [11] Jianchao Li, Shunli Wang, Carlos Fernández, Ni Wang, Hongqiu Xie. The Battery Management System Construction Method Study for the Power Lithium-ion Battery Pack. 2017 IEEE 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering.
- [12] F. Zapf, R. Weiss, A. Itzke, R. Gordon, and R. Weigel. Mechanically Flexible Sensor Array for Current Measurement. IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 69, NO. 10, OCTOBER 2020.
- [13] Alexander Itzke, Roland Weiss, and Robert Weigel. Influence of the Conductor Position on a Circular Array of Hall Sensors for Current Measurement. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 66, NO. 1, JANUARY 2019.
- [14] Roland Weiss, Alexander Itzke, Julian Reitenspieß, Ingolf Hoffmann, and Robert Weigel, Fellow, IEEE A Novel Closed Loop Current Sensor Based on a Circular Array of Magnetic Field Sensors IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 19, NO. 7, APRIL 1, 2019.
- [15] Stefano Nieddu, General Motors Powertrain Europe, Turin, Italy. High Accuracy-Wide Range Resistance Measurement for Thermistor Sensors Monitoring. 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings.
- [16] Sarah G. Garrow, Christopher T. Aksland, Sunny Sharma and Andrew G. Alleyne (corresponding author) Mechanical Science and Engineering Department, University of Illinois at Urbana-Champaign Urbana, IL 61801 USA. Integrated Modeling for Battery Electric Vehicle Transcritical Thermal Management System. 2018 Annual American Control Conference (ACC) June 27–29, 2018. Wisconsin Center, Milwaukee, USA.
- [17] Qin, Xu, Du, Guo, Lu and Ouyang. External Liquid Cooling Method for Lithium-ion Battery Modules under Ultra-fast Charging. 2021 The 6th International Conference on Power and Renewable Energy.
- [18] R. Rizk, H. Gualous, H. Louahlia, P. Schaetzel. Passive Cooling of High Capacity Lithium-Ion batteries. 2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC).
- [19] Fan He, Abhid Akram, Yeliana Roosien, Wei Tao, Bruce Geist, Ken Singh. Reduced-order Thermal Modeling of Liquid-cooled Lithium-ion Battery Pack for EVs and HEV's. 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC).
- [20] Sagar Dusad, Suman Basu, Khan Ghazanfar and Chandrasekaran N. Battery thermal management comparison for orthogonal arrangement of battery modules in an EV battery pack. 2019 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India).
- [21] S. Habib et al. Comprehensive Study of Implemented International Standards, Technical Challenges, Impacts and Prospects. IEEE Access. March 2018.
- [22] Kong, P.Y. y Karagiannidis: Charging Schemes for PHEVs in Smart Grids. IEEE Access. October 2016.
- [23] Dubey, A. y Santoso, S. Electric Vehicle Charging on Residential Distribution Systems: Impacts and Mitigations. IEEE Access. October. 2015.
- [24] A. Ahmad Pesaran, T. Markel, S. Harshad Tataria, and D. Howell. Battery requirements for plug-in hybrid electric vehicles- Analysis and rationale. Proceedings International Electric Vehicles Symposium, Anaheim, CA, USA, December 2007.

- [25] SAE Electric Vehicle and Plug In Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler, Standard SAE J1772, January 2010.
- [26] Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión e Instrucciones Técnicas Complementarias. R.D. 842 / 2002 actualizado el 10 de abril de 2019.
- [27] Electric vehicle infrastructure installation guide. Pacific Gas & Electric Company. 1999.
- [28] Zulhani Rasin, Nur Afiqah Md Raif, Lochana Palraju Infineon. Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknikal Malaysia Melaka. Investigation on Battery Supercapacitor Hybrid Energy Storage Performance based on Frequency Separation Strategy for Electric Vehicle Drive System. 2022 IEEE 12th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE) Melaka Malaysia. Sept. 2022.
- [29] Ricardo de Castro, Claudio Pinto, Rui Esteves Araujo, Pedro Melo, Diamantino Freitas Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. Optimal Sizing and Energy Management of Hybrid Storage Systems. Conferencia IEEE de Energía y Propulsión de Vehículos 2012.
- [30] Imán Aghabali, Jennifer Bauman, Phillip J. Kelleher y otros. 800 v Electric Vehicle Powertrain: Review and Analysis of Benefits, Challenges and Future Trends. IEEE Transactions on Transportation Electrification. Vol 7, nº3. September 2021.
- [31] Standard IEEE 835. 2012
- [32] S.A.S. Mohammed y Jin-Woo Jung. A Comprehensive State-of-the-Art Review of Wired/Wireless Charging Technologies for Battery Electric Vehicles: Classification/Common Topologies/Future Research Issues. IEEE Access. January 2021.
- [33] Enabling Fast Charging: A Technology Gap Assessment. U.S. Department of Energy. October 2017.
- [34] Lu Wang, Ziang Qin, Tim Slangen, Pavol Bauer y Thijs van Wijk. Grid Impact of Electric Vehicle Fast Charging Stations: Trends, Standards, Issues and Mitigation Measures - An Overview. IEEE Open Journal of Power Electronics. February 2021.
- [35] Suarez y Martínez. Fast and Ultra-Fast Charging for Battery Electric Vehicles – A Review. IEEE Energy Conversion Congress and Expo. IEEE 2019.
- [36] Kamala Kumari Duru, Chanakya Karra, Praneash Venkatachalam, Sai Akhil Betha, Asha Anish Madhavan, and Sujith Kalluri. Critical Insights Into Fast Charging Techniques for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 21, no. 1, March 2021.
- [37] A. Rashid, T. Hofman y B. Rosca. Enhanced Battery Thermal Management Systems with Optimal Charge Control for Electric Vehicles. 2018 Annual American Control Conference (ACC) June 27–29, 2018. Wisconsin Center, Milwaukee, USA.
- [38] Rikitake, T. Magnetic and Electromagnetic Shielding. D. Reidel Publishing Company. 1987.
- [39] Ramo, Whinnery y Van Duzer. Campos y ondas. Ediciones Pirámide. Madrid 1965.
- [40] Lorrain y Corson. Campos y ondas electromagnéticos. Selecciones Científicas 1972.

CONAMA

María de Molina 5, 1º D
28006 Madrid (España)

T +34 91 310 73 50

conama@conama.org
www.conama.org