

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

**Parámetros de Calidad Eléctrica y
Exposición Humana a Campos
Magnéticos Mediante el Análisis de la
Radiación Armónica de la Red Eléctrica**

Almería, enero de 2023

Francisco Portillo Rodríguez



MEMORIA PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR

**Parámetros de Calidad Eléctrica y Exposición
Humana a Campos Magnéticos Mediante el Análisis
de la Radiación Armónica de la Red Eléctrica**

Power Quality Parameters and Human Exposure to
Magnetic Fields by Harmonic Radiation Analysis of
the Power Grid



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN TECNOLOGÍA DE
INVERNADEROS E INGENIERÍA INDUSTRIAL Y AMBIENTAL**

Autor: Francisco Portillo Rodríguez

Directores: Dr. Manuel Fernández Ros
Dr. Alfredo Alcayde García

*Desde luego, no se ha hecho nada mejor
que este antiguo análisis de Fourier*

Cómo nace un teorema (2021), Cédric Villani.

AGRADECIMIENTOS

Comencé esta tesis en noviembre de 2019, y como le ocurre a cualquier señal temporal, ha tenido sus momentos pico y sus momentos valle. En el transcurso de estos tres años hemos sufrido una pandemia mundial, y he compaginado la tesis con el trabajo de profesor sustituto y mi trabajo fuera de la universidad, por lo que confieso que en algunos instantes llegué a entrar en saturación, pero mis directores me condujeron nuevamente a la zona activa y el resultado final es positivo.

Siguiendo con el símil de la señal temporal, si se pudiera descomponer esta tesis mediante la transformada de Fourier para poder visualizar su espectro, resultaría que la componente fundamental de esta tesis ha sido la familia. Mis hermanos y mis padres que se esforzaron por darme una educación, mis hijos, y sin duda alguna *Elisa*, que sería mis 50 Hz.

Un tercer armónico bastante potente habrían sido mis directores de tesis y mi tutor, *Manuel Fernández Ros*, *Alfredo Alcayde* y *José Antonio Gázquez*.

El quinto armónico estaría compuesto por los compañeros del área de Tecnología Electrónica que me han ayudado en todo lo posible: *Carlos Cano*, *Rosa García*, *Nuria Novas* y *Manolo Soler*, con el que siempre he estado en la misma fase.

El séptimo armónico lo formarían los compañeros de otras áreas de la UAL, como los compañeros de Ingeniería Eléctrica o los antiguos compañeros del área de Física Aplicada, donde empecé. Especial mención para *Javier Batlles* que me dio la oportunidad de empezar en este mundo allá por el 2017.

Los armónicos son bastante denostados en el ámbito de la calidad de energía eléctrica, pero, en este caso, estoy completamente seguro de que solo gracias a estos armónicos se ha podido formar la señal completa que es esta tesis.

PREFACIO

Esta tesis dio comienzo en noviembre de 2019, y desde entonces este doctorando es profesor sustituto interino en el Área de Tecnología Electrónica del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Almería (UAL) e integrante del Grupo de Investigación de Electrónica, Comunicaciones y Telemedicina TIC019, cuyas principales líneas de investigación son:

- Desarrollo de sistemas electrónicos;
- Diseño de sistemas basados en microcontrolador;
- Sensorización y telemonitorización medioambiental;
- Sistemas aplicados a telemedicina;
- Sistemas de comunicaciones inalámbricas.



Los indicios de calidad que asientan la línea de investigación de esta tesis se basan en los artículos publicados por el doctorando y que se han basado en el trabajo que se detallará en los sucesivos capítulos. A continuación se citan las referencias de dichas publicaciones:

- ✓ **F. Portillo**, R. M. García, A. Alcayde, J. A. Gázquez, M. Fernández-Ros, and N. Novas, "Prospective Environmental and Economic Assessment of a Sensor Network," *Sustainability*, vol. 13, no. 18, p. 10306, Sep. 2021, doi: 10.3390/su131810306 [1].
- ✓ **F. Portillo**, A. Alcayde, R. M. García, N. Novas, J. A. Gázquez, and M. Fernández-Ros, "Grid Frequency Measurement through a PLHR Analysis Obtained from an ELF Magnetometer," *Sensors*, vol. 22, no. 8, p. 2954, Apr. 2022, doi: 10.3390/s22082954 [2].

Hay un artículo que a fecha de la defensa de la tesis ha sido enviado y se encuentra en fase de revisión:

- **F. Portillo**, A. Alcayde, R. M. García, N. Novas, J. A. Gázquez, and M. Fernández-Ros, "Current Total Harmonics Distortion Evaluation of an Electrical Grid through Data Obtained from an ELF Magnetometer," artículo en revisión en *Measurement*.

Y por último, hay un artículo que se encuentra en fase de preparación para ser enviado:

- M. Fernández-Ros, **F. Portillo**, “Analysis of Human Exposure to Electromagnetic Fields in the ELF and ULF Bands,” artículo en preparación para *Transactions on I&M*.

En cuanto a la memoria de la tesis, el documento se encuentra organizado por capítulos. En la Introducción se hace un recorrido por los antecedentes de los campos electromagnéticos, se describen diversos parámetros de calidad de energía eléctrica junto con la normativa relacionada y se finaliza con los problemas relacionados por la influencia de la radiación electromagnética de baja frecuencia sobre la salud humana. En el capítulo de Objetivos se describen los objetivos generales y específicos que han impulsado la realización de esta tesis. En el capítulo Materiales y Métodos se ha hecho un apartado específico donde se especifican las características del sistema usado y como se obtienen los datos que se usarán para los siguientes apartados. Y por último, en los capítulos Resultados y Conclusión cabe destacar que se han desglosado en apartados que se corresponden con los cuatro artículos citados anteriormente.

Para las siglas y acrónimos utilizados se ha elegido usar el castellano siempre que sea posible, excepto para aquellas palabras que su uso frecuente sea en inglés. En estos casos, se ha optado por escribir la palabra completa en una nota al pie de página.

Por último, mi agradecimiento al proyecto de I+D+i UAL18-TIC-A025-A encuadrado dentro del marco del Programa Operativo FEDER Andalucía 2014-2020, del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), ya que todos los datos usados en esta tesis proceden del magnetómetro prototipo de este proyecto.



Almería, noviembre de 2022

F. Portillo

RESUMEN

El objetivo de esta tesis se centra en el estudio de las ondas electromagnéticas en el rango de frecuencia de 3 Hz a 2,2 kHz producidas por las líneas de distribución de energía eléctrica y los dispositivos conectados a ella. Estas emisiones fueron medidas por un magnetómetro diseñado específicamente para tal fin, junto con todo el sistema de adquisición de datos, procesado de señal, etc. Se va a detallar como se tuvieron en cuenta parámetros medioambientales y económicos para escoger la mejor opción de diseño del hardware mediante el análisis del ciclo de vida y el análisis de costes del ciclo de vida. Una vez hecho esto, con los datos obtenidos por el sistema, se estudiaron algunos parámetros de calidad de energía eléctrica de una manera no invasiva, tales como la frecuencia de la red eléctrica y la tasa de distorsión armónica en corriente. Por último, el posible efecto de la exposición a los campos de 50 Hz en entornos residenciales plantea la cuestión de cómo se deben medir y monitorizar, ya que uno de los objetivos que promueve la Organización Mundial de la Salud dentro de su sección de “Campos Electromagnéticos y Salud Pública” es que la exposición, ya sea para trabajadores o para el público en general, debe ser monitorizada para asegurar que los límites no se superan. De esta manera hemos establecido una metodología para analizar la ratio de exposición humana al campo magnético y estudiar cómo contribuyen las diferentes bandas de frecuencia a esta ratio de exposición. Además otras características de los campos magnéticos, tales como armónicos, transitorios, cambios espaciales y temporales, entre otros, han recibido relativamente poca atención en los estudios de posibles efectos biológicos y de salud. Tras una profunda revisión de la normativa internacional y estatal actual, tanto en materia de calidad eléctrica como en relación con los posibles efectos de los campos magnéticos a la salud, pensamos que esta tesis podría aportar una valiosa información no disponible en este momento sobre los niveles de este tipo de campos en el entorno de un campus universitario como el de la Universidad de Almería, donde diariamente hay una gran cantidad de personas que trabajan y estudian.

Palabras clave: PLHR, campo magnético, exposición humana, calidad de energía eléctrica.

ABSTRACT

The goal of this thesis is to study the electromagnetic waves in the frequency range from 3 Hz to 2.2 kHz generated by the power distribution lines and devices connected to them. These emissions were measured using a magnetometer specifically designed for this purpose, together with the data acquisition system and signal processing, among others. Environmental and economic parameters were considered to select the best hardware design through a life cycle assessment and a life cycle costing. Subsequently, with the data obtained by the system, some electrical power quality parameters such as the grid frequency and current total harmonic distortion rate were studied in a non-invasive way. Finally, the possible effects of human exposure to electromagnetic fields of 50 Hz in residential environments raises the question of how they should be measured and monitored, since one of the objectives promoted by the World Health Organization under its "Electromagnetic Fields and Public Health" section, is that human exposure, either for workers or for the general public, must be monitored to ensure that the limits are not exceeded. In this regard, a methodology to analyze the ratio of human exposure to magnetic fields and to determine how the different frequency bands contribute to this ratio was established. Other characteristics of magnetic fields, such as harmonics, transients, as well as spatial and temporal changes, among others, have received little attention in studies of possible biological and health effects. After an exhaustive review of international and state regulations regarding the possible effects of magnetic fields on health, we believe that this thesis could provide valuable information not presently available for places such as the University of Almería campus, where a large number of people work and study on a daily basis.

Keywords: PLHR, magnetic field, human exposure, power quality.

SIGLAS

ACV	<i>Análisis de ciclo de vida.</i>	HPS	<i>High pressure sodium.</i>
ADC	<i>Analog to digital converter.</i>	ICNIRP	<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.</i>
AT	<i>Alta tensión.</i>	IEE	<i>Institute of Electrical Engineers.</i>
AVR	<i>Analizador vectorial de redes.</i>	IEEE	<i>Institute of electrical and Electronics Engineers.</i>
BT	<i>Baja tensión.</i>	IET	<i>Institution of Engineering and Technology.</i>
CA	<i>Corriente alterna.</i>	IoT	<i>Internet of things.</i>
CC	<i>Corriente continua.</i>	ISO	<i>International Organization for Standardization.</i>
CCV	<i>Coste del ciclo de vida.</i>	MC	<i>Microcontrolador.</i>
CEM	<i>Campo electromagnético.</i>	MLR	<i>Magnetospheric line radiation.</i>
CEE	<i>Calidad de energía eléctrica.</i>	MT	<i>Media tensión.</i>
CM	<i>Communication module.</i>	NA	<i>Niveles de acción.</i>
CT	<i>Centro de transformación.</i>	NIEHS	<i>National Institute of Environmental Health Sciences.</i>
CTP	<i>Coste total de propiedad.</i>	NIOSH	<i>National Institute for Occupational Safety and Health.</i>
DFT	<i>Discrete Fourier transform.</i>	OMS	<i>Organización Mundial de la Salud.</i>
EFSD	<i>Environmental Footprint Secondary Database.</i>	PA	<i>Punto de acceso.</i>
ELF	<i>Extremely low frequency.</i>	PEF	<i>Product Environmental Footprint.</i>
RE	<i>Ratio de exposición.</i>	PLE	<i>Power line emission.</i>
FFT	<i>Fast Fourier transform.</i>	PLHR	<i>Power line harmonics radiation.</i>
FEDER	<i>Fondo Europeo de Desarrollo Regional.</i>	RAEE	<i>Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.</i>
FRC	<i>Factor de recuperación de capital.</i>	RD	<i>Real decreto.</i>

REE	<i>Red Eléctrica de España.</i>
RSC	<i>Responsabilidad social corporativa.</i>
SAI	<i>Servicio de alimentación ininterrumpida.</i>
SC	<i>Signal conditioner.</i>
SCHEER	<i>Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks.</i>
SD	<i>Standard deviation.</i>
S/N	<i>Signal/noise.</i>
THD	<i>Total harmonic distorsión.</i>
TL	<i>Tram lines.</i>
UAL	<i>Universidad de Almería.</i>
UE	<i>Unión Europea.</i>
UIT	<i>Unión Internacional de Telecomunicaciones.</i>
ULF	<i>Ultralow frequency.</i>
UTC	<i>Universal time coordinated.</i>
VLE	<i>Valores límite de exposición.</i>
VLF	<i>Very low frequency.</i>
ZC	<i>Zero-crossing.</i>

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
A.	Antecedentes de la Investigación	3
B.	Análisis del Ciclo de Vida y de Costes del Ciclo de Vida	5
1)	Fases de un Análisis del Ciclo de Vida.....	8
2)	Calidad de la Base de Datos.....	9
3)	Product Environmental Footprint.....	10
C.	Power Line Harmonics Radiation	13
1)	Observaciones Terrestres	16
2)	Observaciones desde Satélites y Globos	18
D.	Antecedentes Teóricos	23
E.	Parámetros de Calidad de Energía Eléctrica y Normativa Relacionada	33
1)	Frecuencia de la Red Eléctrica	35
2)	Armónicos en Corriente	37
F.	Estudios sobre la Influencia de la Radiación Electromagnética de Baja Frecuencia en la Salud Humana.	39
G.	Normativa Relativa a Exposición a Campos Electromagnéticos.....	46
1)	Normativa Europea e Internacional	46
2)	Normativa Española	47
3)	Límites a la Exposición a los Campos Magnéticos	48
H.	Artículos e Informes de Mediciones de Densidad de Flujo Magnético.....	53
1)	Líneas de alta y Media Tensión y Subestaciones Transformadoras	53
2)	Medio Urbano y Domicilios.....	55
3)	Industria y Ambientes Laborales	58
II.	OBJETIVOS	61
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	67
A.	Análisis del Ciclo de Vida y de Costes del Ciclo de Vida	69
1)	Objetivos y Escenarios	69
2)	Unidad Funcional y Flujo de Referencia	70
3)	Límites del Sistema	71
4)	Descripción del Sistema.....	71
5)	Recopilación de Datos para el Análisis del Ciclo de Vida	75
6)	Recopilación de Datos para el Análisis de Costes del Ciclo de Vida	78
7)	Métodos	79

8) Interpretación de los Resultados y Análisis de Sensibilidad	83
B. Descripción del Sistema	84
1) Hardware Usado	85
2) Procesamiento de los Datos Obtenidos	87
C. Análisis de la Exposición Humana a los Campos Magnéticos	92
D. Medida de la Frecuencia de la Red Eléctrica	96
1) Método de Paso por Cero	96
2) Método FFT	97
3) Comparación de los Resultados	98
E. Evaluación de la Tasa de Distorsión Armónica en Corriente	100
1) Agrupación.....	100
2) Comparación de los Resultados	101
IV. RESULTADOS	105
A. Análisis del Ciclo de Vida y de Costes del Ciclo de Vida.....	107
1) Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida	107
2) Análisis de Costes del Ciclo de Vida	110
3) Análisis de Sensibilidad.....	111
B. Análisis de la Exposición Humana a los Campos Magnéticos	114
1) Valores de Densidad de Flujo Magnético y Consumos Eléctricos.....	114
2) Ratio de Exposición al Campo Magnético	122
C. Medida de la Frecuencia de Red	130
D. Evaluación de la Tasa de Distorsión Armónica en Corriente	135
V. CONCLUSIÓN	143
A. Análisis del Ciclo de Vida y de Costes del Ciclo de Vida.....	145
B. Análisis de la Exposición Humana a los Campos Magnéticos	147
C. Medida de la Frecuencia de la Red Eléctrica	147
D. Evaluación de la tasa de Distorsión Armónica en Corriente	148
E. Mejoras y Futuros Trabajos	149
ANEXOS	151
LISTA DE VARIABLES	153
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Hardware del proyecto UAL18-TIC-A025-A.....	3
Fig. 2. Ejemplo reproducido de [67] de un espectrograma observado desde satélite sobre los EE. UU. el 19 de abril de 2009.	14
Fig. 3. PLHR en Japón los días 22 y 23 de octubre de 2009 [62]. (a) Órbitas del satélite. (b) Espectrograma de la zona de 50 Hz. (c) Espectrograma de la zona de 60 Hz.....	15
Fig. 4. Representación esquemática de la propagación de los PLHR según [62].....	16
Fig. 5. Espectros simultáneos obtenidos en Roberval (arriba) y Siple (abajo) [80].	17
Fig. 6. Patrones detectados en la ocurrencia de los PLHR. (a) Variación según la hora local [82]. (b) Variaciones semanales [83].	18
Fig. 7. Espectro de los PLHR observados en [93].	18
Fig. 8. Mapa de los eventos PLHR observados en [113].	21
Fig. 9. Órbitas del satélite [120] con eventos de 50 o 60 Hz descritos en [119].	21
Fig. 10. Mapa de coordenadas magnéticas [127] con el conjugado de la península ibérica en un círculo rojo.	23
Fig. 11. Voltaje generado en un circuito cerrado por un campo magnético.	27
Fig. 12. Uso del tiristor [65]. (a) Forma de onda característica de la corriente para un circuito de control de potencia. (b) Espectro del modelo del tren de pulsos.	30
Fig. 13. Ejemplo de espectro de una señal de corriente dado en [160].	31
Fig. 14. Arquitectura del sistema de suministro eléctrico.	34
Fig. 15. Frecuencia de uso doméstico en el mundo.....	36
Fig. 16. Cadena de medida según [188].	37
Fig. 17. Clasificación de los tipos de radiaciones.	40
Fig. 18. Límites de exposición al campo magnético según RD 299/2016.	49
Fig. 19. Límites de exposición al campo magnético según ICNIRP.	50
Fig. 20. Límites de exposición al campo magnético según RD 1066/2001.	51
Fig. 21. Evolución de los límites de exposición al campo magnético.	52
Fig. 22. Densidad de flujo magnético en cargadores eléctricos según [270].	59

Fig. 23. Estación de la Sierra de los Filabres. (a) Ubicación. (b) Mediciones de la estación recogidas en [275].	63
Fig. 24. Ejemplo de espectrograma del día 3 de mayo de 2021 del magnetómetro situado en la UAL.	64
Fig. 25. Diferentes formas de suministrar energía eléctrica a los sensores.	70
Fig. 26. Límites del sistema para el ciclo de vida.	71
Fig. 27. Kit de evaluación CC3220 SimpleLink LaunchPad [282].	72
Fig. 28. Comunicación de los nodos con el servidor central.	72
Fig. 29. Panel solar elegido [284].	75
Fig. 30. Captura de pantalla del programa usado.	80
Fig. 31. Programa openLCA. (a) Lista de componentes disponible. (b) Inserción de la cantidad correspondiente de cada componente. (c) Realización del diagrama del sistema de producto.	82
Fig. 32. Categorías de impacto definidas en la EF 3.0.	83
Fig. 33. Localización del magnetómetro ELF. (a) Situación de la ciudad de Almería. (b) Localización de la UAL (c) Ubicación del laboratorio en el campus.	84
Fig. 34. Bobina usada en el magnetómetro.	85
Fig. 35. Estructura del sistema de medida.	86
Fig. 36. Sistema instalado en el laboratorio: 1. Magnetómetro ELF; 2. Amplificador de instrumentación; 3. Amplificador final; 4. ADC+DSP; 5. Servidor de cálculo.	86
Fig. 37. Vista frontal del oZm (recuadro rojo).	87
Fig. 38. Señal en el tiempo. (a) 300 s. (b) Detalle de 1s. (b) Detalle de 200 ms.	88
Fig. 39. Espectro de la señal tras la FFT.	89
Fig. 40. Analizador vectorial de redes usado en este trabajo.	89
Fig. 41. Espectro de la señal calibrada.	90
Fig. 42. Agrupación de líneas espectrales. (a) Grupos; (b) Subgrupos.	91
Fig. 43. Esquema tomado de [311] para ilustrar la relación entre los VLE y NA.	94
Fig. 44. Múltiples pasos por cero. (a) 6 ciclos de la señal (b) Detalle.	97
Fig. 45. Búsqueda de picos. (a) Hasta armónico 40. (b) Cercano a los 50 Hz.	98
Fig. 46. Diagramas de los algoritmos ZC y FFT.	98
Fig. 47. Diagrama de bloques del sistema usado para hallar la THD.	102
Fig. 48. Edificios y alumbrado exterior cercano al magnetómetro ELF.	102

Fig. 49. Alumbrado exterior presente en el campus de la UAL. (a) Farolas; (b) Leds decorativos; (c) Detalle de las lámparas HPS.	103
Fig. 50. Evaluación del impacto del ciclo de vida.	108
Fig. 51. Contribución de cada componente en Kg para la categoría "Destrucción de la capa de ozono".....	109
Fig. 52. Contribución de cada componente en kg CO ₂ eq para la categoría "Cambio climático".	110
Fig. 53. Distribución de costes. (a) Escenario 1. (b) Escenario 2.	111
Fig. 54. Análisis de sensibilidad para "Destrucción de la capa de ozono" en kg.	113
Fig. 55. Costes totales tras los análisis de sensibilidad en €/año.	113
Fig. 56. Variaciones semanales en la densidad de flujo magnético. . (a) Del 3 al 9 de mayo. (b) Del 10 al 16 de mayo. (c) Del 17 al 23 de mayo. (d) Del 24 al 30 de mayo.	115
Fig. 57. Enfriadoras usadas en el CPD. (a) Vista cenital de la cubierta del edificio. (b) Detalle de las enfriadoras.	116
Fig. 58. Densidad de flujo magnético por semanas. (a) Del 3 al 9 de mayo. (b) Del 10 al 16 de mayo. (c) Del 17 al 23 de mayo. (d) Del 24 al 30 de mayo.	118
Fig. 59. Valores máximos, medios y mínimos diarios de la densidad de flujo magnético para todo el mes de mayo.	119
Fig. 60. Comparación de la densidad de flujo magnético obtenida en el sensor con el consumo eléctrico del CITIC. (a) Semana del 3 al 9 de mayo. (b) Semana del 10 al 16 de mayo. (c) Semana del 17 al 23 de mayo. (d) Semana del 24 al 30 de mayo.	121
Fig. 61. Comparación de la densidad de flujo magnético y del consumo eléctrico del CITIC el día 7 de mayo.	121
Fig. 62. Comparación de la densidad de flujo magnético y del consumo eléctrico del CITIC. (a) viernes 7 de mayo. (b) sábado 8 de mayo. (c) domingo 9 de mayo.	122
Fig. 63. Valores de las diferentes RE_i a lo largo del mes de mayo. (a) RE_T . (b) RE_{ELF} . (c) RE_H . (d) RE_{50} . (e) RE_S	124
Fig. 64. Hora del día en la que se producen los valores máximos y mínimos de la RE_T para todo el mes de mayo.	125
Fig. 65. Detalle de los valores de la RE_T desde el día 4 al 18 de mayo.....	126
Fig. 66. Influencia de cada RE_i . (a) RE_{ELF} . (b) R_H . (c) R_{50} . (d) R_S	127
Fig. 67. Contribuciones parciales R_i a los valores diarios. (a) Para valores máximos de RE_T (b) Para valores mínimos de RE_T	128
Fig. 68. Frecuencia del día 3 de mayo: comparación de los métodos ZC y FFT.	130
Fig. 69. Comparación de los métodos ZC y FFT: regresión lineal.	130

Fig. 70. Frecuencia a lo largo del día 3 de mayo. (a) Comparación entre el método FFT y el oZm. (b) Comparación entre el método ZC y el oZm.....	131
Fig. 71. Comparación entre métodos. (a) Regresión lineal de los métodos FFT y oZm. (b) Regresión lineal de los métodos ZC y oZm.	132
Fig. 72. Frecuencia máxima, mínima y media en cada día del mes de mayo.	133
Fig. 73. Variación diaria de la frecuencia. (a) Valor mínimo de mayo. (b) Valor máximo de mayo.	134
Fig. 74. Densidad de flujo magnético en el dominio de la frecuencia. (a) hasta 2 kHz. (b) hasta la componente armónica 15ª.	135
Fig. 75. Evolución a lo largo del tiempo de la densidad de flujo magnético para el día 7 de mayo (a) Componente fundamental más armónicos 3º, 9º y 15º. (b) Componente fundamental más armónicos 5º, 7º, 11º y 13º.....	136
Fig. 76. Datos obtenidos el día 7 de mayo. (a) B; (b) THD_B	137
Fig. 77. THD_B . (a) Día 1 de mayo. (b) Día 31 de mayo.	138
Fig. 78. Comparación entre las THD_B y THD_I del CITIC y la iluminación exterior para el día 7 de mayo.	139
Fig. 79. Comparación entre la THD_B y la THD_I agrupada para el día 7 de mayo.	139
Fig. 80. Comparación entre la THD_B y la THD_I durante el periodo diurno (7:00 a 21:00) del día 7 de mayo.	140
Fig. 81. THD media en el periodo diurno durante el mes de mayo.....	140
Fig. 82. Comparación entre la THD_B y la THD_I para el periodo nocturno (21:00 a 07:00) entre los días 6 y 7 de mayo.	141
Fig. 83. THD media en el periodo nocturno durante el mes de mayo.....	141
Fig. 84. Radio de influencia del sensor ELF.....	142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I Nomenclatura UIT para la designación de frecuencias	14
Tabla II Estudios sobre PLHR captados desde satélites y globos	22
Tabla III Aplicaciones típicas divididas por frecuencias.....	41
Tabla IV Niveles de acción para el campo magnético según RD 299/2016.....	48
Tabla V Límites de exposición para trabajadores según ICNIRP	49
Tabla VI Límites de exposición pública según ICNIRP	50
Tabla VII Niveles de referencia para el campo magnético según RD 1066/2001	51
Tabla VIII Evolución de los límites de exposición al campo magnético	52
Tabla IX Ejemplos de densidad de flujo magnético en electrodomésticos	56
Tabla X Irradiación solar (kWh/m ²) en el campus de la UAL para un panel orientado al sur e inclinación 60º	74
Tabla XI Consumo de materia anual en el escenario 1 (conexión a red)	76
Tabla XII Consumo de materia anual en el escenario 2 (sistema autónomo).....	76
Tabla XIII Mix eléctrico en España en 2019.....	77
Tabla XIV Coste de inversión anualizado en el escenario 1 (conexión a red).....	79
Tabla XV Coste de inversión anualizado en escenario 2 (sistema autónomo).....	79
Tabla XVI Resultados de la comparación entre programas según [295]	81
Tabla XVII Valores absolutos de las diferentes categorías de impacto	108
Tabla XVIII Análisis de costes del ciclo de vida	110
Tabla XIX Valores estadísticos diarios de la densidad de flujo magnético para todo el mes de mayo (L indica lunes).	118
Tabla XX Valores estadísticos (multiplicados por 10 ⁻⁵) de la RE_T para todo el mes de mayo (L indica lunes)	124
Tabla XXI Media mensual de las diferentes RE_i	125
Tabla XXII Media mensual de las diferentes R_i	127
Tabla XXIII Relaciones parciales (%) para valores máximos de RE_T (L indica lunes).....	129
Tabla XXIV Relaciones parciales (%) para valores mínimos de RE_T (L indica lunes).....	129

Tabla XXV Coeficiente de determinación R^2 de la comparación ZC vs. oZm, y de FFT vs. oZm del mes de mayo (L indica lunes).....	133
Tabla XXVI Diferencia entre los valores medios de la <i>THD</i> en el periodo diurno durante el mes de mayo (L indica lunes)	140
Tabla XXVII Diferencia entre los valores medios de la <i>THD</i> en el periodo nocturno durante el mes de mayo (L indica lunes)	142



Capítulo I.

INTRODUCCIÓN



I. INTRODUCCIÓN

A. Antecedentes de la Investigación

Esta tesis se ha realizado dentro de las disciplinas de Ingeniería en Tecnología Electrónica e Ingeniería Eléctrica. El punto de partida son los datos recopilados por un magnetómetro diseñado para capturar señales de frecuencias muy bajas que ha permanecido instalado en un laboratorio gestionado por el Grupo de Investigación TIC019 en el campus de la UAL.

El magnetómetro usado es el prototipo de los magnetómetros que se usarán en la red de sensores (Fig. 1) descrita en el proyecto de I+D+i UAL18-TIC-A025-A que se encuadra dentro del marco del Programa Operativo FEDER Andalucía 2014-2020, del Fondo europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Los investigadores principales de este proyecto son Nuria Novas Castellano, Profesora Titular de Universidad y José Antonio Gázquez Parra, Catedrático de Universidad, ambos pertenecientes al Área de Tecnología Electrónica del Departamento de Ingeniería de la UAL.

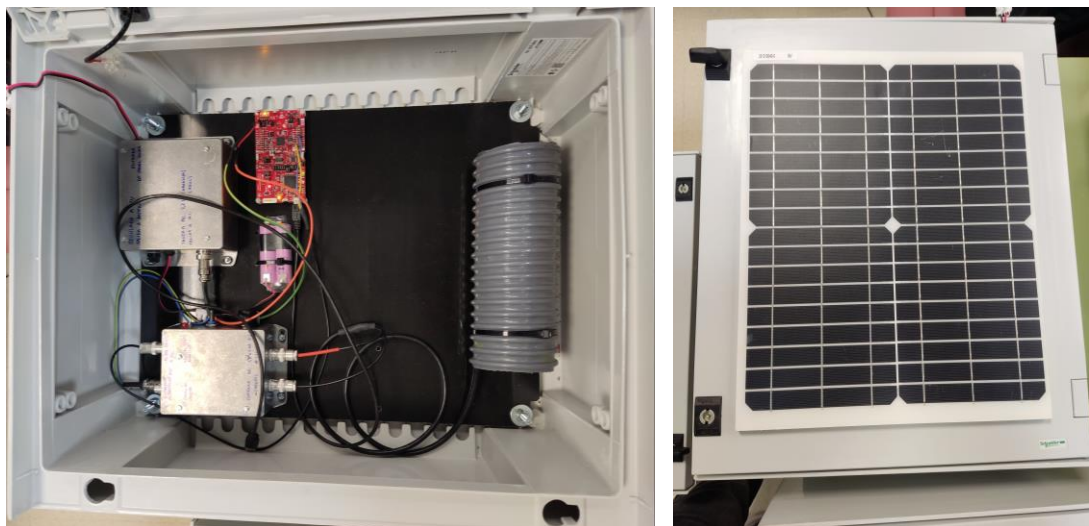


Fig. 1. Hardware del proyecto UAL18-TIC-A025-A

El proyecto UAL18-TIC-A025-A se denominó “Campo Electromagnético Generado por Redes Eléctricas Monitorizado” y tiene la finalidad de construir

una red de 10 sensores distribuidos espacialmente en el campus de la UAL con el objetivo de monitorizar en tiempo real el campo electromagnético (CEM) de baja frecuencia producido por equipos e instalaciones eléctricas. Los estudios en este campo ha tenido un aumento considerable en los últimos tiempos, duplicándose por década [3]. Hoy en día la investigación está presente en numerosas y diversas disciplinas, tales como la astrofísica, medicina, ingeniería y biología, entre otras [4].

Cuando se inició esta tesis el proyecto aún estaba en fase de diseño, por lo que aparte de los requerimientos técnicos del proyecto, se decidió empezar escogiendo el hardware teniendo en cuenta criterios medioambientales y económicos usando para ello herramientas como el análisis del ciclo de vida (ACV) y el coste del ciclo de vida (CCV).

B. Análisis del Ciclo de Vida y de Costes del Ciclo de Vida

En la actualidad, el desarrollo de las plataformas del IoT¹ se está convirtiendo en un factor clave para la evolución del concepto de ciudad inteligente, centrándose en la mejora de la calidad de vida y la expansión económica. Se espera que la evolución de una nueva generación de productos y servicios tenga un gran impacto en el sistema social y tecnológico. Aunque para el desarrollo de estas plataformas se suelen usar dispositivos de pequeño tamaño y bajo coste, pensamos que es importante comenzar a incluir análisis medioambientales en este tipo de proyectos, ya que el concepto de ciudades inteligentes y hogares inteligentes se desarrollará exponencialmente en los próximos años [5].

Los entornos IoT se caracterizan por la presencia de muchos dispositivos heterogéneos, a menudo instalados masivamente en una misma área, para permitir el desarrollo de una determinada aplicación [6]. En 2020 había alrededor de 8.400 millones de dispositivos conectados en todo el mundo y se estima que esta cifra alcance los 20.400 millones en 2022 [7]. En un mundo globalizado, incluso proyectos de bajo coste podrían convertirse en proyectos a gran escala, ya que el desarrollo del IoT necesitará de una gran cantidad de dispositivos. Por tanto, es fundamental desde el punto de vista de la sostenibilidad y la economía que organismos públicos como las universidades y grupos de investigación como el nuestro empiecen a promover tales análisis, ya que su combinación podría complementar estos proyectos desde el punto de vista de la sostenibilidad y el medioambiente.

En las últimas décadas ha habido un aumento sustancial en la literatura que estudia el análisis del impacto ambiental de productos, tecnologías y/o servicios. Algunos de los aspectos comunes de estos estudios se han centrado en una mayor conciencia y comprensión de esos impactos. La creciente demanda de servicios e infraestructuras de la sociedad actual es un factor clave para el progreso social y el desarrollo económico de los países [8], pero esto, a su vez, genera problemas medioambientales, lo que supone un verdadero desafío para las generaciones actuales y futuras. En ese sentido, la sostenibilidad se está convirtiendo en un elemento clave de un nuevo pensamiento para lograr el objetivo de reducir los impactos medioambientales [9]. Para alcanzar el objetivo de la sostenibilidad se requieren herramientas de

¹ Internet of things.

evaluación adecuadas, y una herramienta básica que se utiliza para este tipo de estudios es el ACV [10].

El ACV es una herramienta utilizada para evaluar los efectos ambientales de un producto o proceso a lo largo de todo su ciclo de vida. Por eso a este tipo de análisis también se le denomina “de la cuna a la tumba” [11]. Implica examinar el producto desde la extracción de materias primas para el proceso de fabricación, pasando por la producción y uso, hasta la disposición final de los residuos generados, abarcando así todo el sistema de producto.

El uso del ACV se ha expandido con rapidez, especialmente en un contexto comparativo entre dos productos o servicios. Su uso ha apoyado la selección de mejores alternativas medioambientales, promoviendo principios de diseño ecológico y reconociendo los impactos medioambientales potencialmente más dañinos [12]. La primera aplicación de un ACV (de forma parcial) se remonta a 1969. En ese año, Coca-Cola evaluó el consumo de insumos y las emisiones de los envases de bebidas. La empresa analizó la posibilidad de utilizar botellas de vidrio retornables en lugar de envases de plástico desechables. Trazaron el proceso completo, analizaron todo el ciclo de vida (desde el origen de la materia prima hasta la disposición final de los residuos) y proporcionaron un análisis cuantitativo para poder comparar estas dos opciones. A este análisis se le ha identificado como uno de los primeros ACV realizados [13].

Sin embargo, el enfoque de los ACV se ha expandido recientemente, desde productos elementales a productos más sofisticados, y desde decisiones locales a políticas estratégicas. El alcance de los ACV también ha cambiado de una simple evaluación medioambiental a un estudio de sostenibilidad, y el espectro de las categorías de impacto estudiadas ha aumentado progresivamente, especialmente en el ámbito medioambiental: desde una evaluación básica de residuos y energía, a la introducción de categorías como acidificación, toxicidad humana, destrucción de la capa de ozono, uso de recursos y agua, etc. [14].

El análisis CCV es otro análisis del ciclo de vida de un producto o servicio, pero se centra en los costes monetarios que implica un producto o proyecto, desde el inicio de la idea, hasta el final de su vida útil. Además de la inversión inicial, el CCV también considera el gasto a largo plazo de poseer y operar un proyecto y el gasto de la disposición final de los mismos. Una perspectiva solo desde el punto de vista del cliente se denomina coste total de propiedad (CTP)

y solo tiene en cuenta el coste del ciclo de vida del producto o sistema después de su compra por parte de una organización [15].

De hecho, el análisis CCV es más antiguo que el ACV [16], pero el concepto de conjugar el ACV y el CCV en un análisis más completo es relativamente nuevo. Un análisis CCV ambiental se puede realizar junto con el ACV utilizando los mismos límites y modelos del sistema, lo que permite la evaluación económica de un producto o servicio desde una perspectiva de sistemas [17]. Así, combinar los dos análisis se ha convertido en una herramienta eficaz para obtener el conocimiento completo de un producto o proceso para poder tomar decisiones tales como:

- Reducir los impactos ambientales reduciendo el consumo de energía, el uso de materias primas, emisiones contaminantes, etc.;
- Identificar posibles mejoras en el sistema;
- Mejorar la imagen de marca a través de estrategias de responsabilidad social corporativa (RSC).

Por lo tanto, la consolidación de los requisitos medioambientales de acuerdo con los criterios tradicionales en el diseño de productos está adquiriendo una importancia crucial como mecanismo para guiar la toma de decisiones en las empresas privadas [18] [19] [20] [21] [22] [23].

Como sociedad, necesitamos mejorar nuestras acciones para influir en las decisiones que conduzcan el desarrollo humano hacia la sostenibilidad. Para esto, además de las decisiones tomadas desde las empresas privadas, los gobiernos son actores clave para lograr estos objetivos. Hoy en día, las administraciones públicas de todos los gobiernos están fomentando la aplicación de los principios del ACV y CCV, de forma que se están convirtiendo en una pieza básica en las políticas medioambientales de EE. UU., Canadá, la Unión Europea (UE), Japón, Corea, Australia, China, e incluso también de países en vías de desarrollo como India [13]. Un ejemplo de esto es el ACV realizado por la Agencia Federal de Medio Ambiente de Alemania, que promovió el procedimiento para la devolución de los envases de bebidas [24].

Cabe destacar el interés que tiene el ACV y CCV en los procedimientos de contratación pública desde la publicación de la Directiva 2014/24/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 26 de febrero de 2014 sobre contratación pública [25]. Esta directiva permite a los organismos públicos realizar contrataciones determinando cuál es la oferta económicamente más ventajosa a través del enfoque del análisis CCV. Además, la Directiva 2010/31/UE del

Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios [26] y la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética [27], incluyen una gran cantidad de información medioambiental para los certificados energéticos.

En España, la Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética [28] tiene como finalidad facilitar la descarbonización de la economía española y su transición hacia un modelo circular para garantizar un uso racional de los recursos. Establece cuatro objetivos mínimos para 2030:

1. La economía española debe reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en, al menos, un 23 %, referido a 1990;
2. En el consumo final de energía, las fuentes renovables tienen que alcanzar una penetración de, al menos, el 42 %;
3. El logro de un sistema eléctrico con, al menos, un 74 % de generación a partir de fuentes de energía de origen renovable;
4. La mejora de la eficiencia energética mediante la reducción del consumo de energía primaria en, al menos, un 39,5 % respecto a la línea de base, de acuerdo con la normativa comunitaria.

En consecuencia, un ACV puede contribuir a hacer frente a estos desafíos. El ACV y el CCV están actualmente teniendo cabida en grandes proyectos de arquitectura, ingeniería, construcción y servicios: Muteri et al. [29] llevaron a cabo un ACV de paneles fotovoltaicos; Wiedemann et al. [30] evaluaron a través de un ACV las cadenas de suministro de carne roja de Australia en términos de impactos medioambientales; Oğuz y Şentürk [31] hicieron mediante un ACV una comparación entre diferentes tipos de tecnologías (eólica versus fotovoltaica); y Muñoz et al. [32] realizaron un estudio ACV y CCV para una planta de tratamiento de aguas residuales con recuperación de calor. Hay muchos más ejemplos de ACV en grandes proyectos, aunque se aprecia una falta significativa de estudios ACV y CCV en proyectos de bajo coste como este.

1) Fases de un Análisis del Ciclo de Vida

La implementación de un ACV está estructurada en cuatro etapas según lo definido por las normas ISO 14040:2006 “Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.” [33] e ISO 14044:2006 “Gestión

ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.” [34]. Estas cuatro fases son las siguientes:

1. **Objetivo y alcance:** esta es la primera etapa y el paso más importante de un ACV. En esta fase se definen los límites del sistema y la unidad funcional del análisis, incluyendo los motivos para realizar el estudio. Esto permite a los investigadores comparar dos o más productos o sistemas utilizando un método de medición consistente. En consecuencia, la unidad funcional debe definirse claramente y medirse con facilidad. Los límites del sistema deciden qué procesos relacionados directa o indirectamente con el producto o dispositivo se incluirán en el estudio.
2. **Inventario del ciclo de vida:** en dicha fase los datos son recopilados y almacenados. El análisis del inventario del ciclo de vida se utiliza para recopilar datos de los materiales y energía utilizados en todo el proyecto de acuerdo con los límites establecidos en el paso anterior.
3. **Evaluación del impacto del ciclo de vida:** este tercer paso engloba una serie de procesos:
 - **Evaluación de impacto:** cálculo del impacto ambiental;
 - **Clasificación:** los datos se agregan en impactos separados;
 - **Caracterización:** se cuantifica las contribuciones relativas de materiales/emisiones en una de las categorías de impacto;
 - **Normalización y valoración:** estas etapas independientes permiten un análisis pormenorizado de la envergadura de cada impacto. Ambas etapas son subjetivas, considerándose generalmente la valoración más subjetiva que la normalización.
4. **Interpretación y mejora:** los resultados son interpretados y se describen algunos posibles instrumentos para la mejora. El objetivo de este paso final es explicar los resultados obtenidos en la evaluación de impacto estimada y las prioridades en la mejora.

2) *Calidad de la Base de Datos*

Un punto importante que destacar es que el origen y la calidad de los datos de referencia son particularmente relevantes para identificar el nivel de confianza en los resultados. Es bien sabido que los ACV necesitan un gran volumen de información en los pasos iniciales [35] [36], que es precisamente cuando la información no está completamente disponible y es difícil de obtener.

Por lo tanto, se deben incluir datos primarios de los proveedores de primer nivel más relevantes, según el marco del estudio. Existen bases de datos públicas y privadas [37] para obtener todos los datos necesarios, pero es importante analizar su grado de representatividad con el sistema estudiado. La pregunta clave es cómo de confiables y comparables son los resultados.

Debido a la diversidad de métodos, sorprende que no haya una investigación en profundidad de las diferentes técnicas, la relación entre ellas y cómo se podría avanzar para integrarlas [38]. Existe una gran influencia en los resultados obtenidos de impacto ambiental dependiendo de la base de datos seleccionada. Pauer, Wohner y Tacker [24] compararon un ACV de seis sistemas de empaquetado utilizando tres bases de datos diferentes: GaBi, Ecoinvent 3.6 y la Environmental Footprint. Encontraron un impacto similar para el cambio climático pero discrepancias notables para otras categorías de impacto. Una revisión sobre los métodos disponibles para la interpretación del ciclo de vida presentada por Laurent et al. [39] encontró una falta de guías exhaustivas para realizar las etapas individuales dentro de la interpretación del ciclo de vida, lo que llevó a circunstancias en las que los usuarios del ACV llegaron a conclusiones incorrectas, o la comparación de los resultados fue arbitraria. Weidema [40] presentó un artículo que proporcionaba un proceso detallado para la etapa de verificación de coherencia. Encontró que el hecho de revisar y enmendar las inconsistencias puede eludir la mayoría de los problemas, aunque la falta de recursos podría hacer que esta revisión fuese extremadamente complicada.

De todo ello resulta que realizar un ACV es un proceso desafiante y complicado, en el que es probable que se cometan errores materiales debido a que la información de entrada es recopilada en un muestreo no representativo [41]. Se requieren datos precisos y actualizados, pero estos difieren de un caso a otro. En muchos casos, estos datos de entrada no están ni siquiera disponibles o se basan en un muestreo irregular debido a la ausencia de datos adecuados [42] [43] [44].

3) Product Environmental Footprint

Con el fin de aumentar la comparabilidad de los estudios de evaluación ambiental, en el 2013 la Comisión Europea lanzó la Recomendación 2013/179/UE “sobre el uso de métodos comunes para medir y comunicar el comportamiento ambiental de los productos y las organizaciones a lo largo de su ciclo de vida” [45], donde se describe un método de evaluación

medioambiental para toda la UE, denominado PEF². En 2017, fue publicada la última versión de la Guía PEFCR³ [46], que es la 6.3.

La intención principal del método PEF es establecer un conjunto coherente de preceptos para determinar el comportamiento medioambiental de un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida [47] y aumentar de esta manera la comparabilidad entre productos [48]. Se basa en el mismo procedimiento que el ACV, tratando de evitar alteraciones a la hora de normalizar los impactos ambientales entre las diferentes etapas del ciclo de vida y considerando todos los impactos relevantes de los insumos a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o servicio [49]. Al predefinir las especificaciones para ciertos aspectos metodológicos se espera lograr un aumento en la comparabilidad, pero esto conlleva una limitación en la flexibilidad [48] [50] con respecto a las normas [33] y [34].

En el PEF hay 16 categorías de impacto ya definidas que deben incluirse en el ACV. La directrices de la Recomendación Europea [45] son claras, y se sacrifica la flexibilidad al minimizar el número de opciones y decisiones que el usuario tiene que tomar [51]. La Comisión Europea también ha llevado a cabo proyectos piloto durante el periodo 2013-2016 que incluyen 26 proyectos que abarcan diferentes tipos de productos o sectores [52]. Desde la finalización de las pruebas piloto, este método ha atraído cada vez más la atención para mejorar la sostenibilidad de productos. Así Russo et al. [53] presentaron un trabajo con el estado del arte del PEF en el sector de la aceituna. Six et al. [54] llevaron a cabo un ACV conforme a las directrices del PEF para una sección de la cadena de producción de carne porcina en Bélgica. Soode-Schimonsky, Richter y Weber-Blaschke [55] siguieron la metodología del PEF para calcular los impactos ambientales de algunos sistemas de producción de fresas en Estonia. Famiglietti et al. [56] desarrollaron una herramienta para evaluar las cargas ambientales de los productos lácteos, permitiendo la identificación de los puntos críticos a través de las 16 categorías de impacto diferentes del PEF. Pyay et al. [57] evaluaron mediante el método PEF los resultados primarios e intermedios del cultivo de caucho en Tailandia. Corradini, Pierobon y Zanetti [58] aplicaron la metodología del PEF a productos hechos de madera en edificios de Italia. Kuo y Lee [59] propusieron un método de criterios múltiples para diseñar una cadena de suministro basada en los resultados del PEF. Egas et al. [60] desarrollaron una herramienta compatible para determinar el PEF de productos lácteos y Wohner et al. [17] desarrollaron un método para la

² Product Environmental Footprint.

³ Product Environmental Footprint Category Rules.

evaluación de la sostenibilidad en el envasado de alimentos siguiendo la norma [33] con un guiado adicional del PEF.

Este tipo de estudios muestran que el PEF es una herramienta muy útil para hacer una evaluación medioambiental, aunque todavía es un método relativamente nuevo para los estudios basados en el ACV. Actualmente, también se aprecia una falta de PEF en dispositivos electrónicos, aunque en 2021, en [52] se presentó un ACV de una luminaria LED utilizando la metodología PEF. Los productos de iluminación no se incluyeron en los proyectos piloto del PEF, por lo que los autores concluyen que los resultados de su estudio serán complementarios para el desarrollo de nuevas categorías de PEF para productos de iluminación. De la misma manera, pensamos que el trabajo realizado en esta tesis puede aportar una información útil en proyectos de material electrónico de bajo coste como el nuestro.

C. Power Line Harmonics Radiation

La creciente demanda de energía es esencial para el desarrollo económico de los países [8], pero a su vez la red eléctrica y los dispositivos también generan CEM en su frecuencia fundamental (50 o 60 Hz) y en sus armónicos, comúnmente llamados PLHR⁴ [61]. Cuando la radiación se refiere solo a la componente fundamental de 50 o 60 Hz, se suele denominar PLE⁵ [62].

Debido a que la forma de onda de la corriente eléctrica no es exactamente sinusoidal, aparecen distorsiones que conducen a armónicos significativos de múltiplos de 50 o 60 Hz, pudiendo llegar hasta varios kilohercios. Esta distorsión en las ondas que recorren las líneas de distribución y transmisión terrestres pueden irradiarse, produciéndose lo que se ha denominado como PLHR [61]. Los PLHR son una fuente de contaminación electromagnética artificial [63] y se ha aceptado como un problema de compatibilidad electromagnética [62], especialmente en áreas industriales. No solo afectan a la calidad de la energía eléctrica (CEE), dañan el funcionamiento normal de la red y perturban el sistema de comunicaciones, sino que además contaminan la ionosfera y la magnetosfera [61], [64].

Los PLHR se generan en las áreas industrializadas de la Tierra [65] y se cree comúnmente que los efectos se limitan solo a la superficie y atmósfera de la Tierra, pero los PLHR también pueden llegar a grandes partes del entorno espacial cercano a la Tierra [66] y transformarse en ondas ionosféricas de baja frecuencia que pueden penetrar en la ionosfera y la magnetosfera, pudiendo ser incluso detectados y grabados por satélites de baja altitud [67]. Pueden interactuar con partículas y otras ondas naturales o artificiales, provocando crecimientos de ondas y emisiones y precipitaciones de electrones, alterando así los estados de la ionosfera [68] [69]. Incluso se ha documentado que pueden influir en la actividad de las tormentas eléctricas [63] [70] [71] [72].

El rango de frecuencia de los PLHR cubre las frecuencias ELF⁶, ULF⁷ y VLF⁸. Como convención en la nomenclatura, se va a seguir la recomendación [73] de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), en el cual se divide y nombra el espectro de radio en las bandas mostradas en la Tabla I.

⁴ Power line harmonic radiations.

⁵ Power line emission.

⁶ Extremely low frequency.

⁷ Ultralow frequency.

⁸ Very low frequency.

TABLA I
NOMENCLATURA UIT PARA LA DESIGNACIÓN DE FRECUENCIAS

Número de la banda	Nomenclatura (en inglés)	Gama de frecuencias (excluido límite inferior e incluido el superior)
-1	ELF	0,03-0,3 Hz
0	ELF	0,3-3 Hz
1	ELF	3-30 Hz
2	ELF	30-300 Hz
3	ULF	300-3.000 Hz
4	VLF	3-30 kHz
5	LF	30-300 kHz
6	MF	300-3.000 kHz
7	HF	3-30 MHz
8	VHF	30-300 MHz
9	UHF	300-3.000 MHz
10	SHF	3-30 GHz
11	EHF	30-300 GHz
12		300-3.000 GHz
13		3-30 THz
14		30-300 THz
15		300-3.000 THz

Cuando los PLHR se representan en una forma tradicional de espectrogramas con densidad espectral de potencia codificada por colores de fluctuaciones de CEM, estos eventos toman la forma de un conjunto de líneas horizontales. En la Fig. 2, tomada de [67], se puede observar un espectrograma de un evento observado por satélite sobre los Estados Unidos el día 19 de abril de 2009, donde se observan líneas visibles a las frecuencias de 60 y 180 Hz.

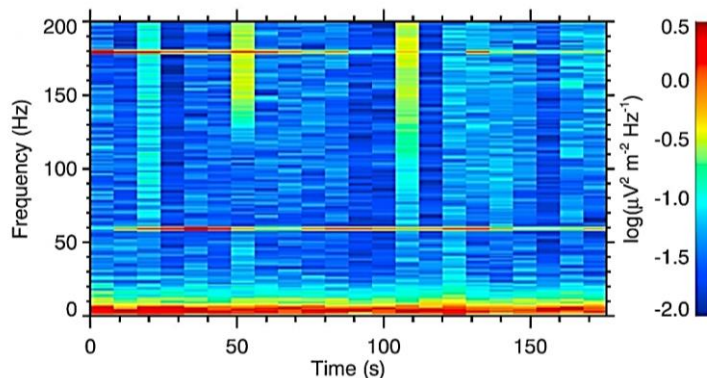


Fig. 2. Ejemplo reproducido de [67] de un espectrograma observado desde satélite sobre los EE. UU. el 19 de abril de 2009.

La separación de frecuencia de estas líneas depende de la frecuencia del sistema eléctrico en la región de generación [74] [75]. Para ilustrar los espectrogramas se ha elegido otro ejemplo recogido en [62] de los PLHR captados por un satélite al sobrevolar Japón. Este es un caso especial dentro de los sistemas de energía eléctrica mundiales, ya que como se comentó anteriormente el sistema de energía en Japón utiliza una combinación de 50 Hz (región oriental) y 60 Hz (región occidental). Se trazaron dos órbitas que representan las trayectorias del satélite cuando sobrevoló Japón los días 22 y 23 de octubre de 2009. Las líneas rojas y azules marcan la radiación de 50 y 60 Hz, respectivamente, que fueron detectadas en las distintas órbitas que se muestran en la Fig. 3a. La Fig. 3b muestra el espectrograma para los PLHR de 50 Hz correspondiente a la órbita del día 22, mientras que la Fig. 3c muestra el espectrograma para los de 60 Hz de la órbita del día 23.

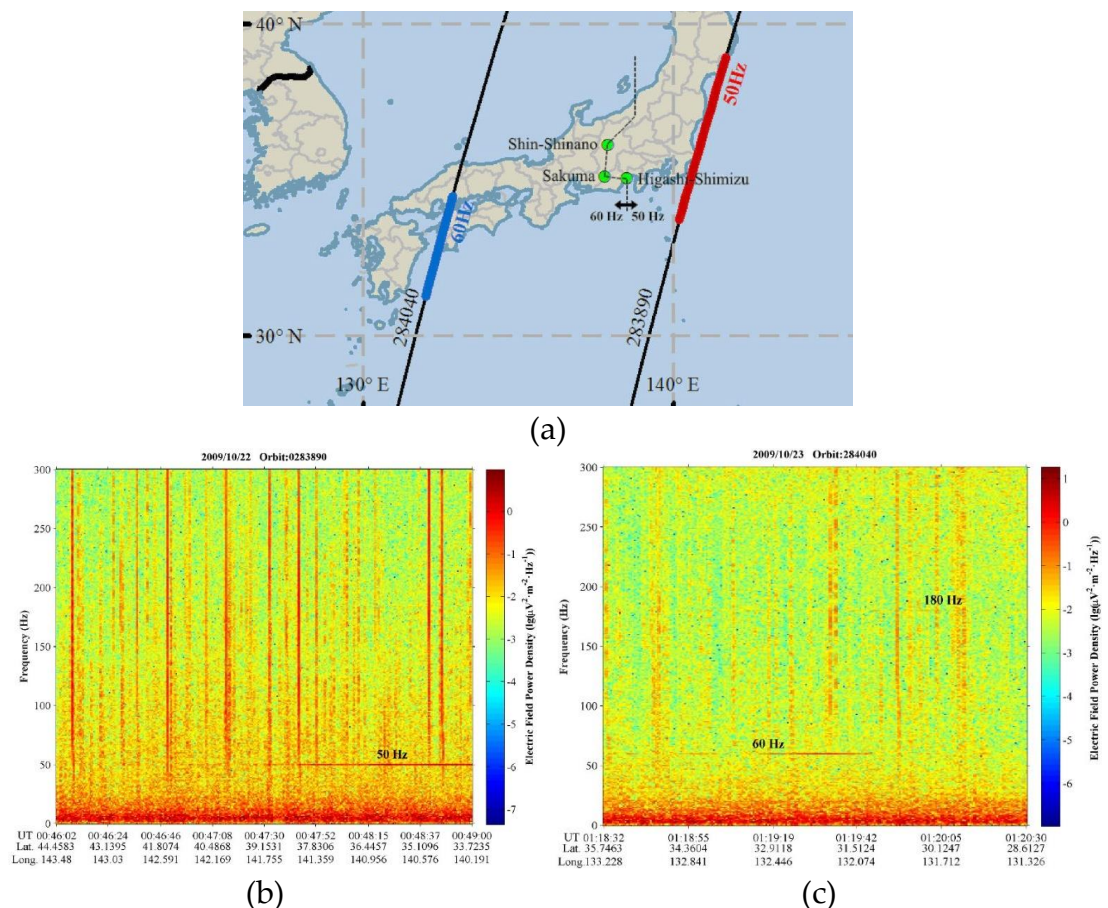


Fig. 3. PLHR en Japón los días 22 y 23 de octubre de 2009 [62]. (a) Órbitas del satélite. (b) Espectrograma de la zona de 50 Hz. (c) Espectrograma de la zona de 60 Hz.

A continuación se va a relatar la historia de las observaciones de los PLHR, que empezaron con observaciones terrestres en la década de los años 60 y continuaron posteriormente con las observaciones desde satélites y globos.

Cabe destacar las observaciones realizadas desde el satélite DEMETER [76], que fue puesto en órbita en junio de 2004.

1) Observaciones Terrestres

La descripción de los PLHR comenzó con observaciones desde tierra y se registraron por primera vez en los años sesenta. En un artículo de Helliwell de 1966 [77] los PLHR son visibles en muchas de sus figuras, aunque en ese momento todavía no se habían descrito, y por lo tanto, se ignoraba el fenómeno.

Cuando señales débiles pero coherentes entran en la región de interacción onda-partícula cerca del ecuador, pueden amplificarse y desencadenar emisiones. El mecanismo físico responsable de la amplificación de estas emisiones está descrito en [78]. En 1974, Helliwell y Katsufakis [79] demostraron tales efectos mediante experimentos de inyección de ondas controladas en la Estación Siple, en la Antártida. Se encontró que las emisiones provocadas típicamente estaban unos 30 dB por encima de la intensidad de la señal de entrada. Pero no fue hasta 1975 en que Helliwell et al. [80] identificaron las líneas de los PLHR y postularon que se habían originado a partir de la radiación de las líneas eléctricas terrestres. Los datos los recopilaron en la Estación Siple, en la Antártida, y en su punto conjugado, en la región de Roberval, Canadá. Dos puntos de la Tierra se conjugan geomagnéticamente si están en extremos opuestos de la misma línea de campo. En la Fig. 4 se puede ver una representación esquemática de este fenómeno tomada de [62].

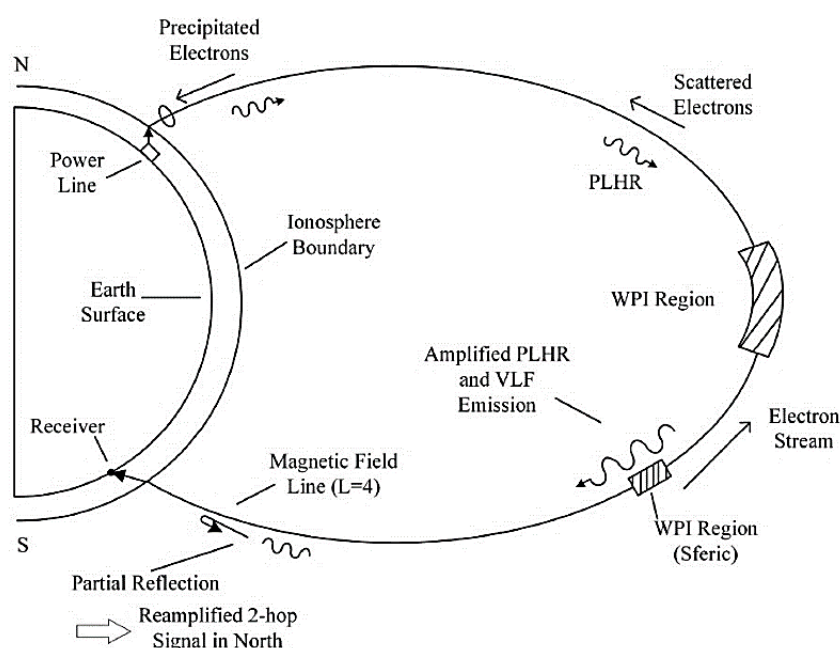


Fig. 4. Representación esquemática de la propagación de los PLHR según [62].

Las observaciones terrestres que realizaron Helliwell et al. revelaron conjuntos de líneas espectrales en la banda de los 2 a los 6 kHz. Algunos conjuntos de líneas tienen espaciamientos casi constantes de 120 Hz, probablemente correspondientes a los armónicos impares del sistema eléctrico canadiense. Sin embargo, encontraron que otras líneas magnetosféricas tenían espaciado variable. En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de las figuras descritas en el artículo.

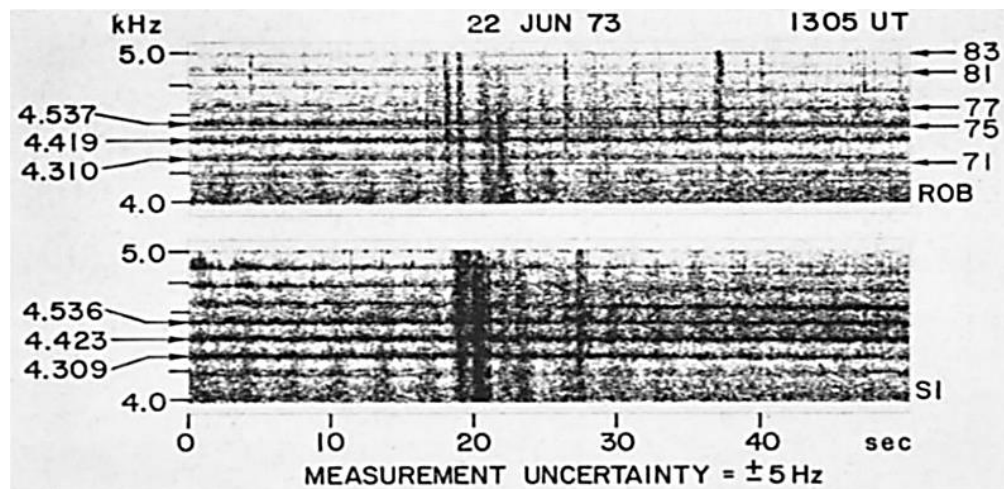


Fig. 5. Espectros simultáneos obtenidos en Roberval (arriba) y Siple (abajo) [80].

A finales de la década de los setenta se discutió ampliamente el papel que tienen los PLHR para desencadenar o amplificar las ondas naturales. En 1977, en [81] se mostró que la actividad de las ondas VLF es estimulada por la radiación de los sistemas de distribución y transporte de energía eléctrica durante las tormentas magnéticas.

En 1978, tras un análisis estadístico de las observaciones, en [82] se mostró que la actividad desencadenada alcanza un máximo alrededor del mediodía local (véase la Fig. 6a), que corresponde a la hora cuando el consumo de energía es más alto. Además, los datos magnetosféricos de las ondas VLF presentados en 1979 en [83] se indica una disminución dominical en comparación con el resto de la semana (Fig. 6b), que interpretaron como una clara influencia del patrón de consumo de energía eléctrica.

En 1979, en [84] se realizó una estimación de la señal de entrada de los PLHR antes de la amplificación en la magnetosfera y las potencias radiadas asociadas a partir de mediciones realizadas en diferentes lugares de Nueva Zelanda, y en 1983 el mismo experimento se realizó en Terranova, Canadá [85].

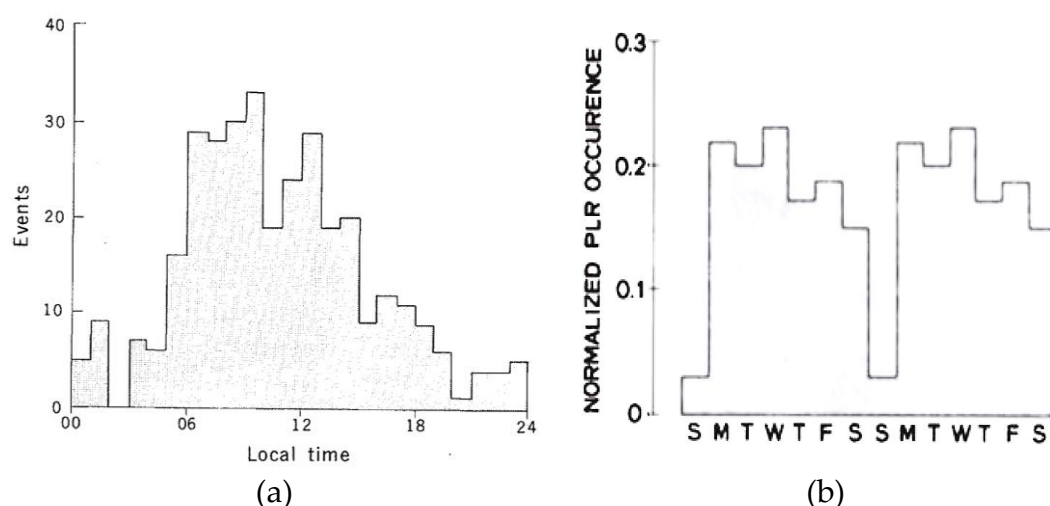


Fig. 6. Patrones detectados en la ocurrencia de los PLHR. (a) Variación según la hora local [82]. (b) Variaciones semanales [83].

2) Observaciones desde Satélites y Globos

Además de las observaciones terrestres de los PLHR, se disponen de datos extensos de observaciones de los PLHR realizadas desde satélites. Los primeros estudios globales de los satélites ARIEL-3 [86] y 4 [87] revelaron un máximo en la actividad de las ondas en América del Norte y su conjugado geomagnético, que se atribuyeron principalmente a los PLHR [70] [88] [89] [90].

En 1977, en [91] se postuló que la actividad de las ondas VLF detectada por el satélite OGO-3 [92] tiene la mayor probabilidad de ocurrencia en regiones entrelazadas por líneas de campo geomagnético que cruzan áreas industrializadas. Posteriormente, en 1979, en [93] se presentó un ejemplo de eventos PLHR del paso del satélite OGO-4 [94] sobre América del Sur (véase Fig. 7). Los picos espectrales se representaron en función de la frecuencia, y la figura muestra que los picos están espaciados 100 Hz, lo que corresponde a la radiación armónica del sistema eléctrico de 50 Hz de América del Sur.

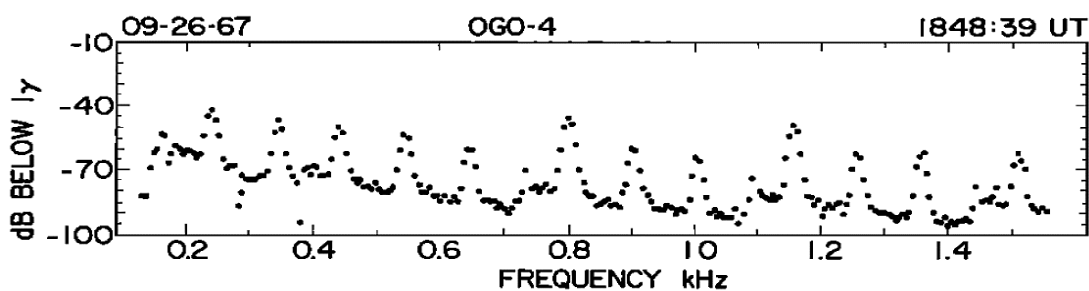


Fig. 7. Espectro de los PLHR observados en [93].

En 1982, emisiones débilmente relacionadas con los PLHR fueron reportadas en [95], según datos de las observaciones del satélite ISEE-1 [96] sobre América del Norte. solo se detectaron PLHR en 5 de las 90 órbitas estudiadas, y se observaron en condiciones de muy baja actividad magnética.

En 1981, en [97] se describieron algunas observaciones sobre América del Norte desde el satélite ISIS-2 [98]. Aparecieron varias líneas entre 1 y 1,8 kHz, pero sus espaciamentos eran irregulares y variaban con el tiempo. Los autores presentaron otros dos ejemplos donde la intensidad de una línea a 60 Hz fue modulada por el giro del satélite, lo que evidencia que la señal fue detectada a bordo por la antena del satélite.

En 1985, varias mediciones de los PLHR a la frecuencia fundamental de 50 Hz se llevaron a cabo en la atmósfera del norte de Europa en [99], esta vez desde globos. El experimento reveló que la radiación de la línea eléctrica a la frecuencia de 50 Hz no se amplificó, pero las frecuencias armónicas de 300, 450 y 600 Hz se amplificaron en asociación con una tormenta magnética. Ese mismo año, en un experimento similar en la ionosfera superior realizado a bordo del satélite OHZORA [100] descrito en [101], se mostró aumentos de la intensidad del campo magnético a la frecuencia fundamental de 60 Hz (irradiada desde las islas de Japón) y de 50 Hz (en el este de China).

El AUREOL-3 [102] fue el primer satélite con telemetría francesa en tiempo real (utilizado solo cuando el satélite estaba cerca de una estación de telemetría). Esta telemetría contenía datos de alta velocidad y podía proporcionar formas de onda de cinco componentes del CEM en un ancho de banda de 0 a 1,5 kHz. En 1990, en [103] se realizaron estudios estadísticos de las intensidades de las emisiones ELF/VLF observadas por este satélite. Se observó también un aumento de la actividad de las ondas VLF en América del Norte, similar a los datos de los satélites [86] y [87]. En 1994, en [104] el mismo autor utilizó los datos de observaciones directas de eventos PLHR del satélite [102].

En 1995, en [105] se estudiaron los PLHR observados en los satélites ISIS-1 [106] e ISIS-2 [98] sobre Nueva Zelanda y reportaron dos tipos distintos de PLHR. El primero, que denominaron MLR⁹, se caracteriza por un ancho de banda más amplio y sin una correlación obvia entre las frecuencias de línea y los múltiplos de 50 o 60 Hz. La variación horaria en la ocurrencia de los MLR no mostró correlación con la carga de las posibles fuentes eléctricas principales

⁹ Magnetospheric line radiation.

y no fue evidente una disminución clara en la ocurrencia los fines de semana. No estaba claro el papel que jugaba la radiación terrestre correspondiente a los PLHR en estos MLR. La segunda, las denominadas TL¹⁰, consistían en líneas con un ancho de banda estrecho, con deriva de frecuencia nula y cercana a los armónicos de 50 o 60 Hz. Las TL claramente tienen su origen en los sistemas terrestres de distribución de energía eléctrica. Con respecto a las observaciones realizadas desde tierra, los autores llegaron a la misma conclusión después de analizar los datos medidos en la estación Halley, en la Antártida [107] [108] [109]. En un artículo de revisión de 2017 sobre las observaciones de las emisiones de PLHR y MLR mediante experimentos en tierra y en satélites [110] se discutió la posibilidad de que las MLR se deban también a los PLHR.

En 2005, en [111] se realizó un análisis sistemático utilizando los datos del satélite [76]. Se presentaron observaciones de PLHR separados 50/100 Hz, correspondientes a la frecuencia del sistema eléctrico, y encontraron además otras líneas separadas 16,66 Hz, lo que interpretaron como una influencia del sistema de electrificación de ferrocarriles, que en algunos países de Europa del norte y central se sigue el estándar de 15 kV de tensión y 16 2/3 Hz de frecuencia. Posteriormente, en 2006, en [112] se usaron también los datos del satélite [76]. Se analizaron los eventos PLHR con espaciamiento de frecuencia de 50/100 Hz o 60/120 Hz y encontraron que los espaciamientos de frecuencia de todos los eventos observados se correspondían perfectamente con las frecuencias del sistema de energía en las regiones de generación. En otro artículo de 2007, los mismos autores hicieron una comparación entre las MLR y los PLHR [113]. Descubrieron que los eventos PLHR ocurren tanto con actividad geomagnética alta como baja, dándose el mismo número de eventos en ambos escenarios. Sin embargo, los eventos MLR ocurren con mayor frecuencia en condiciones de perturbaciones geomagnéticas. Un ejemplo de las ubicaciones geográficas de estos eventos se muestra en la Fig. 8, donde las cruces señalan eventos PLHR espaciados 50/100 Hz, los cuadrados representan eventos PLHR espaciados 60/120 Hz y los eventos MLR están representados por círculos sólidos. Se puede observar que los eventos se corresponden con las frecuencias del sistema eléctrico de la zona de pasada del satélite.

Siguiendo con los datos del satélite [76], en [114] encontraron que los PLHR observados por encima de China no mostraban una dependencia significativa con la actividad geomagnética, pero sí se detectaron más eventos durante los días de invierno que en las noches de verano.

¹⁰ Tram lines.

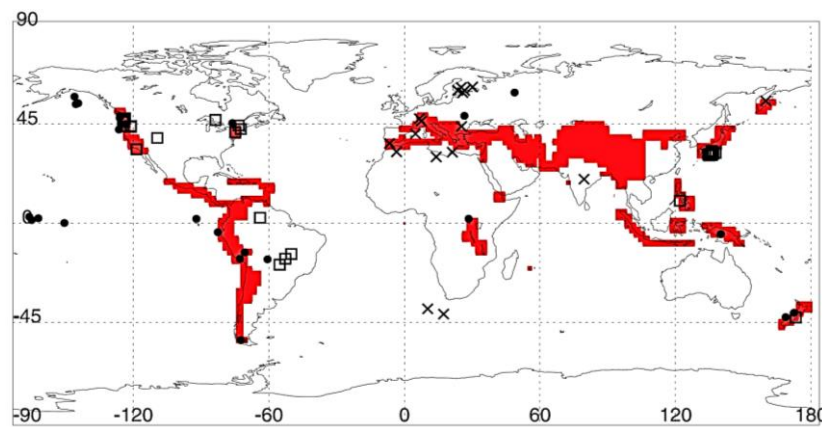


Fig. 8. Mapa de los eventos PLHR observados en [113].

DEMETER [76] es un satélite de baja altitud (710-660 km), con unas dimensiones totales de $80 \times 60 \times 60$ cm y una masa total de 130 kg, incluida una carga útil científica de 50 kg, es el primer microsátélite desarrollado por la agencia espacial nacional francesa [115]. Desde su lanzamiento en junio de 2004, muchos autores han estudiado los datos de sus observaciones [61] [64] [67] [63] [62] [111] [114] [66] [75]. Es uno de los satélites que más datos ha aportado para el estudio de los PLHR [116] por los investigadores más relevantes en este ámbito, siendo capaz de medir campos entre los 17 Hz y los 17,4 kHz [62].

En 2014, en [117] se presentaron una serie de mediciones directas de la radiación de las líneas eléctricas de 50 o 60 Hz detectada por el satélite C/NOFS [118] y en 2015, en [119] se detectaron líneas espectrales claras de 50 o 60 Hz sobre redes de energía eléctrica (véase la Fig. 9) utilizando el microsátélite Chibis-M [120]. También señalan que los casos de registro directo de la frecuencia fundamental son mucho menores que las de sus armónicos.

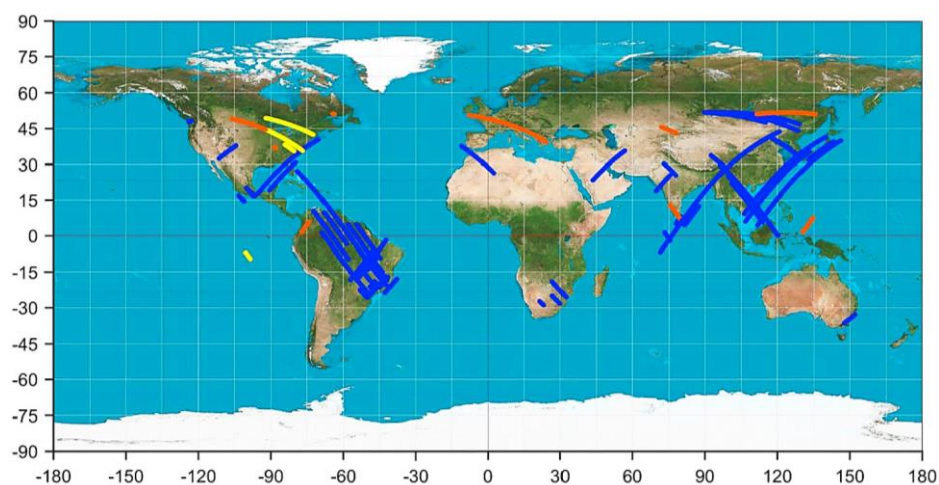


Fig. 9. Órbitas del satélite [120] con eventos de 50 o 60 Hz descritos en [119].

Los estudios más relevantes sobre observaciones de PLHR desde satélites y globos se han resumido y ordenado cronológicamente en la Tabla II, detallando los satélites y globos utilizados y su fecha de lanzamiento.

TABLA II
ESTUDIOS SOBRE PLHR CAPTADOS DESDE SATÉLITES Y GLOBOS

Nombre	Lanzamiento	Autor y año
OGO-3 [92]	Jun. 1966	Lurette et al. (1977) [91]
ARIEL-3 [86]	May. 1967	Bullough, Tatnall y Denby (1976) [70]
		Tatnall et al. (1983) [88]
		Bullough (1983) [89]
		Bullough, Kaiser y Strangeways (1985) [90]
OGO-4 [94]	Jul. 1967	Lurette, Park y Helliwell (1979) [93]
ISIS-1 [106]	Ene. 1969	Rodger, Thomson y Dowden (1995) [105]
ISIS-2 [98]	Abr. 1971	Park y Helliwell (1981) [97]
		Rodger, Thomson y Dowden (1995) [105]
ARIEL-4 [87]	Dic. 1971	Bullough, Tatnall y Denby (1976) [70]
		Tatnall et al. (1983) [88]
		Bullough (1983) [89]
		Bullough, Kaiser y Strangeways (1985) [90]
S3-3 [121]	Jul. 1976	Koons, Dazey y Edgar (1978) [122]
ISSE-1 [96]	Oct. 1977	Bell, Lurette e Inan (1982) [95]
AUREOL-3 [102]	Sep. 1981	Parrot (1990) [103]
Globo B15-1N	Mar. 1982	Tomizawa, Yoshino y Sasaki (1985) [99]
Globo B15-2N	Nov. 1982	Tomizawa, Yoshino y Sasaki (1985) [99]
OHZORA [100]	Feb. 1984	Tomizawa y Yoshino (1985) [101]
		Parrot et al. (2005) [111]
		Werner, Rodger y Thomson (2005) [66]
		Němec et al. (2006) [112]
		Němec et al. (2007) [64]
		Němec et al. (2007) [113]
		Wu, Fu y Zhang (2014) [61]
		Němec, Parrot y Santolik (2015) [67]
		Wu et al. (2017) [114]
		Zhang y Ma (2018) [123]
		Parrot (2018) [75]
Wu et al. (2019) [63]		
Guo et al. (2019) [124]		
Wu et al. (2020) [62]		
C/NOFS [118]	Abr. 2008	Pfaff et al. (2014) [117]
Chibis-M [120]	Ene. 2012	Dudkin et al. (2015) [119]

D. Antecedentes Teóricos

Como contaminante artificial reconocido, el efecto ambiental causado por los PLHR se ha convertido en un asunto de creciente preocupación [123], lo que provoca la necesidad de una investigación a gran escala [125]. La cantidad de CEM existentes aumentará a medida que demandemos más electricidad [126], ya que el aumento de población provocará el incremento de aparatos eléctricos usados. De esta manera, para mejorar el conocimiento y la experiencia en este campo, nació el proyecto UAL18-TIC-A025-A. A continuación se van a exponer algunas consideraciones teóricas que se tendrán en cuenta en el desarrollo de esta tesis.

Dos puntos de la Tierra se conjugan geomagnéticamente si están en extremos opuestos de la misma línea de campo. En el mapa de coordenadas magnéticas [127] de la Fig. 10 se ha señalado con un círculo rojo la situación del conjugado magnético de la península ibérica, encontrándose en el sur del Océano Atlántico, lejos de cualquier sistema de energía. Considerando el mecanismo subyacente de la amplificación de los PLHR en la ionosfera que se ha mostrado en la Fig. 4, se puede considerar que la única fuente posible de PLHR en España se encuentra en su sistema eléctrico.

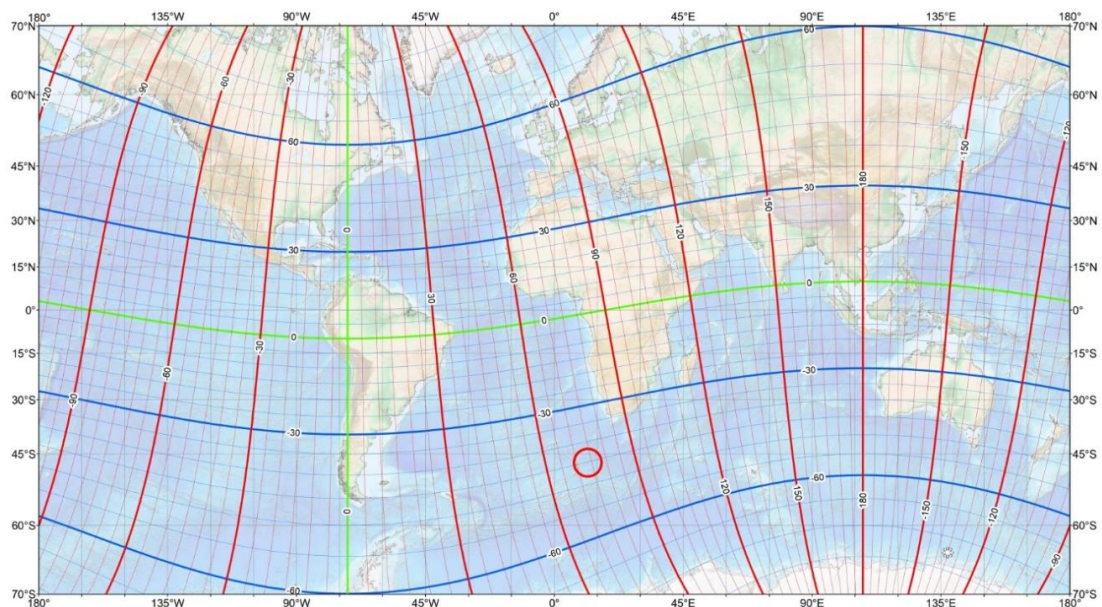


Fig. 10. Mapa de coordenadas magnéticas [127] con el conjugado de la península ibérica en un círculo rojo.

En cuanto a la propagación de los CEM, un factor a destacar es que la atmósfera ofrece una baja atenuación en la banda ELF. La atenuación a la frecuencia de 40 Hz es de unos 0,64 dB/1.000 Km [128], aunque depende de la

latitud. Este hecho permite a estas ondas propagarse por todo el globo terrestre con muy poca atenuación. Otros autores [129] han realizado trabajos similares mediante simulaciones y métodos analíticos que corroboran esta baja atenuación. Pero la falta de estudios para frecuencias superiores a los 50 Hz limita la fiabilidad para obtener resultados fidedignos más allá de la frecuencia fundamental de la red eléctrica.

Las ecuaciones de Maxwell que rigen el CEM alterno pueden llegar a ser un problema dificultoso debido al acoplamiento entre el campo eléctrico y el magnético. No obstante se puede hallar una solución aproximada si se considera que la frecuencia es pequeña, despreciando así el campo eléctrico que se induce debido a las variaciones del campo magnético. Las cargas eléctricas que circulan por los conductores se mueven a la frecuencia de la red (50 Hz en Europa), por lo que esta oscilación tan pequeña permite considerar a ambos campos como cuasi estáticos. Con esta aproximación (llamada cuasi estática), se consigue desacoplar el campo eléctrico del campo magnético.

Desde hace tiempo son conocidas las ecuaciones de propagación de la radiación electromagnética a lo largo de un sistema de transmisión. En 1926, Carson [130] analizó la propagación de ondas en un cable recto largo horizontal con retorno a tierra y presentó un modelo matemático que todavía sigue siendo usado por los investigadores [131]. Utilizando las ecuaciones de Carson, en [132] se presentó el modelo de propagación de ondas en líneas de transmisión sobre terreno con pérdidas y en [85] hicieron una presentación teórica de los campos de inducción y radiación debidos a una línea aérea de transmisión. En [133] propusieron un método de cálculo basado en una aproximación discreta de la ley de Biot-Savart para calcular los componentes de la densidad de flujo magnético a distancias lejanas de las líneas eléctricas para diferentes configuraciones de líneas de transmisión. En [88] estudiaron la generación y radiación de armónicos de líneas eléctricas consideradas como antena de cable largo, en [134] se proporcionó una revisión muy completa de las características de la fuente radiante y en [61] presentaron un modelo físico de la propagación de los PLHR en la Tierra, la atmósfera y la ionosfera.

Es decir, existen modelos para determinar el campo eléctrico y el campo magnético de líneas de transmisión y distribución de diferentes topologías, pero cuando tenemos una configuración compleja y los campos provienen de fuentes muy diversas, se recurren a las mediciones experimentales, ya que los CEM producidos dependen de una geometría compleja y además pueden ser distorsionados por objetos cercanos como árboles y estructuras altas. Depende incluso de los materiales del que están hechos estas estructuras [135]. Existen

modelos computacionales para determinar los campos eléctricos y magnéticos de líneas y subestaciones transformadoras [136] [137] [138], pero abordar el problema de obtener los campos eléctricos y magnéticos en un entorno urbano o residencial de manera teórica sería una misión inabarcable.

Las leyes básicas que rigen los CEM establecen que la intensidad del campo eléctrico es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el punto de medición y la fuente del campo [139]. Los campos eléctricos generados alrededor de dos objetos con diferente potencial se miden en unidades de voltios por metro (V/m). La magnitud del campo eléctrico es función de la tensión que hay en los conductores, es decir, cuanto mayor sea la tensión de la línea, mayor será el campo eléctrico generado, incluso cuando la electricidad no está siendo usada. Por el contrario, los campos magnéticos solo se producen cuando hay electricidad fluyendo por un conductor y dependen de la corriente en el cable y la distancia. A mayor intensidad de corriente eléctrica que recorre una línea, mayor será el campo magnético que se genera.

La densidad de flujo magnético B , cuyo resultado se expresa en Tesla (T), se crea o se induce por la intensidad de campo magnético H (A/m), y se relacionan mediante (1):

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1)$$

siendo μ la permeabilidad magnética del material en el que se está induciendo el magnetismo. En el caso del aire μ toma el valor de $4\pi 10^{-7}$ henrio/m [140].

Según la ley de Biot-Savart, la magnitud del flujo magnético en el magnetómetro es inversamente proporcional al cubo de la distancia [141] entre el punto de medición en el plano normal y la fuente del campo, por lo que las fuentes más cercanas al magnetómetro tendrán más influencia. Para una espira circular con su eje z a lo largo del eje se simetría [142], la ley de Biot-Savart queda como (2):

$$B(z) = \frac{\mu I R_b^2}{2(Rb^2 + z^2)^{3/2}} \quad (2)$$

siendo R_b el radio de la bobina, I la intensidad que circula por el conductor, y z la distancia de este a la bobina.

La ley de Biot-Savart indica que incluso a distancia 0 el campo es finito. Y que para distancias grandes ($z \gg Rb$), la densidad de flujo magnético disminuye con el cubo de la distancia ($B \propto K/z^3$).

El principio de funcionamiento de un sensor de campo magnético tipo bobina sigue la ley de Faraday, que establece que el voltaje que se induce en un circuito cerrado es directamente proporcional a la variación en el tiempo del flujo magnético que atraviesa la superficie delimitada por el circuito. Esta ley en su forma diferencial es una de las ecuaciones de Maxwell (3):

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

Por medio del teorema de Stokes, (3) puede escribirse en la forma (4):

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

donde la integral de la izquierda es una integral de línea a lo largo de la curva que encierra el circuito de área S . Si el circuito es cerrado y la densidad de flujo magnético es cuasi estática, esta integral representa el voltaje generado en los extremos del circuito en respuesta al cambio en el tiempo de $B \cdot S$. Considerando el área constante, (4) queda como (5):

$$V = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{B} \cdot S) = -S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5)$$

Para un campo magnético que proviene de una corriente senoidal (6), se tiene que el cambio en el tiempo es (7), por lo que el voltaje queda como (8):

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \text{ sen } \omega t \quad (6)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \omega \vec{B}_0 \cos \omega t \quad (7)$$

$$V = - \omega B_0 S \cos \omega t \quad (8)$$

Se ha supuesto que la corriente que se induce en el circuito cerrado es lo suficientemente pequeña como para que el campo magnético opuesto generado por ella puede ser obviado. Cabe señalar que la relación entre V y B_0 supone que la dirección de B_0 es perpendicular al plano de la espira, por lo que solo la componente espacial de B_0 perpendicular al área de la espira es la que induce voltaje (Fig. 11).

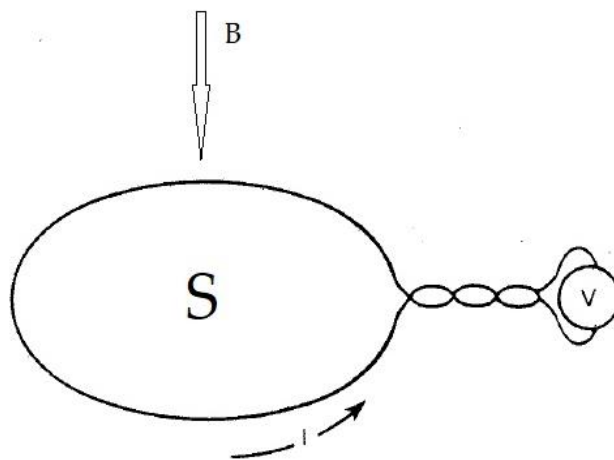


Fig. 11. Voltaje generado en un circuito cerrado por un campo magnético.

Para una bobina de n espiras (8) queda como (9):

$$V = - n \omega B_0 S \cos \omega t \quad (9)$$

El magnetómetro usado en esta tesis permite la medición de CEM de muy baja frecuencia e intensidad. Este tipo de sensores de campo magnético constan de una bobina de un gran número de vueltas que mide el vector de densidad de flujo magnético perpendicular al área del sensor. El desarrollo de una bobina con un gran número de vueltas no es una innovación, aunque sí que es de interés por su tamaño, el hilo usado y su configuración [143].

Para señales sinusoidales, en presencia de ruido térmico, la relación S/N ¹¹ para la salida de la bobina viene dada por (10):

¹¹ Signal/Noise.

$$S/N(\omega_k) = \frac{\vec{B} \omega_k n S}{\sqrt{4 K T W R}} \quad (10)$$

donde R es la parte real de la impedancia de la bobina a la frecuencia ω_k , K es la constante de Boltzmann, T es la temperatura en kelvin, W es el ancho de banda del sistema amplificador, n es el número de vueltas y S es el área promedio de la bobina.

Se observa que para una densidad de flujo magnético B y una frecuencia de medición ω_k , la relación S/N aumenta con n y con $1/\sqrt{R}$. Por ello, para mejorar la eficiencia de la bobina, este tipo de magnetómetros se construye con un número elevado de vueltas con la menor resistencia posible.

En cuanto al sistema de amplificación, este depende en gran medida de la impedancia de entrada, la sensibilidad y el ruido. Estos parámetros vienen determinados por las características del sensor, y son los que determinarán la estructura y ganancia del sistema de amplificación.

En [144] se puede encontrar un estudio de diversos métodos empleados para la detección de señales débiles. Entre los métodos destacan aquellos basados en la Transformada Discreta de Fourier (DFT¹²), que se suele implementar con sus algoritmos rápidos llamado Transformada Rápida de Fourier (FFT¹³) [145], [146]. El resultado final de este análisis es el espectro de una señal que se expresa como un conjunto de pares de coeficientes que representan la amplitud y la fase de una señal sinusoidal de duración infinita, llamadas líneas espectrales debido a su representación típica en el dominio de la frecuencia.

Como se comentó anteriormente, el campo magnético que se pretende medir procede de la corriente eléctrica que circula por los conductores en el sistema de distribución y transporte eléctrico. La forma de onda de esta corriente no es exactamente sinusoidal, apareciendo distorsiones que conducen a armónicos significativos de múltiplos de 50 o 60 Hz, por lo que la densidad de flujo magnético medido también contendrá estas mismas distorsiones [147].

Para las formas de onda en corriente simétricas aparecen armónicos de orden impar, que son los múltiplos 3º, 5º, 7º, etc., de la frecuencia fundamental, mientras que para las formas de onda asimétricas, aparte de los armónicos

¹² Discrete Fourier transform.

¹³ Fast Fourier transform.

impares, también pueden aparecer múltiplos pares de la frecuencia fundamental (es decir, el 2º, 4º, 6º, etc.) e incluso componentes de corriente continua (CC), aunque las magnitudes de estos armónicos pares en las redes de baja tensión son pequeñas [148]. Estos armónicos pares son generalmente bastante pequeños porque la mayoría de las cargas no lineales en los sistemas de potencia producen armónicos impares y los armónicos pares tienden a cancelarse entre sí. Si estos armónicos pares están presentes, por lo general, indican que puede haber una corriente continua en el devanado secundario del transformador.

Las cargas monofásicas no lineales, como ordenadores, iluminación con balastos electrónicos, electrodomésticos, etc., generan armónicos impares (3º, 5º, 7º, 9º, etc.), siendo los más problemáticos para las cargas monofásicas no lineales los múltiplos impares del 3º (es decir, el 9º, 15º, etc.), llamados "triplens". Por otro lado, las cargas trifásicas no lineales, como inversores, convertidores, rectificadores trifásicos, etc. generan principalmente armónicos 5º y 7º y una cantidad menor de armónicos 11º y 13º [149].

Entre los armónicos de corriente existen también otras frecuencias que no son un múltiplo entero de la frecuencia fundamental y que pueden manifestarse como frecuencias discretas o como un espectro de banda ancha [150]. Las causas principales de la aparición de interarmónicos suelen ser dos: por un lado, el cambio aleatorio en la magnitud del valor del voltaje, corriente o del ángulo de fase provoca la aparición de efectos espectrales intermedios y por otro lado, el masivo uso de cargas no lineales, y especialmente aquellas que interactúan con verdaderos sistemas de potencia interarmónicos, como sistemas de propulsión de barcos, inversores de potencia entre diferentes sistemas de frecuencia, aerogeneradores, etc. [151].

La principal fuente de aparición de los armónicos está asociada con dispositivos de conmutación [152], es decir, controladores de potencia de tiristores. Desde los años 60, los controladores de potencia de tiristores se utilizan en todas las industrias donde es necesario controlar la energía liberada a altas cargas activas [65]. Como resultado, si se utiliza un controlador de potencia de tiristor, aparecen pulsos de corriente con una frecuencia de repetición múltiplo de la frecuencia industrial de 50 o 60 Hz en el circuito de potencia. En la Fig. 12a tomada de [65] se observa la forma de onda característica de una corriente de carga en el caso de conmutación de tiristores y en la Fig. 12b el tren de pulsos periódicos.

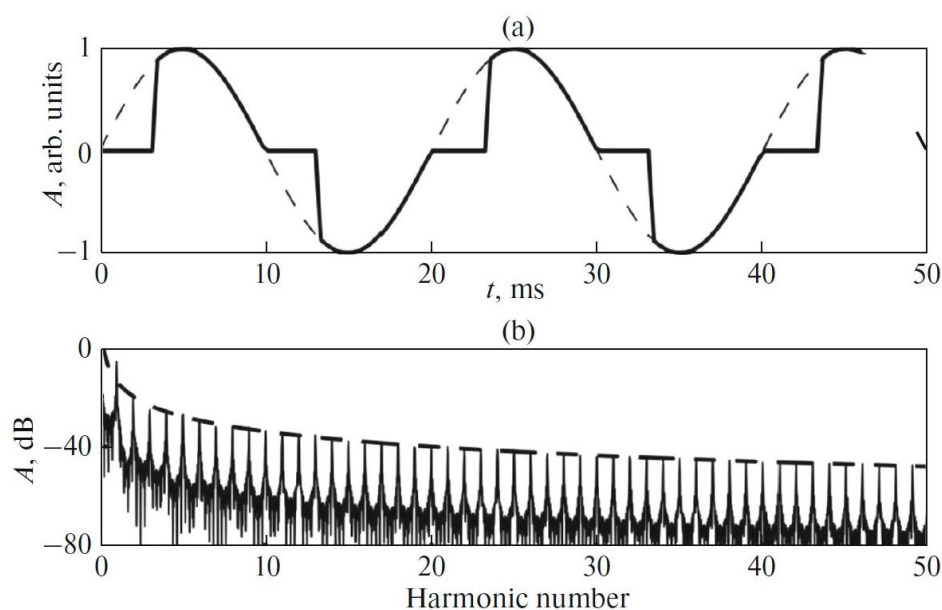


Fig. 12. Uso del tiristor [65]. (a) Forma de onda característica de la corriente para un circuito de control de potencia. (b) Espectro del modelo del tren de pulsos.

Se estima que las cargas no lineales fueron solo el 1,5 % de las cargas totales de la red eléctrica en 1987 [153], pero la creciente complejidad de la red y el crecimiento de la electrónica de potencia ha impactado en muchas cargas que tradicionalmente se consideraban lineales. Como resultado, el número de cargas no lineales ha aumentado de una manera exponencial en las últimas décadas. Las cargas no lineales totales fueron alrededor del 35-40 % en 1995 y del 85 % en 2012, según [154].

Cuando se alimenta una combinación de cargas lineales y no lineales desde un suministro perfectamente sinusoidal, aparecerán pulsos de corriente en el suministro total de corriente con una frecuencia de repetición múltiplo de la frecuencia fundamental de 50 o 60 Hz [155]. Todas estas cargas provocan distorsiones que tienen como consecuencia un empeoramiento en la CEE [156], [157].

Para cuantificar la propiedad no sinusoidal de la forma de onda de una señal se utiliza la tasa de distorsión armónica total (THD^{14}) de la señal. De esta forma, la THD puede expresar colectivamente mediante un % la severidad de las perturbaciones armónicas [158]. Puede particularizarse tanto para la señal de tensión (11) como para la señal de corriente (12):

¹⁴ Total harmonic distortion.

$$THD_V = \sqrt{\sum_{n=2}^H \left(\frac{V_n}{V_1}\right)^2} \cdot 100 \quad (11)$$

$$THD_I = \sqrt{\sum_{n=2}^H \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} \cdot 100 \quad (12)$$

donde V_n o I_n es el valor eficaz de la componente armónica individual de orden n , H es el máximo orden (definido para cada norma particular), y V_1 o I_1 es el valor eficaz de la componente fundamental.

Para el análisis de los armónicos siempre es posible descomponer la señal en componentes espectrales discretas mediante el uso de la transformada de Fourier [159]. Para visualizarlo se ha representado un ejemplo en la Fig. 13 tomada de [160] donde se muestran las barras espectrales para cada orden de armónico de una señal de corriente.

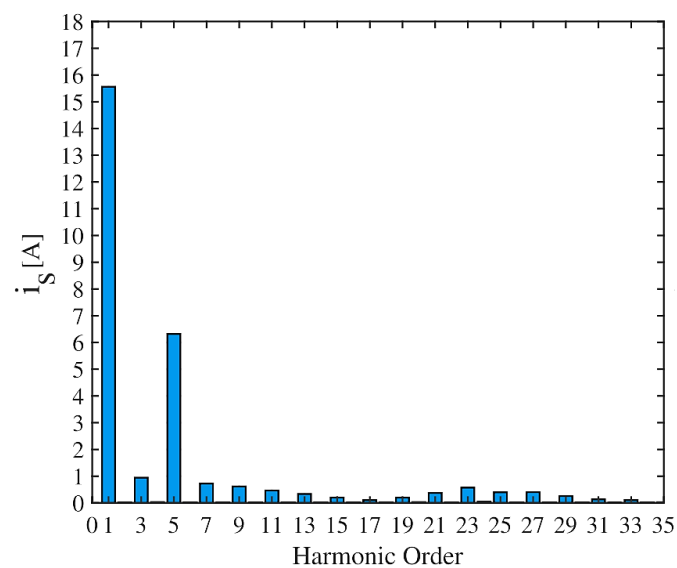


Fig. 13. Ejemplo de espectro de una señal de corriente dado en [160].

Las corrientes armónica inyectadas y las tensiones armónicas resultantes pueden causar problemas en la CEE y afectar el rendimiento de los consumidores conectados a la red eléctrica [161]. El principal fallo en los parámetros de CEE es debido a la contaminación armónica [158], y además sus

efectos son cada día más significativos [162]. Los efectos nocivos más destacados están resumidos en [163]:

- La pérdida de eficiencia en la totalidad de la instalación eléctrica y equipos;
- Problemas en el funcionamiento en equipos electrónicos de regulación, tanto de control como de potencia;
- Sobrecalentamiento de los dispositivos eléctricos (transformadores, motores, etc.) y de las líneas del cableado de potencia, con la consiguiente disminución de la vida útil, degradación del aislamiento, incremento en las pérdidas de energía, etc.;
- Mal funcionamiento en los equipos electrónicos de medición y protección;
- Disparos intempestivos de los interruptores diferenciales;
- Interferencias en los sistemas de telefonía y datos;
- Reducción del valor del coseno de φ y del factor de potencia de la instalación y el envejecimiento y en casos extremos la destrucción de las baterías de condensadores debido a fenómenos de resonancia y amplificación.

Todo el sistema de energía eléctrica se ha vuelto más y más complejo en los últimos décadas debido a la conexión de cargas no lineales, el uso de generación distribuida y la presencia de fallos inesperados [164]. Las redes eléctricas suelen estar cerca de sus límites de estabilidad porque se operan bajo condiciones de carga severas [165]. Es importante limitar la inyección de corrientes armónicas [166] por lo que la monitorización de los parámetros de CEE se vuelve obligatoria a medida que la demanda eléctrica continúa aumentando [167] [168]. A continuación se van a exponer algunas normas que regulan estos parámetros.

E. Parámetros de Calidad de Energía Eléctrica y Normativa Relacionada

Como ya se ha comentado, el proyecto “Campo Electromagnético Generado por Redes Eléctricas Monitorizado” tiene como objetivo monitorizar en tiempo real el CEM producido por equipos, instalaciones y líneas eléctricas. Con más de 100 años de desarrollo, el sistema eléctrico es una de las entidades creadas por el hombre más implantados a nivel global.

El sistema eléctrico puede definirse como el conjunto de elementos necesarios para disponer de energía eléctrica en cualquier lugar en el que su uso se estime preciso [169]. En este sistema se pueden diferenciar tres actividades principales:

- La generación de energía, que se lleva a cabo en centrales que obtienen energía eléctrica a partir de fuentes de energías primarias. Pueden ser de muy diversa índole, tanto renovables (hidráulica, solar, eólica, etc.), como no renovables (nuclear, térmica, etc.);
- El transporte, que transfiere la energía desde las centrales de generación hasta las subestaciones mediante una malla de líneas de alta tensión (AT). En las subestaciones se transforma la AT a media tensión (MT). Suelen estar al aire libre cerca de las centrales y/o en la periferia de las ciudades. Si no son de gran tamaño, se pueden encontrar excepcionalmente en la misma ciudad dentro de un edificio;
- La distribución, que conduce la energía hasta los usuarios finales mediante líneas de distribución en MT y baja tensión (BT). En los centros de transformación (CT) se reduce la tensión de MT a BT para poder ser suministrada a los consumidores finales.

Las redes eléctricas incluyen todo un entramado de líneas a lo largo del territorio de los países [170] y distribuyen la electricidad desde los centros de generación hasta los usuarios industriales, comerciales y domésticos (véase el esquema de la Fig. 14). Según datos de la compañía Red Eléctrica de España (REE) [171], que es el operador y transportista único del sistema eléctrico español, la red de distribución eléctrica en España alcanzó los 44.769 km en el año 2021; se estima que existen en Europa aproximadamente 360.000 km de líneas eléctricas aéreas de transmisión [172].

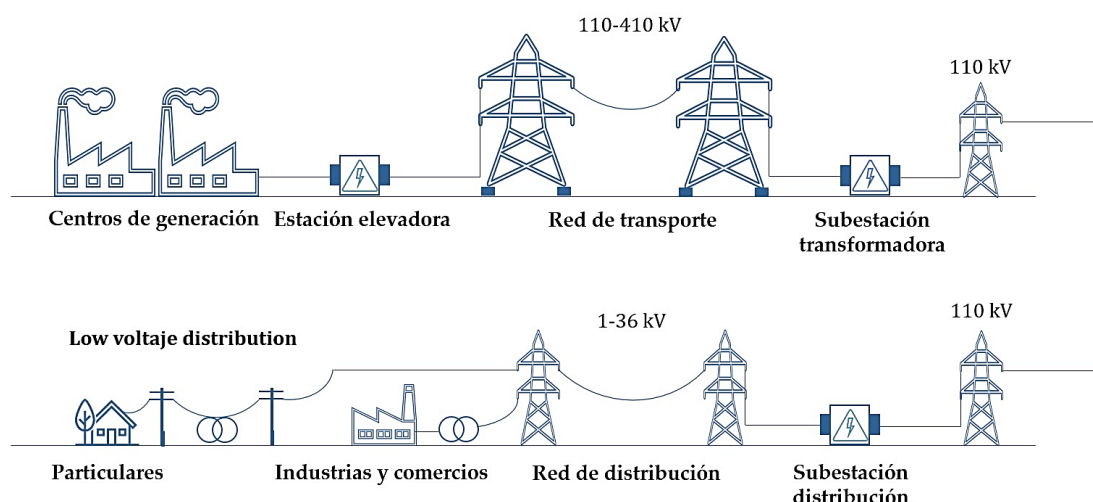


Fig. 14. Arquitectura del sistema de suministro eléctrico.

Un suministro estable y confiable de energía eléctrica es esencial tanto para la sociedad como para la economía [173]. Los usuarios tienen derecho a servicios de alta calidad, y para garantizarlo se han establecido unos criterios en una serie de normas y guías específicas. En España, el Real Decreto (RD) 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica [174], en su Artículo 102, apartado 2, menciona que para establecer los distintos aspectos de la calidad del producto se seguirán los criterios recogidos en la norma UNE-EN 50160 [175] o norma que la sustituya. Posteriormente, la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico [176], en su Capítulo II, Artículo 51, define la calidad del suministro eléctrico como “el conjunto de características, técnicas y de atención y relación con los consumidores y, en su caso, productores, exigibles al suministro de electricidad de las empresas que realicen actividades destinadas al suministro eléctrico”. En cuanto a las características técnicas, la calidad del suministro eléctrico menciona la continuidad, el número y duración de interrupciones y la calidad del producto, entre otros. Pero en [176] no se hace referencia a ninguna guía específica, solo se dice que “mediante real decreto del Consejo de Ministros se establecerán indicadores individuales y colectivos, y valores objetivo para estos indicadores”, algo que no se llevó a cabo. Por lo tanto, en la práctica, se siguen los criterios establecidos en [174] y en la norma UNE-EN 50160:2011 “Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución” [175], de marzo de 2011 y sus posteriores modificaciones UNE-EN 50160:2011/A1 [177], UNE-EN 50160:2011/A2 [178] y UNE-EN 50160:2011/A3 [179]. Esta norma define, describe y especifica las principales características de la tensión en los terminales de suministro de un usuario de redes eléctricas de CA públicas de baja, media y alta tensión en

condiciones normales de operación. También detalla los límites en los cuales se espera que se conserven las propiedades de la tensión en cualquier punto de suministro de la red de distribución europea general y no describe la situación habitual que normalmente experimenta un usuario individual de la red.

Por lo tanto, el objetivo de [175] es definir, describir y especificar las características de la onda de tensión, tales como la frecuencia, la amplitud, la forma de onda y la simetría de los voltajes de línea. En cuanto a la onda de corriente, hay que tener en cuenta que las corrientes armónicas son perturbaciones que se originan en las propias instalaciones y que se inyectan en los sistemas de distribución [180], por lo que la calidad de esta onda depende tanto o más de las propias instalaciones y dispositivos de los consumidores que del suministrador de energía eléctrica.

En esta tesis los parámetros que se van a estudiar en profundidad son la frecuencia de la red y la tasa de distorsión armónica en corriente.

1) Frecuencia de la Red Eléctrica

La mayoría de los sistemas de suministro de energía eléctrica del mundo a gran escala operan con una alimentación de corriente alterna (CA) trifásica con frecuencia de red de 50 o 60 Hz, dependiendo del país [181]. En la Fig. 15 se muestra un mapa con las diferentes frecuencias nominales usadas en todos los países. En rojo se observan los países con una frecuencia de red de 60 Hz, mientras que en azul se muestran los que tienen frecuencia de 50 Hz, aunque hay casos como Japón, donde coexisten las dos frecuencias dependiendo de la zona del país.

La frecuencia es uno de los parámetros clave en la CEE [164] y debe mantenerse lo más estable posible. Como se observa en la Fig. 15 la frecuencia estándar de la red eléctrica europea es de 50 Hz y para garantizar que esta permanezca siempre en un nivel estable, el equilibrio entre la producción y el consumo de energía eléctrica siempre debe ser el correcto. El desajuste entre la producción y el consumo provoca desviaciones de la frecuencia nominal [182]. Para mantener la frecuencia en un valor constante hay que poseer una capacidad de producción que se adapte en todo momento a la demanda. La capacidad de producción de energía eléctrica puede variar de forma discreta, particularmente cuando se da el caso de fallos en la generación. Además, en las redes de transporte y distribución, hay siempre una exposición al desequilibrio que provocaría un aumento o descenso de la frecuencia. Dicho riesgo se puede minimizar si una gran cantidad de redes se agrupan en una gran red

interconectada con una capacidad de producción elevada con respecto a las posibles variaciones que pudieran originarse [175]. A este respecto, un problema reciente son las fluctuaciones adicionales en frecuencia que introduce la implantación masiva de generación eólica o fotovoltaica [183], reduciendo la inercia total disponible en la red [184]. Esto se debe a la ausencia de respuesta inercial y soporte de frecuencia auxiliar [185] tanto en energía eólica como solar, por lo que se pierde el importante efecto de amortiguación. Así, disponer de intercambios eléctricos entre países limítrofes aporta una mayor seguridad en el suministro, y una mayor integración de las energías renovables. La importancia de estas interconexiones eléctricas es crucial para países periféricos como España y Portugal.

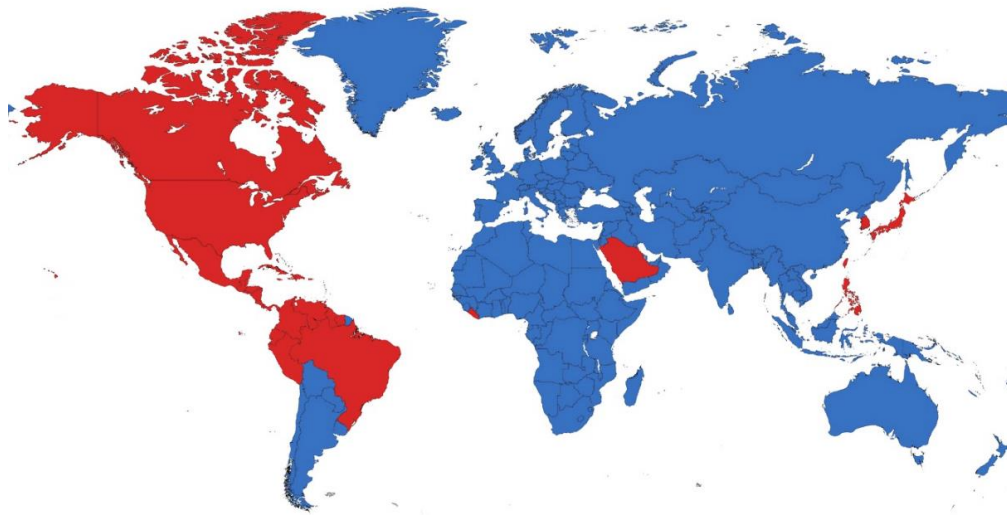


Fig. 15. Frecuencia de uso doméstico en el mundo.

La estabilidad del sistema eléctrico se define como la propiedad del sistema de permanecer en un estado de equilibrio operativo en condiciones normales de funcionamiento y volver a su estado normal o condiciones estables después de ser perturbado. En este sentido, la estabilidad de frecuencia se considera un problema crítico para la operación del sistema de potencia [186]. Una desviación permanente de la frecuencia de su valor nominal puede afectar la operación, confiabilidad, seguridad y eficiencia del sistema de energía y puede dañar equipos, degradar el rendimiento de la carga, sobrecargar las líneas de transmisión e incluso disparar los mecanismos de protección eléctrica [187]. En consecuencia, la medición de la frecuencia es un asunto de crucial importancia en el campo de la ingeniería eléctrica.

Los métodos de medición aplicados en [175] se describen en la norma UNE-EN 61000-4-30:2015 "Compatibilidad electromagnética (CEM)-Parte 4-30:

Técnicas de ensayo y medida - Métodos de medida de la calidad de suministro” [188], de octubre de 2015, y su erratum UNE-EN 61000-4-30:2015/AC:2017-01 [189], donde se definen “los métodos de medida y la interpretación de los resultados de CEE en los sistemas de suministro de energía de CA con una frecuencia fundamental declarada de 50 Hz o 60 Hz. Los métodos de medición se describen para cada tipo de parámetro relevante en términos que brindan resultados confiables y repetibles, independientemente de la implementación del método”. Esta norma indica los métodos de medida destinados para las mediciones in situ, pudiendo ser la magnitud eléctrica directamente accesible (caso general de las redes de BT) o accesibles a través de transductores de medidas. La cadena de medida completa se muestra en la Fig. 16.

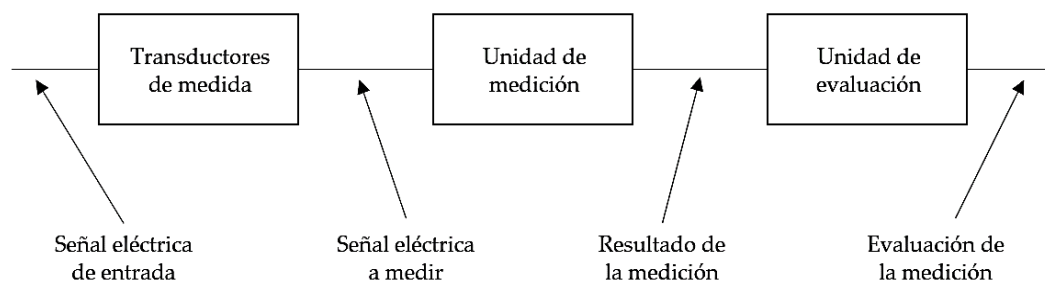


Fig. 16. Cadena de medida según [188].

2) Armónicos en Corriente

Una propiedad de los sistemas eléctricos es que algunas de sus características de calidad dependen más de los usuarios finales que del propio suministrador o productor. En estos casos, el usuario es un importante compañero del suministrador para aplicar un esfuerzo conjunto en mantener una adecuada CEE.

Cuando una combinación de cargas lineales y no lineales se alimenta desde un suministro perfectamente sinusoidal, la corriente de suministro total contendrá armónicos. De ello se deduce que las perturbaciones en el sistema de energía eléctrica son responsabilidad no solo de los distribuidores de electricidad sino también de los usuarios finales, fabricantes e ingenieros [190] [191].

Las corrientes armónicas inyectadas por usuarios finales individuales en el sistema deben limitarse y, por este motivo, se imponen normas estrictas sobre corrientes armónicas en los equipos eléctricos y electrónicos para evitar fallos. Las normas UNE-EN IEC 61000-3-2:2019 “Compatibilidad electromagnética (EMC)—Parte 3-2: Límites—Límites para las emisiones de corriente armónica

(equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase)” [192], de marzo de 2019, y UNE-EN IEC 61000-3-12:2012 “Compatibilidad electromagnética (EMC)— Parte 3-12: Límites—Límites para las corrientes armónicas producidas por los equipos conectados a las redes públicas de baja tensión con corriente de entrada >16 A y ≤ 75 A por fase” [193], de julio de 2012, especifican el límite de los componentes armónicos de la corriente de entrada que un determinado equipo probado bajo unas condiciones específicas puede generar.

En cuanto a la forma de medir las corrientes armónicas, estas se deben evaluar de una manera adecuada realizando la transformación del dominio del tiempo a la frecuencia a través de la DFT. Su uso implica varias ventajas, entre ellas la eficiencia computacional lograda mediante el conocido algoritmo FFT [194]. Para ello se desarrolló la norma UNE-EN 61000-4-7:2004 “Compatibilidad electromagnética (CEM)— Técnicas de ensayo y medida. Guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos conectados” [195], de mayo de 2004, y su posterior enmienda UNE EN 61000-4-7:2004/A1:2010 [196], donde se da una guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos en el margen de frecuencias hasta 9 kHz, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos conectados a estas.

En general, se puede considerar la CEE como la combinación de la disponibilidad del suministro eléctrico, junto con la calidad de las ondas de tensión y corriente suministradas. Una vez descritos los dos parámetros de CEE que se van a estudiar en esta tesis, en el siguiente apartado se va a exponer el problema del nivel de radiación electromagnética que generan los dispositivos y redes eléctricas, ya que el desarrollo universal del sistema eléctrico ha llevado al consiguiente aumento en el nivel de contaminación electromagnética.

Debido a esto, existe una visible inquietud social por los posibles efectos en la salud humana derivados de la exposición a los CEM, lo que ha motivado a muchos científicos e investigadores a estudiar los riesgos para la salud humana [197], concentrándose la mayoría de las publicaciones en las últimas décadas [198]. En el siguiente apartado se van a describir los principales estudios sobre la influencia de la radiación electromagnética de baja frecuencia en la salud.

F. Estudios sobre la Influencia de la Radiación Electromagnética de Baja Frecuencia en la Salud Humana.

Desde que se inició la vida en La Tierra, todos los organismos vivos del planeta han estado rodeados por CEM que naturalmente abundan en su entorno [199] [200] [201]. La Tierra genera un campo magnético permanente a causa de las corrientes eléctricas producidas en el interior de la tierra por el movimiento de iones de metales fundidos [141]. También existen campos eléctricos naturales producidos en la atmósfera a consecuencia de la acumulación de cargas eléctricas debido a las tormentas. La comunicación intercelular de los organismos vivos contiene impulsos eléctricos, y, por tanto, CEM. El cuerpo humano opera con impulsos eléctricos: músculos, sistema nervioso, procesos biológicos y químicos básicos, etc. Por lo tanto, la especie humana ha evolucionado sumergida en estos CEM de origen natural.

Por otra parte, hay CEM que son generados de forma artificial, ya que cualquier dispositivo eléctrico genera un CEM. Dado que el uso de la energía eléctrica es una parte integral de la vida actual, estos campos son omnipresentes en todo nuestro entorno [202] [203]. Desde los años finales del siglo XIX el crecimiento de los CEM artificiales ha ido en aumento, y en ocasiones estos tienen una intensidad más alta que los naturales como consecuencia del desarrollo tecnológico experimentado desde la segunda mitad del siglo XX hasta ahora. Desde 1940 la exposición a los CEM de baja frecuencia ha aumentado de cuatro a cinco veces [204]. Debido a esta exposición continua de la población general, este es un tema de profundo interés para la sociedad actual por el posible riesgo a la salud humana.

En cuanto a los potenciales efectos de los CEM en la salud humana, la primera categorización a contemplar es dividir el espectro de frecuencias entre radiaciones ionizantes y no ionizantes. En general, se acepta que esta división se encuentra en longitudes de onda de alrededor de 10 nm, en la región del ultravioleta lejano. En la Fig. 17 se encuadran diferentes tipos de radiaciones según la división anteriormente expuesta.

La radiación ionizante es una radiación con la suficiente energía para que pueda eliminar electrones de la órbita durante su interacción con un átomo, provocando que el átomo se ionice. Este tipo de radiación puede alterar los átomos de los seres vivos, por lo que puede significar un riesgo para la salud. Puede dañar el tejido humano e incluso tiene suficiente energía como para afectar a los átomos de las células y, por lo tanto, dañar su material genético.

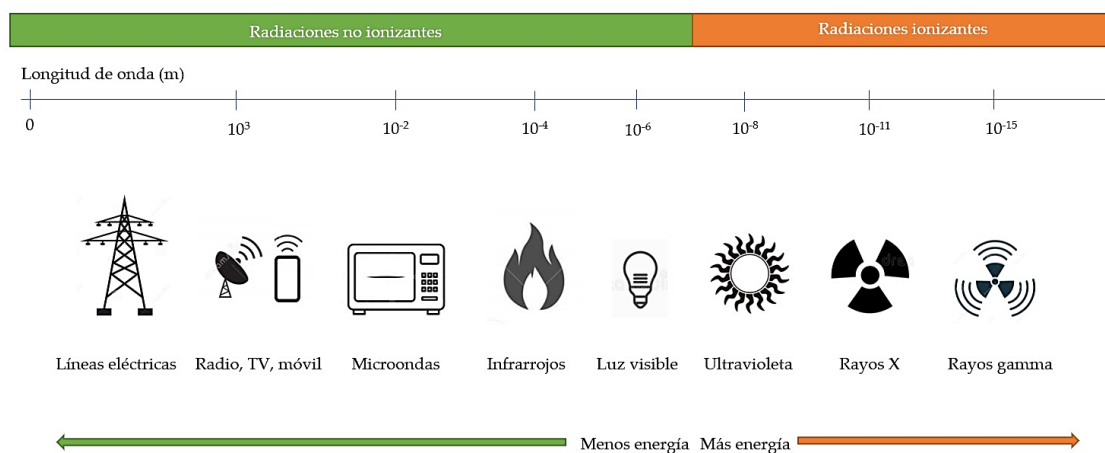


Fig. 17. Clasificación de los tipos de radiaciones.

La radiación no ionizante es el término que se le da a la radiación de la parte del espectro electromagnético donde no hay energía suficiente para causar ionización. Se puede excitar brevemente a las moléculas y aumentar su temperatura sin producir ionización (lo que es la base de los electrodomésticos basados en las microondas).

Dentro de las radiaciones no ionizantes se encuentran las radiaciones ópticas, cuya longitud de onda se encuentra entre 100 nm y 1 mm [205]. Estas se pueden dividir entre radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja [206]. Pueden tener tanto origen natural como artificial y estar presentes en todos los ámbitos donde se desarrolla actividad laboral. La normativa vigente en el ámbito laboral para este tipo de radiación es el RD 486/2010, de 23 de abril, “sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a radiaciones ópticas artificiales” [207], no existiendo legislación específica para el público en general. Los principales efectos nocivos son la acción calorífica, quemaduras, pigmentación retardada, aumento del grosor de la piel, foto envejecimiento y foto carcinogénesis [208].

Dentro de las radiaciones no ionizantes también se encuentran los CEM estudiados en esta tesis, ya que los campos magnéticos generados por las líneas eléctricas con una frecuencia de 50 o 60 Hz y sus armónicos se sitúan en la parte más baja del espectro electromagnético, muy lejos de cualquier radiación ionizante. Por lo tanto, se trata de ondas muy poco energizadas, incapaces de romper enlaces moleculares o de llegar al calentamiento de células. La principal acción de estos CEM en los sistemas biológicos es la inducción de corrientes eléctricas. En la Tabla III se muestran ordenadas por bandas de frecuencias las aplicaciones más típicas que generan radiaciones no ionizantes [209].

TABLA III
 APLICACIONES TÍPICAS DIVIDIDAS POR FRECUENCIAS

Frecuencias	Productor
0 Hz	Reproductores de video; resonancia magnética y otros instrumentos de diagnóstico o científicos; electrólisis industrial; dispositivos de soldadura.
0-300 Hz	Líneas eléctricas de potencia; líneas de distribución doméstica, electrodomésticos; motores eléctricos en automóviles, trenes y tranvías; dispositivos de soldadura.
300 Hz-100 kHz	Pantallas de visualización; dispositivos antirrobo en comercios, sistemas de control de acceso manos libres, lectores de tarjetas y detectores de metales; resonancia magnética; dispositivos de soldadura.
100 kHz-300 GHz	Telefonía móvil; radiodifusión y TV; horno microondas; radar, transceptores de radio portátiles y estacionarios; radio móvil personal; resonancia magnética.

Debido a que la generación, transmisión y uso de la electricidad es una parte omnipresente en la sociedad actual, establecer la influencia de estos campos es una necesidad y es un tema ampliamente estudiado en los últimos tiempos [198].

Fue en 1970, cuando un primer estudio trató de determinar los efectos de este tipo de campo en los animales, específicamente en las ratas de laboratorio [210], aunque no se encontraron diferencias significativas entre las ratas expuestas a la radicación y el grupo de control. Desde entonces, todos los estudios realizados hasta la actualidad han tenido y persiguen el mismo objetivo: tratar de determinar si estamos a salvo de los efectos adversos de los CEM con la intención de lograr una mejor calidad de vida para las poblaciones actuales y futuras.

A principios de la década de 1970 varios informes que se originaron en la Unión Soviética describieron una variedad de efectos nocivos experimentados por el personal que trabajaba en subestaciones de 500 y 750 kV [211]. La preocupación en este campo se incrementó considerablemente debido a un estudio epidemiológico de 1979 [212] llevado a cabo por los investigadores Wertheimer y Leeper en Denver, EE. UU. Los autores encontraron una correlación entre el riesgo de padecer leucemia infantil y una medida indirecta del grado de exposición a las radiaciones ELF provocada por las líneas de transmisión de electricidad. Posteriormente, otros estudios criticaron que el esquema de codificación de cables que habían utilizado para clasificar la exposición de los sujetos era demasiado burdo para dar como resultado una categorización significativa [213].

Debido a la inquietud generada por el informe de Wertheimer y Leeper, durante la década de 1980 muchos investigadores realizaron estudios para establecer la conexión de la exposición crónica a CEM de 50 o 60 Hz con cualquier efecto adverso para la salud, especialmente posible leucemia infantil. En respuesta a esta preocupación, el Instituto de Ingenieros Eléctricos (IEE¹⁵, actualmente integrado en el IET¹⁶) del Reino Unido creó un grupo de trabajo para revisar todas las evidencias disponibles sobre los posibles efectos biológicos de los CEM de bajo nivel y baja frecuencia asociados con cables aéreos de distribución de energía, cableado doméstico, electrodomésticos, pantallas de video, etc. En su informe, publicado en 1994 [214], no encontró evidencia que justifique el alto nivel de especulación mediática sobre los posibles efectos nocivos de los CEM de baja frecuencia o la innecesaria preocupación pública que esto generaba. Tras escudriñar unos 500 estudios aproximadamente, concluyó que la mayoría de los artículos revisados no cumplían con los criterios científicos requeridos para validar los resultados. Pese a las críticas en la metodología y los informes contrarios al estudio de Wertheimer y Leeper, rara vez ha pasado un año sin un debate público sobre la seguridad de los CEM generados por las líneas eléctricas [215].

Otro informe que bastante repercusión a nivel mundial fue el llamado informe Karolinska, publicado en 1993 por Feychting y Ahlbom [216], investigadores del prestigioso Karolinska Institutet de Suecia. El informe advertía del riesgo de casos de leucemia en niños que residen junto a líneas de alta tensión donde la densidad de flujo magnético superaba los 0,2 μ T. Otro de los estudios más citados por la comunidad científica relacionado con la influencia de los CEM de baja frecuencia en la salud humana es un artículo de revisión de 1998 llevado a cabo en la Universidad de Cambridge, Reino Unido [204]. Tras revisar las evidencias acumuladas de los estudios epidemiológicos hasta esa fecha, los investigadores concluyeron que no se podía proporcionar una clara correlación entre la exposición a las radiaciones ELF y el desarrollo de cáncer. En parte esto se debe a que la leucemia infantil (particularmente importante en este contexto) ocurre con una baja frecuencia en la población general. Además, no se conoce ningún mecanismo por el que los CEM puedan contribuir a la tumorigénesis, y, por lo tanto, es imposible definir los parámetros más relevantes. Esto ha contribuido al fracaso de los experimentos con animales para intentar descubrir evidencias concluyentes de los efectos de los CEM para producir tumores; estos estudios adolecen aún más de las

¹⁵ Institution of Electrical Engineers.

¹⁶ Institution of Engineering and Technology.

dificultades asociadas con el uso de una gran cantidad de animales para adquirir datos significativos estadísticamente.

En 1996 la Organización Mundial de la Salud (OMS) creó el Proyecto Internacional de Campos Electromagnéticos para investigar los posibles riesgos para la salud asociados con las tecnologías que emiten las radiaciones ELF. El grupo de trabajo concluyó la revisión en 2007 y presentó las conclusiones y recomendaciones en la monografía 238 sobre los Criterios de Salud Ambiental [202]. Siguiendo un proceso unificado de evaluación de riesgos, el Grupo de Trabajo infirió que no existen problemas sustantivos para la salud en relación con las radiaciones ELF en los niveles en las que estas se encuentran generalmente en el ámbito doméstico. En cuanto a los efectos potenciales a largo plazo, la conclusión fue que existen evidencias limitadas de carcinogenicidad en humanos, aunque estas se ven debilitadas por problemas metodológicos, como el posible sesgo de selección. Tampoco existen mecanismos biofísicos probados que adviertan que las exposiciones de bajo nivel estén involucradas en el desarrollo del cáncer. Por lo tanto, si hubiera algún efecto relacionado con la exposición a estos campos de bajo nivel, tendría que ser a través de un mecanismo biológico que aún se desconoce. Por lo tanto, en conjunto, todas las evidencias en relación con la leucemia infantil no son suficientemente consistentes para ser consideradas causales. Lo que sí concluyen es que existen efectos biológicos por la exposición a niveles altos de campos magnéticos (por encima de los 100 μT), que se explican por mecanismos biofísicos reconocidos. Los CEM de baja frecuencia inducen corrientes en el cuerpo que para intensidades de campo muy altas pueden provocar estimulación nerviosa y muscular e incluso cambios en la excitabilidad de las células en el sistema nervioso central. Por consiguiente, estos son los únicos efectos dañinos conocidos de los CEM con origen en las líneas eléctricas de 50 o 60 Hz.

Otros estudios en las últimas décadas han considerado posibles efectos biológicos de la radiación ELF, como cambios en la movilidad del esperma humano [217], cambios genéticos en las células y las membranas, daño en los tejidos, cambios en la conformación de proteínas, modificación de la absorción de diferentes componentes biológicos, y modificaciones en el material genético [218], perturbaciones del sistema inmunológico [199], efectos en el sistema cardiovascular [219] y la posible interferencia del campo magnético de 50 o 60 Hz en el normal funcionamiento de los marcapasos [220], etc. Otras investigaciones estudiaron la influencia de estos campos sobre el sistema nervioso [221], en la influencia sobre el estado funcional del cerebro mediante

la medición de la actividad cerebral por electroencefalograma [222], o incluso la posible relación con desórdenes del sueño [223] [224].

Sin embargo, hay otros tipos de estudios que consideran que los campos magnéticos y eléctricos usados localizadamente y en determinadas dosis pueden ser beneficiosos en algunas terapias para tratar diversas lesiones [225]. La estimulación magnética es una técnica no invasiva utilizada para el estudio del sistema nervioso central así como para el tratamiento de problemas neuropsiquiátricos. La estimulación magnética transcraneal del sistema nervioso es usada para el estudio de la fisiología del cerebro y para el estudio y posibles tratamientos de enfermedades tales como la epilepsia, depresión, ansiedad o esquizofrenia [226]. También, CEM pulsados en baja frecuencia aumentan la oxigenación en la sangre, mejoran la circulación, el metabolismo celular, y el dolor y la fatiga producidos por la fibromialgia [227]. Se ha comprobado que pueden ayudar a los pacientes con depresión resistente al tratamiento [228], y pueden reducir los síntomas de la esclerosis múltiple esclerosis [229]. Los CEM se han usado para el tratamiento de algunas patologías para estimular la regeneración y reparación de tejidos [230]. También tiene aplicación en el área de la ortopedia para el tratamiento de fracturas no consolidadas y fusiones fallidas [231].

Pese a la gran número de estudios realizados, la relación de los posibles efectos de la exposición a los CEM de baja frecuencia no ha arrojado datos concluyentes, por lo que este problema no está resuelto y necesita investigación avanzada [232]. A pesar de tales esfuerzos, no se conocen claramente los mecanismos ni se ha establecido una dosis de exposición aceptable y segura más allá de toda duda razonable [139]. Hasta que esto no se logre, el asunto de los posibles efectos adversos debe seguir siendo tomado con gran escepticismo por la comunidad científica en general [204]. Como recomendaciones generales de futuras líneas de investigación, la OMS da las siguientes guías [202]:

- Los gobiernos y las industrias deben fomentar programas de investigación con el objetivo de reducir aún más la incertidumbre en las evidencias científicas relacionadas con los posibles efectos en la salud de la exposición a la radiación ELF;
- Los encargados de la formulación de políticas deben establecer un programa de protección que incorpore mediciones de la radiación ELF de todas las fuentes para asegurar que los límites de exposición no se superan ni para el público en general ni para los trabajadores;
- Se alienta a los estados miembros de la OMS a instituir programas de comunicación abiertos y eficaces con todas las partes interesadas para

permitir una toma de decisiones informada. Esto incluye mejorar la coordinación entre industrias, gobiernos locales y ciudadanos en la planificación de las instalaciones que emiten radiaciones ELF;

- Cuando se construyan nuevas instalaciones y diseñen nuevos equipos, incluidos los electrodomésticos, se deben examinar formas de bajo coste para disminuir la exposición a los CEM. Las medidas adecuadas de la reducción de la exposición variarán de un país a otro. Sin embargo, no se justifican las políticas y cláusulas basadas en la aprobación de límites de exposición arbitrarios.
- Se deben considerar los cambios en la forma de trabajar de la ingeniería para disminuir la exposición a los CEM producidos por dispositivos siempre que brinden otros tipos de beneficios adicionales, como una mayor seguridad, o que impliquen un coste mínimo o nulo.
- Si se contemplan cambios en las fuentes originadoras de CEM existentes, se debe considerar la reducción del campo junto con los aspectos de seguridad, confiabilidad y economía.
- Las autoridades locales y nacionales deben vigilar el cumplimiento de las normas de cableado para reducir las corrientes a tierra no intencionadas al construir instalaciones nuevas o cambiar el cableado existente, manteniendo siempre la seguridad.

Una vez vistos los estudios más relevantes sobre la influencia de la radiación electromagnética de baja frecuencia en la salud humana se va a exponer las normativas más relevantes relativas a exposición a los CEM, tanto de carácter internacional, como europea y nacional.

G. Normativa Relativa a Exposición a Campos Electromagnéticos

Como ya se ha comentado, la exposición a los CEM ya sea para trabajadores o para el público en general, debe ser monitorizada y debe existir unas regulaciones apropiadas. A continuación se exponen las normas de referencia relativas a la exposición a CEM.

1) Normativa Europea e Internacional

En 1999, el Consejo de la UE publicó la Recomendación 1999/519/EC “relativa a la exposición del público en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz)” [233]. Esta recomendación contenía restricciones básicas para los campos y corrientes eléctricas inducidas, potencia absorbida en el cuerpo y niveles de referencia para la fuerza de los CEM fuera del cuerpo. Las recomendaciones se derivaban de las pautas de 1998 para limitar la exposición a los CEM de la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP¹⁷) [234].

La ICNIRP publicó en 2010 una nueva guía para acotar la exposición a los CEM (1 Hz – 100 kHz) [140], que es una revisión de la anterior del año 1998 [234]. Varias instituciones han criticado las pautas de esta guía por carecer de una interpretación clara sobre la seguridad de la exposición y la exposición a largo plazo a equipos que generan CEM [200], además de que se doblan los límites de exposición con respecto a la guía anterior.

En 2013 se publica la Directiva 2013/35/UE [235] del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de junio de 2013, “sobre las disposiciones mínimas de salud y seguridad relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de agentes físicos (campos electromagnéticos) (vigésima Directiva específica con arreglo al artículo 16, apartado 1, de la Directiva 89/391/CEE)”, y por la que se derogaba la anterior Directiva 2004/40/CE.

Por lo tanto, las recomendaciones de referencia internacionales seguidas en esta tesis son [233], [140] y [235]. Aunque actualmente, a requerimiento de la Comisión Europea, el Comité Científico de Riesgos Sanitarios, Medioambientales y Emergentes (SCHEER¹⁸) de la UE ha emitido una opinión preliminar relativa a la necesidad de revisar [233] y [235], teniendo en cuenta las últimas evidencias científica disponible sobre CEM y salud. También

¹⁷ International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.

¹⁸ Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks.

pretende actualizar su dictamen de 2015 [236] a la luz de las últimas evidencias científicas con respecto a las frecuencias entre 1 Hz y 100 kHz, cuyo plazo sería julio de 2023.

Debido a que la normativa europea no es legalmente vinculante, cada estado miembro puede tener normas diferentes o puede optar por trasponer a su legislación las directivas europeas, que ha sido el caso de España con esta directiva en concreto. En algunos países existe normativa específica más restrictiva que la directiva europea. Sirva como ejemplo la separación mínima que debe existir entre las instalaciones eléctricas de potencia y las guarderías y escuelas primarias en algunos países como Suiza, Alemania y Suecia [237].

Otros organismos como el IEEE¹⁹ han desarrollado sus propias normas y recomendaciones, siendo las más importantes el estándar para niveles de seguridad con respecto a la exposición humana a los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos de 0 Hz a 300 GHz [238] y el estándar para las prácticas recomendadas para las mediciones y cálculos de campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos con respecto a la exposición humana a dichos campos, de 0 Hz a 300 GHz [239].

2) Normativa Española

No existe legislación básica en España de aplicación directa sobre los CEM de 50 Hz generados en la producción, transformación, transporte, distribución y uso de la energía eléctrica común, ya que el RD 1066/2001, de 28 de septiembre, “por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas”, en su ámbito de aplicación solo aparecen “las emisiones de energía en forma de ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio sin guía artificial, y que sean producidas por estaciones radioeléctricas de radiocomunicaciones o recibidas por estaciones del servicio de radioastronomía” [240].

Sin embargo, la normativa que regula la exposición de los trabajadores a los CEM viene recogida en el RD 299/2016, de 22 de julio, “sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados

¹⁹ Institute of Electrical and Electronics Engineers.

con la exposición a campos electromagnéticos” [241]. Esta ley es la trasposición al derecho español de [235].

De hecho, en la práctica, en España se aplican los límites de [233] como referencia. En 2001, el Ministerio de Sanidad y Consumo publicó el informe "Campos electromagnéticos y salud pública" [242], en el que se concluye que la exposición a CEM no ocasiona efectos adversos para la salud dentro de los límites que ese establecen en [233] y, en consecuencia, el cumplimiento de la dicha recomendación es suficiente para garantizar la protección de las personas en relación a los posibles efectos negativos de los CEM.

3) Límites a la Exposición a los Campos Magnéticos

Los límites para el campo magnético, que [241] llama niveles de acción (NA), son los que aparecen en su Anexo II. En la Tabla IV se muestran los NA para campos magnéticos de frecuencias menores a 10 MHz que podrían tener posibles efectos adversos para la salud.

TABLA IV
NIVELES DE ACCIÓN PARA EL CAMPO MAGNÉTICO SEGÚN RD 299/2016

Intervalo de frecuencias	NA _{inf} (μT) (RMS)	NA _{sup} (μT) (RMS)	NA _{extremidades} (μT) (RMS)
$1 \leq f < 8 \text{ Hz}$	$2 \cdot 10^5/f^2$	$3 \cdot 10^5/f$	$9 \cdot 10^5/f$
$8 \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2,5 \cdot 10^4/f$	$3 \cdot 10^5/f$	$9 \cdot 10^5/f$
$25 \leq f < 300 \text{ Hz}$	10^3	$3 \cdot 10^5/f$	$9 \cdot 10^5/f$
$300 \leq f < 3 \text{ kHz}$	$3 \cdot 10^5/f$	$3 \cdot 10^5/f$	$9 \cdot 10^5/f$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	10^2	10^2	$3 \cdot 10^2$

Los NA pueden ser:

- NA_{inf}: estar por encima de estos niveles puede producir pequeños cambios en las funciones cerebrales y sufrir trastornos transitorios en las percepciones sensoriales.
- NA_{sup}: por encima de estos es posible sufrir ciertos efectos negativos en la salud, tales como el calentamiento o la estimulación del tejido nervioso y muscular;
- NA_{extremidades}: estos niveles se relacionan con los posibles efectos en la salud de los campos eléctricos «in situ», ya que pueden provocar la estimulación eléctrica de los tejidos de las extremidades debido a que

el campo magnético se acopla más débilmente en las extremidades que al cuerpo entero.

Si se evalúan los NA de la Tabla IV para una frecuencia de 50 Hz, el resultado es de 1.000 μT para los efectos sensoriales, 6.000 μT para los efectos perjudiciales para la salud y 18.000 μT para la exposición de las extremidades a un campo magnético localizado. En la Fig. 18 están representados gráficamente esos valores. Si se comparan estos valores con otras normativas, se puede observar que según [235] los valores son los mismos, ya que como se dijo, [241] es la transposición de esa directiva al derecho nacional.

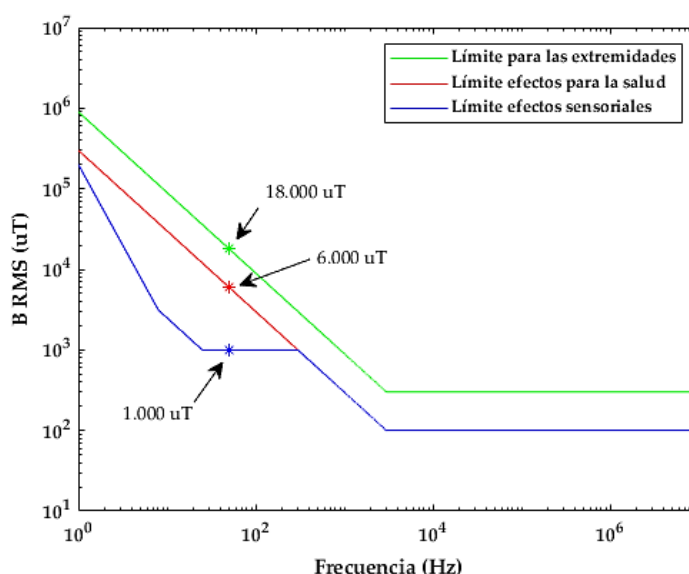


Fig. 18. Límites de exposición al campo magnético según RD 299/2016.

En [140] se hace una distinción entre exposición de trabajadores y pública. La Tabla V y Tabla VI muestran los valores de los límites de exposición recomendados en los distintos rangos de frecuencias.

TABLA V
LÍMITES DE EXPOSICIÓN PARA TRABAJADORES SEGÚN ICNIRP

Intervalo de frecuencias	Límite exposición trabajadores (T)
1 Hz-8 Hz	$0,2/f^2$
8 Hz-25 Hz	$2,5 \cdot 10^{-2}/f$
25 Hz-300 Hz	10^{-3}
300 Hz-3 kHz	$0,3/f$
3 kHz-10 MHz	10^{-4}

TABLA VI
LÍMITES DE EXPOSICIÓN PÚBLICA SEGÚN ICNIRP

Intervalo de frecuencias	Límite exposición pública (T)
1 Hz-8 Hz	$4 \cdot 10^{-2}/f^2$
8 Hz-25 Hz	$5 \cdot 10^{-3}/f$
25 Hz-50 Hz	$2 \cdot 10^{-4}$
50 Hz-400 Hz	$2 \cdot 10^{-4}$
400 Hz-3 kHz	$8 \cdot 10^{-2}/f$
3 kHz-10 MHz	$2,7 \cdot 10^{-5}$

Evaluando estos límites para una frecuencia de 50 Hz, el resultado es de 1.000 μ T para los trabajadores y 200 μ T para el público general (ver Fig. 19).

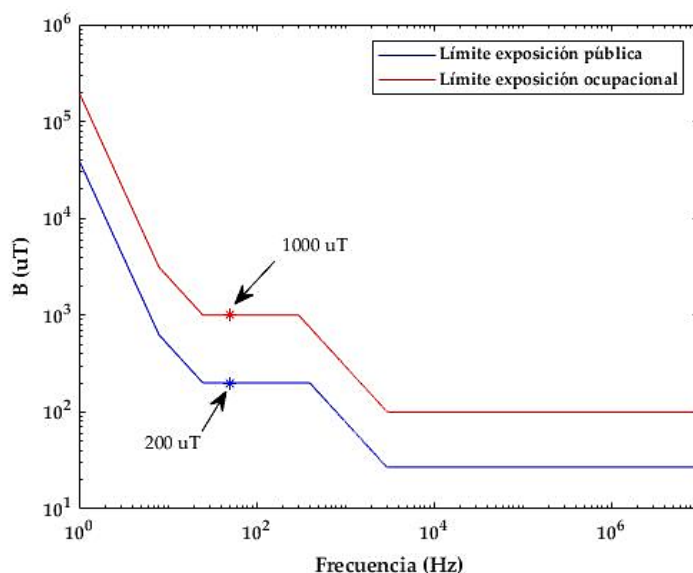


Fig. 19. Límites de exposición al campo magnético según ICNIRP.

Finalmente, y aunque [240] solo afecta a “emisiones de energía en forma de ondas electromagnéticas, que se propagan por el espacio sin guía artificial, y que sean producidas por estaciones radioeléctricas de radiocomunicaciones” (artículo 2 – Ámbito de aplicación), se van a mostrar los niveles de referencia para el campo magnético (ver Tabla VII) de este RD, ya que incluyen frecuencias de la banda ELF-ULF. Se han incluido estos niveles porque a priori no se puede saber la procedencia exacta de las emisiones cuando se está midiendo, ya que los CEM de 50 Hz generados en la producción, transformación, transporte, distribución y uso de la energía eléctrica se propagan globalmente.

TABLA VII
NIVELES DE REFERENCIA PARA EL CAMPO MAGNÉTICO SEGÚN RD 1066/2001

Gama de frecuencia	B (μT) RMS
0-1 Hz	$4 \cdot 10^4$
1-8 Hz	$4 \cdot 10^4/f^2$
8-25 Hz	$5.000/f$
0,025-0,8 kHz	$5/f$
0,8-3 kHz	6,25
3-150 kHz	6,25
0,15-1 MHz	$0,92/f$
1-10 MHz	$0,92/f$
10-400 MHz	0,092
400-2.000 MHz	$0,0046/f^{1/2}$
2-300 GHz	0,20

Evaluando para una frecuencia de 50 Hz, el valor límite del nivel de referencia corresponde a 100 μT (ver Fig. 20), el mismo valor de [233] para la frecuencia fundamental de 50 Hz.

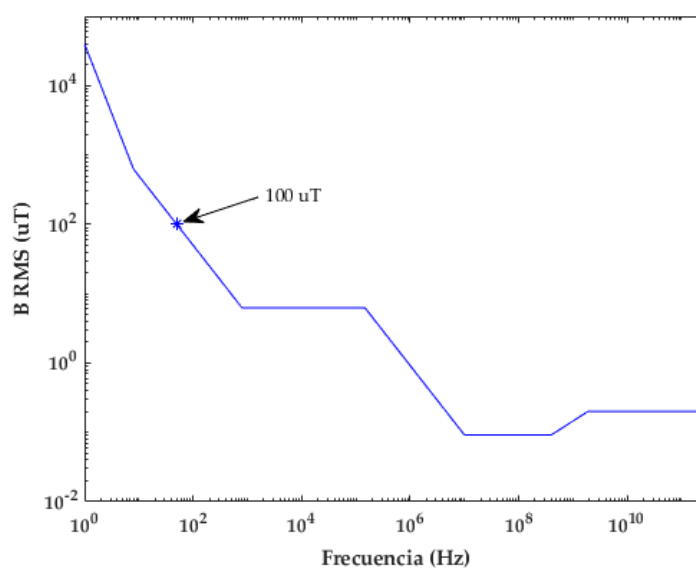


Fig. 20. Límites de exposición al campo magnético según RD 1066/2001.

En el resumen presentado en la Tabla VIII se exponen cómo han evolucionado los valores de la legislación europea a lo largo de los últimos años para los límites de exposición a los CEM de 50 Hz. En la Fig. 21 puede apreciarse que los límites propuestos están siendo cada vez menos restrictivos. Al no poderse haber establecido una relación de los posibles efectos de la

exposición a campos ELF con los efectos sobre la salud de las personas, los límites se han ido aumentando en cada normativa nueva. Aunque, tal como recomienda la OMS [202], el problema no está resuelto y se necesita investigación avanzada.

TABLA VIII
EVOLUCIÓN DE LOS LÍMITES DE EXPOSICIÓN AL CAMPO MAGNÉTICO

Normativa o Recomendación	Límite exposición pública (μT)	Límite exposición ocupacional (μT)
Guía ICNIRP 1998	100	500
Recomendación 1999/519/EC	100	
RD 1066/2001	100	
Guía ICNIRP 2010	200	1.000
Directiva 2013/35/UE		1.000/6.000
RD 299/2016		1.000/6.000

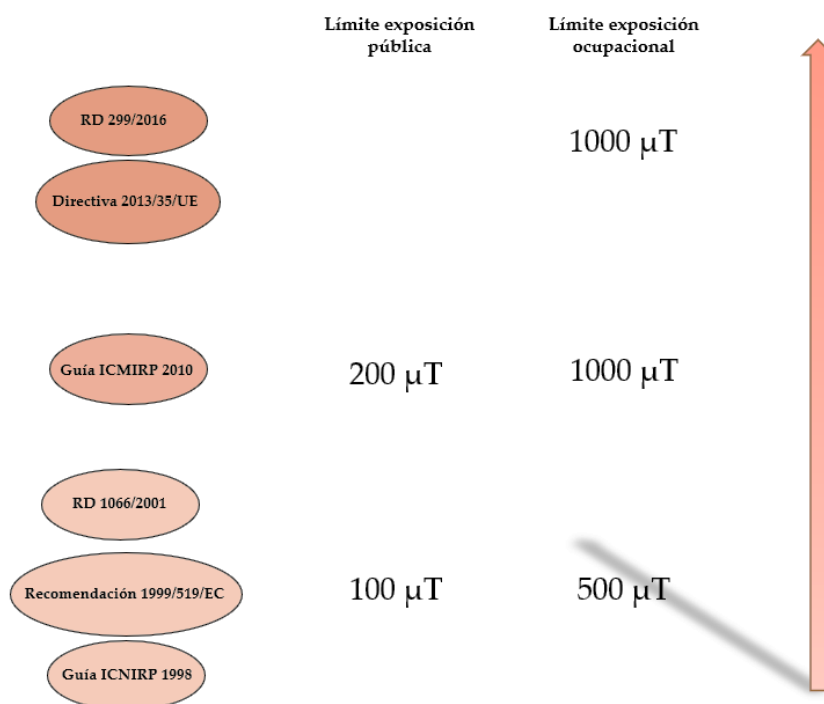


Fig. 21. Evolución de los límites de exposición al campo magnético.

A continuación, para mostrar los valores de densidad de flujo magnético a los que está sometida la población general y los trabajadores, se van a exponer una serie de artículos cuyo principal objetivo ha sido monitorizar la densidad de flujo magnético en diversas localizaciones y circunstancias.

H. Artículos e Informes de Mediciones de Densidad de Flujo Magnético

Para ilustrar los valores de densidad de flujo magnético a los que se puede estar expuesto en diversas circunstancias se han agrupado en tres sectores diferentes:

1. Líneas eléctricas aéreas y subestaciones;
2. Medio urbano y domicilios;
3. Industria y ambientes laborales.

Un hecho a remarcar es que la mayoría de los artículos e informes analizados dan un valor RMS total para la densidad de flujo magnético, y no valores a distintas frecuencias.

1) Líneas de alta y Media Tensión y Subestaciones Transformadoras

Según mediciones realizadas en 2016 por REE [243], los valores máximos de densidad de flujo magnético en el punto más cercano a los conductores de las líneas de 400 kV oscilan entre 1 y 15 μT . Además, este valor disminuye a medida que aumenta la distancia a los conductores: a una distancia de 30 metros oscila entre 0,1 y 3 μT , siendo habitualmente inferior a 0,3 μT a partir de los 100 metros. Para líneas de 220 kV los valores son inferiores, siendo en el lugar más cercano a los conductores de 1 a 6 μT . A 30 metros de distancia el nivel varía entre 0,1 y 1,5 μT , siendo generalmente inferior 0,2 μT a partir de 100 metros de distancia. Valores similares reporta National Grid [202], compañía eléctrica del Reino Unido. Según sus datos, la densidad de flujo magnético promedio en las líneas aéreas de 400 kV es de 4 μT en el punto más próximo a los conductores, de 0,136 μT a 100 metros y de 0,015 μT a 300 metros. Para líneas subterráneas, los valores en el punto más cercano al conductor son de 20,83 μT para líneas de 400 kV, de 9,62 μT para líneas de 132 kV, de 1 μT para líneas de 33 kV, de 0,75 μT para líneas de 11 kV y de 0,5 μT para líneas de 400 V. El desarrollo de este tipo de proyectos de líneas transmisión subterráneas aparece como alternativa para enfrentar los costes sociales y medioambientales que genera en las comunidades las obras de ampliación del sistema eléctrico, especialmente cuando se ubican en las cercanías de poblaciones y centros de consumo. El cableado subterráneo normalmente se realiza con fines estéticos, pero aumenta el coste de la instalación comparándolo con las obras de líneas aéreas.

La mayor cantidad de artículos científicos que abarcan mediciones de campos magnéticos son aquellos que las realizan en las cercanías de líneas aéreas de AT y MT y en las subestaciones transformadoras. Una característica de estas es que las personas en general no pueden acceder a las zonas funcionales de la subestación, ya sea por tener una cerca perimetral, estar dentro de un recinto, o por la altura del poste. Las regiones con los campos magnéticos mayores y que sí son accesibles al público son las zonas por donde pasan las líneas aéreas y los cables subterráneos que entran y salen de las subestaciones. A continuación, se muestran algunos ejemplos, con los valores máximos encontrados en cada artículo.

- En el año 2000, en [244] se realizaron mediciones en la ciudad de Tampere, Finlandia, y las compararon con los valores máximos de exposición. Las mediciones fueron hechas en las cercanías de líneas de 400, 110 y 20 kV, encontrando un valor máximo de 11,4 μT , así como en las cercanías de las estaciones transformadoras, con un máximo de 18,6 μT . En la misma ciudad, en 2002 [245] continuaron con la serie de mediciones, esta vez centrados en la subestación de 400 kV que fue donde se hallaron los valores más altos en el artículo previamente descrito, dando unos valores similares, con un máximo de 16,5 μT .
- En 2007, en [246] se realizaron mediciones en subestaciones de 154/31,5 kV en la ciudad de Antalya, Turquía. Realizaron las mediciones en los puestos de trabajo del personal de las subestaciones, encontrando que en sus puestos de trabajo los operadores estaban expuestos a una densidad de flujo magnético de 0,3 μT durante ocho horas al día. En 2008 [247] continuó con las mediciones en otras subestaciones de 380/154 kV y encontró que en los puestos de control de los operadores la densidad de flujo magnético variaba entre 0,5 y 0,8 μT .
- En 2011, en [248] se presentaron mediciones de campo eléctrico y magnético cerca de subestaciones de 400/110 kV en Rumanía, encontrando un valor de 55 μT cerca de los transformadores.
- En 2013, en [249] se llevaron a cabo mediciones en CT de MT/BT. Los autores mapearon la densidad de flujo magnético alrededor y encima los CT, obteniendo valores menores de 0,4 μT a distancias de 3 m.
- En 2014, en [250] se realizaron mediciones de campo eléctrico y magnético en varias subestaciones abiertas de 132/11 kV en Chipre. Encontraron un valor máximo de 45,89 μT . Aparte de este máximo, los autores encontraron un valor anómalo cerca de una de las bobinas (3134 μT) e informaron a los propietarios de la subestación.

- En 2014, en [251] se presentaron mediciones de campo eléctrico y magnético en líneas y subestaciones de 400/220/33 kV en India. El valor máximo encontrado de densidad de flujo magnético fue de 12,4 μT en las cercanías del transformador de MT.
- En 2016, en [172] se presentó un artículo de revisión sobre estudios referentes a la exposición del público general a los CEM de baja frecuencia en Europa. Se estudiaron 14 países, entre ellos España, y entre las conclusiones más destacadas se muestra que el promedio al aire libre en áreas públicas de entornos urbanos oscila entre 0,05 y 0,2 μT , pero que valores más altos (del orden de unos pocos μT) ocurren directamente debajo de las líneas eléctricas de AT, en los muros de las casetas de transformadores y en los cercos perimetrales de las subestaciones de transformación.
- En 2016, en [252] se presentaron mediciones de subestaciones de 220/90/60/30 kV en Argelia, no superándose los 20 μT .
- En 2017, en [253] se realizaron mediciones en una línea subterránea de 11 kV, encontrando que los campos magnéticos emitidos por estos disminuyen más rápidamente con la distancia que los campos irradiados por cables aéreos, aunque en el lugar más cercano al cable el valor es mayor. Encontraron valores de 3,1 μT a un metro sobre la superficie justo encima del cable, no disminuyendo el valor de 0,1 μT hasta no alejarse más de ocho metros.
- En 2019, en [254] se investigaron las emisiones de campo magnético en una subestación de 132 kV en Sudáfrica, dando como resultado un valor máximo de 1,26 μT .

2) Medio Urbano y Domicilios

Según un informe de 1998 [255] del Instituto Nacional de Ciencias de la Salud Ambiental (NIEHS²⁰) de EE.UU, la exposición promedio al campo magnético para la población general en los EE. UU. es de aproximadamente 0,09 μT . De ellos, el 44 % de la población tiene exposiciones superiores a 0,1 μT , el 14 % por encima de 0,2 μT , el 2,5 % por encima de 0,5 μT y menos del 1 % por encima de 0,75 μT . En los hogares la media fue de aproximadamente 0,06 μT , con el 28% de los hogares excediendo los 0,1 μT , el 11 % superando los 0,2 μT y el 2 % por encima de los 0,5 μT . La principal diferencia entre las medidas

²⁰ National Institute of Environmental Health Sciences.

de exposición domésticas y personales se refiere a las exposiciones incurridas fuera del hogar.

Dentro del hogar, la principal fuente de exposición al campo magnético son los electrodomésticos y dispositivos que requieren electricidad [256]. En este sentido, en [202] se puede consultar una tabla muy completa con los valores promedios de densidad de flujo magnético medidos a 50 cm de distancia de diversos electrodomésticos que funcionan a 50 Hz. Los valores se detallan en la Tabla IX.

TABLA IX
EJEMPLOS DE DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO EN ELECTRODOMÉSTICOS

	Fuente	B (μT)
Aseo	Secadora de pelo	0,12
	Afeitadora eléctrica	0,84
Cocina	Licuadaora	0,97
	Abridora de latas	1,33
	Cafetera	0,06
	Lavavajillas	0,8
	Horno microondas	1,66
	Batidora	0,69
	Horno	0,39
	Nevera	0,05
	Congelador	0,04
	Tostadora	0,09
	Cuchillo eléctrico	0,12
	Hervidor	0,26
	Campana extractora	0,26
Zona de lavandería	Secadora	0,34
	Lavadora	0,96
	Plancha	0,03
	Calentador portátil	0,22
	Limpiadores de vacío	0,78
	Calentador centralizado	0,14
Salón	Televisión	0,26
	Bomba de la pecera	0,32
	Reproductores de música	0,08
	Radio	0,06
Dormitorio	Reloj despertador	0,05
Despacho	Monitor	0,14
Varios	Aire acondicionado	0,51
	Alarma antirrobo	0,18

En España, según un informe de REE [257] de 2001 el nivel de densidad de flujo magnético de 50 Hz existente en el interior de una vivienda varía entre 0,01 y 0,5 μT . En Francia, este mismo resultado muestra que en el 50 % de las viviendas el valor medido está por debajo de 0,01 μT , y únicamente el 5 % de ellas tenía una densidad de flujo magnético por encima de 0,12 μT . En las calles de Gotemburgo (Suecia) se midió el valor de la densidad de flujo magnético a lo largo de 12 km de calles peatonales y a un metro de altura del suelo, dando como resultado unos valores medios de 0,34 μT . También se observó que el 50 % de las medidas eran inferiores a 0,2 μT , el 44% estaba entre los 0,2 y 1 μT , y el 6 % restante se situó por encima de 1 μT .

Otros artículos exponen las medidas en zonas urbanas y residenciales. Algunos artículos hacen hincapié en las zonas donde existen CT y líneas de distribución cercanas. Entre ellos cabe destacar los siguientes:

- En 2002, en [258] se llevaron a cabo mediciones de densidad de flujo magnético en varios colegios de dos ciudades de España, dando como resultado una exposición media de densidad de flujo magnético de 0,015 μT para la ciudad de Oviedo y de 0,016 μT para Barcelona.
- En 2008, en [259] se realizaron una serie de mediciones en 30 edificios de Finlandia cercanos a CT. Los apartamentos que estaban justo encima del CT tuvieron la máxima medida, con un valor de 0,62 μT .
- En 2008, en [260] se realizaron un experimento similar en 31 apartamentos de Hungría. El resultado fue similar, siendo el valor más alto el encontrado en los apartamentos que estaban justo encima del CT, unos 0,98 μT .
- En 2010, en [261] se realizaron mediciones en zonas urbanas de la ciudad de Chongqing, China, afectadas por los CEM generados por una línea de AT de 110 kV. Encontraron un valor de 0,29 μT en las azoteas de los edificios de ocho plantas cercanos a la línea de AT, disminuyen este valor a 0,11 μT para la planta primera, por lo que sugieren que estructuras físicas como techo y paredes pueden proteger de manera significativa la radiación electromagnética generada por la línea de AT.
- En 2011, en [262] se llevaron a cabo mediciones en 41 apartamentos en Israel. A 0,5 metros del suelo, la media de las medidas fue de 0,4 μT para los apartamentos situados justo sobre el CT.
- En 2011, en [263] se completaron mediciones en 39 apartamentos de 18 edificios de Suiza. Encontraron un valor medio de 0,59 μT para los apartamentos adyacentes a un CT.

- En 2012, en [264] se midió la densidad de flujo magnético en colegios de Teherán, Irán, dando como resultado una media de $0,147 \mu\text{T}$.
- En 2014, en [265] se presentaron los resultados de las medidas de densidad de flujo magnético tomadas en la ciudad de Bor, Serbia. Midieron en algunas viviendas construidas con CT ubicados en el interior del propio edificio o adyacente a estos. Los valores encontrados variaron entre los $1,26$ y los $12,28 \mu\text{T}$ en los apartamentos situados justo encima del CT. También realizaron mediciones a una distancia de 30 cm de los principales electrodomésticos, siendo el horno microondas el que aportó la mayor medida, unos $6,12 \mu\text{T}$.
- En 2020, en [237] se analizaron el campo magnético al que estaban expuestos los alumnos en sus pupitres de un colegio en Corea, estando las medidas entre los $0,01$ y $0,09 \mu\text{T}$, por lo que concluyen que son más bajos que en otros lugares residenciales.

3) Industria y Ambientes Laborales

- En 1998, en [266] se midieron los campos magnéticos alternos en trenes británicos. Describieron contribuciones significativas no solo a los 50 Hz , sino también en sus armónicos. Encontraron valores de $20 \mu\text{T}$ en las cabinas de los conductores del metro de Londres, 1 mT a nivel de suelo en los compartimentos de pasajeros del metro suburbano, 15 mT en los vagones de trenes autopropulsados y de 5 a $50 \mu\text{T}$ en los vagones de pasajeros de las líneas de trenes.
- En 1999, en [267] se midió la exposición al campo magnético variable en los trenes eléctricos de Finlandia usando un magnetómetro cuyo rango de medición era de 10 a 2000 Hz . Los niveles medios encontrados fueron de $0,3$ a $290 \mu\text{T}$ para los pasajeros y de 10 a $6.000 \mu\text{T}$ para los trabajadores ferroviarios.
- En 2001, en [268] se reportó que los conductores de tranvías en Suecia estaban expuestos a campos magnéticos de $16 \frac{2}{3} \text{ Hz}$ de frecuencia (estándar del sistema de electrificación de ferrocarriles en algunos países de Europa), con niveles que podían llegar desde 25 a $120 \mu\text{T}$.
- En 2019, en [269] se llevó a cabo una monitorización de la densidad de flujo magnético en vehículos eléctricos en un espectro de 0 a 2 kHz . El máximo alcanzado durante las aceleraciones fue de $1,57 \mu\text{T}$ y de $0,58 \mu\text{T}$ a velocidad constante.
- En esta misma línea, en 2020, en [270] se centraron en los campos magnéticos de baja frecuencia emitidos por cargadores rápidos de vehículos eléctricos e hicieron una completa monitorización del flujo

magnético en el dominio de la frecuencia, desde los 25 Hz a los 2 kHz, encontrando situaciones donde se superaban los valores de la normativa (ver Fig. 22 reproducida del artículo). Este artículo es interesante porque se analiza la densidad de flujo magnético a diversas frecuencias, y no un valor RMS total como suele ser habitual. Los autores eligieron un ancho de banda de 2 kHz porque otros estudios de vehículos eléctricos disponibles se centraban en los resultados por debajo de este valor.

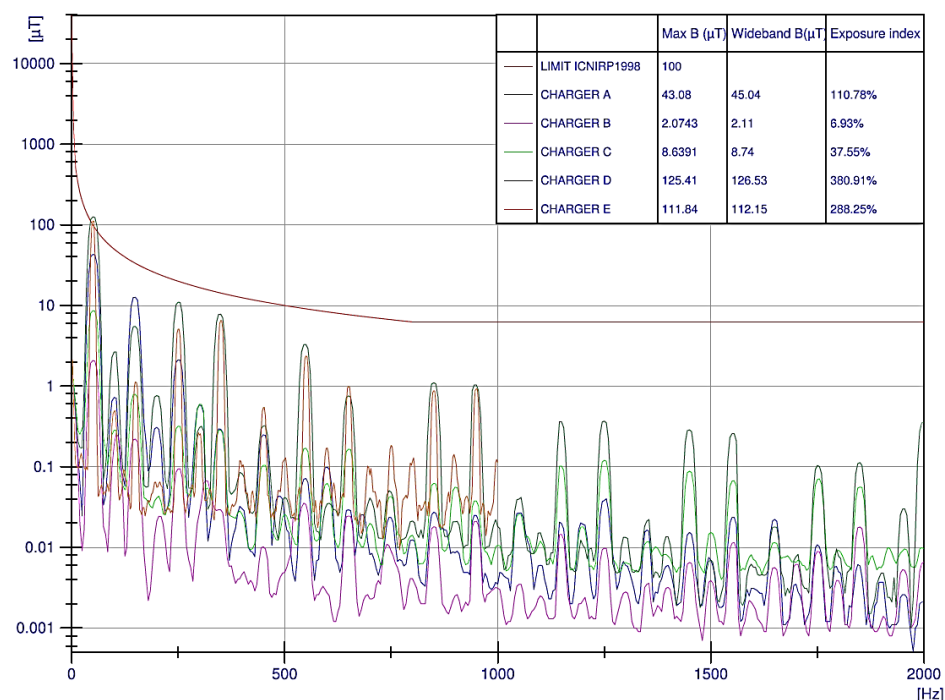


Fig. 22. Densidad de flujo magnético en cargadores eléctricos según [270].

- En 2020, en [271] se realizaron mediciones de densidad de flujo magnético en las inmediaciones de un campo de turbinas eólicas en Grecia, encontrando valores medios de 0,146 μT en la base de las turbinas. Este valor disminuía rápidamente al aumentar la distancia, por lo que concluyen que los niveles de densidad de flujo magnético son similares o más bajos en comparación con los de las áreas urbanas.
- En 2020 [272] midieron la densidad de flujo magnético en diferentes unidades de una planta de energía térmica. Para los operadores y técnicos de planta se encontró una media de 12,64 μT , mientras que para los trabajadores de oficina el valor medio de las mediciones estuvo en 2,41 μT . El valor más alto encontrado en la planta fue en las cercanías de las líneas de transmisión de energía en el edificio de los transformadores, siendo de unos 48,2 μT .



Capítulo II.

OBJETIVOS



II. OBJETIVOS

El Grupo de Investigación TIC-019 de la UAL dispone en la zona de la Sierra de los Filabres (Almería) de una estación de medida de CEM naturales en la banda ELF. Esta estación fue desarrollada, construida y puesta en marcha en 2011 gracias al proyecto P07-FQM-3280. Una vez finalizado este proyecto, el grupo de investigación se hizo cargo de las instalaciones, manteniéndolas y perfeccionándolas.

La ubicación de la estación, alejada de las líneas eléctricas y núcleos de población, permite minimizar las interferencias de la actividad humana. La estación tiene dos sensores ortogonales que operan entre 1 y 90 Hz. Los datos capturados por el sistema son enviados a un servidor de la UAL, donde quedan registrados de forma continua y almacenados desde hace una década [273] [274]. A pesar de la ubicación remota de la estación (véase Fig. 23a), se ha observado claramente en los datos registrados la señal de la red de 50 Hz, e, incluso, se puede observar débilmente la señal de 60 Hz. Este hecho se puede constatar en la Fig. 23b, extraída de [275], donde se han rodeado con un círculo rojo los picos correspondientes de las señales de 50 y 60 Hz captadas por la estación de medida.

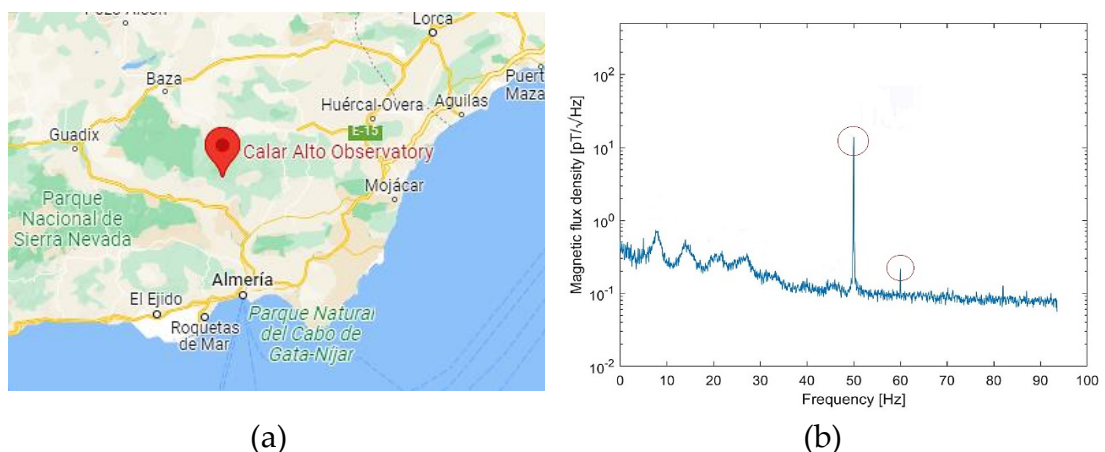


Fig. 23. Estación de la Sierra de los Filabres. (a) Ubicación. (b) Mediciones de la estación recogidas en [275].

En la Fig. 15 del capítulo de Introducción de esta tesis se presentó un mapa donde se indica la frecuencia de la red eléctrica de cada país. Se puede observar que los países más cercanos a España que tienen 60 Hz como frecuencia de red son Estados Unidos y Arabia Saudí. El hecho de poder medir desde la estación la señal de 60 Hz denota que los CEM generados por redes eléctricas son de carácter global en el planeta y además se ven afectados de variaciones de intensidad, que se intuye dependen del consumo eléctrico zonal.

Para estudiar estos CEM generados por líneas eléctricas y dispositivos, se creó el proyecto UAL18-TIC-A025-A, denominado “Campo Electromagnético Generado por Redes Eléctricas Monitorizado”, cuya finalidad fue construir una red de 10 sensores distribuidos espacialmente en el campus de la UAL. El objetivo general de esta tesis se ha centrado en estudiar los campos magnéticos producidos por redes eléctricas en un entorno humano como es un campus universitario usando un magnetómetro que es el prototipo de los sensores usados en el proyecto UAL18-TIC-A025-A, ya que al iniciarse esta tesis el proyecto estaba en la fase inicial.

El referido magnetómetro consta de una bobina sin núcleo de 12.000 vueltas, etapa analógica de acondicionamiento y procesamiento de señal posterior. Un ejemplo de la densidad de flujo magnético obtenida se puede observar en la Fig. 24, donde se muestra un espectrograma del día 3 de mayo de 2021 recogido por el magnetómetro ELF situado en el campus de la UAL. En él se observan el conjunto de líneas horizontales correspondientes a la frecuencia fundamental de 50 Hz y a sus armónicos impares (150 Hz, 250 Hz, 350Hz, etc.).

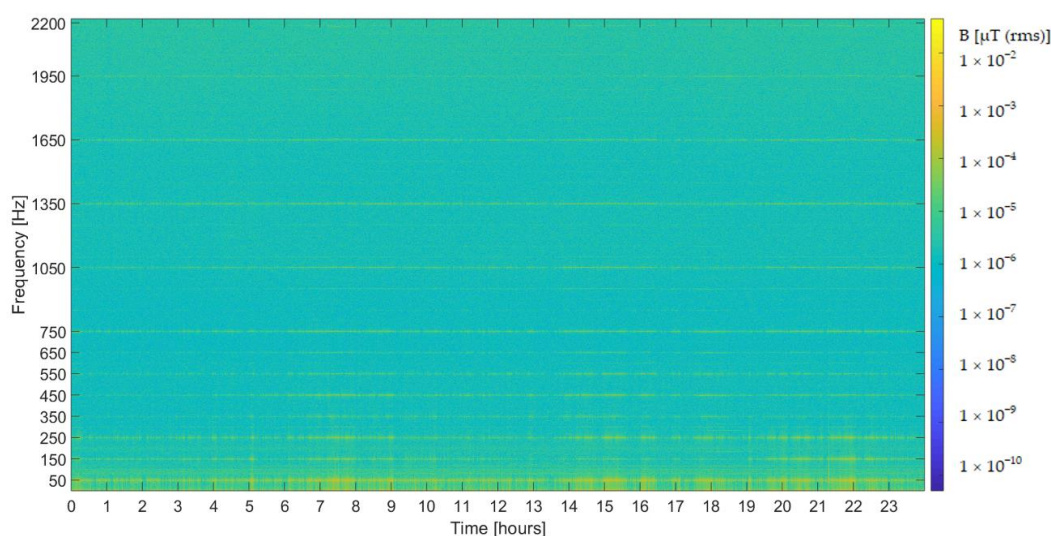


Fig. 24. Ejemplo de espectrograma del día 3 de mayo de 2021 del magnetómetro situado en la UAL.

Para una mayor comprensión de estos fenómenos, se van a perseguir una serie de objetivos específicos que se desarrollarán en los capítulos posteriores y que se exponen a continuación.

Al iniciarse esta tesis el proyecto aún estaba en fase de diseño, por lo que aparte de los requisitos técnicos, el primer objetivo de esta tesis ha sido decidir si las estaciones de medida se alimentaban de la red eléctrica general o si, por el contrario, se hacían totalmente autónomas, con un panel fotovoltaico como fuente de energía y una batería de respaldo. Para ello se seguirán principios de sostenibilidad ambiental mediante la técnica llamada ACV y principios de sostenibilidad económica mediante una evaluación CCV.

En segundo lugar, se van a usar los datos obtenidos por el prototipo del sensor ELF que desde septiembre de 2020 fue instalado en un laboratorio del grupo de investigación y que recoge datos de los PLHR del entorno. Mediante toda esta información recopilada, esta tesis pretende relacionar el campo magnético generado por las líneas de tensión y dispositivos eléctricos que operan a 50 Hz con el consumo eléctrico zonal e inferir ciertos parámetros de CEE. De esta manera, se van a usar los datos obtenidos para conseguir una medida indirecta de la frecuencia de red y poder compararla con la frecuencia de red real suministrada por los medidores de CEE que la UAL tiene distribuidos por el campus. Así mismo se van a comparar los armónicos de la densidad de la densidad de flujo magnético con los armónicos en corriente del campus universitario de la UAL.

Por último, se ha visto en el Capítulo de Introducción que uno de los objetivos que promueve la OMS dentro de su sección de “Campos Electromagnéticos y Salud Pública” [202] es que la exposición a los CEM ya sea para trabajadores o para el público en general, debe ser monitorizada para asegurar que los límites de exposición no se superan. Los límites de exposición a campos magnéticos ELF propuestos por las normas han sido cada vez menos restrictivos, pero a la luz de las últimas evidencias científicas con respecto a las frecuencias entre 1 Hz y 100 kHz la Comisión Europea está trabajando para revisar la normativa vigente [276], y se ha dado un plazo hasta julio de 2023. Aun así, el problema no está resuelto y necesita de investigación avanzada, tal como recomienda la OMS, por lo que pensamos que esta tesis puede aportar una valiosa información no disponible en este momento sobre los niveles y variaciones en frecuencia de los CEM en un entorno de un campus universitario, donde diariamente hay una gran cantidad de personas que trabajan y estudian.

En el Capítulo de Introducción se han detallado diversos artículos donde se muestran valores de exposición a CEM de baja frecuencia, pero no se ha encontrado ningún trabajo donde se estudie la evolución de los campos inducidos por redes eléctricas de forma continua en una determinada zona, en un amplio periodo de tiempo y con monitorización en continuo en tiempo real. Además, otras características de los campos magnéticos, tales como armónicos, transitorios, cambios espaciales y temporales, etc. han recibido relativamente poca atención en los estudios de posibles efectos biológicos y de salud [277], por lo que por todo ello se justifica el interés de esta tesis.



Capítulo III.

MATERIALES Y MÉTODOS



III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Análisis del Ciclo de Vida y de Costes del Ciclo de Vida

Un ACV es una herramienta que se usa para evaluar los efectos ambientales de un producto o proceso a lo largo de todo su ciclo de vida, examinando el producto desde la extracción de materias primas para el proceso de fabricación, la producción, uso y disposición final de los residuos generados. Se abarca toda la vida del producto, por eso también se le denomina análisis de “la cuna a la tumba”. El análisis CCV es otro análisis del ciclo de vida de un producto o servicio, pero se centra en los costes, desde la inversión inicial hasta el coste a largo plazo de poseer y operar un proyecto o producto y el gasto de la disposición final de los mismos.

A continuación se van a describir los pasos que se han seguido para la realización de sendos análisis.

1) Objetivos y Escenarios

El objetivo de los análisis fue comparar los impactos ambientales y los costes desde el punto de vista del cliente de una red de sensores conectados a la red eléctrica (escenario 1) en comparación con la opción que la alimentación eléctrica fuera totalmente autónoma (escenario 2), con el sensor conectado a un panel fotovoltaico. La finalidad del proyecto de I+D UAL18-TIC-A025-A es construir una red de 10 nodos distribuidos espacialmente en el campus de la UAL, pero se ha elegido un nodo como objetivo para este estudio ya que todos los nodos son idénticos. Un punto para tener en cuenta es que solo se analizaron los componentes que difieren de cada escenario porque el resto de los componentes de la red de sensores son los mismos para ambos escenarios. Por lo tanto, se va a analizar la cuestión de si las cargas ambientales generales y los costes totales de la solución del escenario autónomo son más bajos o altos que sus beneficios y ahorros. Para responder a esta pregunta y tomar conciencia de las potenciales mejoras y las consecuencias medioambientales y financieras del proyecto, se realizaron sendos ACC y CCV.

2) Unidad Funcional y Flujo de Referencia

La unidad funcional es una descripción cuantificada del rendimiento de un sistema, para su uso como unidad de referencia. Un flujo de referencia es una cuantificación de productos para que un sistema específico proporcione el rendimiento especificado en la unidad funcional. El objetivo del flujo de referencia es trasladar una unidad funcional abstracta en flujos de productos específicos para cada uno de los sistemas o productos comparados, de modo que las alternativas de producto se comparen sobre una base equivalente, reflejando las consecuencias reales de una posible sustitución de producto [278].

La unidad funcional considerada en este estudio es la alimentación eléctrica de un sensor durante un año.

El flujo de referencia es el consumo anual de material atribuible a un año de funcionamiento. En el escenario 1 se ha considerado un flujo de referencia de tal manera que el sensor se alimenta desde la red pública, y en el escenario 2 se ha considerado que el sensor se alimenta desde un panel fotovoltaico con una batería de respaldo (ver Fig. 25).

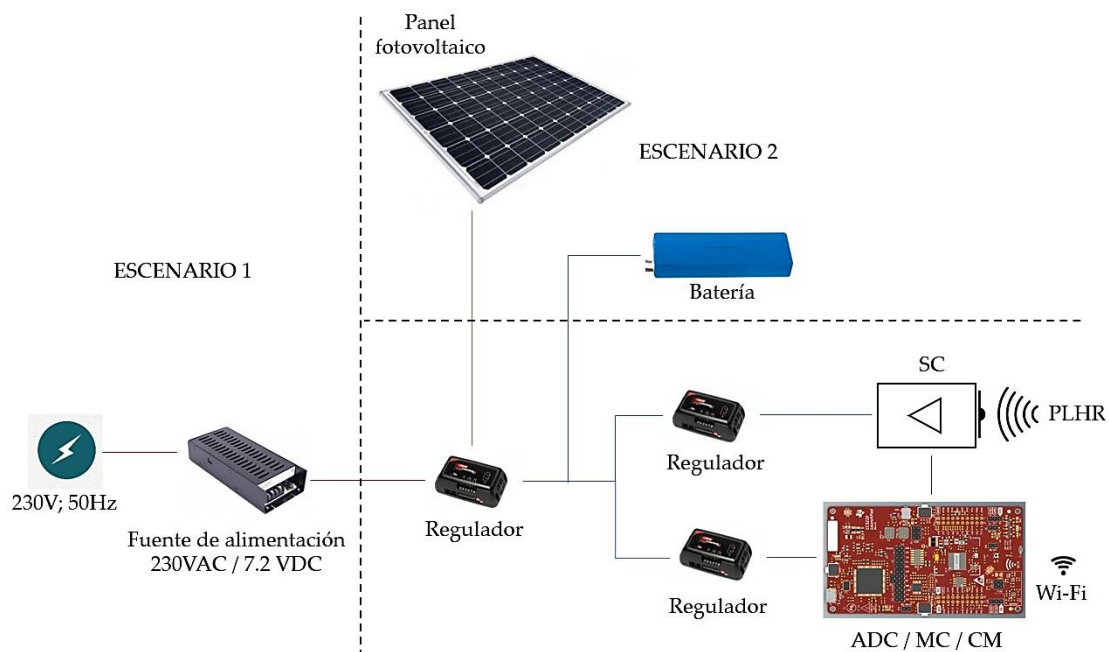


Fig. 25. Diferentes formas de suministrar energía eléctrica a los sensores.

3) Límites del Sistema

Los límites del sistema describen las etapas del ciclo de vida del sistema y los procesos y flujos incluidos en el análisis. En este estudio, se incluyeron cuatro etapas (ver Fig. 26). No se consideró la etapa de montaje ya que los diferentes componentes solo necesitan un montaje manual.

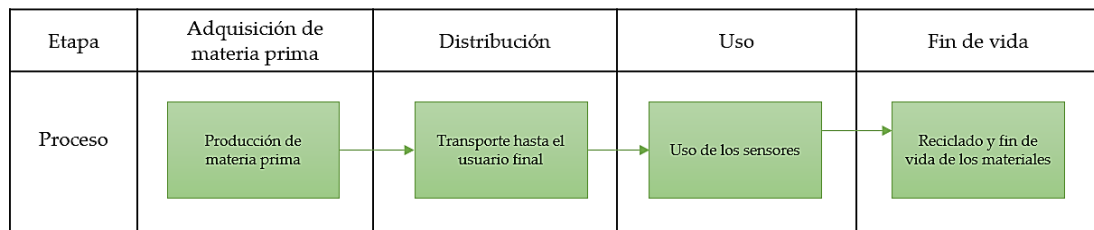


Fig. 26. Límites del sistema para el ciclo de vida.

4) Descripción del Sistema

El siguiente paso que realizar en un ACV y CCV es describir lo más detalladamente posible el producto o proyecto que se va a analizar. En nuestro caso, el proyecto UAL18-TIC-A025-A denominado “Campo Electromagnético Generado por Redes Eléctricas Monitorizado” tiene como objetivo construir una red de 10 nodos distribuidos espacialmente en el campus de la UAL con el ánimo de monitorizar en tiempo real el CEM producido por los equipos e instalaciones eléctricas. Cada nodo individual constará de los siguientes elementos:

- Magnetómetro ELF;
- Acondicionador de señal (SC²¹);
- ADC²²;
- Microcontrolador (MC);
- Módulo de comunicación wifi (CM²³).

El SC se basa en el amplificador de instrumentación INA188 [279] del fabricante Texas Instruments y en el amplificador operacional LT1490 [280] de Linear Technology. El ADC, MC y CM están integrados en un solo componente, la solución MCU CC3220SF Simplelink Wi-Fi Single-Chip [281]

²¹ Signal conditioner.

²² Analog to digital converter.

²³ Communication module.

(AMCM), de Texas Instruments. Para las pruebas preliminares se ha usado el kit de evaluación CC3220SF_LAUNCHPAD [282] (ver Fig. 27).

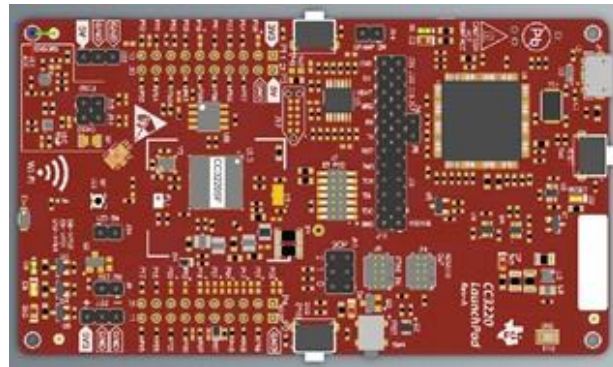


Fig. 27. Kit de evaluación CC3220 SimpleLink LaunchPad [282].

Los nodos estarán ubicados en las cubiertas de los edificios del campus de la UAL y la comunicación de cada nodo con el servidor central se realizará a través de los puntos de acceso (PA) de la red wifi del campus. Esto proporciona flexibilidad en términos de ubicación espacial, sin depender de una conexión por cable (ver Fig. 28).

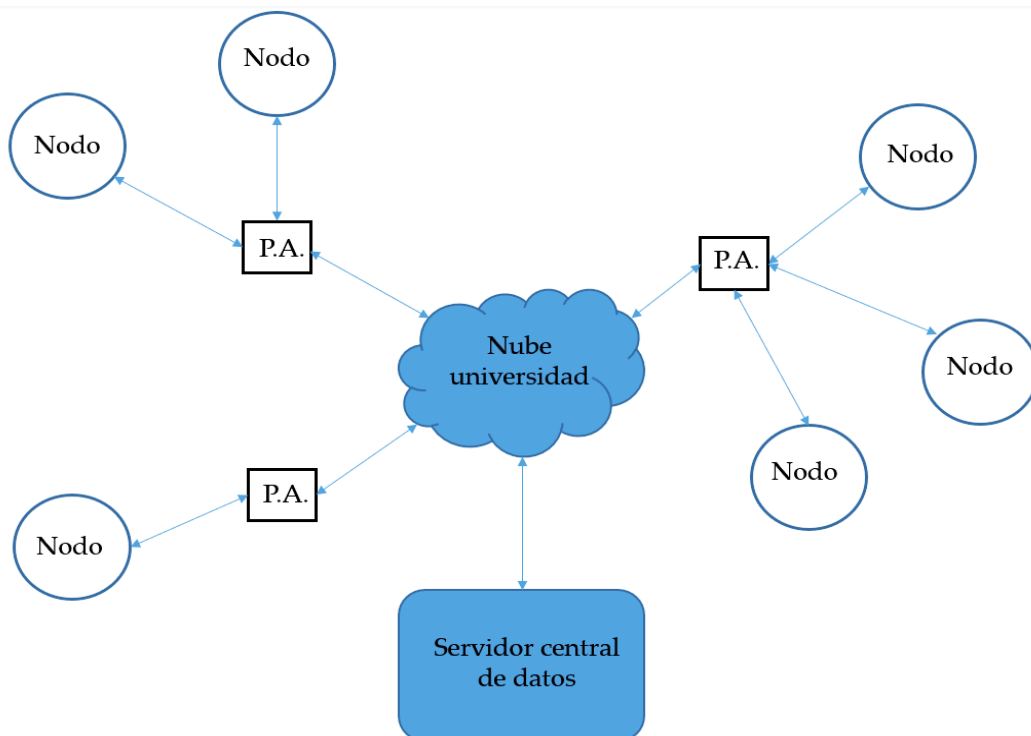


Fig. 28. Comunicación de los nodos con el servidor central.

Las especificaciones iniciales del proyecto son las siguientes:

- Solo hay un magnetómetro por nodo, por lo que solo se requiere un canal de adquisición;
- El voltaje del suministro principal es de 7,2 V. El voltaje de suministro del SC es de 6 V y el voltaje de suministro del AMCM es de 3,3 V;
- El SC está permanentemente alimentado;
- El ADC adquiere datos (12 bits) continuamente con una frecuencia de muestreo de 62,5 ksp/s;
- Los datos se procesan en el MC y la frecuencia de muestreo se reduce a 7,8125 kHz;
- Una vez realizado el proceso de diezmado, los datos se agrupan en paquetes de 6" (750.000 bits de datos) para ser enviados por el CM al servidor de datos vía wifi;
- La velocidad de transmisión depende del enlace wifi y varía entre de 1 a 54 Mbps;
- El consumo de energía de transmisión es difícil de evaluar porque depende de la proximidad del sensor al PA, condiciones del enlace, etc. En una aproximación inicial se ha considerado la peor situación y se asume un consumo de energía de 230 mA correspondiente a la máxima potencia;
- Panel fotovoltaico (opción autónoma): 7,2 V;
- Autonomía del sistema (opción autónoma): 10 días.

Para hacer el sistema totalmente autónomo se debe instalar un panel fotovoltaico y una batería, y se necesitan algunos cálculos para conocer sus especificaciones para elegir los modelos y tamaños correctos. El consumo del SC estimado es de 2,2 mA [279] [280]. En general, el consumo de AMCM es difícil de evaluar porque integra tres módulos con diferentes funcionalidades: el ADC, el MC y el CM. Se estiman los siguientes consumos de corriente eléctrica:

- El consumo mínimo del AMCM es de 25,2 mA [281]. El ADC funciona de forma continua y, debido a esto, no es posible llevar el MC a ninguno de sus posibles estados de bajo consumo.
- El consumo restante de AMCM depende de la tasa de transmisión del CM. Se suponen dos escenarios: en el más conservador, la velocidad de transmisión es de 6 Mbps (9,6 mA de corriente media). Sin embargo, en el más favorable, la velocidad de transmisión es de 54 Mbps (corriente media de 1 mA).

Para el cálculo del panel fotovoltaico se ha considerado una irradiación solar de 150 kWh/m², lo que corresponde al valor medio mensual entre 2010-2016 del mes de noviembre de la Tabla X (el peor mes del año). Esta información ha sido extraída del Sistema de Información Geográfica Fotovoltaica (PVGIS²⁴) [283] para un panel fotovoltaico con orientación sur y con una inclinación de 60°, situado en las coordenadas 36.280N 2.406W (ubicación del campus de la UAL).

TABLA X
IRRADIACIÓN SOLAR (KWH/M²) EN EL CAMPUS DE LA UAL PARA UN PANEL ORIENTADO AL SUR E INCLINACIÓN 60°

Mes	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	152	144	179	171	164	190	189
Febrero	118	177	188	168	150	157	153
Marzo	152	166	199	158	198	169	192
Abril	164	164	181	164	179	157	162
Mayo	180	154	171	167	172	166	163
Junio	161	159	161	164	160	160	166
Julio	169	168	174	174	175	173	170
Agosto	184	190	184	185	190	179	192
Septiembre	181	191	166	180	173	184	192
Octubre	183	179	162	187	188	165	174
Noviembre	145	152	128	153	145	181	147
Diciembre	158	171	157	167	179	183	155

En base a los datos y suposiciones anteriores, el resultado es un consumo de 11.093 mAh considerando el escenario más conservador (velocidad de transmisión de 6 Mbps) y un consumo de 8.508 mAh en el caso de transmitir a 54 Mbps (mejor escenario). En esta fase de diseño y al no conocer la tasa de transmisión real, se ha asumido el peor escenario y los componentes seleccionados son un módulo fotovoltaico de la marca PowerFilm Solar, modelo MP7.2-150F [284] de 1,73 Wp (ver características en la Fig. 29) y dos baterías recargables comerciales de 6.700 mAh.

²⁴ Photovoltaic Geographical Information System.

MP7.2-150F**Electrical Specifications:****Full Sun**

Power: 1.73W
 Operating Voltage: 7.2V
 Operating Current: 240mA

1/4 Sun

Power: 389mW
 Operating Voltage: 7.2V
 Operating Current: 54.0mA

All Levels

Average Voc: 10.5V
 Maximum Voc: 11.1V
 Isc: 308mA

Physical Specifications:

Dimensions:
 253.0 x 146.0 (mm)
 9.96 x 5.75 (in)
 Weight: 0.90oz / 25.51g

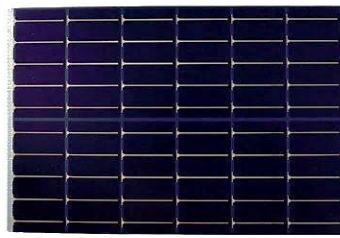
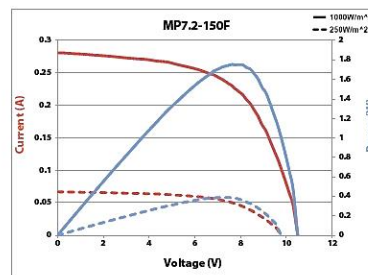
**IV Curve**

Fig. 29. Panel solar elegido [284].

5) Recopilación de Datos para el Análisis del Ciclo de Vida

A continuación se describen los datos de partida de ambos escenarios en las distintas etapas del ciclo de vida del proyecto: construcción, distribución, operación y fin de vida.

El inventario utilizado en la etapa de construcción de la red de sensores se deriva de una lista de materiales detallada de la instalación.

En el escenario 1, que analiza la opción de conectar los sensores a la red eléctrica existente, la lista de materiales necesarios es la siguiente:

- 20 m de cable de tres conductores, sección 1,5 mm², 60 g/m;
- 12 conectores cilíndricos, sección 1,5 mm²;
- 1 magnetotérmico bipolar;
- 1 fuente de alimentación 230 V AC/7,2 V DC.

En el escenario 2, que analiza la opción de que la alimentación eléctrica de los nodos sea completamente autónoma, la lista de materiales considerados es la siguiente:

- 1 panel fotovoltaico de PowerFilm, modelo MP7.2-150F, 0,037 m²;
- 2 baterías recargables de ion-litio, 6,7 Ah 7,2 V.

El siguiente paso es atribuir un determinado número de años como vida útil a cada artículo, en función del desgaste esperado. Los valores elegidos han sido los siguientes:

- 20 años de vida útil para el panel fotovoltaico y los componentes eléctricos (cable, magnetotérmico y conectores);
- 10 años de vida útil para los componentes electrónicos, en este caso la fuente de alimentación;
- 8 años de vida útil para baterías. Según [285], la vida útil prevista de una batería de ion-litio en condiciones reales de funcionamiento es de entre 8 y 12 años. Elegimos 8 años, el valor menor, ya que en la fase de diseño desconocemos las condiciones reales de las baterías (temperatura, profundidad de descarga, etc.).

La vida útil del sistema completo se ha establecido en 20 años. En cuanto al uso de suelo de este sistema, no se ha considerado, ya que todos los componentes del sensor estarán montados en las cubiertas de los edificios existentes en la UAL, por lo que no se ha destinado suelo particular para el sistema.

Con los datos anteriores, en la Tabla XI se describe el consumo de materia anual para el escenario 1 y en la Tabla XII para el escenario 2.

TABLA XI
CONSUMO DE MATERIA ANUAL EN EL ESCENARIO 1 (CONEXIÓN A RED)

Componente	Cantidad	Peso unitario (g)	Peso total (g)	Vida útil (años)	Consumo anual (g/año)
Cable	20 m	60	1200	20	60
Conectores	12 ítems	0,52	6,24	20	0,312
Fuente de alimentación	1 ítem	270	270	10	27
Magnetotérmico	1 ítem	231,86	231,86	20	11,593

TABLA XII
CONSUMO DE MATERIA ANUAL EN EL ESCENARIO 2 (SISTEMA AUTÓNOMO)

Componente	Cantidad	Peso unitario (g)	Peso total (g)	Vida útil (años)	Consumo anual (g/año)
Panel fotovoltaico	1 ítem	25,51	25,51	20	1,276
Batería	2 ítems	196	392	8	49

En la etapa de distribución se incluyen dos actividades de transporte de los componentes necesarios: 9.000 km de barco transoceánico desde China al puerto marítimo de España y 339 km de camión (> 32 ton) desde el puerto de Algeciras hasta el almacén de Almería. En cuanto al panel fotovoltaico, el transporte se consideró de la siguiente manera: 6.000 km de barco transoceánico desde EE. UU. hasta el puerto de España y 339 km de camión (> 32 toneladas) desde el puerto de Algeciras hasta el almacén de Almería. Todas estas distancias han sido estimadas y se usaran estos datos para evaluar los impactos asociados a esta etapa.

Durante la etapa de operación solo se incluye la electricidad consumida por el equipo, que en el caso del escenario 1 (sensor conectado a la red eléctrica) es de 6.392 mWh/día, es decir, 2,33 kWh/año. Para modelar el impacto del consumo eléctrico en esta etapa se ha usado el mix eléctrico de 2019 en España [286], que se muestra en la Tabla XIII. En el escenario fuera de la red, no hay consumo eléctrico ya que toda la energía es suministrada por el panel solar fotovoltaico.

TABLA XIII
MIX ELÉCTRICO EN ESPAÑA EN 2019

Mix eléctrico	Proporción
Gas natural	30,8 %
Nuclear	21,3 %
Eólica	20,3 %
Hidráulica	9,8 %
Carbón	5,2 %
Petróleo	4,6 %
Solar	5,5 %
Biofuel	1,8 %
Residuos no renovables	0,7 %

Al igual que ocurre en la etapa de construcción, el flujo de referencia en esta etapa ha sido modelado como el desmantelamiento de materiales atribuible a un año de operación. Para el fin de vida de los componentes se ha tenido en cuenta los procedimientos sobre Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), ya que la eliminación de este tipo de residuos está definida en la Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 4 de julio de 2012 “sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos” [287] y en su posterior trasposición a la normativa española en el RD 110/2015, de 20 de febrero, “sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos” [288].

Se ha tenido en cuenta que el fin de vida de los diversos componentes será realizado por profesionales, por lo que se asume que se cumple íntegramente con los procedimientos especificados en [288].

6) Recopilación de Datos para el Análisis de Costes del Ciclo de Vida

El análisis CCV ha incluido dos etapas para ambos escenarios:

- Inversión;
- Funcionamiento durante la vida útil.

En el análisis realizado se han excluido los costes derivados del desmantelamiento de la instalación, ya que se espera que sean mucho menores en magnitud.

Los costes de inversión se han anualizado de acuerdo con (13):

$$I_a = I \cdot FRC \quad (13)$$

donde I_a es el coste anualizado de la inversión (€/año), I es el coste de la inversión en euros y FRC es el factor de recuperación de capital o factor de amortización (1/año). El FRC se calcula con (14):

$$FRC = \left(\frac{r \cdot (1 + r)^N}{(1 + r)^N - 1} \right) \quad (14)$$

donde N representa la vida útil en años y r es la tasa de interés (adimensional).

La tasa de interés usada para anualizar los costes de inversión fue del 0,377 %. Este valor se ha obtenido del interés de la deuda soberana a diez años de la zona euro ponderado por el índice de precios al consumo, conforme a la información facilitada por el Banco Central Europeo a principios de 2021 [289].

El coste de la inversión para ambos escenarios se ha calculado en base a los precios de proveedores especializados con los que la UAL tiene acuerdos de compra y el coste anualizado se ha calculado con (14). En la Tabla XIV se muestra el coste de inversión anualizado para el escenario 1 y en la Tabla XV para el escenario 2.

TABLA XIV
 COSTE DE INVERSIÓN ANUALIZADO EN EL ESCENARIO 1 (CONEXIÓN A RED)

Materiales e instalación	Cantidad	Vida útil (años)	Coste anualizado (€/año)
Cable	20 m	20	0,80
Conector	12 ítems	20	0,05
Fuente de alimentación	1 ítem	10	2,71
Magnetotérmico	1 ítem	20	0,64
Instalación	1 ítem	20	3,05

TABLA XV
 COSTE DE INVERSIÓN ANUALIZADO EN ESCENARIO 2 (SISTEMA AUTÓNOMO)

Materiales e instalación	Cantidad	Vida útil (años)	Coste anualizado (€/año)
Panel fotovoltaico	1 ítem	20	1,18
Batería	2 ítems	8	9,66
Instalación	1 ítem	20	0,76

El coste de operación incluye el consumo eléctrico del nodo, que está permanentemente alimentado ya que el objetivo del proyecto es monitorizar el campo magnético en tiempo real. El coste de la electricidad se ha cuantificado en función del consumo específico del sensor descrito anteriormente y el coste unitario de la electricidad. El precio de la energía eléctrica en España se ha tomado como 0,243 €/kWh. Este precio es la media en España para los consumidores industriales en la banda inferior a 20 MWh/año e incluye el precio de la energía, la red y los impuestos y tasas [290]. De acuerdo con esto, el coste anualizado en la etapa de operación para el escenario 1 es de 0,58 €/año.

En la etapa de operación solo se ha considerado el coste de la electricidad ya que se asumió que el mantenimiento era insignificante. Este tipo de tarea será realizada por los investigadores del grupo dado que los datos obtenidos por la red de sensores se utilizarán para otras publicaciones y trabajos.

No se considera ningún coste de operación para el escenario 2, ya que el sistema es totalmente independiente de la red eléctrica e igualmente el mantenimiento de la instalación será llevado a cabo por los miembros del Grupo de Investigación.

7) Métodos

Para realizar el ACV se han seguido las normas [33] y [34]. Además se han tomado recomendaciones adicionales de [46], que para este estudio han sido:

- Selección de las distintas categorías de impacto del ciclo de vida;
- Distancias de transporte predeterminadas;
- Asignación de entrada y salida de materiales secundarios.

El programa seleccionado para realizar el estudio ha sido el openLCA [291], ya que es un software de código abierto, de libre acceso y fácil uso, muy adecuado para principiantes (ver Fig. 30). Además, como el inventario de materiales de la instalación consta de pocos elementos, no se ha tenido la necesidad de usar bases de datos especializadas.



Fig. 30. Captura de pantalla del programa usado.

También hay empresas privadas que venden programas más avanzados, como SimaPro [292], Gabi [293], BEES [294], etc. Con este tipo de herramientas, los profesionales del ACV son libres de establecer ciertas suposiciones y sus bases de datos incluyen muchos más productos. Sin embargo, requieren de experiencia y técnica en la metodología para poder usarlos y comprender los resultados. En [295] se hace una comparativa entre diversos programas, detallándose las conclusiones en la Tabla XVI.

TABLA XVI
RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN ENTRE PROGRAMAS SEGÚN [295]

Criterio de análisis	GaBi	openLCA	SimaPro	Umberto NXT
Origen	Alemania, ThinkStep	Alemania, GreenDelta	Países Bajos, PRé Consultants	Alemania, iFu Hamburg
Aspectos positivos	-Buena documentación de conjuntos de datos. -Se pueden modelar costes y aspectos sociales. -Es posible importar/exportar conjuntos de datos. -Base de datos profesional.	-Se pueden modelar costes y aspectos sociales. -Es gratis y open-source. -Es posible importar/exportar conjuntos de datos. -Posibilidad de compartir bases de datos en línea.	-Buena documentación de conjuntos de datos. -Se pueden modelar aspectos sociales. -Integrado con la base de datos EcoInvent. -La mayoría de los datos son procesos unitarios.	-Se pueden modelar costes. -Integrado con las bases de datos EcoInvent y GaBi. -Buena integración con Excel.
Aspectos negativos	-Alto coste. La mayoría de los conjuntos de datos están agregados.	-Hay escasez de conjunto de datos gratuitos. -Pobre documentación de conjuntos de datos.	-Alto coste. -Limitado número de conjunto de datos.	-Alto coste. -NO es posible importar/exportar conjunto de datos.

El siguiente paso es modelar el ciclo de vida usando datos de alguna biblioteca. En nuestro caso se han usado los datos contenidos en la biblioteca ef_secondarydata_201908 (EFSD). El uso de bases de datos de ACV permite a los usuarios reducir tiempo, esfuerzos y recursos para la recopilación de datos y reflejar las cadenas de suministro sobre las que no se tienen un control directo [296]. La EFSD ha sido desarrollada bajo la iniciativa PEF, que recomendó investigar la viabilidad de una iniciativa sobre la huella ecológica para abordar el problema derivado del impacto ambiental de productos y servicios, incluidas las emisiones de carbono. Esta iniciativa animó a los investigadores a buscar alternativas para establecer una metodología común europea y desarrolló esta base de datos, que además está disponible para el software de código abierto de GreenDelta openLCA [291].

Como los componentes del sistema ya están inventariados, se selecciona de la sección correspondiente de la base de datos el producto correspondiente (ver Fig. 31a) y después se procede a insertar en el programa la cantidad correspondiente de cada ítem (ver Fig. 31b). Una vez terminada la inserción de

componentes, el programa permite crear un diagrama con todos los procesos bajo estudio llamado sistema de producto, que es un proceso o una red de múltiples procesos donde están definidos todos los componentes del sistema (ver Fig. 31c).

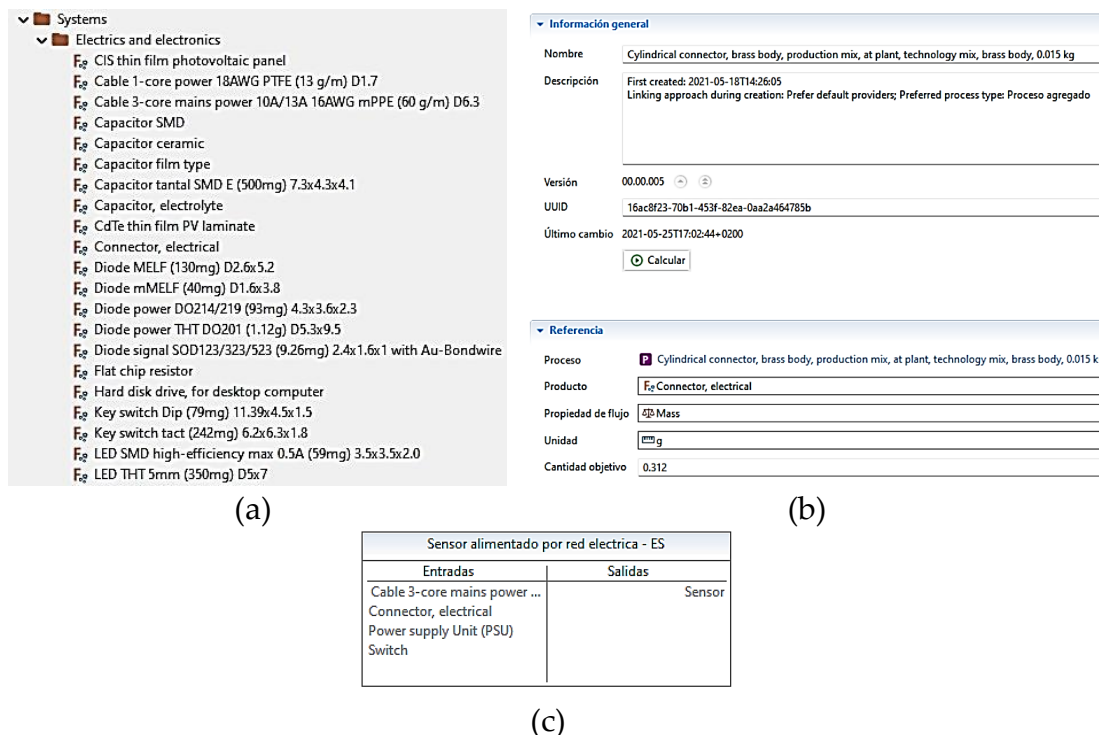


Fig. 31. Programa openLCA. (a) Lista de componentes disponible. (b) Inserción de la cantidad correspondiente de cada componente. (c) Realización del diagrama del sistema de producto.

Una vez realizado el sistema completo, se ejecuta la simulación. El programa openLCA deja seleccionar entre los métodos de evaluación que se hayan descargado previamente. En nuestro caso, el método de evaluación de impacto elegido ha sido el EF 3.0. La Comisión Europea propuso este método como una forma comúnmente aceptada de medir el desempeño ambiental y con el claro objetivo de la estandarización [45] [46]. Es el método recomendado por la UE para cuantificar las cargas ambientales de productos, servicios y organizaciones. En este método hay 16 categorías de impacto ya definidas que se incluyen en el ACV (Fig. 32).

De esta forma, se han comparado el impacto ambiental de los dos escenarios propuestos. Como se ha dicho anteriormente, este proyecto aún se encontraba en la fase de diseño, por lo que los resultados obtenidos tras el análisis ambiental y el estudio de costes fueron de utilidad para fijar los requisitos del proyecto o incluso mejorar el diseño final en términos de sostenibilidad, medio ambiente y economía. Según [297], se estima que más del

80% del impacto ambiental de un producto o servicio se establece en la etapa temprana del diseño, por lo que un análisis ambiental en esta fase no solo es factible, sino que también brinda información valiosa para tomar las mejores y más transparentes decisiones posibles [41]. En consecuencia, no solo es útil sino también necesario utilizar dichos métodos al comienzo de un proyecto [298]. De esta forma, podemos identificar oportunidades de mejora a un menor coste ya que estos métodos se aplican a los insumos y ayudan a revertir algunos de los principales impactos dañinos porque aún es posible variar el diseño en función de los resultados obtenidos. Sin embargo, en esta fase hay menos información detallada sobre el producto, su uso futuro o escenario de fin de vida, y pueden ser necesarias ciertas estimaciones.

Nombre
> Particulate Matter
> Resource use, minerals and metals
> Human toxicity, cancer
> Eutrophication marine
> Climate change-Fossil
> Land use
> Ecotoxicity, freshwater
> Eutrophication, freshwater
> Ionising radiation, human health
> Climate change
> Ozone depletion
> Resource use, fossils
> Climate change-Land use and land use change
> Human toxicity, non-cancer
> Photochemical ozone formation - human health
> Climate change-Biogenic
> Eutrophication, terrestrial
> Acidification
> Water use

Fig. 32. Categorías de impacto definidas en la EF 3.0.

8) Interpretación de los Resultados y Análisis de Sensibilidad

En esta última fase se interpretan los resultados y se describen algunos posibles instrumentos para la mejora. El objetivo de este paso final es explicar los resultados de la evaluación de impacto estimada y las prioridades en la mejora. Para ello se recurren a los análisis de sensibilidad, que consisten en modificar los valores de uno o algunos datos de entrada para comprobar la reacción en el resultado final. Este análisis ayuda a determinar y registrar cambios en los datos de salida debido a la modificación de la información de entrada [299]. Todo el conocimiento adquirido a partir del reconocimiento de datos o parámetros de entrada sensibles puede ayudar al proceso de desarrollo del producto y, por lo tanto, puede categorizar y/o priorizar aquellos componentes con un mayor peso en el impacto ambiental de un producto o sistema [39].

B. Descripción del Sistema

El punto de partida de esta tesis son los datos recopilados por un magnetómetro ELF instalado en el campus universitario de la UAL desde septiembre de 2020. Almería está situada en el sur de España (Fig. 33a), y su universidad se encuentra situada a 7 km al este de la ciudad (Fig. 33b). En la Fig. 33c se muestra la ubicación del laboratorio donde se encuentra instalado el sensor. El laboratorio está gestionado por el Grupo de Investigación TIC019 y se encuentra dentro del “Centro de Investigación en Tecnologías de la Información y la Comunicación” (CITIC). Esta infraestructura es un espacio de trabajo para investigadores y profesores, y además, el edificio alberga el centro de proceso de datos (CPD) y la sede de los servicios informáticos centrales de la UAL. Por este hecho, la potencia media de este edificio (alrededor de 100 kW) es superior a la del resto de edificios del campus universitario.

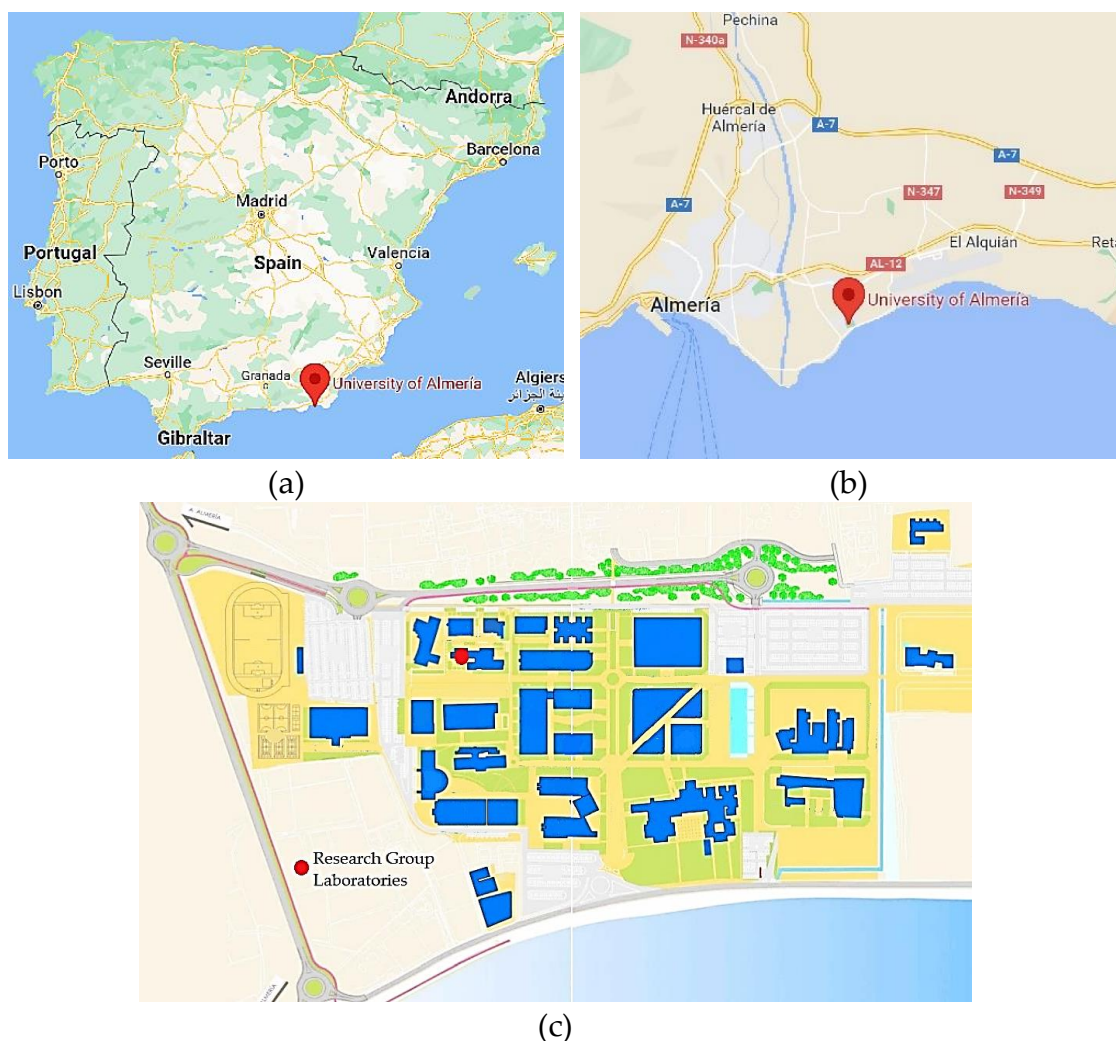


Fig. 33. Localización del magnetómetro ELF. (a) Situación de la ciudad de Almería. (b) Localización de la UAL (c) Ubicación del laboratorio en el campus.

1) Hardware Usado

El magnetómetro ELF usado es el prototipo de los magnetómetros que se usarán en la red de sensores descrita en el proyecto de I+D UAL18-TIC-A025-A. Este tipo de magnetómetros permiten la medición de CEM de muy baja frecuencia e intensidad. La geometría, la estructura y los materiales del que está fabricado determinan sus propiedades (sensibilidad, inductancia, autorresonancia y ancho de banda).

El sensor consta de una bobina sin núcleo (Fig. 34) con 12.000 vueltas de alambre de cobre esmaltado de 0,25 mm de diámetro. El diámetro promedio de la bobina es de 32 cm y el ancho de bobinado es de 4,5 cm. La inductancia del sensor es de 68,5 H y la frecuencia de autorresonancia es de 990 Hz. La sensibilidad máxima del sensor más la etapa de amplificación es de 2,93 mV/pT a 632 Hz, mientras que a 50 Hz el valor es de 57 $\mu\text{V/pT}$. En artículos previos de los miembros del Grupo de Investigación hay descritos sensores similares [143].



Fig. 34. Bobina usada en el magnetómetro.

La señal analógica es convertida a digital mediante un ADC de 24 bits de resolución. La salida del ADC es leída por un procesador de señal digital (DSP²⁵) integrado, que realiza un preprocesamiento consistente en diezmar la frecuencia de muestreo en el ADC, reduciendo el ruido de adquisición [300] y la frecuencia final de muestreo del sistema a 4.439 Hz. Por tanto, el ancho de banda es la mitad de esta frecuencia, 2.219,5 Hz. En Fig. 35 se encuentra un diagrama con la estructura del sistema de medida y en Gázquez et al. [273] se encuentra un esquema eléctrico detallado.

²⁵ Digital signal processor.

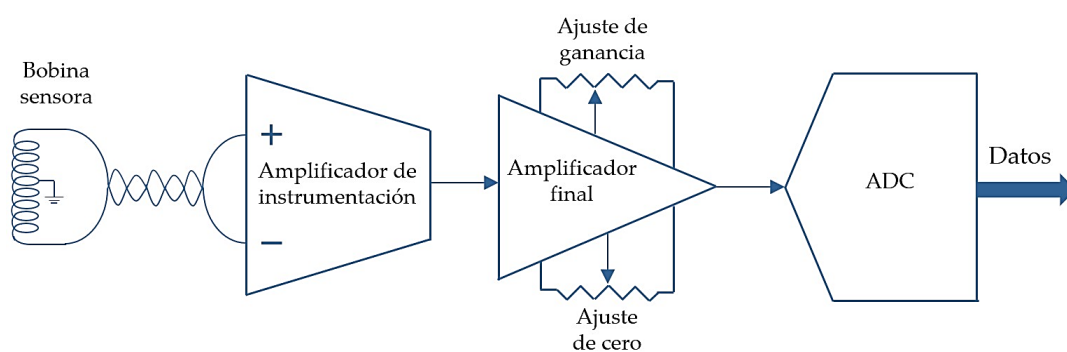


Fig. 35. Estructura del sistema de medida.

Finalmente, los datos obtenidos se envían a través de ethernet a un servidor de datos en el que se almacenan para su posterior análisis. El laboratorio también cuenta con un servidor de cálculo en la misma sala donde está situado el magnetómetro. Las diferentes partes del sistema aparecen enumeradas en la Fig. 36.



Fig. 36. Sistema instalado en el laboratorio: 1. Magnetómetro ELF; 2. Amplificador de instrumentación; 3. Amplificador final; 4. ADC+DSP; 5. Servidor de cálculo.

Para contrastar los resultados de esta tesis se han usado analizadores de calidad de energía comerciales como método de validación. El modelo elegido fue el Openzmeter (oZm), que es un analizador inteligente de bajo coste con un sistema de código abierto (software libre y hardware abierto [301]) desarrollado entre la UAL y la Universidad de Granada para ayudar en la medición inteligente de la energía y el análisis de la CEE. Mide voltajes RMS con una precisión de hasta el 0,1 %, frecuencias de hasta 10 mHz (entre 42,5 y 57,5 Hz)

y corrientes RMS de acuerdo a las diferentes sondas que puede llevar (la versión básica puede medir hasta 265 V_{RMS} y 35 A_{RMS} utilizando un sensor incorporado) [302] [303]. Todas las características cumplen con las normas [188] y [175] y ha sido citado en numerosos artículos de investigación internacionales [304] [305] [306] [307] y ampliamente utilizado en aplicaciones de investigación [308]. La Fig. 37 presenta una vista general del oZm utilizado en esta tesis.

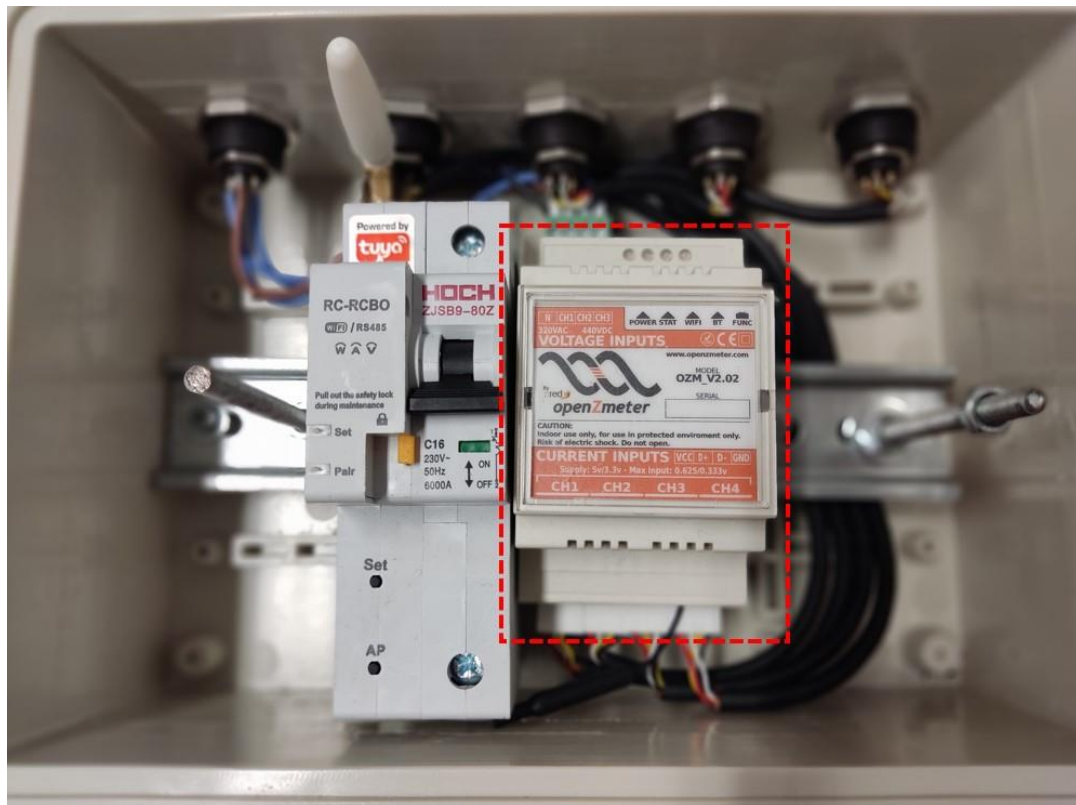
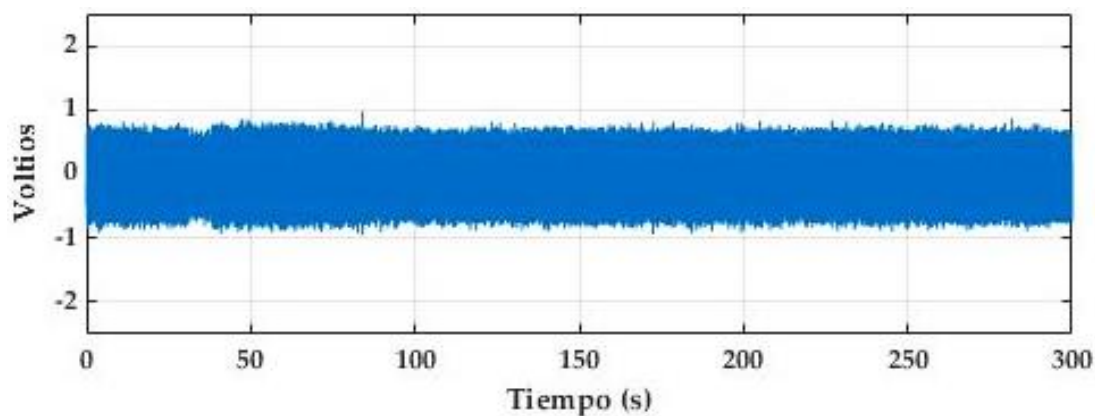


Fig. 37. Vista frontal del oZm (recuadro rojo).

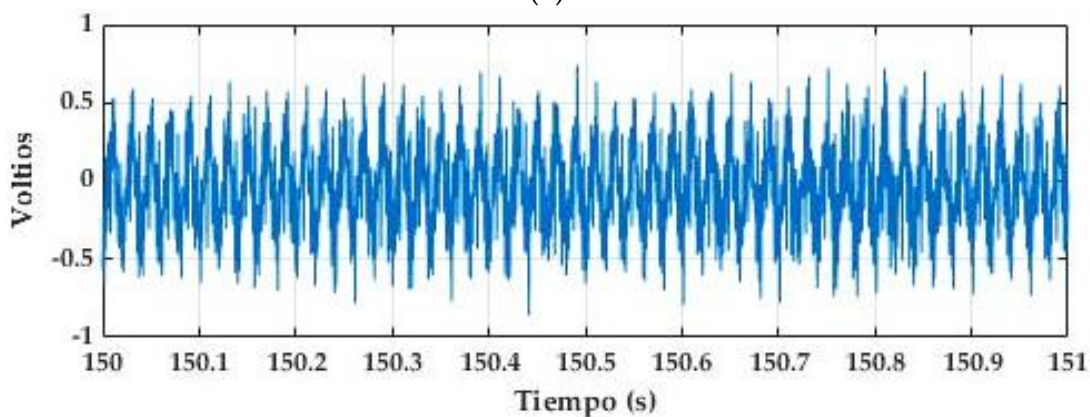
2) Procesamiento de los Datos Obtenidos

Para el procesado de datos se ha usado MatLab® R2021.a (MA, EE. UU.) y se ha analizado un mes completo, específicamente el mes de mayo de 2021.

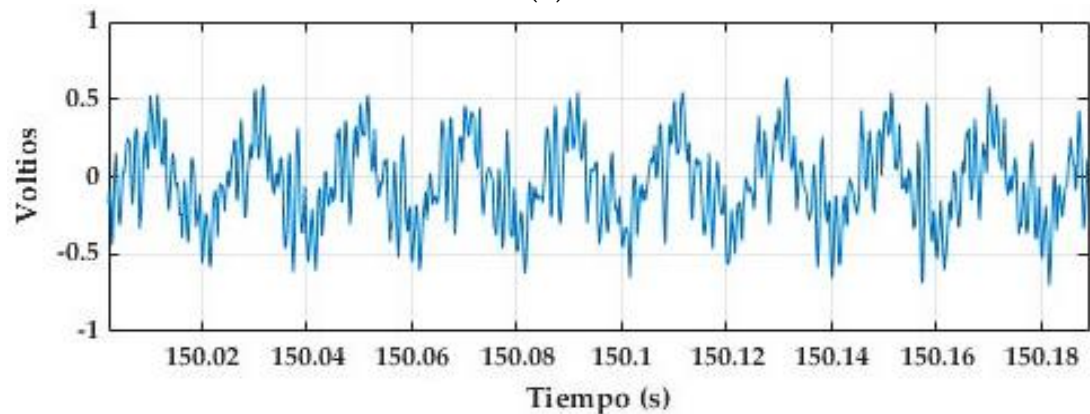
Se parte de una señal en el tiempo que ha sido muestreada a 4.439 Hz. Tras una primera calibración se obtiene la señal en voltios. En la siguiente figura se puede observar un ejemplo donde se ha representado la señal, con una duración de 300 s (Fig. 38a), y después con detalles de 1 s (Fig. 38b) y 200 ms (Fig. 38c).



(a)



(b)



(c)

Fig. 38. Señal en el tiempo. (a) 300 s. (b) Detalle de 1s. (c) Detalle de 200 ms.

Por medio de la FFT, la señal se transforma del dominio del tiempo a la frecuencia. El espectro obtenido aún no está calibrado en frecuencia (ver Fig. 39).

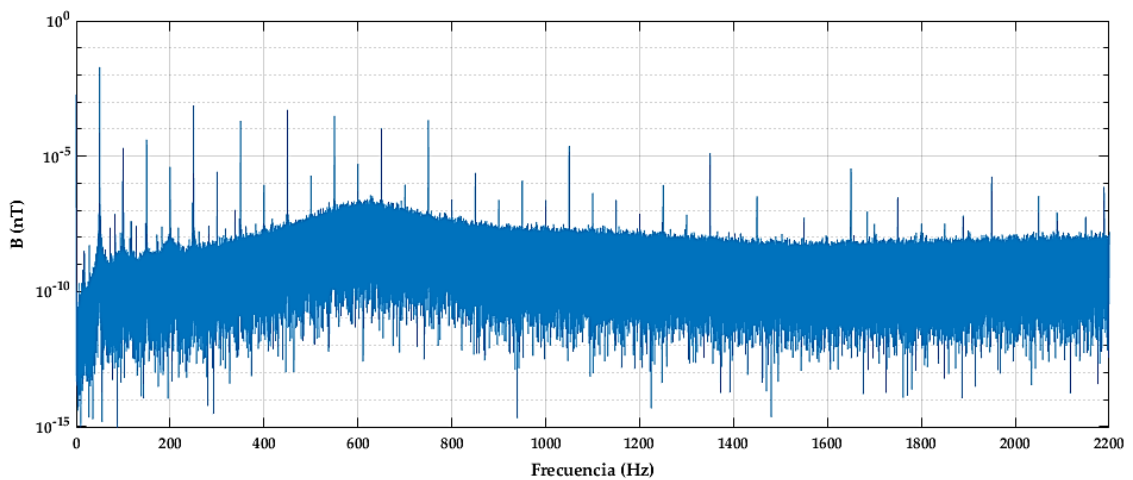


Fig. 39. Espectro de la señal tras la FFT.

En este momento se aplica una función de calibración, obtenida a través del analizador vectorial de redes (AVR) Agilent E5061B de la Fig. 40. El AVR permite determinar los valores de impedancia tanto real como imaginaria de un elemento en un rango de frecuencias establecido, aunque la medición de bobinas de muchas vueltas como la nuestra es un proceso complicado por los múltiples efectos que se manifiestan durante la medida, como la capacitancia entre espiras y fenómenos derivados del comportamiento de los devanados que actúan como líneas de transmisión [143].

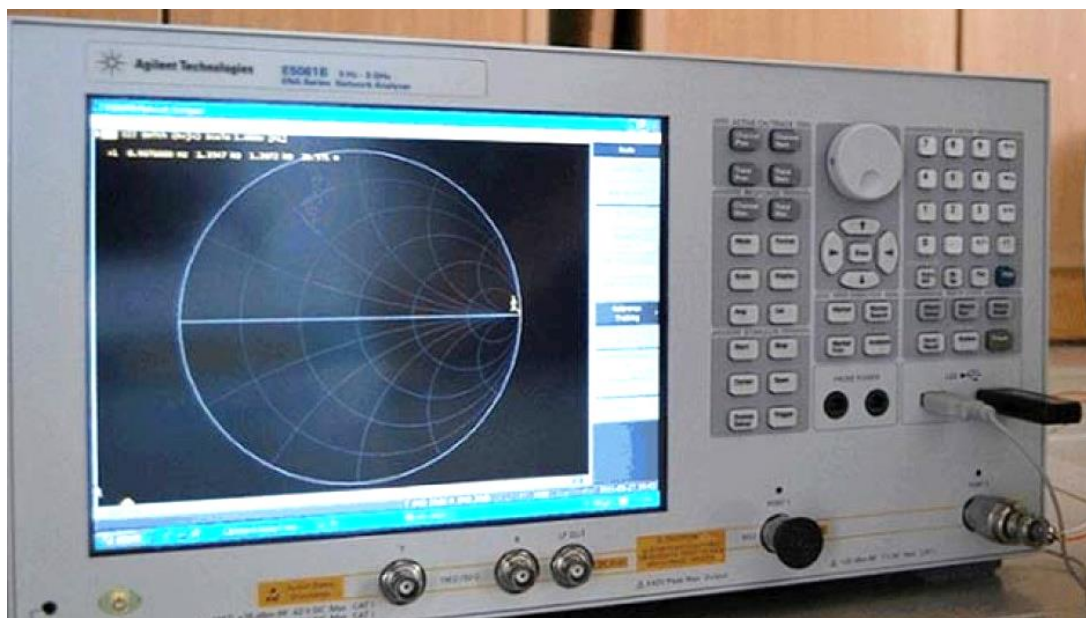


Fig. 40. Analizador vectorial de redes usado en este trabajo.

Después de esta calibración, el resultado final es la densidad de flujo magnético en el dominio de la frecuencia. En la Fig. 41 se puede observar el

efecto de la calibración y como se aplanan la respuesta en frecuencia de la señal en comparación con la Fig. 39.

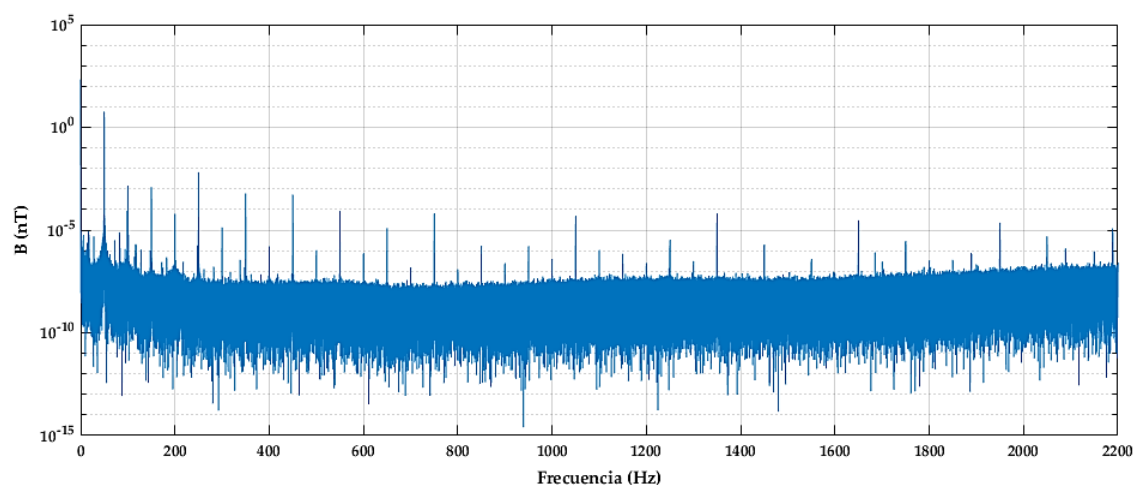


Fig. 41. Espectro de la señal calibrada.

La precisión del análisis FFT requiere una señal estacionaria. Sin embargo, las señales en su mayoría son de naturaleza no estacionaria, ya que la amplitud y la frecuencia varían con el tiempo. Una función $f(t)$ continua en el dominio del tiempo, se transforma mediante la transformada de Fourier en una función en el dominio de la frecuencia $f(f)$, y dado que las funciones base que se usan son sinusoidales, un solo componente con frecuencia f afectará a todo el dominio de la señal $f(t)$ por igual [309]. Por lo tanto, las señales pueden fluctuar extendiendo la energía de los componentes armónicos a las barras espectrales adyacentes [310]. Debido a esto, la norma [195] introduce el concepto de agrupación de líneas espectrales. Así las líneas espectrales se pueden agrupar de dos maneras para formar la suma cuadrática de las barras espectrales intermedias entre dos armónicos adyacentes en los denominados:

- Grupos: cada lote se denomina "grupo" y para redes de 50 Hz comprende frecuencias de ± 25 Hz alrededor de cada armónico (ver Fig. 42a).
- Subgrupos: cada lote se denomina "subgrupo" y para redes de 50 Hz comprende frecuencias de ± 5 Hz alrededor de cada armónico (ver Fig. 42b). Esta forma de agrupamiento es más útil si los armónicos y los interarmónicos se evalúan por separado.

Una vez agrupados convenientemente las barras espectrales, los valores se deben agrupar de acuerdo a [188]. Esta norma define los métodos de medición y la interpretación de los resultados para los parámetros CEE en

sistemas de alimentación de CA con una frecuencia fundamental de 50 Hz o 60 Hz. Los diferentes métodos de medición se describen para cada tipo de parámetro con el objetivo de brindar resultados confiables y repetibles, independientemente de la su implementación. La norma fija dos categorías diferentes de algoritmos de agregación para factores de CEE en redes de 50 Hz:

- Agregación de 150 ciclos: los datos deben agregarse a partir de 15 intervalos de 10 ciclos.
- Agregación de 10 minutos: los datos deben agregarse a partir de los intervalos de 10 ciclos.

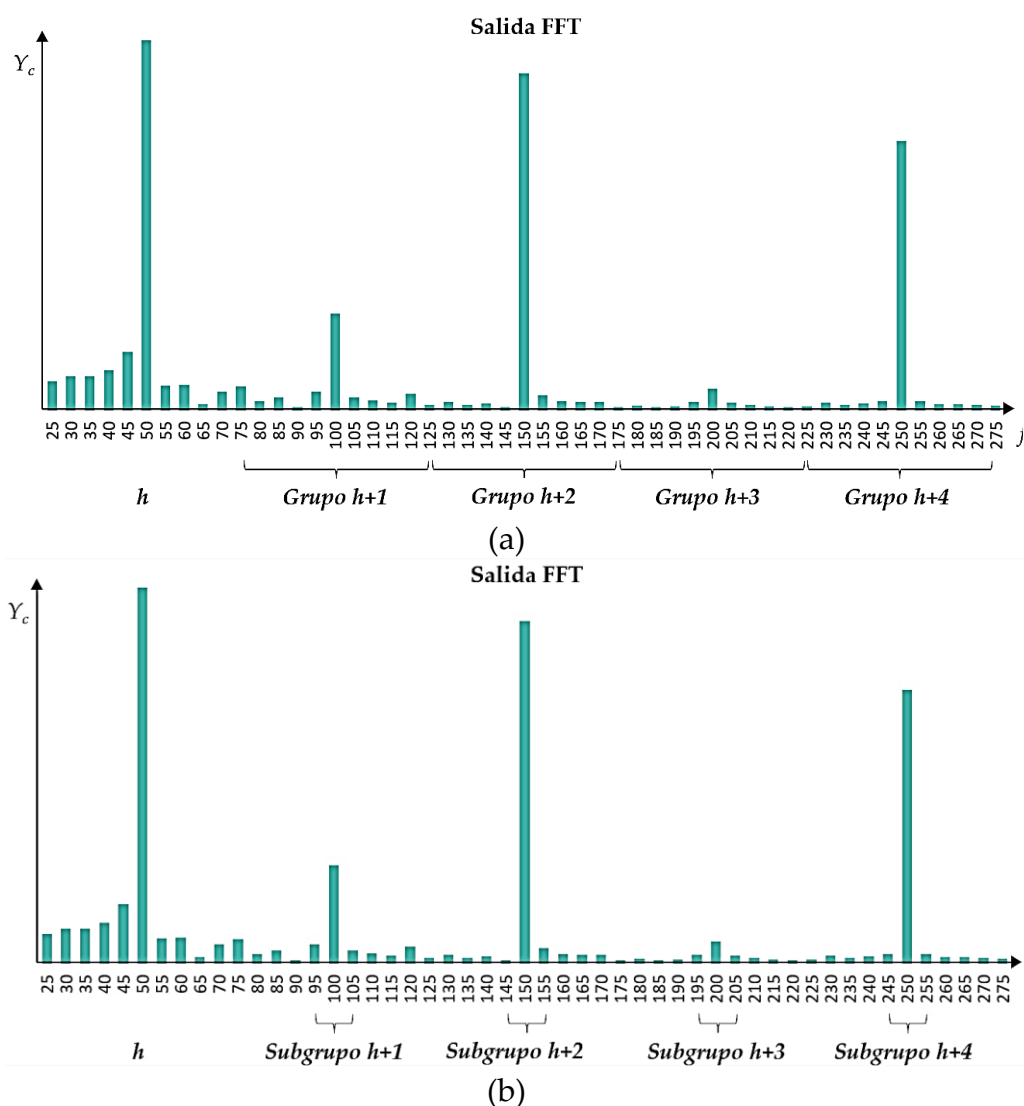


Fig. 42. Agrupación de líneas espectrales. (a) Grupos; (b) Subgrupos.

C. Análisis de la Exposición Humana a los Campos Magnéticos

El escenario de medida es el laboratorio del campus de la UAL donde se encuentra instalado el magnetómetro. La presencia de trabajadores en ese laboratorio es esporádica y de corta duración. Se van a seguir los límites normativos de [241], ya que este RD es el relativo a la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a los CEM. Este RD tiene como ámbito de aplicación “los campos eléctricos estáticos, los campos magnéticos estáticos y los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo, cuyas frecuencias estén comprendidas entre 0 Hz y 300 GHz”.

También se definen los efectos biofísicos directos en el cuerpo humano que pueden ser causados por los CEM. Se citan:

1. Los efectos térmicos, tales como el calentamiento del tejido humano debido a la absorción de energía.
2. Los efectos no térmicos, tales como la estimulación de los nervios, de los órganos sensoriales, de los músculos, etc. Dichos efectos pueden ser perjudiciales tanto para la salud mental como física de las personas. Puede producir síntomas transitorios, como alteración del conocimiento o vértigo, por lo que repercute directamente en la capacidad de la persona para trabajar de forma segura. Es decir, puede suponer un riesgo para la seguridad.
3. Las corrientes en las extremidades.

Asimismo, también se definen los efectos indirectos, que son los causados por la presencia de un objeto en un CEM y que pueda devenir en un riesgo para la seguridad o la salud de las personas, como:

1. Las interferencias con equipos de electromedicina, como marcapasos.
2. El peligro derivado de la proyección de objetos que se da en materiales ferromagnéticos en el interior de campos magnéticos estáticos.
3. La activación de detonadores.
4. El riesgo de explosión e incendio debido a la ignición de materiales inflamables mediante chispas provocadas por campos inducidos, descargas en forma de chispa y corrientes de contacto.
5. Corrientes de contacto.

Hay dos formas de cuantificar la exposición humana a los CEM:

- Los VLE, que se han fijado a partir de consideraciones biofísicas y biológicas en base a los efectos directos agudos y a corto plazo que han sido comprobados científicamente y que afectan directamente a la salud de las personas. Producen efectos en el interior del organismo y esto los hace difíciles de medir. Se pueden clasificar en:
 - 1 VLE sanitarios: por encima de estos se pueden padecer efectos adversos para la salud;
 - 2 VLE sensoriales: por encima de estos se puede estar sujeto a trastornos transitorios de las percepciones sensoriales e incluso a pequeños cambios de las funciones cerebrales.
- Los NA, que son niveles operativos fijados para simplificar el cumplimiento de los VLE. Hay NA para la intensidad del campo eléctrico, la intensidad del campo magnético, la densidad de flujo magnético, las corrientes de contacto y las corrientes de las extremidades.

Los NA se derivan de los correspondientes VLE a través de programas informáticos de modelado, teniendo en cuenta el supuesto más desfavorable. Así, el cumplimiento de los NA garantiza el acatamiento del correspondiente VLE. No obstante, en ciertas ocasiones es posible superar el NA y seguir respetando el correspondiente VLE. La relación entre el NA y el VLE se ejemplifica en la Fig. 43 tomada de la “Guía no vinculante de buenas prácticas para la aplicación de la Directiva 2013/35/UE sobre campos electromagnéticos” [311].

En esta tesis solo tendremos en cuenta los NA para la densidad de flujo magnético. Los valores de los NA que se derivan de los VLE se pueden observar en Tabla IV y en la Fig. 18 del capítulo de introducción.

Según [140], cuando la exposición humana se debe a campos de diferentes frecuencias, la exposición es acumulativa y se mide mediante la ratio de exposición (RE). Este criterio viene definido en la guía para H , pero en esta tesis se ha adaptado para la densidad de flujo magnético. La RE es la suma de las relaciones de la densidad de flujo magnético de cada frecuencia con su NA correspondiente, tal como se muestra en (15):

$$RE = \sum_{j=1 \text{ Hz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{B_j}{B_{NA,j}} \leq 1 \quad (15)$$

donde B_j es la densidad de flujo magnético a la frecuencia j y $B_{NA,j}$ es el NA para la densidad de flujo magnético a la frecuencia j . Para esta tesis se ha elegido los NA_{inf} , que son los más restrictivos y se observó en cálculos preliminares que se ya se cumplían.

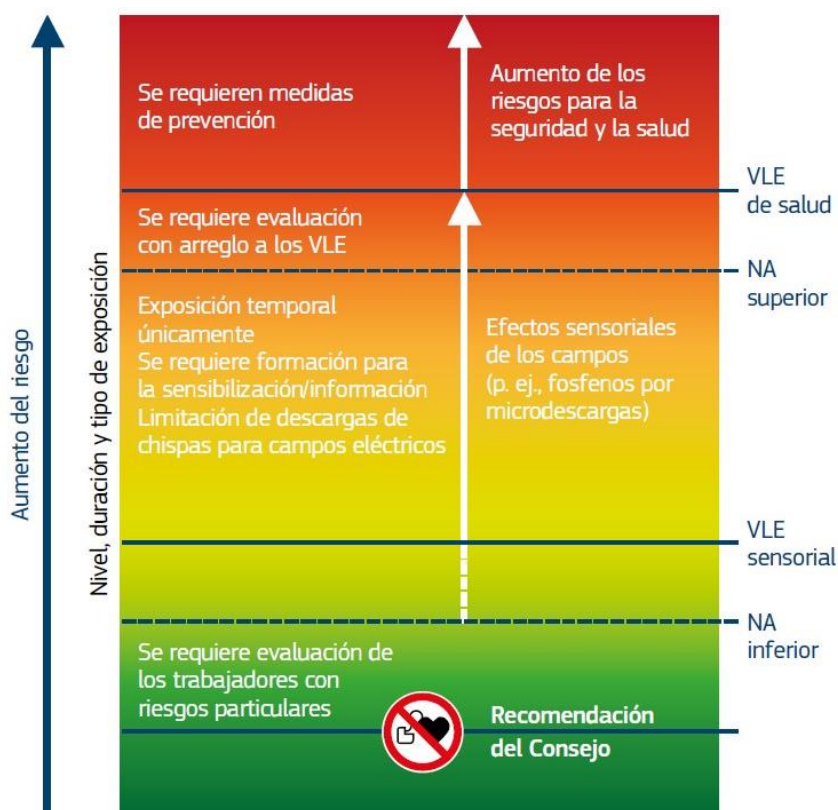


Fig. 43. Esquema tomado de [311] para ilustrar la relación entre los VLE y NA.

Para el cálculo de la RE se realiza un análisis basado en el algoritmo FFT. En las normas mencionadas anteriormente no se especifica la ventana de tiempo a utilizar en frecuencias inferiores a 100 kHz. Únicamente en la “Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de la exposición a campos electromagnéticos en los lugares de trabajo” [312] elaborado para la adaptación de [235] a la legislación española, se menciona que en ese rango de frecuencias se deben utilizar ventanas de tiempo de 1 s.

Una vez realizado el algoritmo FFT, la salida es el valor RMS de la densidad de flujo magnético en el dominio de la frecuencia. Aplicando (15) se

calcula el valor de la RE . Para investigar la naturaleza de la exposición al campo magnético, aparte de calcular el valor global hasta los 2,2 kHz (ancho de banda de nuestro sistema) se han calculado las siguientes RE :

- RE_{ELF} : se calcula en el rango de frecuencias de 0 a 45 Hz. Las señales esperadas en este tramo se consideran de origen natural, siendo las principales las resonancias de Schumann [313]. Aunque la banda ELF se extiende hasta los 300 Hz, el cálculo de esta RE se ha limitado hasta los 45 Hz porque a partir de 50 Hz predomina la frecuencia de la red eléctrica.
- RE_{50} : se calcula para la frecuencia fundamental 50 Hz, agrupando las barras espectrales adyacentes entre frecuencias de ± 5 Hz en lo que se denominó subgrupo [195].
- RE_H : se calcula para los componentes armónicos de 50 Hz, pero sin contener el aporte de la componente fundamental, por lo que se calcula desde el armónico 2 (100 Hz) hasta el 44 (2.200 Hz). Igualmente, para calcular la contribución de cada armónico se han agrupado por subgrupos [195].
- RE_T : se calcula en todo el ancho de banda del sistema. Este valor es el RE total al que están expuestas las personas que puedan estar en la misma posición del sensor.
- RE_S : se calcula para todas aquellas frecuencias que no son predecibles. Estas frecuencias se consideran espurias y se obtienen mediante (16):

$$RE_S = RE_T - RE_{ELF} - RE_{50} - RE_H \quad (16)$$

Para conocer el peso del valor parcial en % de cada RE_i en el valor de RE_T , se calcularon las relaciones RE_i/RE_T , a las que llamaremos R_i .

A frecuencias por debajo de 100 kHz, los campos eléctricos y, en particular, los magnéticos, en la mayoría de los casos, están distorsionados por componentes armónicos distribuidos en una gran banda de frecuencias. En consecuencia, las formas de onda de los campos muestran patrones complejos, a menudo pulsados. En esta tesis la frecuencia de referencia es de 50 Hz, y debido a las componentes armónicas se hace necesario calcular la RE .

D. Medida de la Frecuencia de la Red Eléctrica

En el contexto de una CA, la frecuencia se refiere al número de veces que la señal eléctrica cambia entre positivo y negativo en un segundo. Según [188], el valor de la frecuencia fundamental es la relación entre el número de ciclos enteros contados durante 10 s de intervalo de reloj N dividido por la duración del número entero de ciclos t (17). La norma también permite otras técnicas con equivalente resultados. En [314], se describen diferentes métodos de medición de la frecuencia por técnicas de procesado de señal.

$$f = \frac{N_{t=10}}{t} \quad (17)$$

El primer método utilizado para obtener la frecuencia de la red a través de los datos obtenidos por el magnetómetro ELF fue un algoritmo de cruce por cero (ZC²⁶). También se implementó un segundo método basado en la FFT de la señal. Aunque la agregación para la frecuencia no es obligatoria según [188], los datos obtenidos por nuestro sensor se agregaron para obtener un valor cada 3 minutos para poder así comparar con los datos obtenidos del analizador oZm. La agregación se calculó utilizando el algoritmo mencionado en [188].

1) Método de Paso por Cero

Según [188], cuando se utiliza el método de paso por cero, los armónicos e interarmónicos deben atenuarse para reducir los efectos de los múltiples pasos por cero y los intervalos de tiempo de medición no deben superponerse. Como se menciona también en [188], para algunas aplicaciones como aerogeneradores, puede ser útil el uso de tiempos menores a 10 s. Para ellos en redes de 50 Hz la frecuencia se obtiene a partir de 10 ciclos de frecuencia (dividiendo los ciclos por la duración de los períodos enteros).

Los algoritmos que actúan con funciones en el dominio del tiempo son muy comunes debido a su simplicidad computacional. Además, son fáciles de implementar ya que no necesitan ninguna transformación [315]. Por lo tanto, el método ZC es una forma práctica y eficiente de calcular la frecuencia de una serie de datos muestreados [316]. Previo al algoritmo ZC, se aplicó un filtro digital paso bajo para atenuar los armónicos e interarmónicos y así eliminar los múltiples cruces por cero no deseados de la señal temporal obtenida por el

²⁶ Zero-crossing.

magnetómetro ELF, como se puede observar en la Fig. 44. Después del proceso de filtrado, se aplicó el algoritmo para hallar la frecuencia cada 10 s.

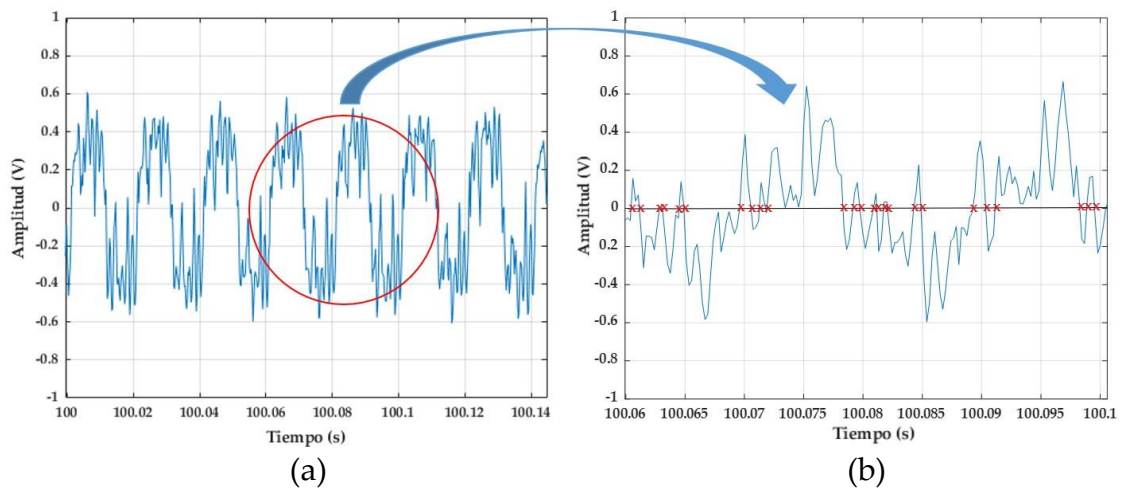
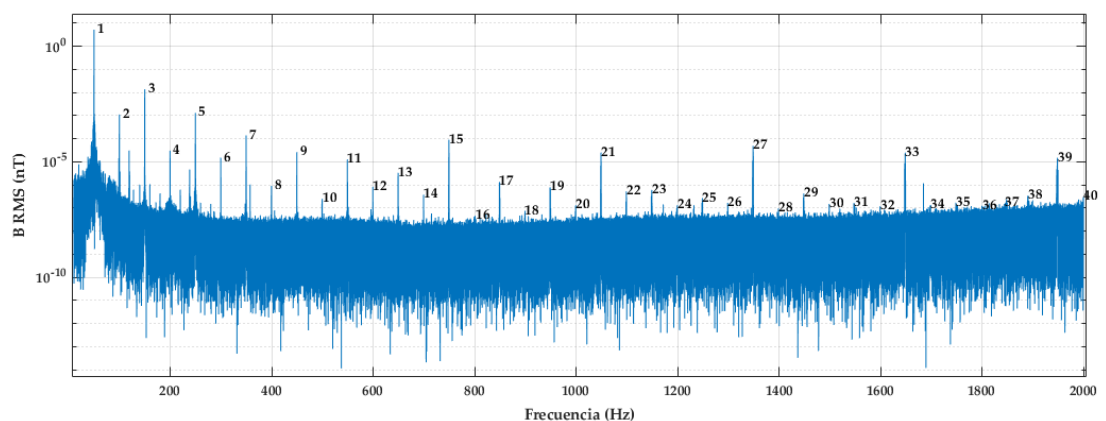


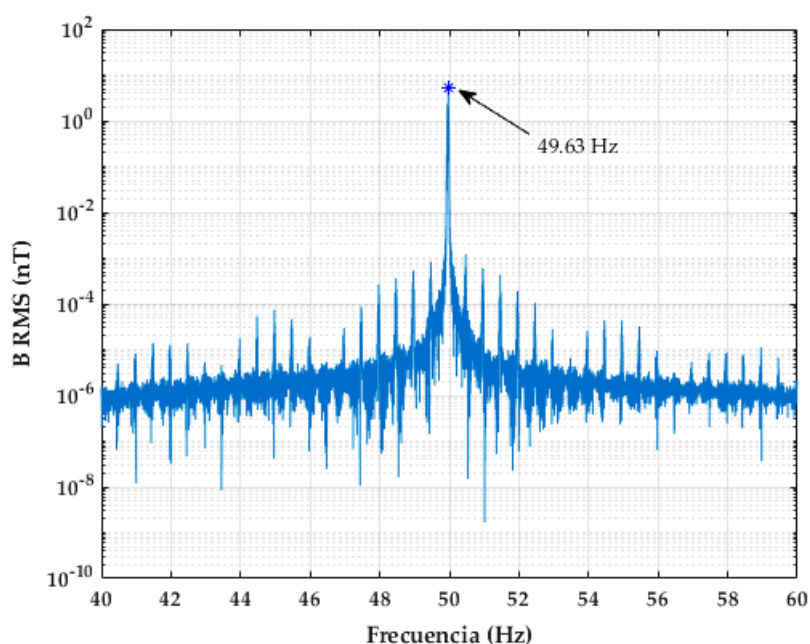
Fig. 44. Múltiples pasos por cero. (a) 6 ciclos de la señal (b) Detalle.

2) Método FFT

Para obtener la transformada de Fourier, la señal se procesó mediante el algoritmo FFT. Seguidamente se buscó la frecuencia de la barra espectral donde se alcanzan los valores máximos cercanos a la componente fundamental y sus armónicos. La Fig. 45a muestra los picos numerados correspondientes a la frecuencia fundamental y sus armónicos hasta el orden 40. Finalmente, se almacenó el valor de la frecuencia donde se alcanza el pico cercano a 50 Hz (Fig. 45b). Para comparar los resultados con los datos obtenidos del analizador oZm, se eligió una ventana de 3 minutos para el método FFT.



(a)



(b)

Fig. 45. Búsqueda de picos. (a) Hasta armónico 40. (b) Cercano a los 50 Hz.

3) Comparación de los Resultados

Los resultados de las mediciones de ambos métodos se compararon entre sí y con los datos proporcionados por el analizador oZm que se instaló en el edificio donde estaba emplazado el magnetómetro ELF (ver Fig. 46).

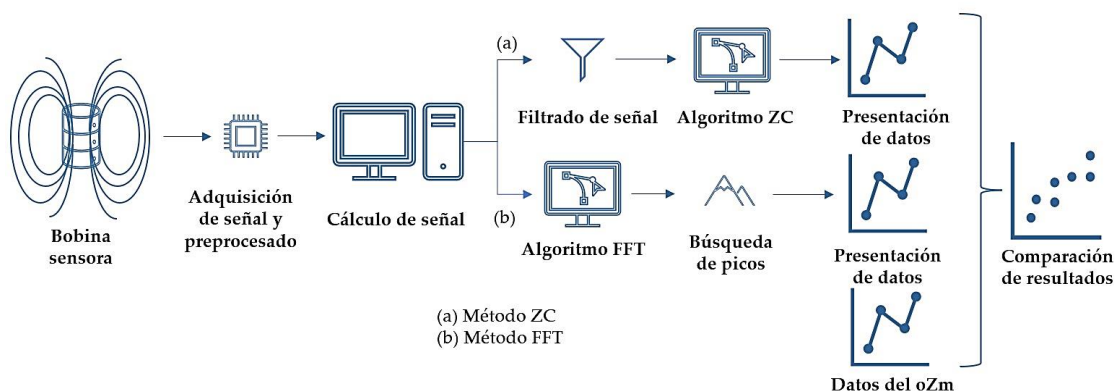


Fig. 46. Diagramas de los algoritmos ZC y FFT

Como paso final, los valores mínimo y máximo hallados de la frecuencia de red se compararon con los valores de la norma [175], que para redes de baja, media y alta tensión con conexión síncrona a un sistema interconectado en

condiciones de operación normal, y con el valor medio de la frecuencia medida en periodos de 10 s establece que debe ser:

- 50 Hz \pm 1 % (49,5 a 50,5 Hz), durante el 99,5 % de un año;
- 50 Hz -6 %/+4 % (47 a 52 Hz), durante el 100 % del tiempo.

Aunque la modificación [178] de la norma añadió que, en circunstancias excepcionales, pueden aplicarse temporalmente tolerancias de frecuencia más amplias con el fin de que el suministro eléctrico quede garantizado.

E. Evaluación de la Tasa de Distorsión Armónica en Corriente

Para una línea de transporte de energía eléctrica, la magnitud del campo eléctrico creado alrededor de ella es función de la tensión que hay en el conductor y la distancia, es decir, cuanto mayor sea la tensión de la línea, mayor será el campo eléctrico generado, incluso cuando la electricidad no está siendo usada. Por el contrario, los campos magnéticos solo se producen cuando hay electricidad fluyendo por un conductor y dependen de la corriente en el cable y de la distancia. A mayor intensidad de corriente eléctrica que recorra una línea, mayor será el campo magnético que se genera.

Así pues, con la densidad de flujo magnético obtenida a través del magnetómetro solo podremos inferir la *THD* de la señal de corriente eléctrica que circula por los conductores, pero no la *THD* de la señal de voltaje.

Para calificar la propiedad no sinusoidal de la forma de onda de una señal *Y* se utiliza la *THD_Y*. De esta forma, la *THD_Y* puede expresar colectivamente la severidad de las perturbaciones armónicas según (18) [158]:

$$THD_Y = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} Y_h^2}}{Y_1} 100 \% \quad (18)$$

donde, Y_h es el valor eficaz de la señal armónica individual de orden h , h_{max} es el máximo orden (definido para cada norma particular), e Y_1 es el valor eficaz de la componente fundamental de la señal. Para este apartado se ha considerado un orden máximo de 40 (correspondiente a 2 kHz).

En el caso que nos ocupa, para la hallar de la *THD* de la señal de corriente, solo hay que sustituir *Y* por *I* en (18).

1) Agrupación

Como se comentó, las señales no estacionarias fluctúan, extendiendo la energía de los componentes armónicos a las barras espectrales adyacentes [306]. Para mejorar esto, los armónicos se agrupan primero de acuerdo a [195] para formar la suma cuadrática de las barras espectrales intermedias entre dos armónicos adyacentes entre frecuencias de ± 25 Hz, lo que se denominó "grupo".

En nuestro caso, a la señal procedente del magnetómetro se le va a realizar la FFT con un ancho de ventana T_w correspondiente a 10 ciclos de señal, es decir, 200 ms. Este ancho de ventana determina la resolución en frecuencia f_w según (19), por lo que la separación en frecuencias de las barras del espectro será de 5 Hz.

$$f_w = 1/T_w \quad (19)$$

Para redes de 50 Hz y considerando una resolución espectral de 5 Hz, el grupo armónico resultante se obtiene usando (20):

$$Y_{g,h}^2 = \frac{Y_{C,k-5}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 Y_{C,k+i}^2 + \frac{Y_{C,k+5}^2}{2} \quad (20)$$

donde $Y_{g,h}$ es el valor RMS del grupo armónico de orden h , e $Y_{C,k+i}$ es el valor RMS de la componente espectral correspondiente a una barra espectral de la salida del algoritmo FFT.

Una vez realizado el proceso de agrupado, (18) se convierte en (21):

$$THDG_Y = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} Y_{g,h}^2}}{Y_{g,1}} 100 \% \quad (21)$$

donde ahora $Y_{g,h}$ es el valor RMS del grupo armónico individual de orden h , e $Y_{g,1}$ es el valor RMS del grupo asociado a la componente fundamental.

2) Comparación de los Resultados

La salida del algoritmo completo es la THD de la densidad de flujo magnético (THD_B) de un área. Este campo magnético proviene de la señal de corriente de la red eléctrica cercana. Para contrastar estos valores, se han usado los datos de TDH_I de la red eléctrica proporcionados por los analizadores oZm.

Para poder comparar los resultados, en este apartado se ha utilizado el algoritmo de agregación de [188] de 10 minutos para obtener un valor de la

THD cada 10 minutos. En la Fig. 47 se muestra un diagrama de bloques del sistema usado.

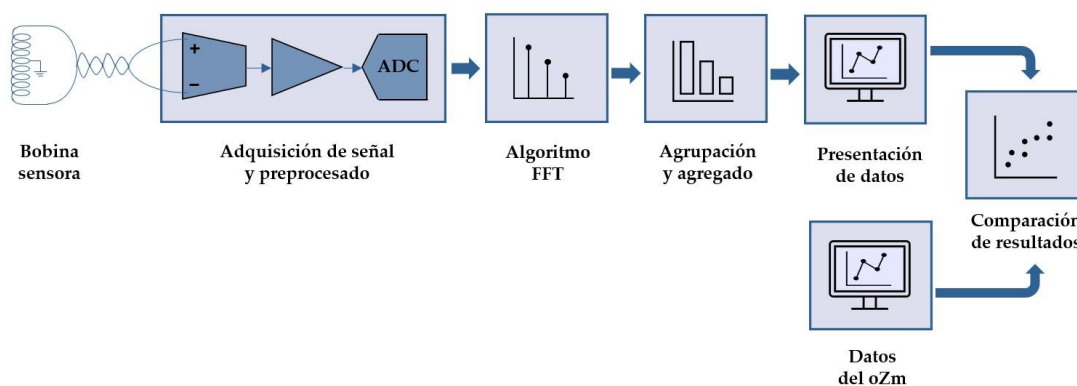


Fig. 47. Diagrama de bloques del sistema usado para hallar la THD.

El primer analizador se instaló en el interruptor eléctrico principal del CITIC, que es donde está situado el laboratorio que alberga el magnetómetro ELF. El segundo se instaló en la línea de alimentación del alumbrado exterior. En la Fig. 48 muestra un plano del campus de la UAL con la ubicación del magnetómetro en el interior del CITIC y la iluminación exterior alrededor del edificio.

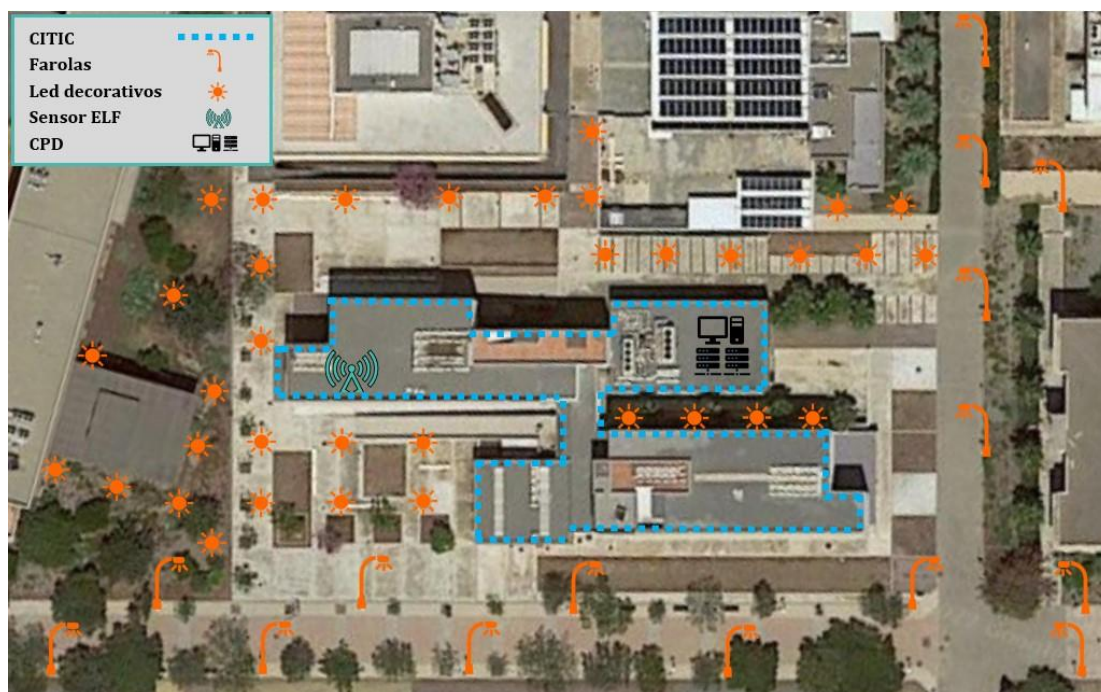


Fig. 48. Edificios y alumbrado exterior cercano al magnetómetro ELF.

Las farolas del alumbrado público del campus (Fig. 49a) se activan mediante un interruptor crepuscular astronómico programable, que cambia automáticamente el periodo de encendido/apagado en función del día del año. Además, la iluminación decorativa (Fig. 49b) se apaga entre las 00:00 y las 6:00 horas. El alumbrado público principal del campus de la UAL sigue estando provisto de lámparas de sodio de alta presión (HPS²⁷) con balastos electromagnéticos (Fig. 49c).

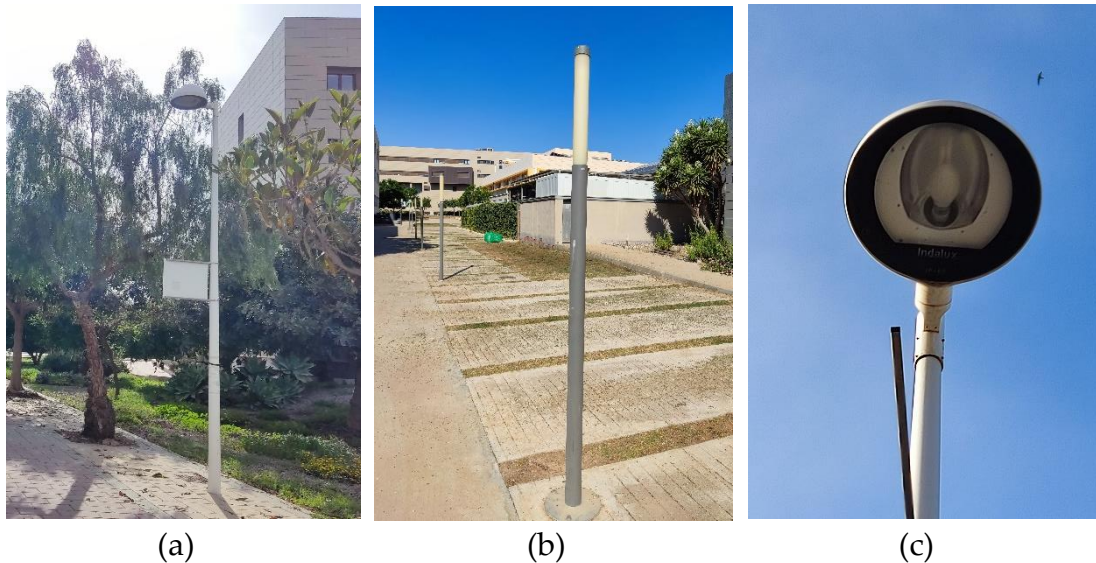


Fig. 49. Alumbrado exterior presente en el campus de la UAL. (a) Farolas; (b) Leds decorativos; (c) Detalle de las lámparas HPS.

Este tipo de lámparas no tienen una potencia unitaria elevada, por lo que cabría esperar que no fuese una fuente importante de corrientes armónicas, pero debido a que en el alumbrado público un gran número de ellas son usadas simultáneamente durante un periodo prolongado de tiempo, las lámparas HPS se convierten en una fuente importante de armónicos [317], sobre todo del 3^o.

²⁷ High pressure sodium.



Capítulo IV.

RESULTADOS



IV. RESULTADOS

A. Análisis del Ciclo de Vida y de Costes del Ciclo de Vida

En primer lugar se van a presentar los resultados del ACV, donde se analizaron los impactos ambientales de una red de sensores conectados a la red eléctrica (escenario 1) en comparación con la opción de hacer el sistema completamente autónomo (escenario 2) con el sensor conectado a un panel fotovoltaico y una batería de respaldo. A través de las 16 categorías de impacto diferentes expuestas en la Fig. 32 se tratará de encontrar la mejor opción en términos de cargas medioambientales. Posteriormente se mostrarán los resultados del análisis de CCV desde el punto de vista del cliente y, por último, se mostrarán los resultados de dos análisis de sensibilidad realizados.

1) Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida

Para la evaluación del impacto del ciclo de vida se ha seguido el método EF 3.0. recomendado por la UE para cuantificar las cargas ambientales de productos, servicios y organizaciones. Se propuso este método para medir el desempeño ambiental de una manera objetiva y estandariza a través de 16 categorías de impacto ya definidas que se deben incluir en el ACV.

El resultado de la evaluación de impacto del ciclo de vida para las 16 categorías de impacto se muestra en la Fig. 50, donde la barra de la izquierda corresponde al escenario 1, mientras que la barra de la derecha corresponde al escenario 2. Los datos se han presentado de forma normalizada tomando como referencia el escenario con mayor impacto. En la Tabla XVII se presentan los valores absolutos de cada categoría de impacto para ambos escenarios. Como se observa en los datos, para la mayoría de las categorías de impacto la opción de hacer el sistema completamente autónomo con un panel solar y una batería de respaldo (escenario 2) fue más favorable en términos medioambientales, aunque solo hay un indicador en el que esta opción es peor: la destrucción de la capa de ozono. Para este indicador, el escenario 2 presentó un valor de $2,89 \cdot 10^{-10}$ kg, mientras que en el escenario 1 el valor fue de $8,45 \cdot 10^{-10}$ kg, es decir, valores 2,9 veces más altos.

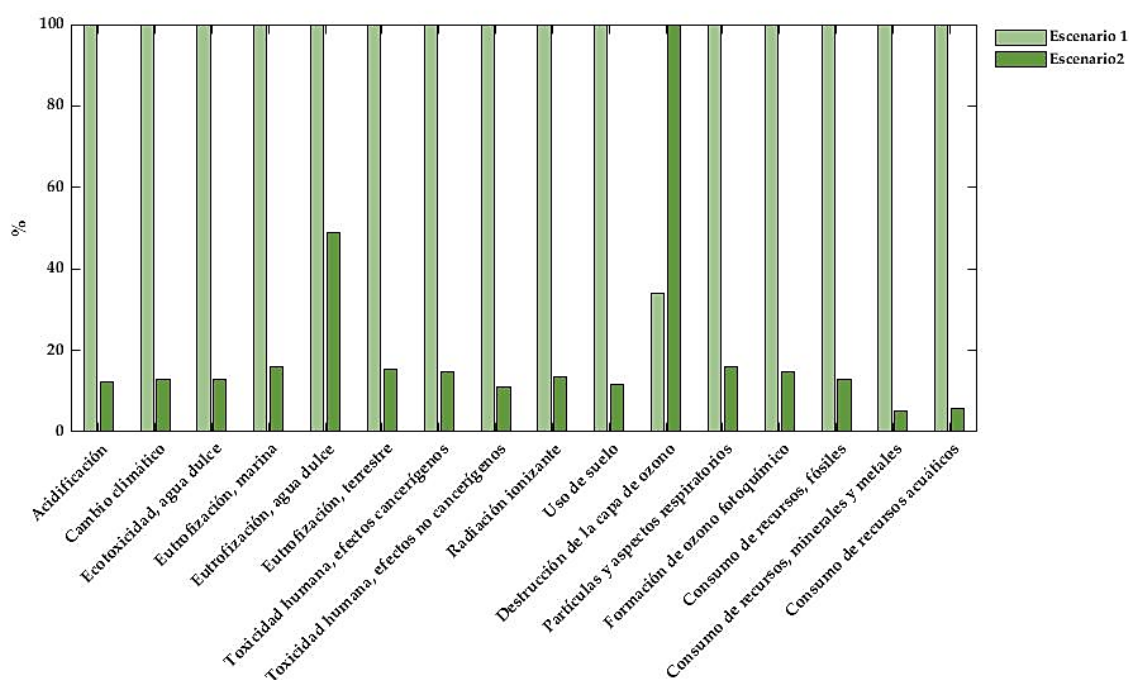


Fig. 50. Evaluación del impacto del ciclo de vida.

TABLA XVII
VALORES ABSOLUTOS DE LAS DIFERENTES CATEGORÍAS DE IMPACTO

Categoría de impacto	Unidad	Escenario 1	Escenario 2
Acidificación	<i>mol</i>	0,0122	0,0015
Cambio climático	<i>Kg CO₂ eq.</i>	2,1	0,3
Ecotoxicidad, agua dulce	<i>ítem</i>	0,7	0,1
Eutrofización, marina	<i>kg</i>	0,0018	0,0003
Eutrofización, agua dulce	<i>kg</i>	1,05 10 ⁻⁵	5,11 10 ⁻⁶
Eutrofización, terrestre	<i>kg</i>	0,020	0,003
Toxicidad humana, efectos cancerígenos	<i>ítem</i>	1,32 10 ⁻⁸	1,94 10 ⁻⁹
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos	<i>ítem</i>	3,83 10 ⁻⁷	4,21 10 ⁻⁸
Radiación ionizante	<i>kBq</i>	0,25	0,03
Uso de suelo	<i>ítem</i>	7,1	0,8
Destrucción de la capa de ozono	<i>kg</i>	2,89 10 ⁻¹⁰	8,45 10 ⁻¹⁰
Partículas y aspectos respiratorios	<i>ítem</i>	1,29 10 ⁻⁷	2,05 10 ⁻⁸
Formación de ozono fotoquímico	<i>kg</i>	0,0056	0,0008
Consumo de recursos, fósiles	<i>MJ</i>	30	4
Consumo de recursos, minerales y metales	<i>kg</i>	1,74 10 ⁻⁴	8,71 10 ⁻⁶
Consumo de recursos acuáticos	<i>m³</i>	1,05	0,06

Se ha realizado un análisis adicional para la categoría de impacto “destrucción de la capa de ozono” detallando la contribución que tiene cada componente en ambos escenarios. De la Fig. 51 se puede inferir que el mayor

impacto en este indicador fue causado por la batería, y representó el 99,9 % del impacto del escenario 2. En el escenario 1 el elemento con mayor impacto fue el consumo eléctrico, con un 70,3 % del impacto total.

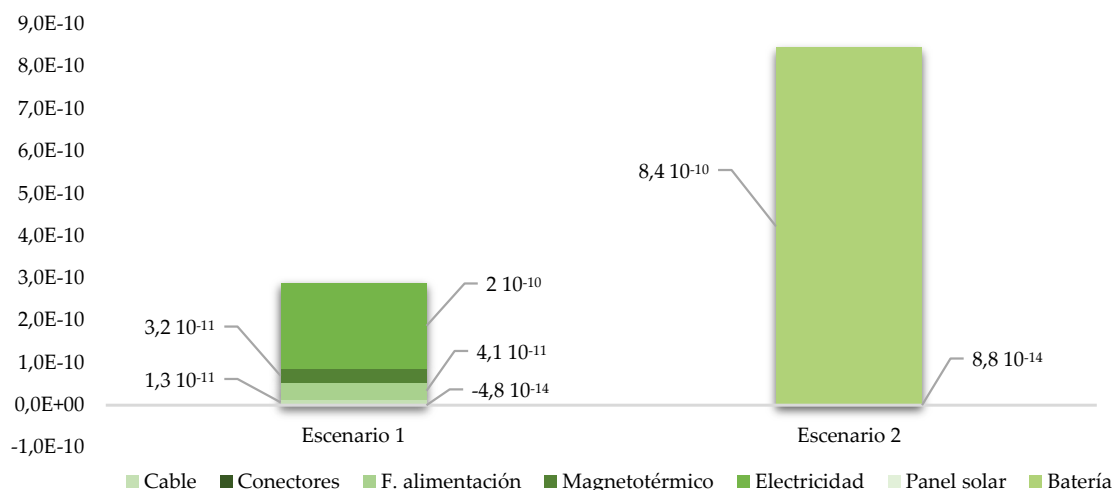


Fig. 51. Contribución de cada componente en Kg para la categoría "Destrucción de la capa de ozono".

Teniendo en cuenta que uno de los mayores desafíos para las generaciones presentes y futuras es el cambio climático y que uno de los parámetros que más contribuyen al cambio climático son las emisiones de gases de efecto invernadero. Por esta razón, todos los esfuerzos que se hagan para reducir este tipo de emisiones son reconocidos como contribuciones importantes en la lucha contra el cambio climático [298]. Debido a la importancia de este asunto, se ha realizado un análisis adicional para esta categoría de impacto, detallándose en la Fig. 52 la contribución de cada componente en cada escenario. Se puede observar que el impacto del cambio climático expresado en Kg CO₂ eq. para el escenario 2 fue siete veces menor que para el escenario 1. La batería continúa representando la mayor contribución en el escenario 2, con el 96,4 % del impacto total, así como el consumo eléctrico en el escenario 1, con el 46,2 % del impacto total.

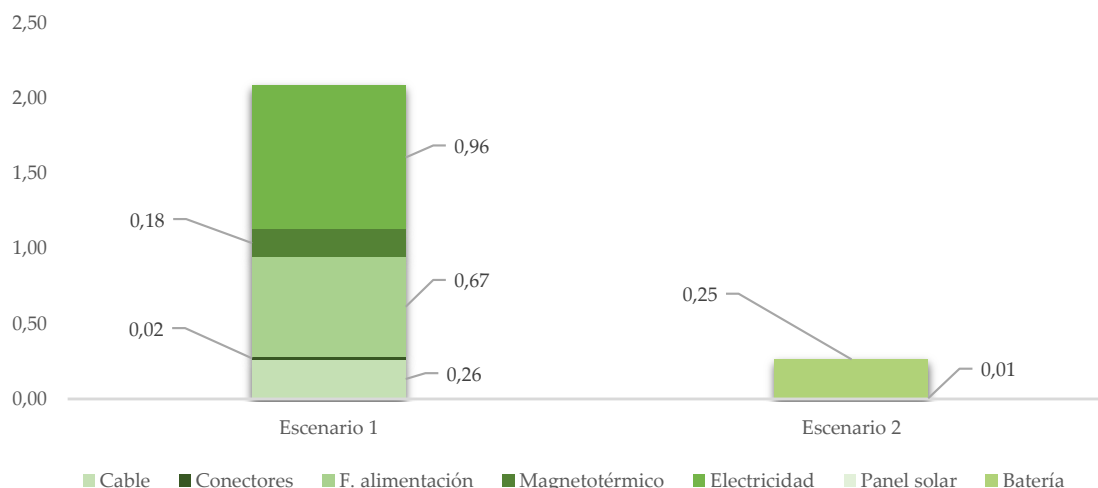


Fig. 52. Contribución de cada componente en kg CO₂ eq para la categoría "Cambio climático".

2) Análisis de Costes del Ciclo de Vida

El ACV realizado anteriormente no aborda los elementos económicos del ciclo de vida, que de hecho es el foco del análisis CCV. Tras llevarlo a cabo, se puede observar que desde un punto de vista económico la opción de hacer la alimentación de los sensores independientes con un panel fotovoltaico y una batería de respaldo supone un aumento de coste significativo en comparación con la opción de conectar los sensores a la red eléctrica existente. Por tanto, la decisión de independizar completamente el sistema de la red no supone un ahorro económico, a pesar de los resultados positivos del análisis medioambiental para este escenario. Según se desprende de la Tabla XVIII, el CCV muestra que el escenario 2 es un 48 % más caro, lo que representa un coste adicional de 3,77 € por nodo y año.

TABLA XVIII
ANÁLISIS DE COSTES DEL CICLO DE VIDA

Actividad	Escenario 1 (€/año)	Escenario 2 (€/año)	Diferencia (€/año)
Inversión en materiales	4,20	10,84	6,64
Instalación	3,05	0,76	-2,29
Electricidad	0,58	0	-0,58
Total	7,83	11,60	3,77

Gracias al análisis CCV se pueden identificar los elementos con mayor influencia en el coste. La contribución de los diferentes componentes y actividades para cada escenario se muestra en la Fig. 53. En el escenario 2 (Fig. 53b), el componente con mayor impacto es la batería, ya que representa el 83 %

del coste total. Este impacto negativo en el coste se debe al alto precio y la limitada vida útil de la batería. En el escenario 1 (Fig. 53a) el elemento de mayor impacto es el correspondiente a la partida de instalación, con el 39 % del coste total.

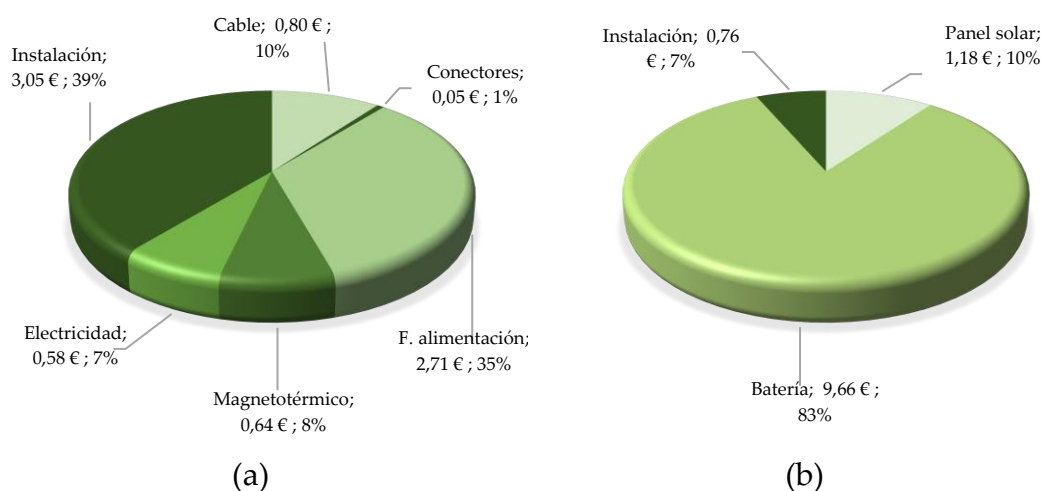


Fig. 53. Distribución de costes. (a) Escenario 1. (b) Escenario 2.

A pesar de todos estos datos y aunque la opción de independizar eléctricamente los sensores es económicamente menos atractiva que la opción de conectarlos a la red eléctrica existente, creemos que esta es la mejor opción debido a los requisitos del proyecto de I+D UAL18-TIC-A025-A. Este proyecto de investigación depende totalmente de los datos obtenidos por el sensor, y la opción de independizar eléctricamente los sensores asegura que no se perderán datos debido a posibles cortes de energía en el campus de la UAL. Debido a ello, se han realizado dos análisis de sensibilidad donde se han variado algunas hipótesis y parámetros de partida para intentar llegar a una solución donde el escenario 2 sea más ventajoso tanto medioambientalmente como económicamente.

3) Análisis de Sensibilidad

Al proceso en el que se modifican los valores de uno o algunos datos de entrada para comprobar la reacción en el resultado final se le denomina análisis de sensibilidad. Como se ha visto anteriormente, en el escenario 2 el mayor impacto ha sido causado por la batería, debido a esto se van a cambiar algunos supuestos para reducir el tamaño de la batería. Desde este punto de partida se van a realizar dos análisis de sensibilidad de la siguiente forma:

1. Análisis de sensibilidad 1: Se va a considerar que la tasa de transmisión dentro del campus de la UAL es de 54 Mbps ya que el campus posee una alta densidad de puntos de acceso. El resultado ahora es un consumo de 8508 mAh, y las baterías seleccionadas para este análisis fueron dos baterías comerciales recargables de 5200 mAh;
2. Análisis de sensibilidad 2: Según [318] el promedio de horas de sol al año entre 2011 y 2015 fue de 3201 horas, por lo que se propone cambiar el parámetro de autonomía para baja irradiación solar de 10 días a 4 días. Tras realizar los cálculos, el resultado es un consumo de 4437 mAh en el escenario más conservador (tasa de transmisión de 6 Mbps), y las baterías seleccionadas para este propósito fueron dos baterías comerciales recargables de 2250 mAh.

Como se observa, la capacidad y tamaño de la batería han cambiado para ambos análisis de sensibilidad. Con estos nuevos valores se ha vuelto a realizar el ACV y el CCV para comprobar la solidez de los resultados.

Cambiar el tamaño de la batería implicó una reducción del 29 % en el impacto de la categoría de destrucción de la capa de ozono en el caso del análisis de sensibilidad 1, mientras que en el análisis de sensibilidad 2 el valor final se redujo a un tercio del valor inicial. Comparando ahora con la opción del escenario 1 (conexión a red eléctrica existente), el valor de la categoría de destrucción de la capa de ozono fue 2,3 veces mayor para el análisis de sensibilidad 1, mientras que para el análisis de sensibilidad 2 fue un 2 % menor. Esto significa que tras realizar el análisis de sensibilidad 2, la opción de hacer el sistema completamente autónomo con un panel solar y una batería de respaldo muestra preferencia en todas las categorías de impacto, incluido ahora sí la categoría de destrucción de la capa de ozono (ver Fig. 54).

En la Fig. 55 se muestran los resultados de ambos análisis de sensibilidad a nivel económico, donde se han recalculado los costes que implican el cambio de modelo y tamaño de la batería. Los resultados indican una reducción de costes del 15 % en el análisis de sensibilidad 1, aunque el coste total fue aún mayor que la opción de conectar el sistema a la red eléctrica existente, mientras que en el análisis de sensibilidad 2, la reducción de costes fue del 53 %, alcanzándose al punto de equilibrio y proporcionando un beneficio económico neto de 0,23 € por nodo y año. Considerando que la vida útil del proyecto completo es de 20 años, el ahorro económico total del proyecto (red de 10 sensores) es de 460 €. Esta cantidad puede parecer insignificante en comparación con el coste de grandes proyectos de arquitectura, ingeniería,

construcción, etc., pero en una economía de escala, esto podría llevar a grandes ahorros si estos tipos de sensores se instalan masivamente.

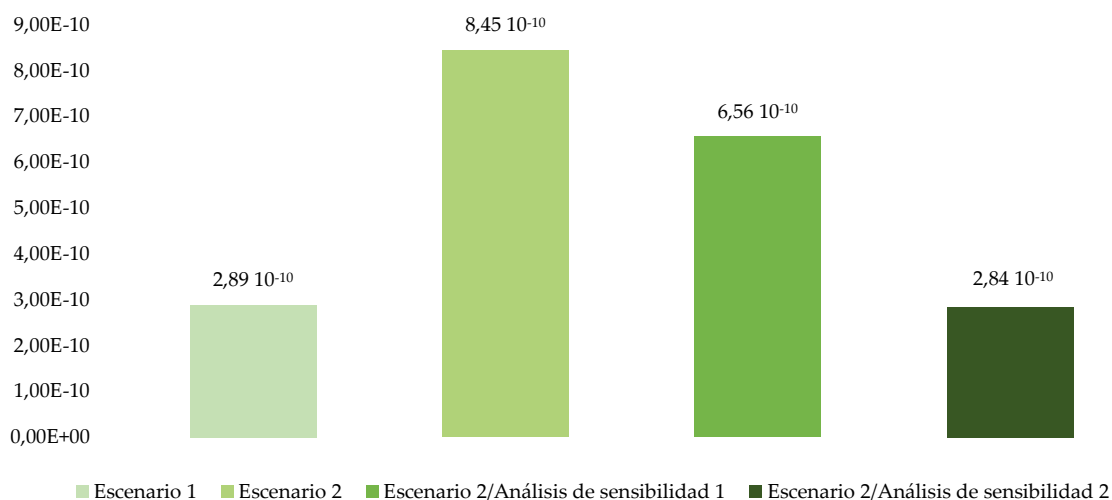


Fig. 54. Análisis de sensibilidad para “Destrucción de la capa de ozono” en kg.

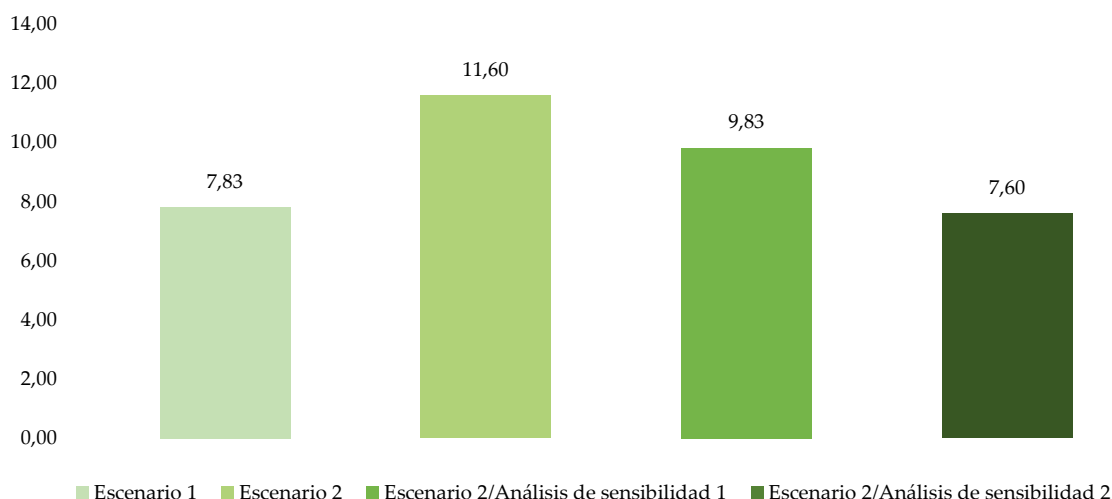


Fig. 55. Costes totales tras los análisis de sensibilidad en €/año.

Por lo tanto, reemplazar las dos baterías de 6,7 Ah por dos baterías de 2,25 Ah representa una mejora ambiental y económica, como se ha dejado patente en el segundo análisis de sensibilidad.

B. Análisis de la Exposición Humana a los Campos Magnéticos

En este apartado las escalas de tiempo se expresaron en hora local de España, no en UTC²⁸. De esta forma, los gráficos ayudan a comprender mejor los resultados, que están influenciados por hábitos locales (iluminación nocturna, horas pico, etc.). La hora local en España en mayo es UTC+2.

1) Valores de Densidad de Flujo Magnético y Consumos Eléctricos

El primer parámetro hallado ha sido el valor RMS de la densidad del flujo magnético, es decir la suma cuadrática media de la componente fundamental con todos sus armónicos hasta el orden 44, ya que el ancho de banda del sistema es de 2,2 kHz. La Fig. 56 muestra este valor en cuatro semanas del mes de mayo.

Un hecho destacable que se puede apreciar es que existe una periodicidad semanal en las variaciones de densidad de flujo magnético que capta el sensor. Cada martes a las 14:00 aproximadamente se aprecia como las variaciones de densidad de flujo magnético en semanas alternativas tiene comportamiento diferente. Del martes 4 al martes 11 y del martes 18 al martes 25 (etiquetados en la Fig. 56a y Fig. 56c como semana 1 y 3, respectivamente) se aprecia como las variaciones temporales de la densidad de flujo magnético son mucho menos bruscas que en las otras semanas alternas (semana 2 y 4 de la Fig. 56b y Fig. 56d, respectivamente). Cabe recordar que el laboratorio donde se encuentra ubicado el sensor está emplazado en el edificio que alberga el CPD de la UAL. Una vez consultado con los servicios informáticos de la UAL, nos confirman que existen dos enfriadoras situadas en la cubierta del edificio (Fig. 57a) usadas para climatizar la sala de servidores que conmutan semanalmente los martes. Las salas de servidores generalmente están climatizadas para obtener una temperatura constante entre 20 y 22 °C [319]. Este es un parámetro clave para el buen rendimiento de los equipos informáticos, por lo que generalmente se instalan equipos redundantes para garantizar que en caso de avería de un equipo siempre haya otro disponible. Una buena práctica dentro del ámbito del mantenimiento conductivo es hacer rotar dos equipos para que tengan un número de horas de servicio parecidas y de esa manera el desgaste que sufre el sistema redundante no recaiga siempre sobre el mismo equipo.

²⁸ Universal time coordinated.

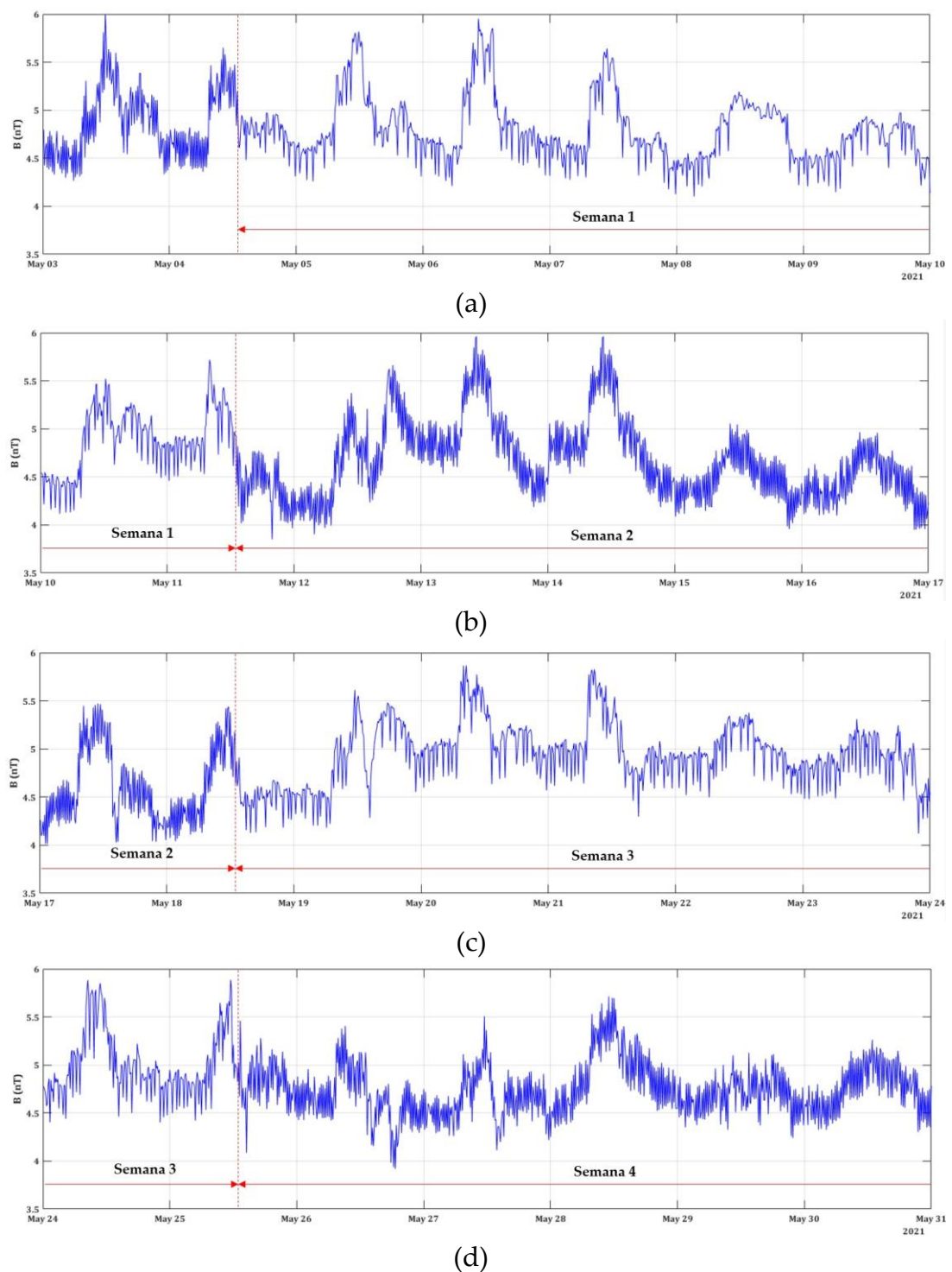


Fig. 56. Variaciones semanales en la densidad de flujo magnético. . (a) Del 3 al 9 de mayo. (b) Del 10 al 16 de mayo. (c) Del 17 al 23 de mayo. (d) Del 24 al 30 de mayo.

De la Fig. 56 se desprende que la conmutación entre las dos enfriadoras mostradas en la Fig. 57b se realiza los martes sobre las 14 horas. Al ser dos enfriadoras de modelos diferentes tienen un consumo eléctrico y

comportamiento diferente, hecho que se observa en la diferencia del comportamiento de la densidad de flujo magnético captado por nuestro sensor en las semanas 1 y 3 con respecto a las semanas 2 y 4 de la Fig. 56.

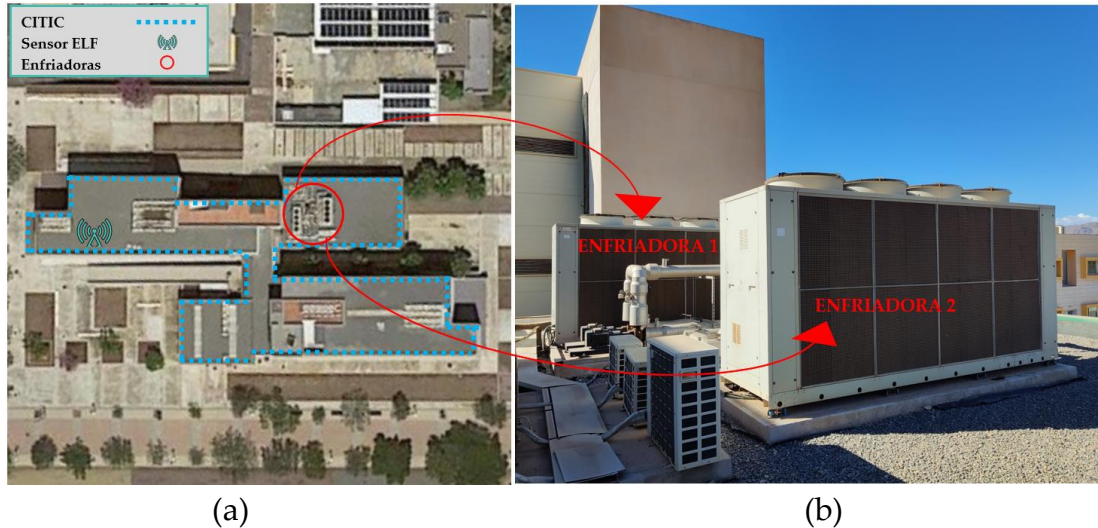
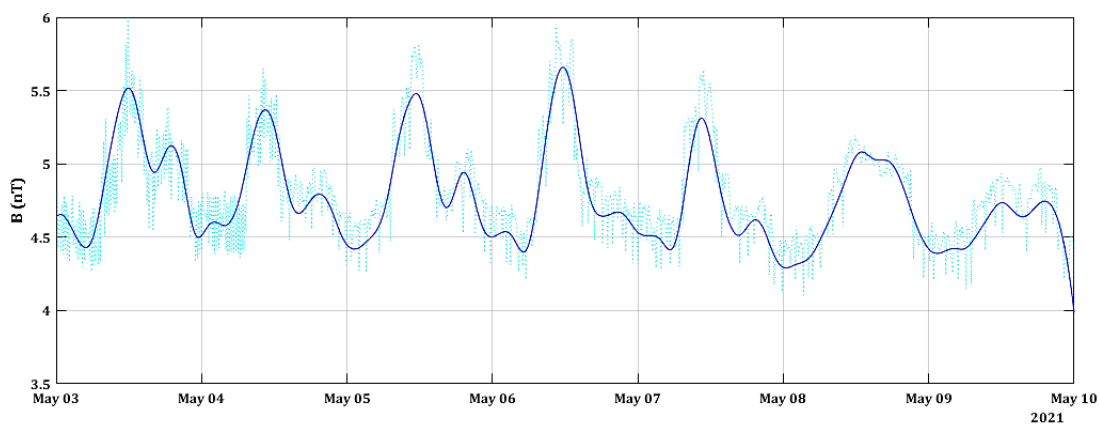


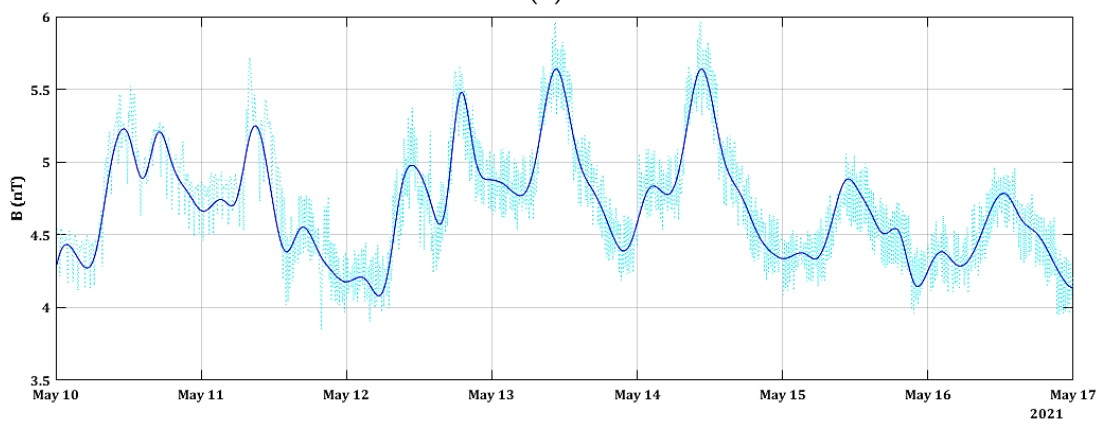
Fig. 57. Enfriadoras usadas en el CPD. (a) Vista cenital de la cubierta del edificio. (b) Detalle de las enfriadoras.

La Fig. 58 muestra ahora en cian el valor de la densidad de flujo magnético obtenido por el magnetómetro y en azul se ha representado los datos suavizados mediante un filtro de media móvil, y en la Tabla XIX se muestran los valores máximos, mínimos y medios diarios junto con la desviación estándar. En la semana del 3 al 9 de mayo (Fig. 58a) el valor máximo de la densidad de flujo magnético fue de 6,02 nT (lunes 3 de mayo a las 11:50), mientras que el valor mínimo fue de 4,10 nT (sábado 8 de mayo a las 03:20). En la semana del 10 al 16 de mayo (Fig. 58b) el valor máximo fue de 5,96 nT (jueves 13 de mayo a las 10:30), mientras que el valor mínimo fue de 3,85 nT (martes 11 de mayo a las 19:50). En la semana del 17 al 23 de mayo (Fig. 58c) el valor máximo fue de 5,87 nT (jueves 20 de mayo a las 08:30), mientras que el valor mínimo fue de 4,01 nT (domingo 17 de mayo a las 01:30). Por último, en la semana del 24 al 30 de mayo (Fig. 58d) el valor máximo fue de 5,89 nT (martes 25 de mayo a las 11:30), mientras que el valor mínimo fue de 3,92 nT (miércoles 26 de mayo a las 18:40).

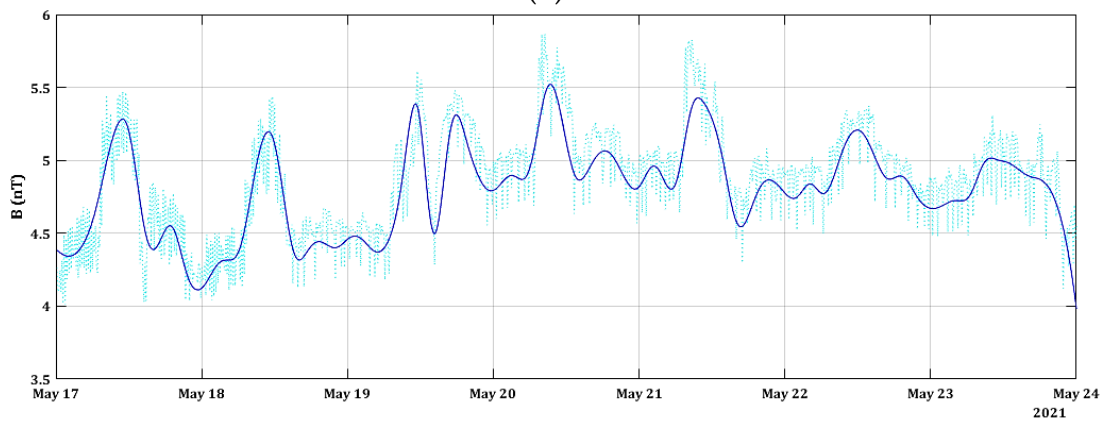
En la Fig. 58 se puede ver también como la curva diaria es más plana en los fines de semana. Como indicador de esto, se observa que los datos de desviación típica recogidos en la Tabla XIX de los sábados y domingo son menores comparados con el resto de la semana.



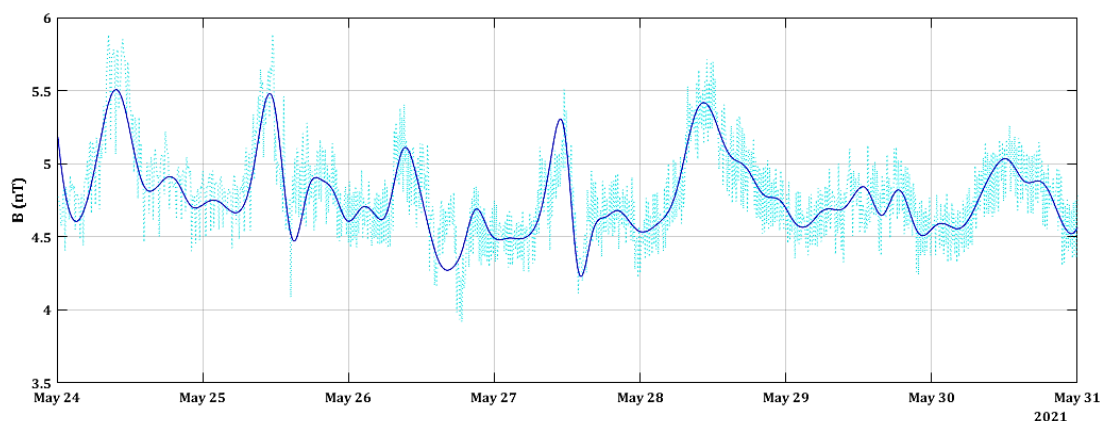
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 58. Densidad de flujo magnético por semanas. (a) Del 3 al 9 de mayo. (b) Del 10 al 16 de mayo. (c) Del 17 al 23 de mayo. (d) Del 24 al 30 de mayo.

TABLA XIX
VALORES ESTADÍSTICOS DIARIOS DE LA DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO PARA TODO EL MES DE MAYO (L INDICA LUNES).

Día	1	2	3 L	4	5	6	7	8	9	10 L	
B_{max} (nT)	5,25	5,16	6,02	5,65	5,82	5,95	5,64	5,19	4,97	5,52	
B_{min} (nT)	4,47	4,27	4,27	4,31	4,26	4,21	4,13	4,10	4,14	4,12	
B_{media} (nT)	4,83	4,64	4,87	4,83	4,92	4,88	4,78	4,76	4,64	4,84	
SD²⁹	0,20	0,21	0,37	0,29	0,36	0,41	0,35	0,28	0,20	0,35	
Día	11	12	13	14	15	16	17 L	18	19	20	
B_{max} (nT)	5,72	5,66	5,96	5,96	5,06	4,97	5,47	5,44	5,61	5,87	
B_{min} (nT)	3,85	3,90	4,19	4,19	3,96	3,95	4,01	4,04	4,18	4,57	
B_{media} (nT)	4,71	4,70	4,92	4,92	4,48	4,45	4,60	4,56	4,91	5,14	
SD	0,40	0,44	0,42	0,42	0,25	0,25	0,39	0,32	0,36	0,28	
Día	21	22	23	24 L	25	26	27	28	29	30	31 L
B_{max} (nT)	5,82	5,37	5,31	5,88	5,89	5,41	5,51	5,71	5,13	5,26	5,59
B_{min} (nT)	4,30	4,50	4,12	4,40	4,09	3,92	4,11	4,35	4,24	4,30	4,25
B_{media} (nT)	5,03	4,98	4,86	5,01	4,91	4,65	4,64	4,93	4,69	4,76	4,79
SD	0,32	0,21	0,23	0,35	0,30	0,29	0,25	0,34	0,20	0,25	0,30

En cuanto a los valores máximos de densidad de flujo magnético, en el capítulo de introducción se hizo un resumen de artículos en los cuales se han realizado mediciones en diversos entornos, tales como lugares cercanos a las líneas de alta y media tensión, estaciones transformadoras, puestos de trabajo, industrias, residencias, colegios, etc. Los lugares más parecidos encontrados en la literatura han sido los colegios donde [258] realizaron mediciones y cuyo

²⁹ Standard deviation.

resultado fue entre 15 y 16 nT y en [237], donde obtuvieron valores entre 10 y 90 nT.

En nuestro caso, como ya se ha comentado, el valor máximo de la densidad de flujo magnético fue de 6,02 nT para el lunes 3 de mayo. Además, el valor medio varía entre 4,45 y 5,14 nT, siendo la media de todo el mes de 4,79 nT. Estos datos se pueden considerar normales ya que el laboratorio donde está instalado el sensor ELF está alejado de las principales líneas eléctricas del campus de la UAL y además ese laboratorio en concreto no dispone de ninguna maquinaria ni aparato eléctrico de gran consumo.

En la Fig. 59 se ha representado gráficamente los valores máximos, medios y mínimos diarios de la densidad de flujo magnético provenientes de la Tabla XIX.

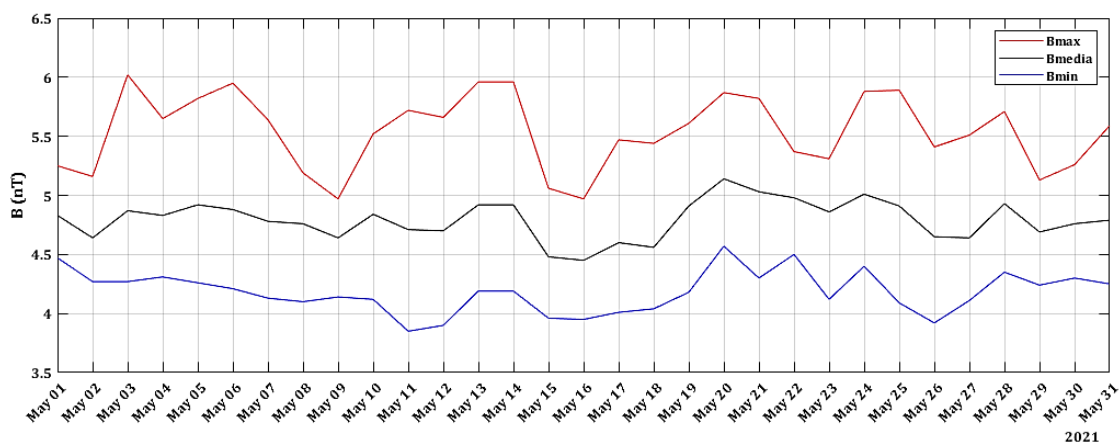
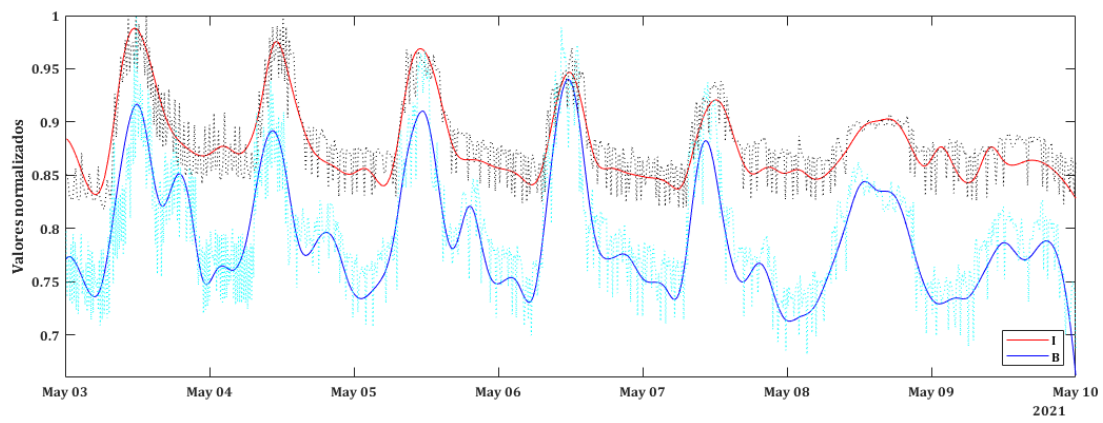
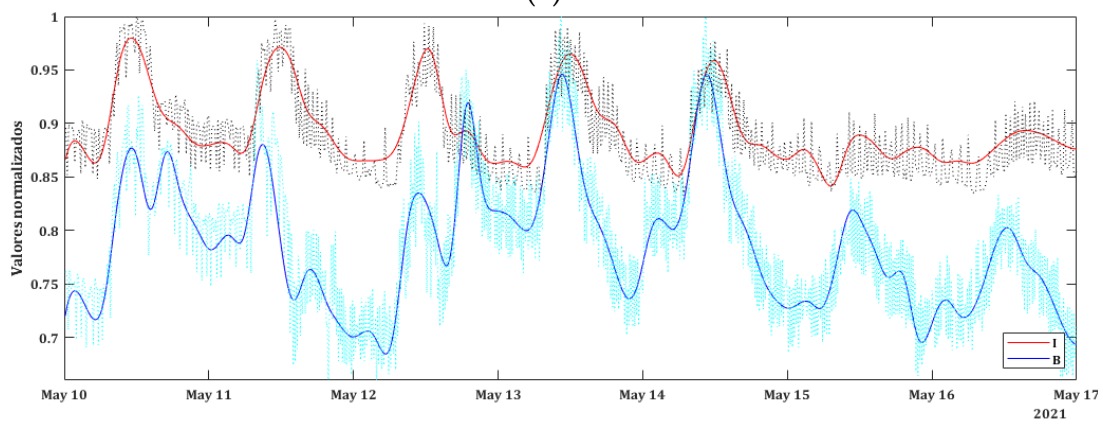


Fig. 59. Valores máximos, medios y mínimos diarios de la densidad de flujo magnético para todo el mes de mayo.

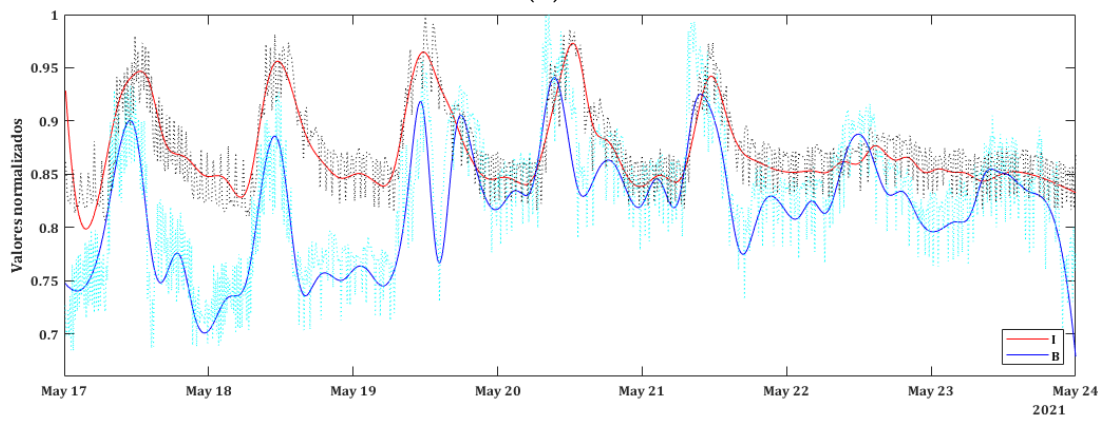
La siguiente comparación fue confrontar el valor de la densidad de flujo magnético obtenida por nuestro sensor y el consumo eléctrico del CITIC, que es el edificio donde está situado nuestro sensor. En la Fig. 60 se muestra la densidad de flujo magnético y el consumo eléctrico del CITIC en valores normalizados. Igualmente que en el caso anterior, se ha elegido una representación por semanas ya que el consumo eléctrico suele estar influenciado por los hábitos locales. La Fig. 60a va del 3 al 9 de mayo, la Fig. 60b del 10 al 16 de mayo, la Fig. 60c del 17 al 23 de mayo y la Fig. 60d del 24 al 30 de mayo.



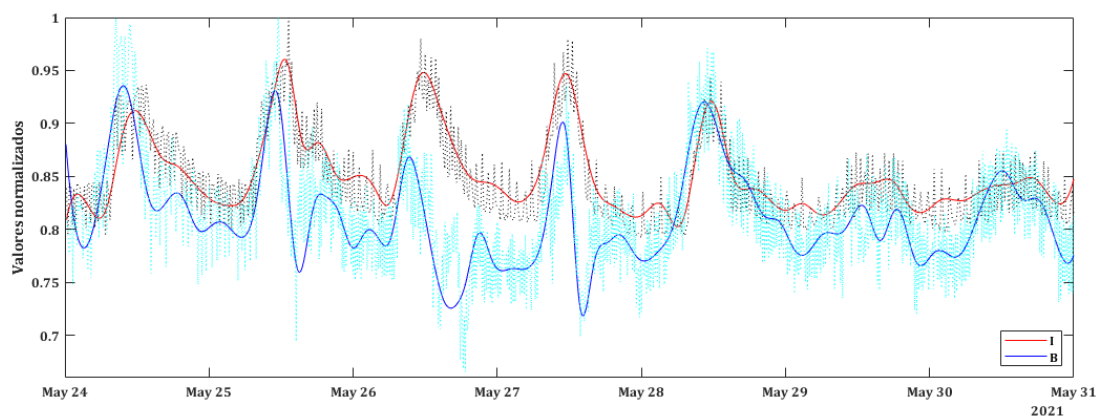
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 60. Comparación de la densidad de flujo magnético obtenida en el sensor con el consumo eléctrico del CITIC. (a) Semana del 3 al 9 de mayo. (b) Semana del 10 al 16 de mayo. (c) Semana del 17 al 23 de mayo. (d) Semana del 24 al 30 de mayo.

La demanda eléctrica en una red se caracteriza por su curva de carga diaria, que suele tener un mínimo al amanecer y un pico al mediodía o temprano en la noche [320]. El comportamiento de esta curva depende de la época del año, climatología, usos (industria, residencial, oficinas, etc.) y costumbres de la población. La Fig. 61 presenta una comparación para el día 7 de mayo de la densidad de flujo magnético y del consumo eléctrico del CITIC. Esta vez se han representado con sus correspondientes valores y unidades, siendo el eje izquierdo el correspondiente a la densidad de flujo magnético y el eje derecho a la intensidad registrada por los analizadores.

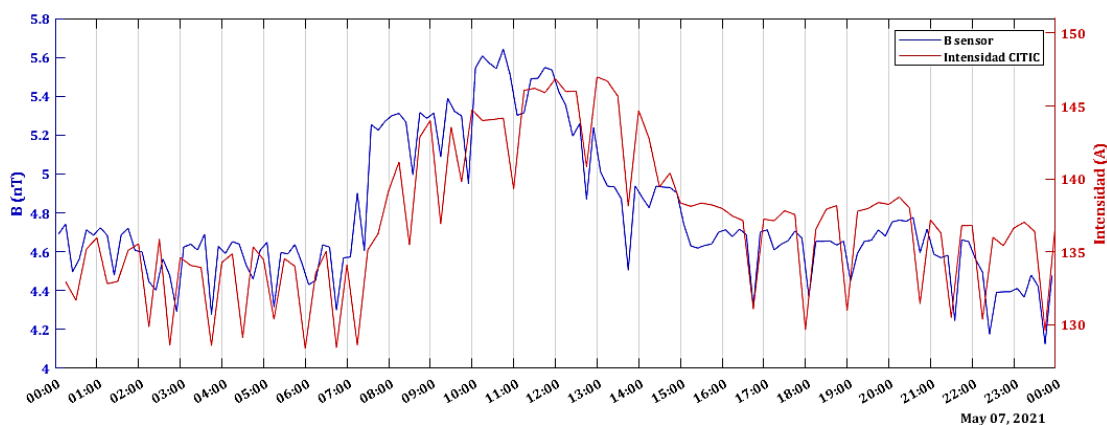
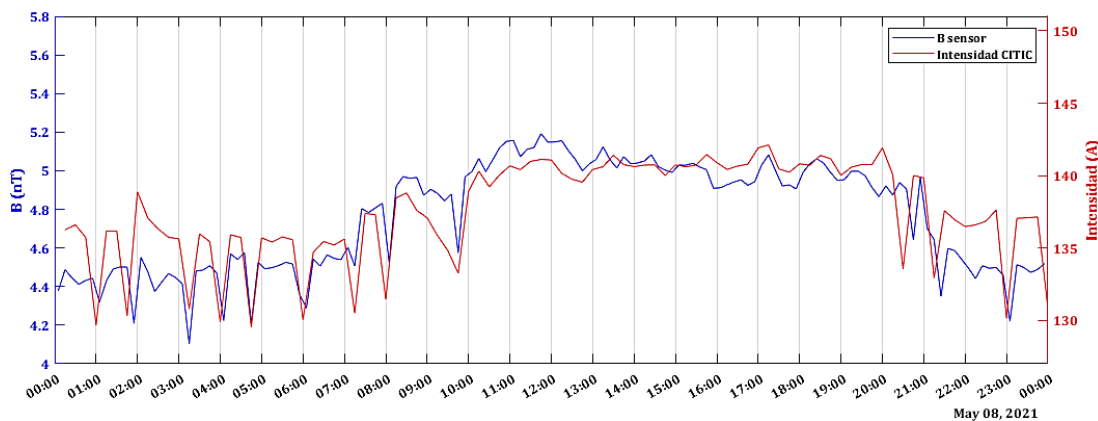


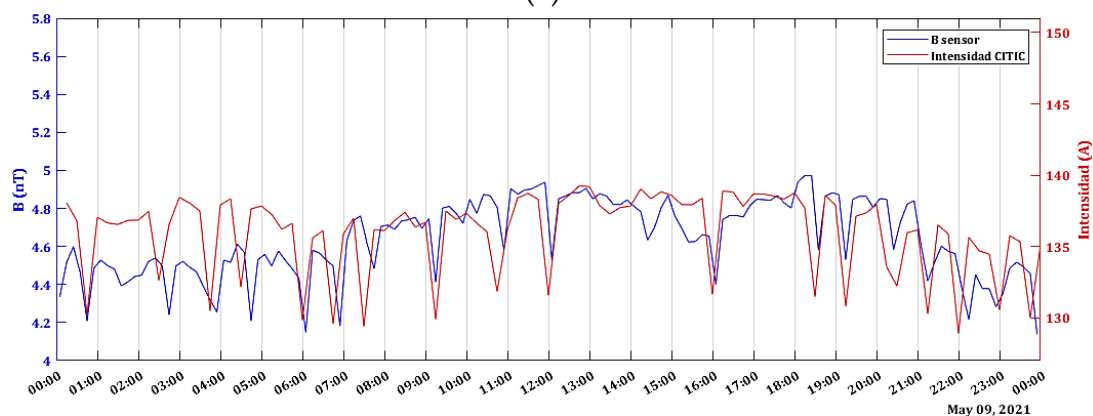
Fig. 61. Comparación de la densidad de flujo magnético y del consumo eléctrico del CITIC el día 7 de mayo.

En nuestro caso, la evolución de la densidad de flujo magnético durante el día sigue una curva de consumo típica de un edificio de oficinas, donde comienza a aumentar a partir de las 7:00, tiene un máximo alrededor del

mediodía y decrece a partir de las 15:00. Se puede observar también como la curva diaria es más plana en los fines de semana, siendo la del domingo (Fig. 62b) menor que la del sábado (Fig. 62a).



(a)

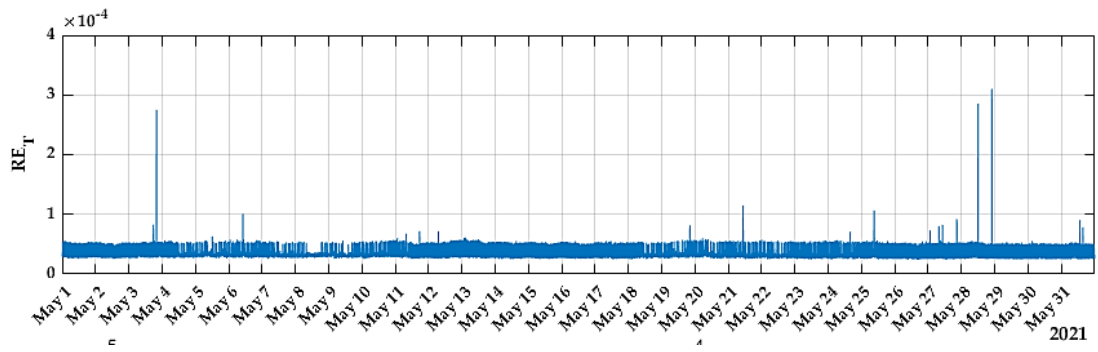


(b)

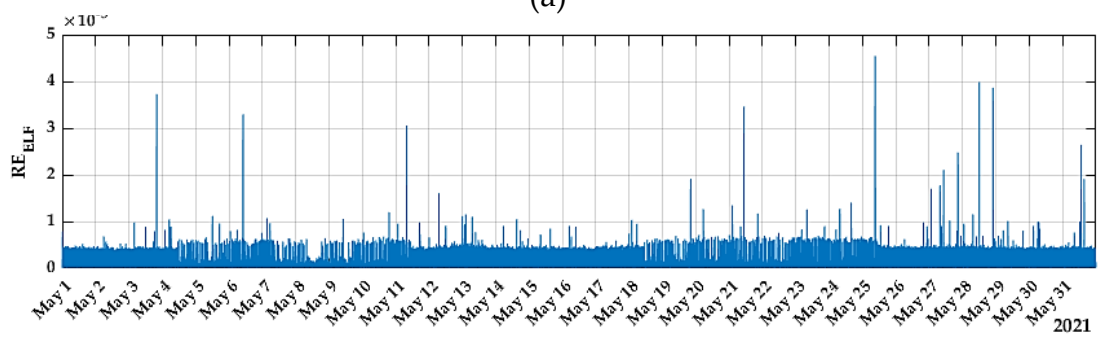
Fig. 62. Comparación de la densidad de flujo magnético y del consumo eléctrico del CITIC. (a) viernes 7 de mayo. (b) sábado 8 de mayo. (c) domingo 9 de mayo.

2) Ratio de Exposición al Campo Magnético

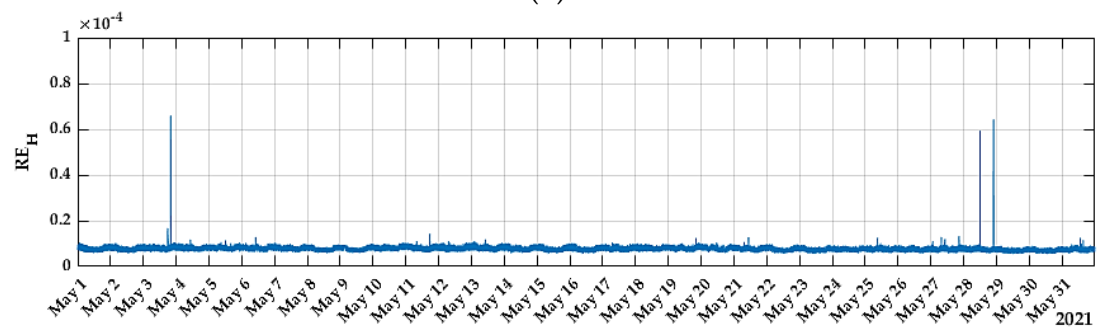
Para analizar la exposición humana debido al campo magnético que generan las líneas y dispositivos eléctricos se calcularon todos los RE_i a lo largo del mes de mayo y se representaron en la Fig. 63. Como se puede observar en la Fig. 63a, la RE_T en ningún momento alcanza los NA_{inf} ($RE_T < 1$), y sus valores están muy alejados del valor límite 1. Hay pequeños intervalos durante los cuales hay niveles más altos. La duración de estos intervalos no supera los pocos segundos en la mayoría de las ocasiones y probablemente se deban a eventos transitorios.



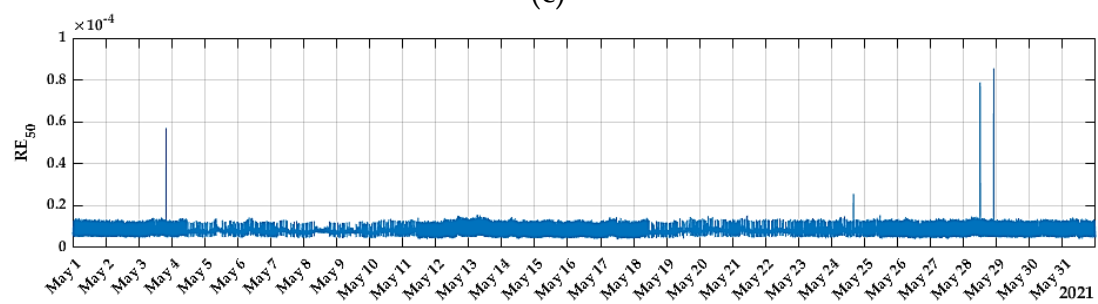
(a)



(b)



(c)



(d)

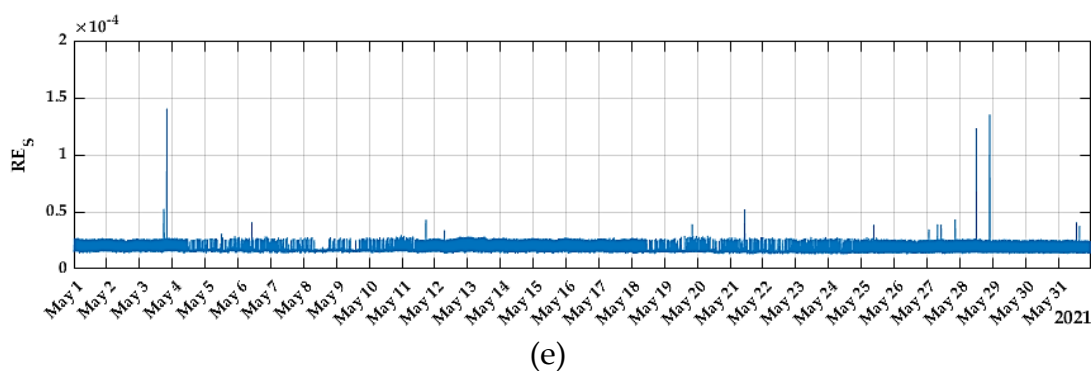


Fig. 63. Valores de las diferentes RE_i a lo largo del mes de mayo. (a) RE_T . (b) RE_{ELF} . (c) RE_H . (d) RE_{50} . (e) RE_S .

Los valores estadísticos para los valores hallados de la RE_T se muestran en la Tabla XX para todo el mes de mayo. El mayor valor se dio el día 28 de mayo y fue de $31,01 \cdot 10^{-5}$, unas 3.225 veces inferior al valor máximo de 1. El momento del día en el que se producen los valores máximo y mínimo de la RE_T se muestra en la Fig. 64. No se aprecia ninguna correlación entre estos valores y la hora del día.

TABLA XX
VALORES ESTADÍSTICOS (MULTIPLICADOS POR 10^{-5}) DE LA RE_T PARA TODO EL MES DE MAYO (L INDICA LUNES)

Día	1	2	3 L	4	5	6	7	8	9	10 L	
Max.	5,58	5,39	27,52	5,63	6,30	10,09	5,53	5,48	5,56	5,71	
Min.	2,55	2,52	2,55	2,57	2,61	2,63	2,53	2,66	2,54	2,50	
Media	3,16	3,12	3,27	3,21	3,28	3,23	3,19	3,17	3,16	3,24	
SD	0,18	0,18	0,36	0,20	0,20	0,18	0,17	0,15	0,18	0,18	
Día	11	12	13	14	15	16	17 L	18	19	20	
Max.	7,19	7,16	6,11	5,54	5,44	5,48	5,50	5,43	8,13	6,01	
Min.	2,50	2,54	2,56	2,43	2,45	2,47	2,47	2,47	2,57	2,53	
Media	3,17	3,16	3,20	3,09	3,06	3,05	3,13	3,12	3,19	3,20	
SD	0,20	0,21	0,21	0,18	0,19	0,18	0,21	0,19	0,19	0,21	
Día	21	22	23	24 L	25	26	27	28	29	30	31 L
Max.	11,50	5,75	5,66	7,07	10,66	5,50	9,20	31,01	5,37	5,51	9,03
Min.	2,49	2,48	2,42	2,41	2,43	2,39	2,36	2,48	2,45	2,48	2,45
Media	3,12	3,05	3,03	3,04	3,04	2,97	2,98	3,06	2,94	2,95	3,01
SD	0,19	0,17	0,18	0,17	0,17	0,19	0,19	0,45	0,17	0,18	0,20

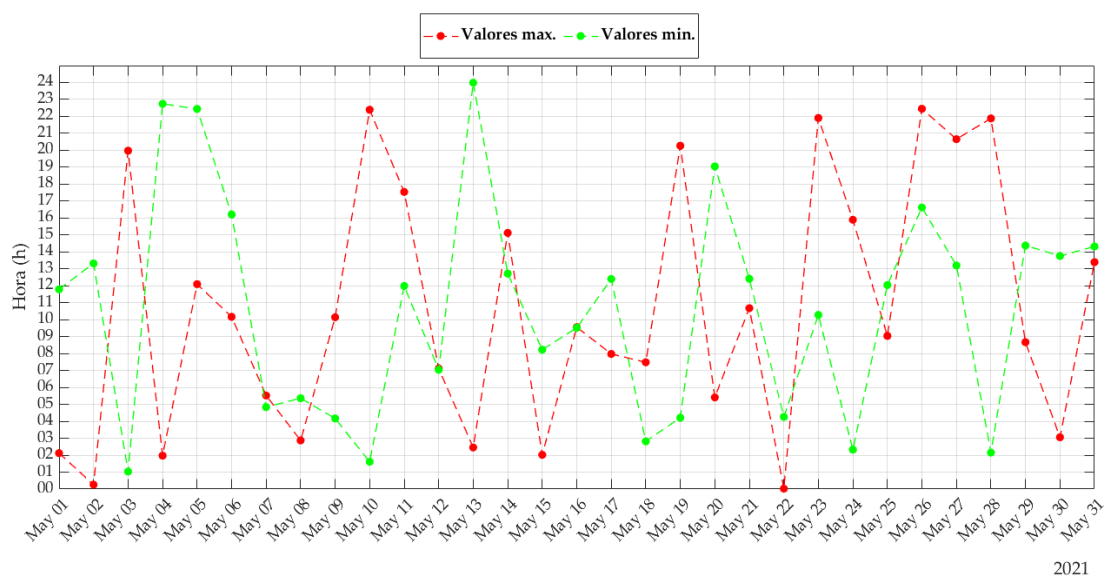


Fig. 64. Hora del día en la que se producen los valores máximos y mínimos de la RE_T para todo el mes de mayo.

En la Tabla XXI se muestran los valores medios de cada RE_i para el mes de mayo. Comparando los valores medios, la contribución de la banda ELF Fig. 63b es la contribución más pequeña. La contribución de los 50 Hz (Fig. 63c), es similar al resto de los 43 armónicos (Fig. 63d). La contribución de las frecuencias espurias (Fig. 63e) es la mayor de todas, arrojando una ratio de $1,55 \cdot 10^{-5}$, y es similar en valor a la contribución de los armónicos más la componente fundamental de 50 Hz, cuyas ratios suman $1,51 \cdot 10^{-5}$.

TABLA XXI
MEDIA MENSUAL DE LAS DIFERENTES RE_i

RE_i	Media
RE_{ELF}	$4,60 \cdot 10^{-7}$
RE_{50}	$7,24 \cdot 10^{-6}$
RE_H	$7,85 \cdot 10^{-6}$
RE_s	$1,55 \cdot 10^{-5}$
RE_T	$3,11 \cdot 10^{-5}$

En la Fig. 63a también se puede observar que la RE_T tiene una periodicidad semanal debido al efecto de las enfriadoras comentado anteriormente. Para observar este detalle, en la Fig. 65 se ha representado desde el día 4 al día 18 de mayo.

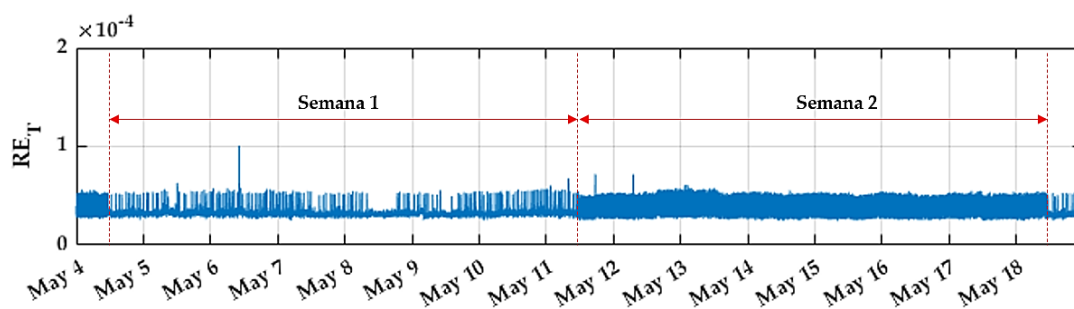
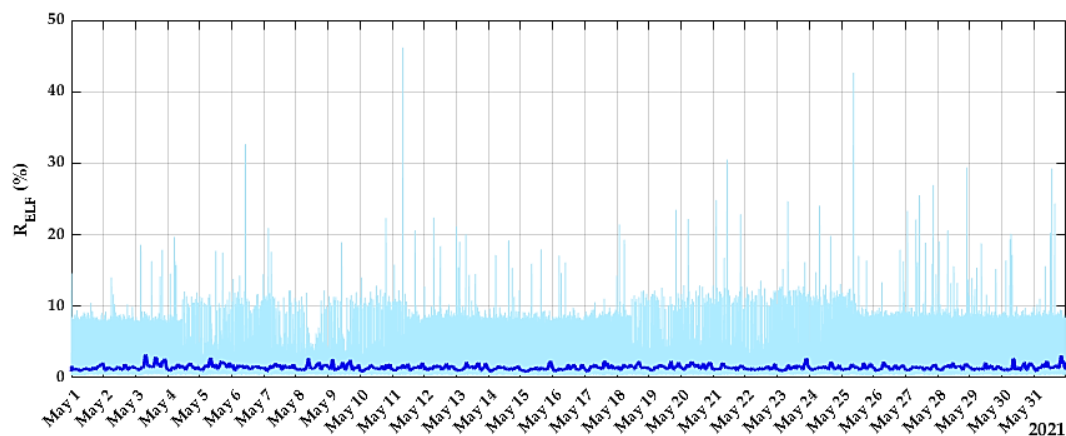
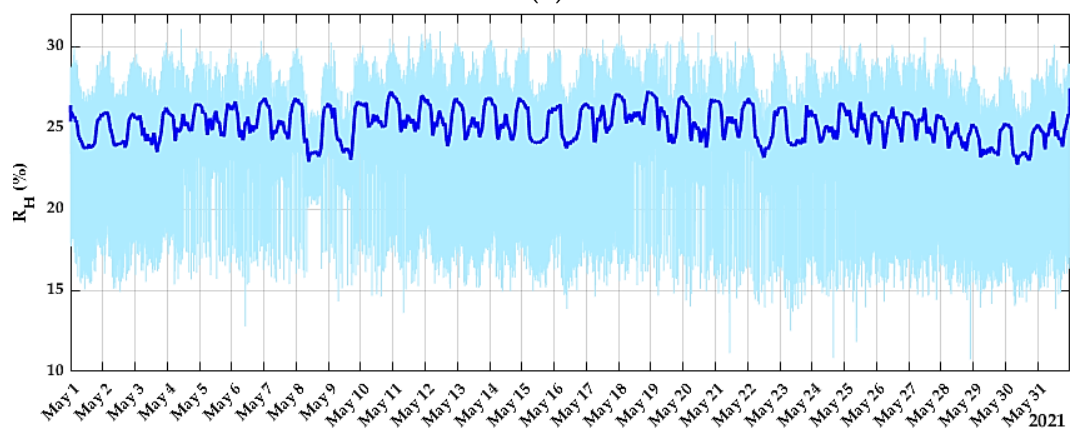


Fig. 65. Detalle de los valores de la RE_T desde el día 4 al 18 de mayo.

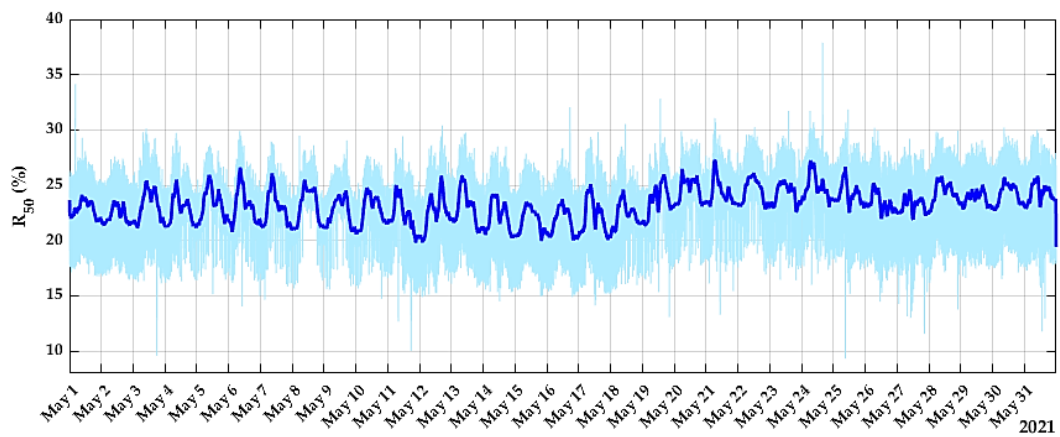
Para conocer el peso del valor parcial en % de cada RE_i en el valor de RE_T , se calcularon las relaciones $R_i = RE_i / RE_T$. Los resultados se presentan en la Fig. 66, donde en color cian se muestra los valores de cada R_i y en color azul se ha representado los datos suavizados mediante un filtro de media móvil.



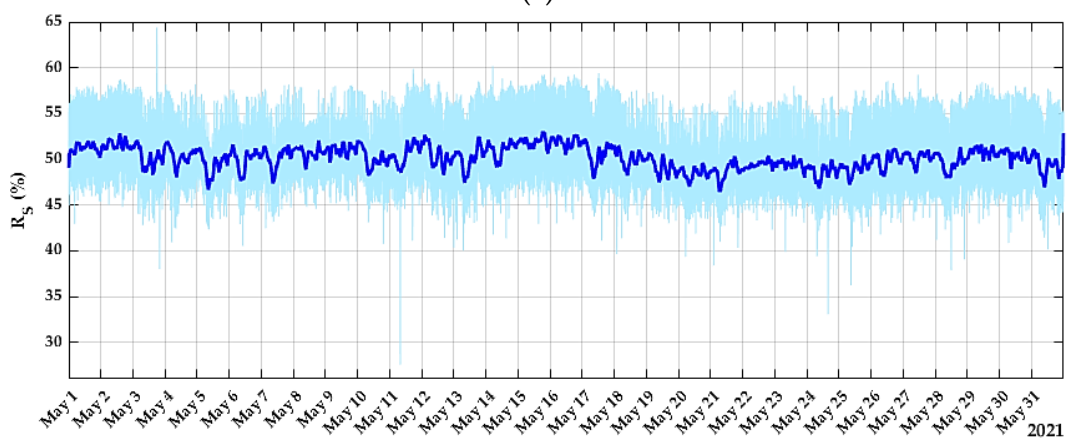
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 66. Influencia de cada RE_i . (a) R_{ELF} . (b) R_H . (c) R_{50} . (d) R_s .

Los valores medios del mes de mayo de cada R_i se muestran en Tabla XXII. De aquí se deduce que R_{ELF} (Fig. 66a) es la que tiene la menor contribución a RE_T . El conjunto de las contribuciones de los 43 armónicos R_H (Fig. 66b) tiene una contribución similar a la de la frecuencia fundamental R_{50} (Fig. 66c). La contribución de los espurios R_s (Fig. 66d) es la mayor de todas, y su valor es similar a la suma de las contribuciones de los 43 armónicos y la de la frecuencia fundamental R_{50} .

TABLA XXII
MEDIA MENSUAL DE LAS DIFERENTES R_i

%	Media
R_{ELF}	1,43 %
R_{50}	23,21 %
R_H	25,19 %
R_s	50,14 %

El análisis de los valores máximos y mínimos de RE_T se muestra en la Fig. 67a y Fig. 67b, respectivamente, y sus valores se detallan en la Tabla XXIII y la Tabla XXIV. Según lo anterior, las contribuciones de RE_{ELF} son más significativas para valores máximos de RE_T que para valores mínimos. La mayor contribución es del 42,6 % el 25 de mayo. RE_{50} muestra valores similares a la suma del resto de armónicos RE_H . Lo más interesante es que la mayor contribución es a través de fenómenos espurios en RE_S . Esto ocurre tanto para valores máximos como mínimos. La mayor contribución es del 59,9 % el 11 de mayo. Para valores mínimos, RE_{ELF} es cuasi insignificante, con valor máximo del 1,1 % el 11 de mayo.

Los resultados obtenidos de las Fig. 63, Fig. 64, Fig. 66, y Fig. 67 muestran cómo se distribuye la exposición humana a los CEM en las bandas ELF y ULF, siendo la mayor contribución la de las frecuencias espurias.

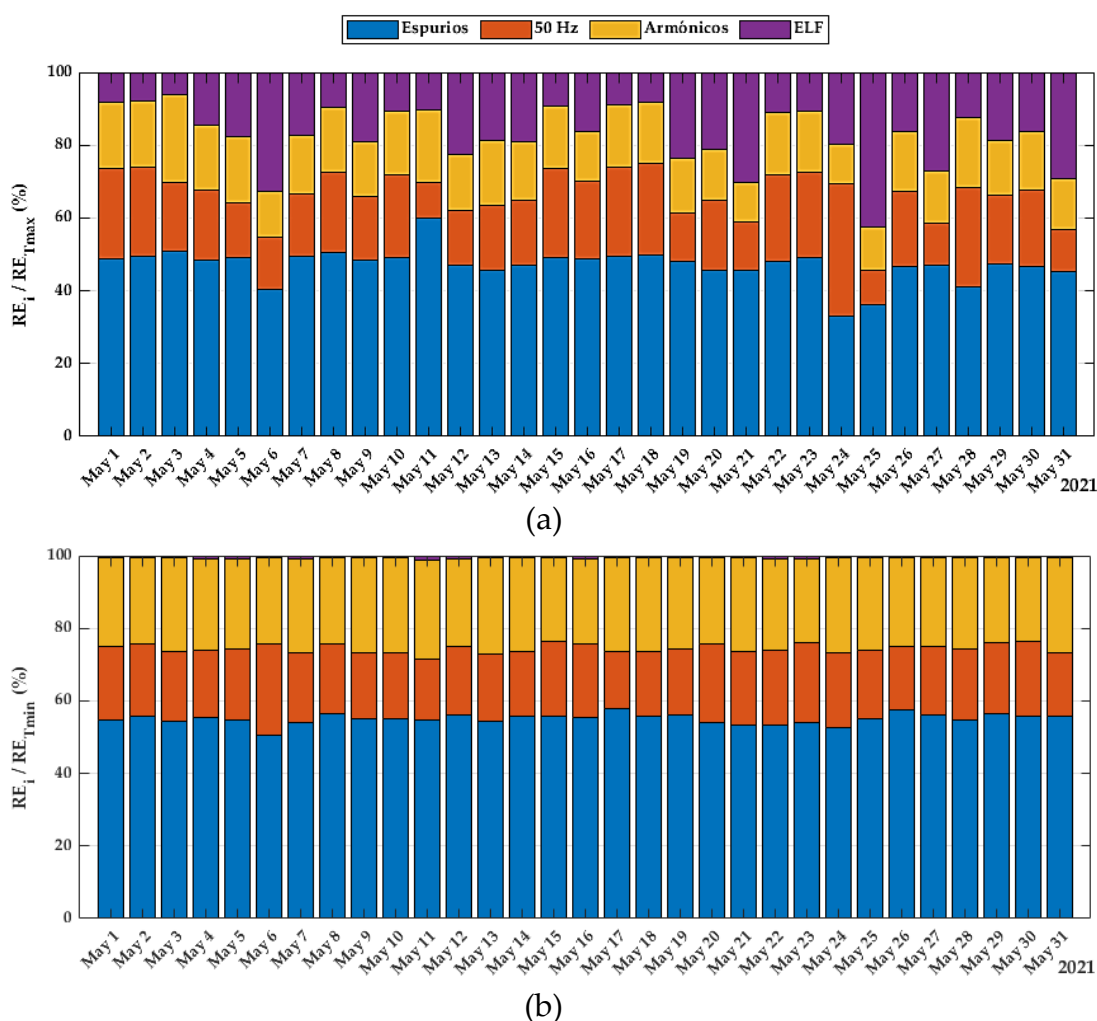


Fig. 67. Contribuciones parciales R_i a los valores diarios. (a) Para valores máximos de RE_T (b) Para valores mínimos de RE_T .

TABLA XXIII
RELACIONES PARCIALES (%) PARA VALORES MÁXIMOS DE RE_T (L INDICA LUNES)

Día	1	2	3 L	4	5	6	7	8	9	10 L	
R_{ELF}	8,1	7,9	6,3	14,5	17,7	32,7	17,4	9,6	18,9	10,6	
R_H	18,2	18,2	24,0	17,7	18,1	12,8	15,8	17,9	15,1	17,6	
R_{50}	24,9	24,4	18,7	19,4	15,2	14,0	17,3	22,0	17,4	22,6	
R_s	48,7	49,5	51,0	48,3	49,0	40,5	49,4	50,5	48,6	49,2	
Día	11	12	13	14	15	16	17 L	18	19	20	
R_{ELF}	10,2	22,4	18,8	19,0	9,2	16,1	8,8	8,4	23,5	21,1	
R_H	19,9	15,4	17,9	16,3	17,2	13,8	17,2	16,6	15,3	14,0	
R_{50}	10,0	15,1	17,8	17,7	24,5	21,3	24,7	25,2	13,1	19,5	
R_s	59,9	47,1	45,5	47,1	49,1	48,7	49,3	49,8	48,1	45,5	
Día	21	22	23	24 L	25	26	27	28	29	30	31 L
R_{ELF}	30,1	11,1	10,6	19,8	42,6	16,3	26,9	12,3	18,8	16,4	29,3
R_H	11,1	16,9	16,9	10,8	11,8	16,4	14,4	19,4	15,1	15,8	13,8
R_{50}	13,3	23,8	23,2	36,3	9,3	20,7	11,6	27,3	18,8	20,9	11,8
R_s	45,5	48,2	49,3	33,0	36,2	46,6	47,1	41,0	47,3	46,8	45,1

TABLA XXIV
RELACIONES PARCIALES (%) PARA VALORES MÍNIMOS DE RE_T (L INDICA LUNES)

Día	1	2	3 L	4	5	6	7	8	9	10 L	
R_{ELF}	0,5	0,6	0,5	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6	0,7	0,5	
R_H	24,4	23,7	25,9	25,5	24,8	23,7	26,1	23,7	26,1	26,2	
R_{50}	20,5	20,1	19,4	18,5	19,7	25,1	19,1	19,2	18,2	18,4	
R_s	54,6	55,6	54,2	55,3	54,8	50,5	54,1	56,6	55,1	54,9	
Día	11	12	13	14	15	16	17 L	18	19	20	
R_{ELF}	1,1	0,8	0,7	0,6	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	
R_H	27,5	24,1	26,4	25,7	23,1	23,6	26,0	25,7	25,1	23,9	
R_{50}	16,7	19,0	18,4	17,9	20,7	20,4	15,8	17,9	18,4	21,6	
R_s	54,8	56,1	54,5	55,9	55,7	55,3	57,7	55,8	56,0	53,9	
Día	21	22	23	24 L	25	26	27	28	29	30	31 L
R_{ELF}	0,5	0,8	0,7	0,5	0,8	0,5	0,6	0,5	0,6	0,7	0,6
R_H	25,9	25,3	23,2	26,1	25,5	24,3	24,4	25,1	23,4	23,3	26,2
R_{50}	20,3	20,7	22,2	20,9	18,9	17,7	19,0	19,7	19,6	20,6	17,6
R_s	53,3	53,3	54,0	52,5	54,9	57,4	56,0	54,7	56,4	55,7	55,6

C. Medida de la Frecuencia de Red

Todas las escalas temporales de este apartado están expresadas en UTC, aunque como ya se ha comentado la hora local en España en mayo corresponde a UTC+2. Este apartado se ha decidido hacerlo así porque pensamos que es más útil ya que toda la red europea está interconectada para disponer de una mayor capacidad de intercambio eléctrico entre países vecinos.

Los métodos utilizados para obtener la frecuencia de la red eléctrica fueron el ZC y el FFT. Para el día 3 de mayo se compararon los resultados de ambos métodos y se han representado en la Fig. 68. Además, se realizó una regresión lineal en R para este día, que se presenta en la Fig. 69, arrojando un coeficiente de determinación de 0,9492.

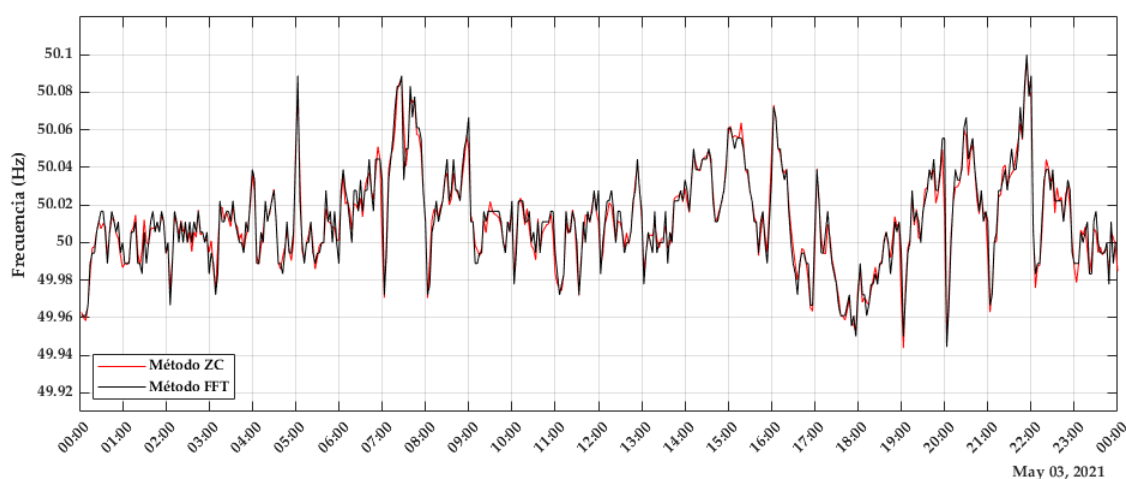


Fig. 68. Frecuencia del día 3 de mayo: comparación de los métodos ZC y FFT.

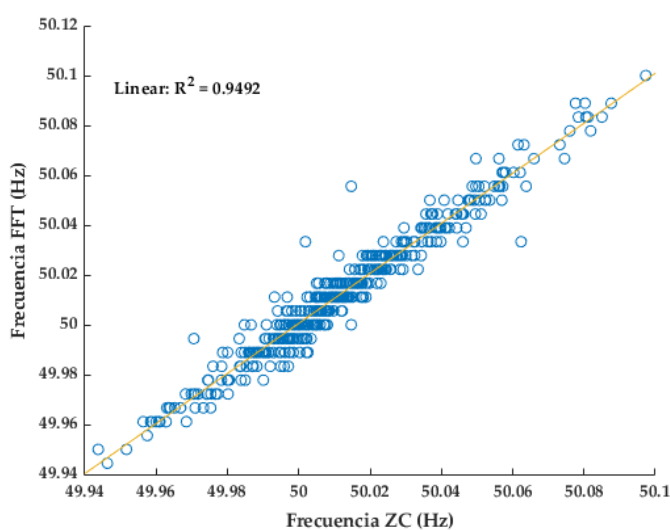
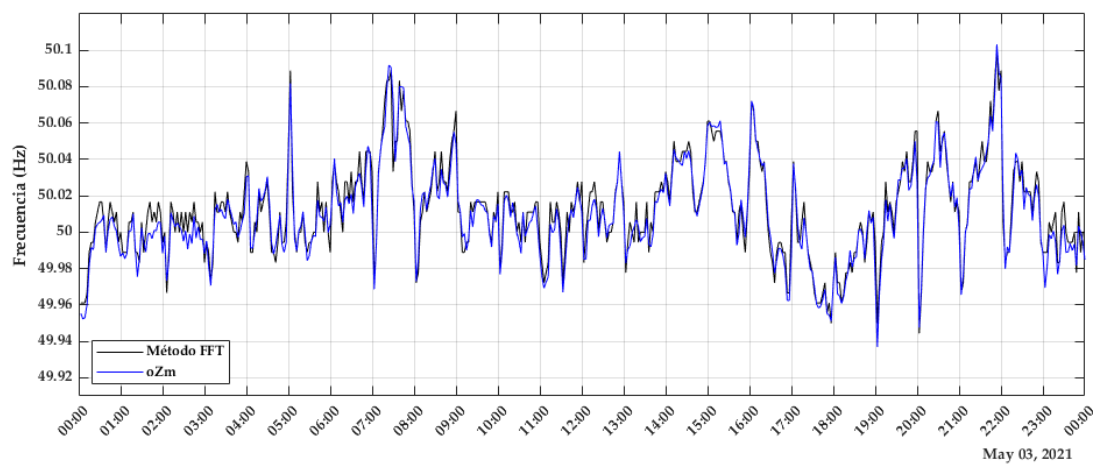


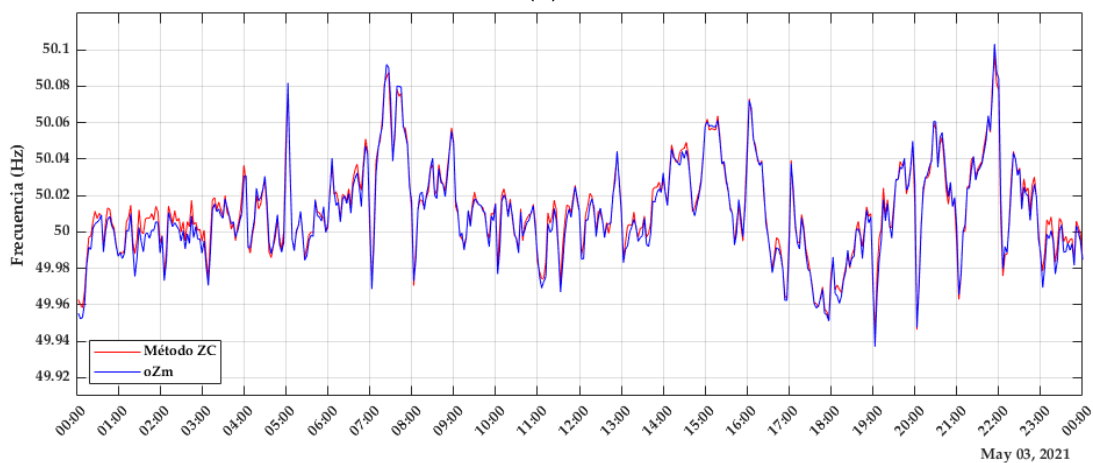
Fig. 69. Comparación de los métodos ZC y FFT: regresión lineal.

Para el resto del mes, los resultados para ambos métodos fueron similares, con un coeficiente de determinación que va desde 0,8600 (día 10) a 0,9392 (día 30).

Estos dos métodos se aplicaron a los datos proporcionados por el magnetómetro ELF para obtener la frecuencia de red eléctrica, arrojando resultados similares. Posteriormente se compararon los resultados de ambos métodos con los resultados de la frecuencia obtenidos por el analizador oZm. En primer lugar, para el día 3 de mayo se comparó la frecuencia diaria obtenida a través del método FFT con la frecuencia registrada por el oZm (Fig. 70a). En segundo lugar, se comparó la frecuencia diaria obtenida a través del método ZC con la frecuencia registrada por el oZm (Fig. 70b).



(a)



(b)

Fig. 70. Frecuencia a lo largo del día 3 de mayo. (a) Comparación entre el método FFT y el oZm. (b) Comparación entre el método ZC y el oZm.

De igual forma, los coeficientes de determinación para ambas comparaciones se representan en las Fig. 71a y Fig. 71b.

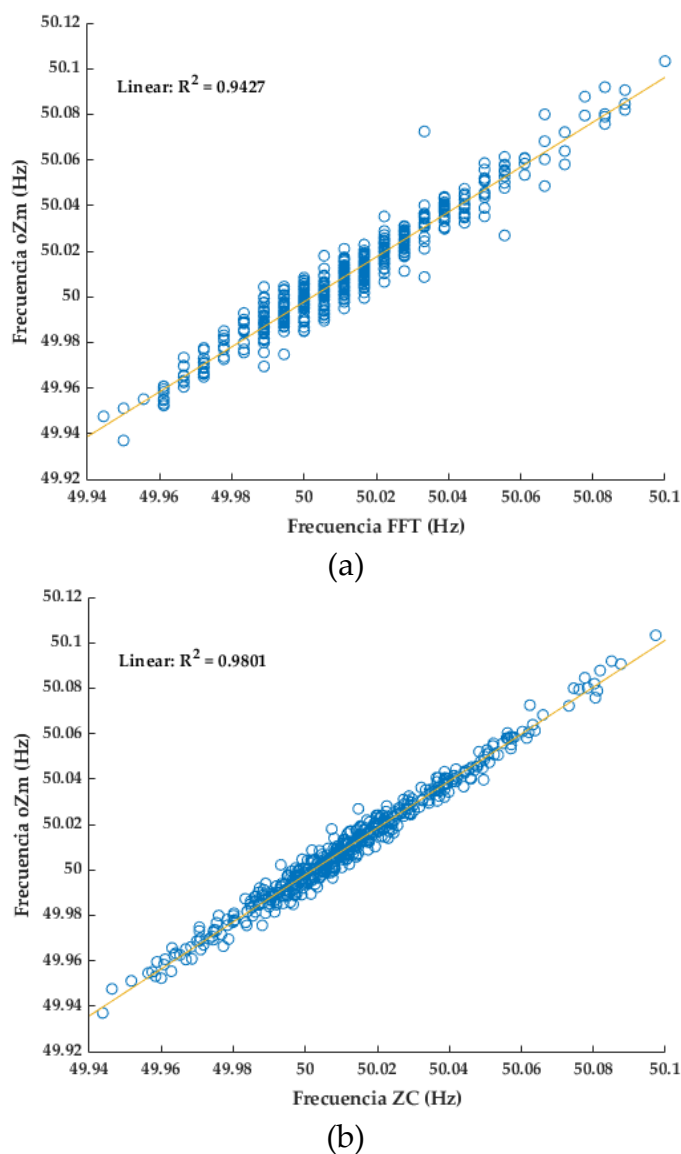


Fig. 71. Comparación entre métodos. (a) Regresión lineal de los métodos FFT y oZm. (b) Regresión lineal de los métodos ZC y oZm.

El coeficiente de determinación para estas comparaciones se presenta en la Tabla XXV para el mes completo de mayo. De acuerdo con esto, los valores de frecuencia obtenidos por el método ZC se ajustan mejor a la frecuencia medida por el analizador oZm que los resultados del método FFT. El coeficiente de determinación para la comparación entre el método ZC y el oZm osciló entre 0,6495 (día 25) y 0,9801 (día 3). El coeficiente de determinación para la comparación entre el método FFT y el oZm osciló entre 0,5304 (día 25) y 0,9427 (día 3).

En un análisis mensual, el valor mínimo, medio y máximo de la frecuencia de red por día se presenta en la Fig. 72. En la gráfica se puede observar que el valor máximo se alcanzó el día 23 y el mínimo el día 17.

TABLA XXV
COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN R² DE LA COMPARACIÓN ZC VS. OZM, Y DE FFT VS. OZM DEL MES DE MAYO (L INDICA LUNES)

Día	1	2	3 L	4	5	6	7	8	9	10 L	
ZC vs. oZm	0,9587	0,9185	0,9801	0,9560	0,9626	0,9377	0,9532	0,9436	0,9414	0,9855	
FFT vs. oZm	0,8787	0,8280	0,9427	0,8963	0,8992	0,8651	0,8735	0,8689	0,8799	0,8110	
Día	11	12	13	14	15	16	17 L	18	19	20	
ZC vs. oZm	0,9311	0,9145	0,7207	0,8630	0,8920	0,8846	0,8763	0,8785	0,8323	0,8698	
FFT vs. oZm	0,8409	0,8083	0,6521	0,6817	0,7748	0,7686	0,7767	0,7602	0,6714	0,7432	
Día	21	22	23	24 L	25	26	27	28	29	30	31 L
ZC vs. oZm	0,8208	0,8048	0,8702	0,8310	0,6495	0,7177	0,7109	0,7367	0,7577	0,8089	0,7713
FFT vs. oZm	0,6833	0,6694	0,7663	0,7180	0,5304	0,6413	0,5717	0,6307	0,6499	0,7085	0,6454

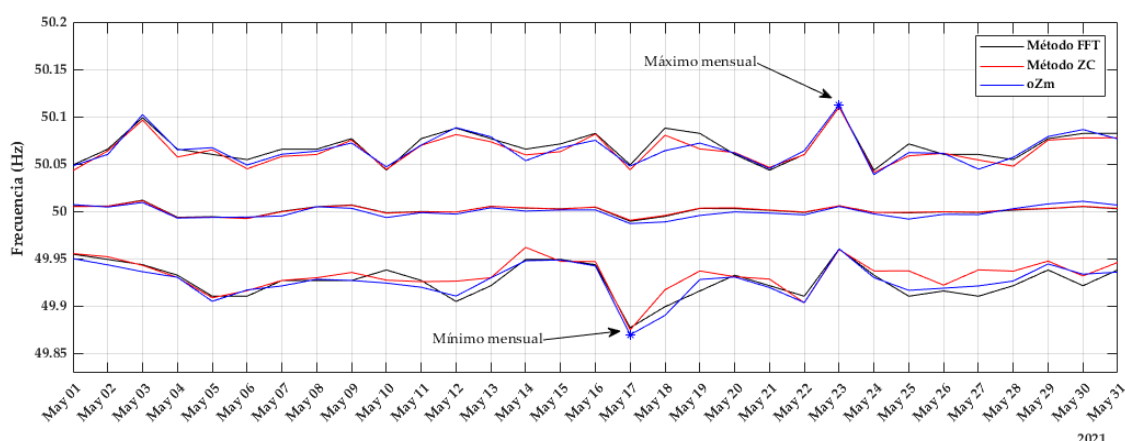


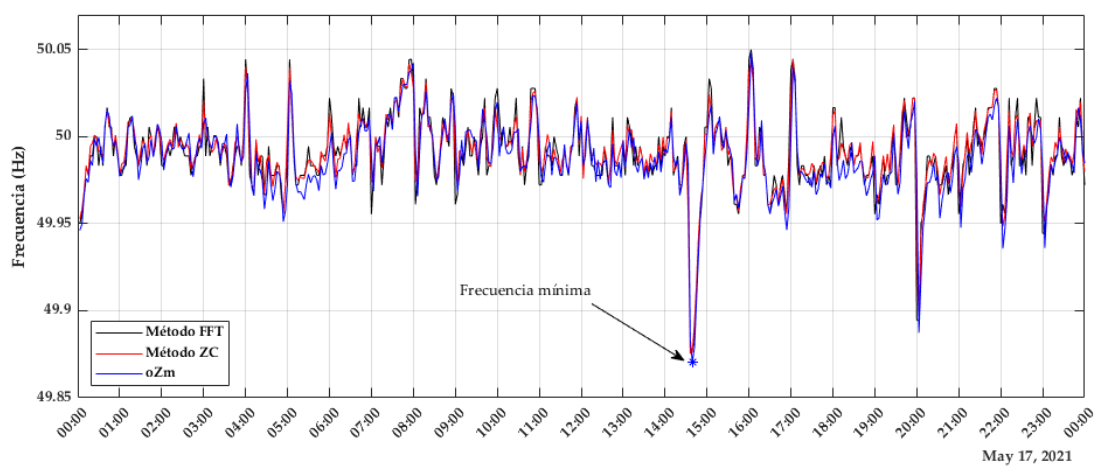
Fig. 72. Frecuencia máxima, mínima y media en cada día del mes de mayo.

En la Fig. 73a se muestra un análisis detallado para el día 17. A las 14:39 el analizador oZm registró el valor mínimo, 49,870 Hz. Al mismo tiempo, el magnetómetro ELF registró 49,876 Hz (método ZC) y 49,878 Hz (método FFT). Estos valores son 0,0120 % y 0,0160 % superiores al valor del oZm, respectivamente. El valor máximo registrado por el analizador oZm se muestra en la Fig. 73b y ocurrió el día 23. Su valor fue de 50,113 Hz a las 21:54 h. En este momento, el sensor registró 50,111 Hz (ambos métodos), un valor 0,0040 % inferior.

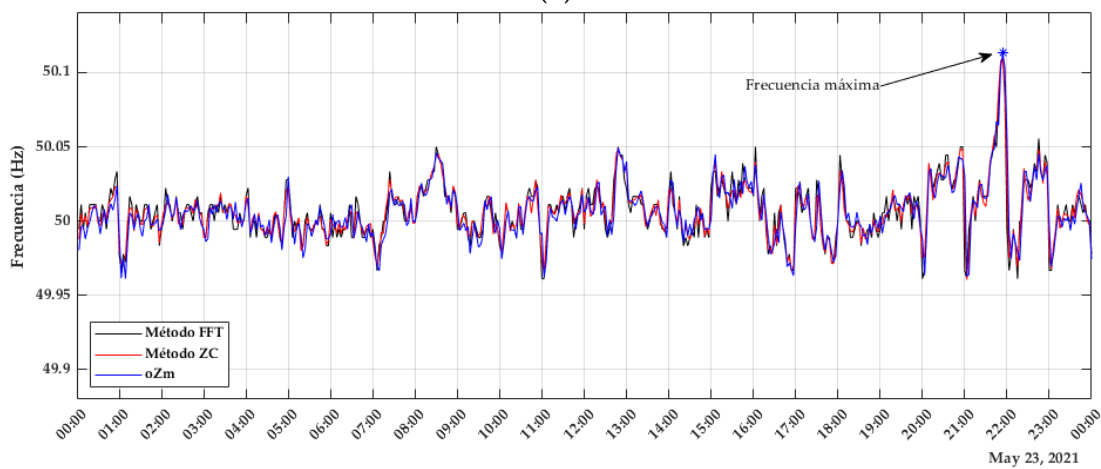
Los valores mínimo y máximo de la frecuencia en el mes de mayo se encontraron dentro de los límites de 50 Hz ± 1 % establecidos en [175]. La máxima desviación en el valor absoluto de la frecuencia respecto a su valor

nominal medido por el magnetómetro ELF se produjo el día 17, 0,248 %, lejos del 1 % permitido.

El valor medio de la frecuencia de todo el mes de mayo obtenido por el método FFT fue de 50,0019 Hz, de 50,0020 Hz por el método ZC, mientras que el analizador arrojó un valor de 50,0003 Hz.



(a)



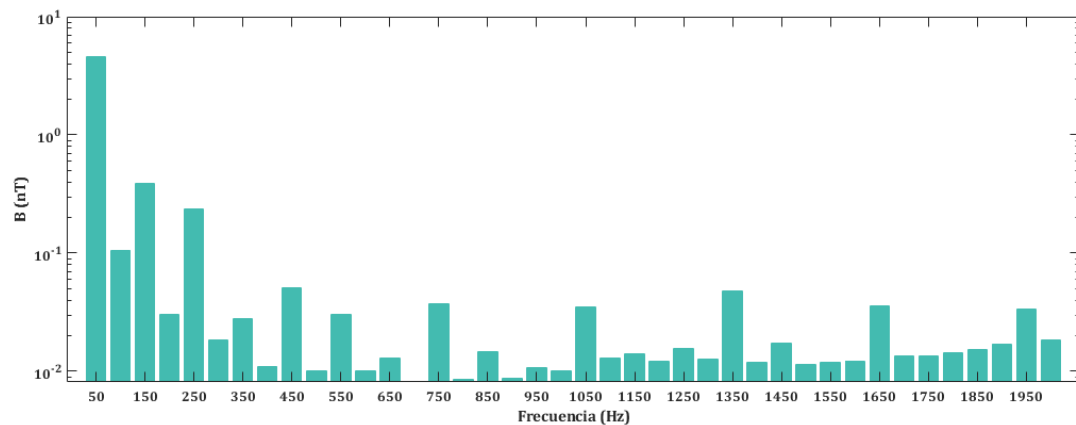
(b)

Fig. 73. Variación diaria de la frecuencia. (a) Valor mínimo de mayo. (b) Valor máximo de mayo.

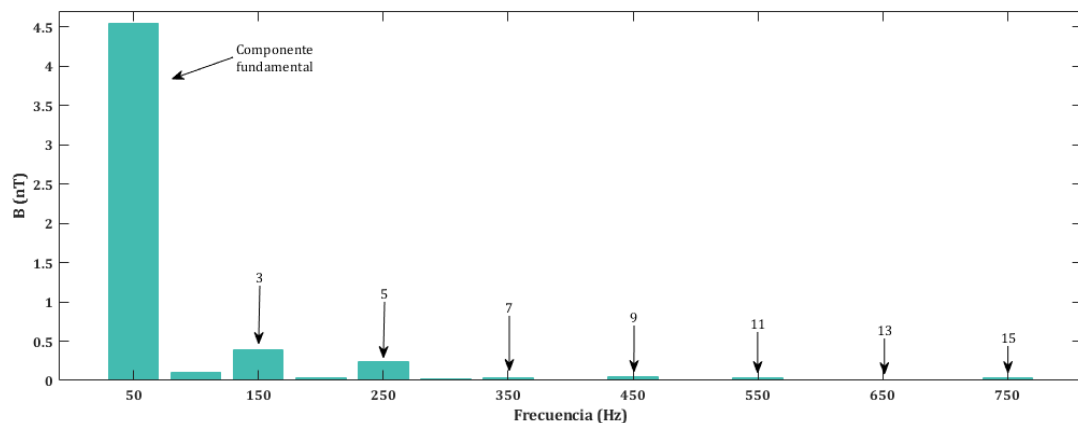
D. Evaluación de la Tasa de Distorsión Armónica en Corriente

En este apartado las escalas de tiempo se expresaron en hora local de España, no en UTC, ya que la TDH está muy influenciada por los hábitos locales, como la iluminación nocturna. De esta forma, los gráficos ayudan a comprender mejor los resultados.

Una vez que la señal del magnetómetro ELF ha sido procesada y los datos agrupados y agregados, la salida del algoritmo corresponde a la densidad de flujo magnético en nT generado por las líneas y dispositivos eléctricos presentes alrededor del área donde se instaló el sensor. La Fig. 74a presenta el valor de la densidad de flujo magnético en un intervalo de 10 minutos para cada frecuencia hasta 2 kHz. El eje de ordenadas se ha representado en escala logarítmica para apreciar todas las componentes espectrales y los datos corresponden específicamente al intervalo entre las 07:00 y las 07:10 del 7 de mayo. La Fig. 74b muestra hasta la componente armónica 15 en escala lineal.



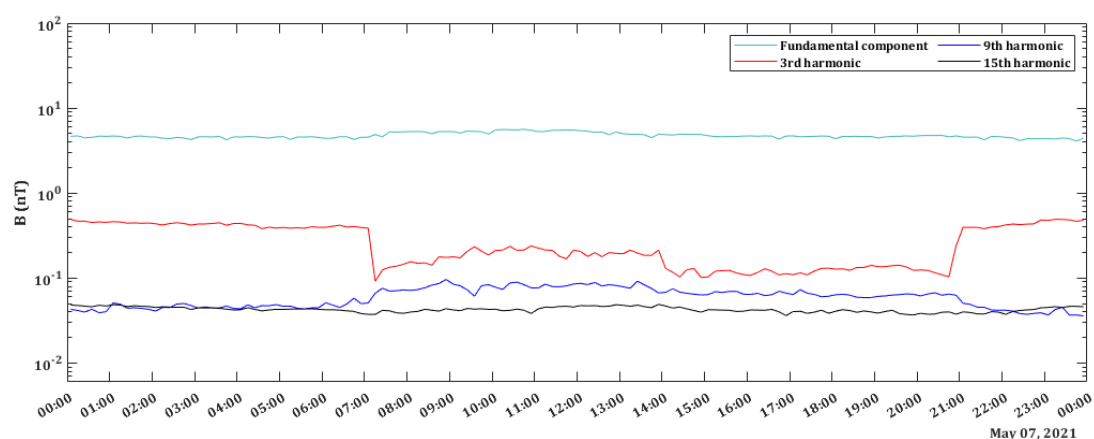
(a)



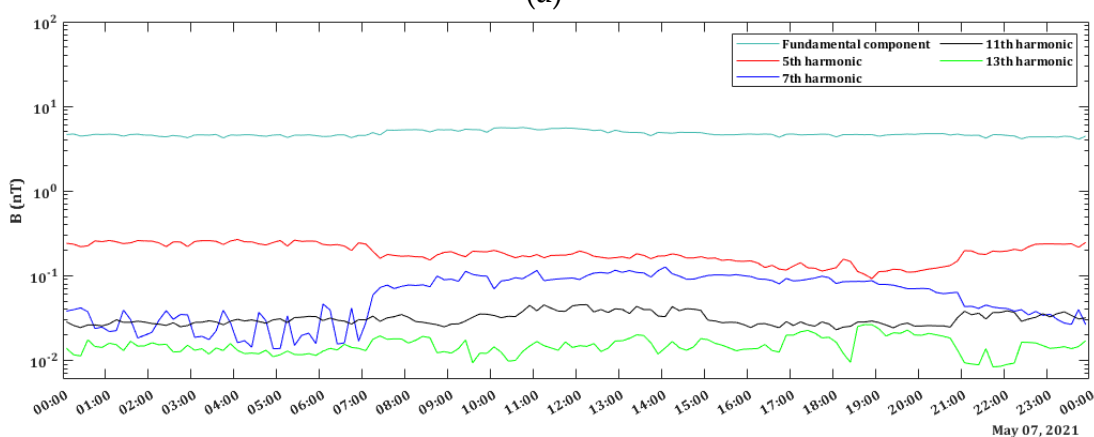
(b)

Fig. 74. Densidad de flujo magnético en el dominio de la frecuencia. (a) hasta 2 kHz. (b) hasta la componente armónica 15ª.

Siguiendo el mismo procedimiento, se calculó la densidad de flujo magnético cada 10 minutos para todo el mes de mayo. La Fig. 75a muestra la evolución de la densidad de flujo magnético captado por el magnetómetro ELF a lo largo del día 7 de mayo. No se han representado los 40 armónicos que capta nuestro sensor, sino que para simplificar, la componente fundamental y los armónicos “triples” (3º, 9º y 15º) se representan en la Fig. 75a, mientras que los armónicos 5º, 7º, 11º y 13º (debidos a las cargas trifásicas no lineales) con la componente fundamental se representan en la Fig. 75b.



(a)



(b)

Fig. 75. Evolución a lo largo del tiempo de la densidad de flujo magnético para el día 7 de mayo (a) Componente fundamental más armónicos 3º, 9º y 15º. (b) Componente fundamental más armónicos 5º, 7º, 11º y 13º.

Discutir los armónicos en términos de porcentaje sobre el fundamental puede ser útil para comprender los niveles armónicos relativos [321], pero en este trabajo la componente fundamental y los armónicos hasta el orden 40 se agrupan en el valor RMS de la densidad de flujo magnético. Su evolución durante el día 7 de mayo se muestra en la Fig. 76a. Además, la THD_B se calcula de acuerdo con (21), obteniendo los valores presentados en la Fig. 76b.

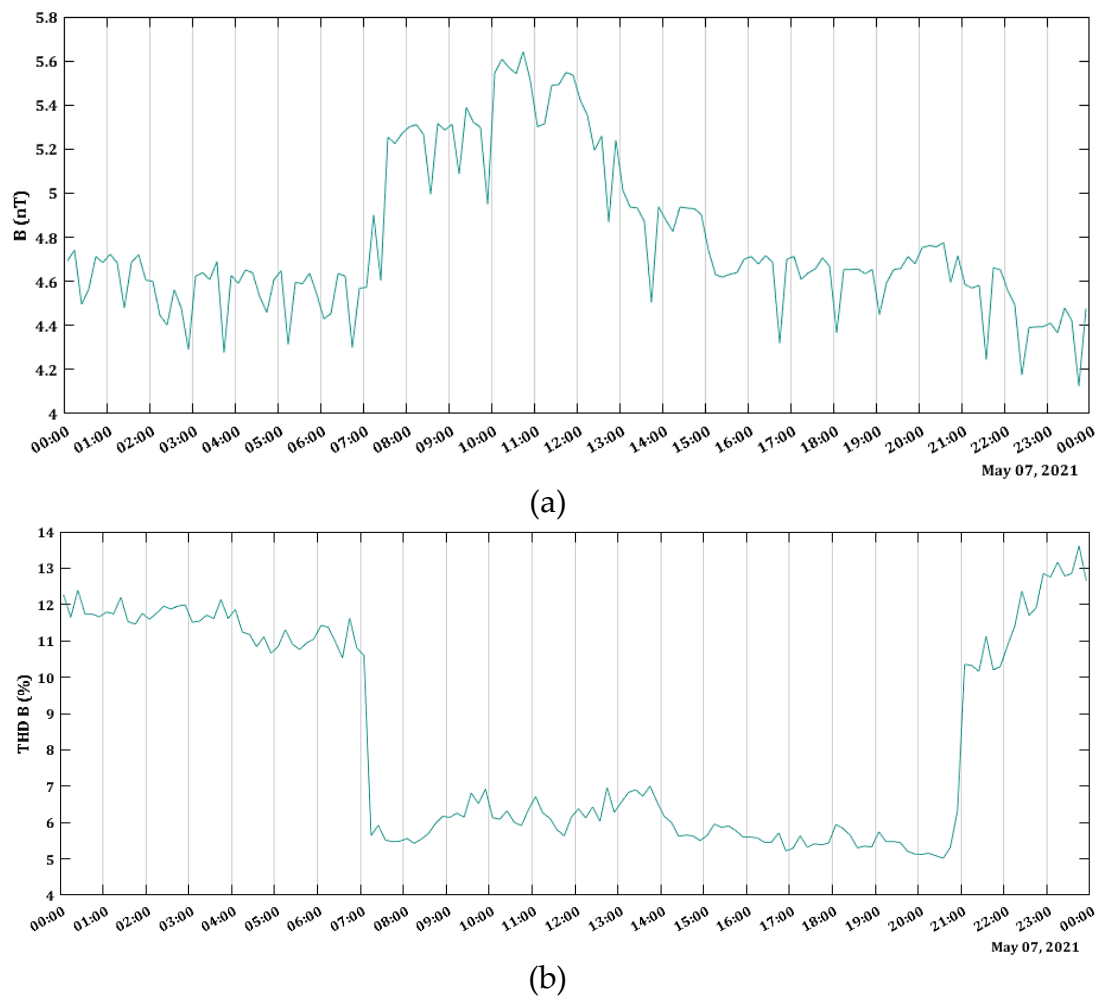


Fig. 76. Datos obtenidos el día 7 de mayo. (a) B ; (b) THD_B .

Un hecho destacable de la Fig. 76b es el cambio repentino que la THD_B sufre aproximadamente a las 7 y a las 21 horas. Tras un análisis más detallado, en las figuras siguientes se puede observar que los cambios bruscos ocurren al amanecer y al anochecer. La Fig. 77a muestra la THD_B correspondiente al sábado 1 de mayo. Ese día amaneció a las 7:16 y anocheceó a las 20:57, que es justo la hora de la variación brusca de la THD_B para ese día. La Fig. 77b muestra la THD_B para el lunes 31 de mayo. Ese día amaneció a las 6:53 y anocheceó a las 21:21, e igual que en la figura anterior, se puede observar que a esa hora es cuando se produce la variación repentina de la THD_B .

Se ha elegido el primer y último día del mes de mayo para enfatizar cómo el amanecer y el atardecer van variando, dependiendo de la época del año, y así comprobar que es en esos momentos cuando se producen las variaciones bruscas de la THD_B .

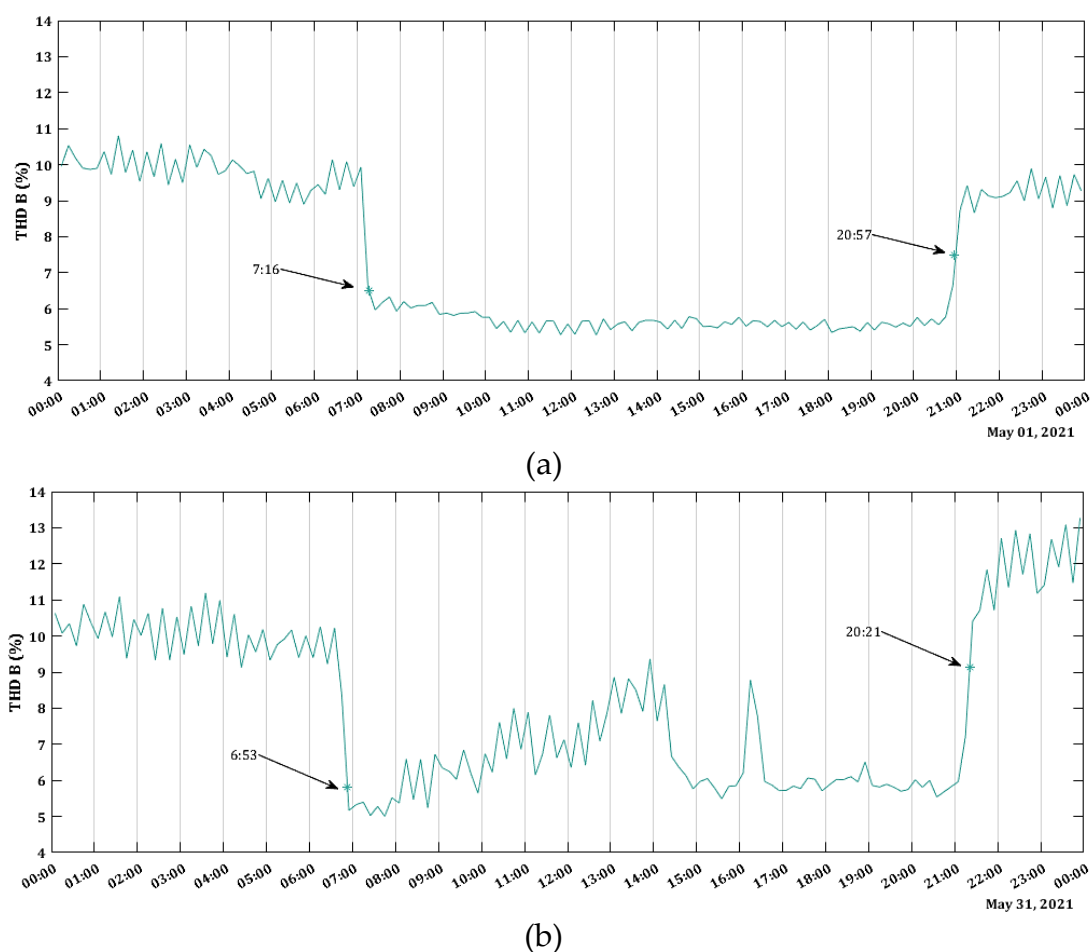


Fig. 77. THD_B . (a) Día 1 de mayo. (b) Día 31 de mayo.

De acuerdo con las figuras anteriores, la THD_B durante el período nocturno está influenciada por la iluminación exterior alrededor del CITIC. Este hecho también se puede observar en la Fig. 75a, donde la componente del 3^{er} armónico de la densidad de flujo magnético sufre la misma variación brusca al amanecer/anochece. Las cargas monofásicas no lineales, como las lámparas HPS de la iluminación exterior, generan un gran contenido de armónicos de corriente, siendo el 3^o el más elevado. La Fig. 78 presenta una comparación entre la THD_B capturada por el sensor ELF y la THD_I proporcionada por los analizadores oZm. Como se indicó anteriormente, los analizadores se instalaron en los interruptores eléctricos principales de las líneas, que son trifásicas, por lo que se obtiene el resultado de THD_I para cada una de las tres fases, tanto para la línea eléctrica del CITIC como para la línea eléctrica del alumbrado exterior.

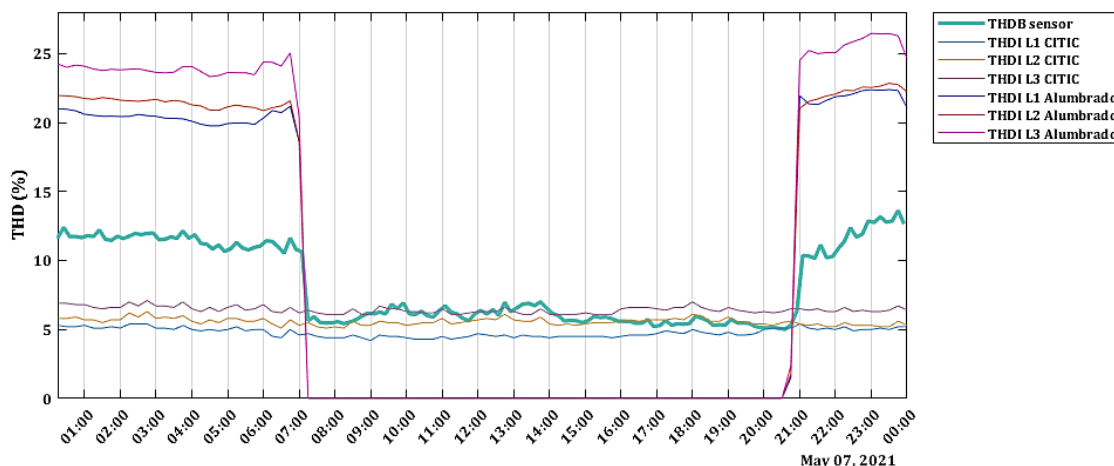


Fig. 78. Comparación entre las THD_B y THD_I del CITIC y la iluminación exterior para el día 7 de mayo.

La Fig. 79 presenta la misma comparación, pero con el valor de la THD_I resultante de agrupar los datos de ambos analizadores.

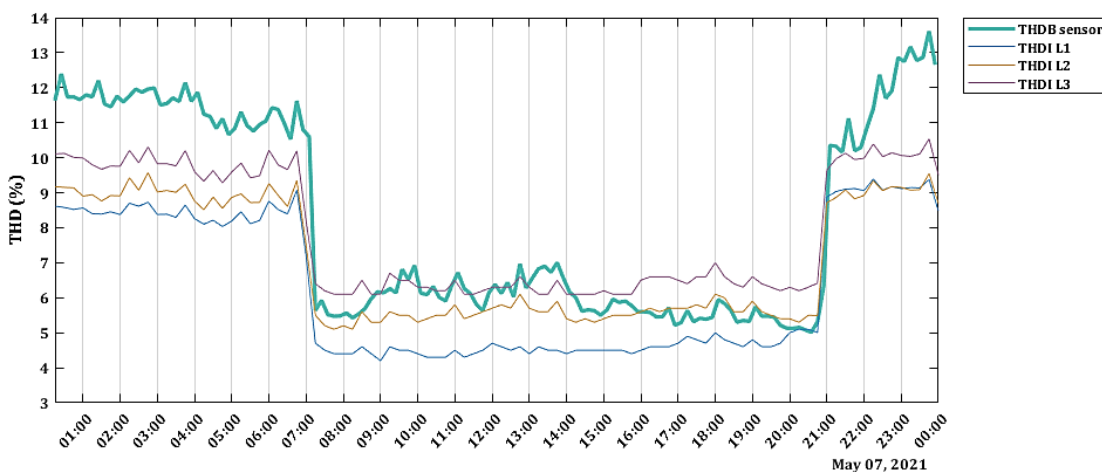


Fig. 79. Comparación entre la THD_B y la THD_I agrupada para el día 7 de mayo.

Para una mejor visualización, se va a dividir las gráficas en periodo diurno y periodo nocturno. De esta manera, la Fig. 80 representa la comparación entre la THD_B y la THD_I desde las 7:00 hasta las 21:00. Como puede observarse, la THD_B se mantiene entre la THD_I de las tres fases. La Fig. 81 presenta un análisis mensual de la THD media durante el período diurno. Las THD_I de las tres fases se han agrupado en un único valor de THD para facilitar el análisis. A lo largo del mes de mayo, la THD_B media obtenida por el magnetómetro durante el período de luz diurna coincide con el valor medio de la THD_I . La diferencia máxima se produce el 27 de mayo, con una diferencia entre los valores de la THD_B y THD_I del 2,08 %, y la diferencia mínima se produce el 14 de mayo, con una diferencia del 0,15 % (ver Tabla XXVI).

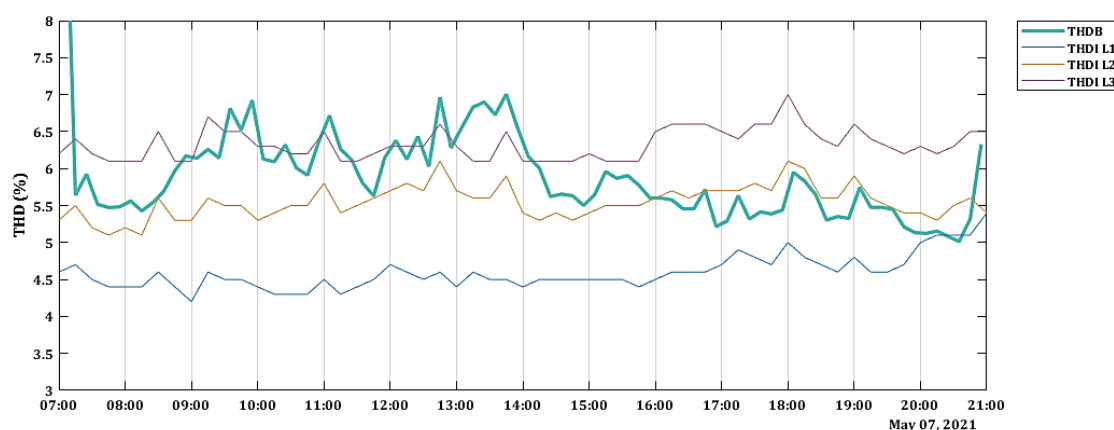


Fig. 80. Comparación entre la THD_B y la THD_i durante el periodo diurno (7:00 a 21:00) del día 7 de mayo.

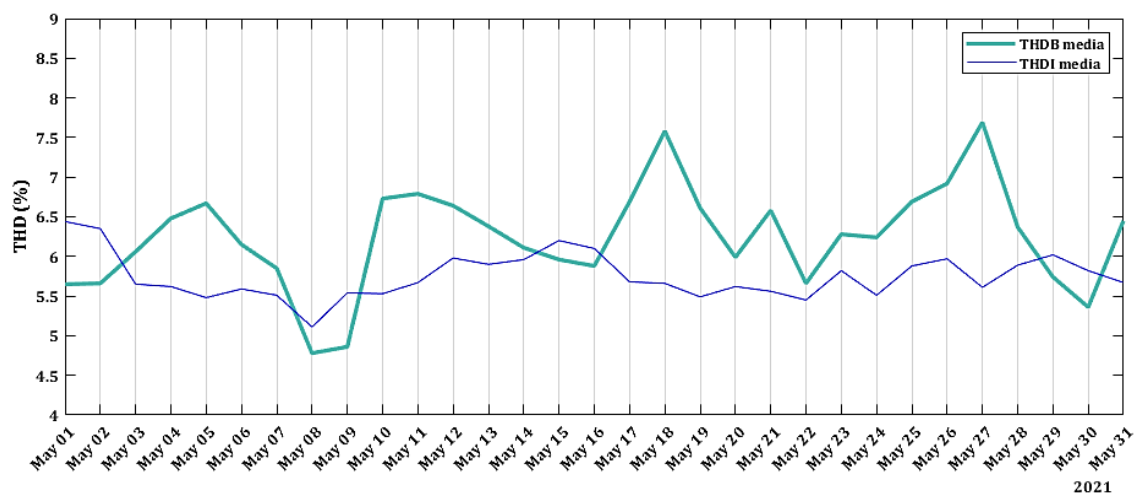


Fig. 81. THD media en el periodo diurno durante el mes de mayo.

TABLA XXVI

DIFERENCIA ENTRE LOS VALORES MEDIOS DE LA THD EN EL PERIODO DIURNO DURANTE EL MES DE MAYO (L INDICA LUNES)

Día	1	2	3 L	4	5	6	7	8	9	10 L	
Diferencia	-0,79	-0,69	0,41	0,86	1,19	0,56	0,34	0,33	0,68	1,20	
Día	11	12	13	14	15	16	17 L	18	19	20	
Diferencia	1,12	0,66	0,48	0,15	-0,24	-0,22	1,01	1,92	1,12	0,37	
Día	21	22	23	24 L	25	26	27	28	29	30	31 L
Diferencia	1,02	0,21	0,46	0,73	0,81	0,95	2,08	0,48	-0,28	-0,46	0,78

Se repite ahora el mismo análisis, pero esta vez en el periodo nocturno. La Fig. 82 representa la comparación entre la THD_B y la THD_i desde las 21:00 horas del día 6 de mayo hasta las 7:00 del día 7 de mayo.

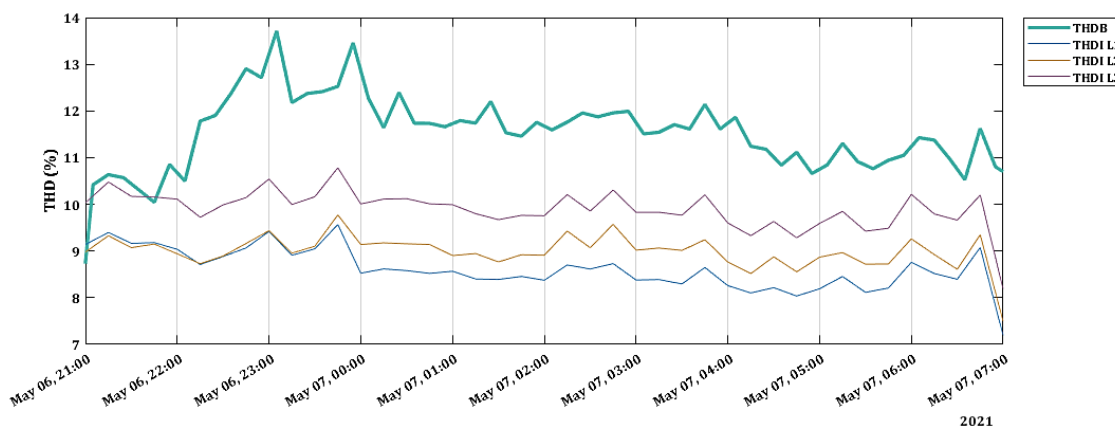


Fig. 82. Comparación entre la THD_B y la THD_i para el periodo nocturno (21:00 a 07:00) entre los días 6 y 7 de mayo.

Cuando comienza el período nocturno y se enciende la iluminación exterior, la THD_B captada por el magnetómetro aumenta y se mantiene en un nivel superior a la THD_i obtenida por los analizadores oZm. La Fig. 83 presenta un análisis mensual de la THD media durante el período nocturno.

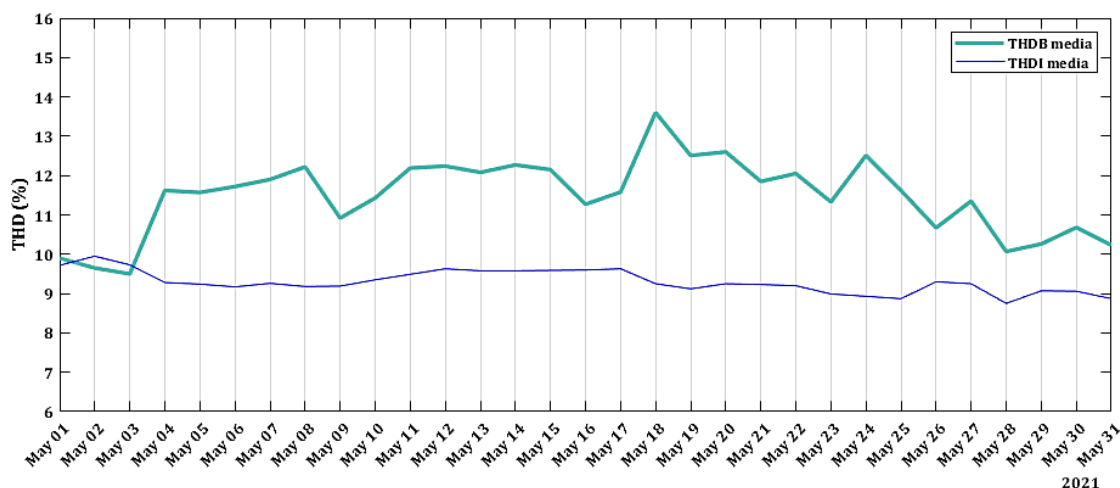


Fig. 83. THD media en el periodo nocturno durante el mes de mayo.

A lo largo del mes de mayo, la THD_B media en el periodo nocturno es superior a la THD_i medida por los analizadores. La diferencia máxima se produce el 18 de mayo, con una diferencia entre los valores del 4,35 % y la diferencia mínima se produce el 1 de mayo, con una diferencia del 0,18 % (ver Tabla XXVII). Esto indica que la línea eléctrica y las farolas del alumbrado exterior están más cerca del magnetómetro que del CPD (ver Fig. 48) y por tanto los datos que obtiene el sensor están más influenciados por esta línea. La característica principal del período nocturno es que el nivel del tercer armónico

aumenta debido al tipo de lámparas utilizadas en la iluminación exterior, lo que provoca el crecimiento de la THD_B .

TABLA XXVII
DIFERENCIA ENTRE LOS VALORES MEDIOS DE LA THD EN EL PERIODO NOCTURNO DURANTE EL MES DE MAYO (L INDICA LUNES)

Día	1	2	3 L	4	5	6	7	8	9	10 L	
Diferencia	0,18	-0,30	-0,23	2,34	2,33	2,55	2,64	3,04	1,73	2,08	
Día	11	12	13	14	15	16	17 L	18	19	20	
Diferencia	2,70	2,61	2,50	2,69	2,56	1,67	1,95	4,35	3,39	3,35	
Día	21	22	23	24 L	25	26	27	28	29	30	31 L
Diferencia	2,62	2,85	2,34	3,58	2,75	1,37	2,10	1,32	1,19	1,62	1,36

En el artículo [147] de 2022 se calcula la densidad de flujo magnético en las proximidades de una línea aérea de 35 kV y después se halla el valor de la THD_B siguiendo el mismo método que se propone en esta tesis. Los autores encuentran un valor similar entre la THD_i de la línea y la THD_B hallada. Las discrepancias encontradas en nuestro método (sobre todo en el periodo nocturno) pueden ser debidas a que el sensor recibe las radiaciones electromagnéticas de multitud de fuentes radiantes, y no de una sola fuente principal como ocurre en [147]. Además, como se indicó en la introducción, la magnitud de la densidad de flujo magnético en el magnetómetro es inversamente proporcional al cubo de la distancia, por lo que las fuentes más cercanas al sensor tendrán más influencia (Fig. 84).



Fig. 84. Radio de influencia del sensor ELF.



Capítulo V.
CONCLUSIÓN



V. CONCLUSIÓN

Desde septiembre de 2020 un magnetómetro ELF desarrollado por nuestro Grupo de Investigación ha estado monitorizando en tiempo real los CEM producidos por dispositivos e instalaciones eléctricas. Esta información, debidamente procesada, ha permitido establecer un procedimiento para hallar la densidad de flujo magnético y poder determinar la ratio de exposición humana al campo magnético. El posible efecto de la exposición a los CEM de 50 Hz en entornos residenciales plantea la cuestión de cómo se deben medir y monitorizar, ya que una de las metas que promueve la Organización Mundial de la Salud dentro de su sección de “Campos Electromagnéticos y Salud Pública” es que la exposición, ya sea para trabajadores o para el público en general, debe ser monitorizada para asegurar que los límites no se superan. La OMS recomienda que gobiernos, industrias e instituciones públicas deben fomentar planes de investigación para disminuir la incertidumbre en las evidencias científicas sobre los posibles efectos en la salud de la exposición a radiaciones ELF. Pensamos que el capítulo dedicado a la exposición humana al campo magnético puede ser de utilidad y cumplir con los objetivos que marcó la OMS.

Además, con los datos obtenidos por el sistema, se estudiarán algunos parámetros de CEE de una manera no invasiva, tales como la frecuencia de la red eléctrica y la tasa de distorsión armónica en corriente. De esta manera se puede afirmar que las investigaciones realizadas en esta tesis han sido de utilidad en el campo de la investigación de los CEM y de su interconexión con algunos parámetros de calidad eléctrica.

Las principales aportaciones de esta tesis se resumen capítulo a capítulo, así como las mejoras y futuros trabajos que se podrían realizar para continuar con esta línea de investigación.

A. Análisis del Ciclo de Vida y de Costes del Ciclo de Vida

El progreso social y el desarrollo económico demandan nuevos servicios e infraestructuras, pero esto está provocando problemas ambientales que

suponen verdaderos desafíos para la generación actual. Para cumplir con el objetivo de un mundo sostenible, se requieren herramientas de evaluación adecuadas, y una herramienta básica utilizada para este tipo de estudios es el ACV.

El primer trabajo realizado en esta tesis fue comparar a través de un ACV y un CCV dos formas diferentes de suministrar energía a la red de sensores, y se ha logrado elegir la opción más ventajosa en términos ambientales y económicos. Las dos formas diferentes consideradas para suministrar energía eléctrica a la red de sensores fue considerar que esta se conecta a la red pública existente, o, hacer que el sistema sea totalmente independiente de la red eléctrica, con un panel fotovoltaico como fuente de energía primaria y una batería de respaldo.

En esta tesis se ha mostrado que la opción de hacer que el sistema sea totalmente independiente de la red eléctrica tiene una mayor cantidad de beneficios que la opción conectada a la red pública en términos de impacto ambiental, aunque es menos ventajosa económicamente. En un análisis detallado se pudo observar que la batería es el componente con mayor impacto, por lo que se tomaron acciones para tratar de reducir el consumo y, por tanto, el tamaño de la batería y su impacto negativo. Después de reducir el tamaño de la batería, se alcanzó el punto de equilibrio, proporcionando un beneficio económico neto de 0,23 € sensor/año. Este análisis se refiere a un solo sensor, pero teniendo en cuenta que el proyecto consta de una red de 10 sensores y que la vida útil del proyecto completo es de 20 años, el ahorro económico total es de 460 €. Aunque los beneficios ambientales y económicos parecen bajos, en una economía de escala, esto podría resultar en un gran ahorro si este tipo de sensores se instalan masivamente.

Actualmente, las empresas privadas son reacias a dar información que pueda reconocer que sus productos son peores en términos medioambientales que los de la competencia, por lo que desde instituciones públicas debemos impulsar este tipo de estudios. En nuestro caso, los resultados obtenidos han sido útiles para mejorar el diseño final en términos medioambientales y económicos del proyecto UAL18-TIC-A025-A, aunque no se ha pretendido crear un modelo de precisión. Los resultados de un ACV requieren de una excelente calidad de las bases de datos, y los investigadores dependen profundamente de este tema. Por supuesto, somos conscientes de los esfuerzos de los proveedores de bases de datos para mejorarlos constantemente, sin embargo, es difícil mantener la confidencialidad de los datos comerciales sin perder la credibilidad de los resultados de un ACV. Pero a pesar de todas las

limitaciones actuales, creemos que la demanda de evaluaciones similares aumentará sustancialmente en un futuro cercano.

Aunque dichos análisis no se suelen emplear para proyectos de pequeño tamaño y bajo coste, desde el Grupo de Investigación pensamos que es importante comenzar a incluir análisis medioambientales y económicos en este tipo de proyectos. En la economía del mundo globalizado, incluso proyectos de este tipo podrían convertirse en proyectos a gran escala ya que el desarrollo del IoT necesitará una gran cantidad de dispositivos. Además, es fundamental que desde organismos públicos como las universidades y grupos de investigación como el nuestro se promuevan este tipo de análisis, ya que su combinación podría complementar los proyectos desde el punto de vista de la sostenibilidad y el medioambiente.

B. Análisis de la Exposición Humana a los Campos Magnéticos

Tras determinar un procedimiento para hallar la RE , se ha establecido una metodología para el análisis de la contribución de las diferentes bandas de frecuencia a la RE_T . Nuestros resultados muestran que ninguna persona en el laboratorio o en su entorno donde está situado el sensor ELF está expuesta a un nivel peligroso de exposición, siendo estos valores incluso algunas órdenes de magnitud por debajo del valor máximo 1.

La mayor contribución a la RE_T son las frecuencias espurias y la contribución de la frecuencia fundamental es similar a la de la suma de sus armónicos. Aunque los valores obtenidos están muy lejos de los límites normativos, queremos avanzar en la investigación sobre cuáles son las frecuencias espurias por ser las que más contribuyen a la exposición a los CEM. Encontrar el origen de las frecuencias espurias podría hacer posible reducir sus valores para minimizar su contribución al valor de la RE_T y poder cuantificar también las no linealidades.

C. Medida de la Frecuencia de la Red Eléctrica

La frecuencia es clave en los sistemas de potencia ya que las desviaciones del valor nominal pueden afectar las operaciones del sistema de potencia y dañar los equipos. Tras analizar los resultados obtenidos en el magnetómetro, la medida indirecta y no invasiva de la frecuencia se ajusta con éxito a la frecuencia de la red eléctrica con los métodos ZC y FFT. El procedimiento de validación con el dispositivo comercial produjo un coeficiente de

determinación para el método ZC que va desde 0,9801 el 3 de mayo hasta 0,6495 el 25 de mayo. Para el método FFT, va desde 0,9427 el 3 de mayo hasta 0,5304 el 25 de mayo.

Aunque la desviación máxima encontrada de la frecuencia respecto a su valor nominal en el mes de mayo fue del 0,248 %, lejos de los límites establecidos en la norma, un problema reciente son las fluctuaciones que la implantación masiva de generación eólica o fotovoltaica introduce en la frecuencia. En consecuencia, se requieren mediciones precisas a medida que la demanda eléctrica continúa aumentando. La medida de frecuencia se suele realizar por métodos directos que requieren una conexión a la red de distribución. En nuestro caso de estudio, la fuente de información se obtiene a través de los CEM generados por las instalaciones eléctricas; por lo tanto, podemos medir la frecuencia de la red sin un punto de conexión, realizando la medición de forma no invasiva. La ventaja es que es posible monitorear la frecuencia de la red de un área amplia, con equipos portátiles que no requieren conexión física y sin necesidad de molestar a los usuarios de la red eléctrica.

D. Evaluación de la tasa de Distorsión Armónica en Corriente

A diferencia de otros factores de CEE como la tensión, la amplitud, la frecuencia o la simetría, que dependen del proveedor de energía, las corrientes armónicas son perturbaciones que se originan en las propias instalaciones y se inyectan en el sistema de distribución. Por lo tanto, esas perturbaciones en el sistema de energía eléctrica son responsabilidad no solo de los distribuidores de electricidad sino también de los usuarios finales, ingenieros y fabricantes. En consecuencia, se requiere un aumento en las mediciones de los parámetros de CEE a medida que la demanda eléctrica continúa creciendo.

Tras analizar los resultados obtenidos en el magnetómetro, la THD_B está de acuerdo con la THD_I durante el período de luz diurna. La diferencia máxima se produce el 27 de mayo, con una diferencia entre los valores de la THD_B y THD_I del 2,08 %, mientras que la diferencia mínima se produce el 14 de mayo, con una diferencia del 0,15 %. Por otro lado, cuando comienza el período nocturno y se enciende la iluminación exterior, la THD_B aumenta y se mantiene en un nivel superior al THD_I obtenido por los analizadores oZm. La diferencia máxima se produce el 18 de mayo, con una diferencia entre los valores del 4,35 % y la diferencia mínima se produce el 1 de mayo, con una diferencia del 0,18 %. Esto indica que la línea eléctrica y las farolas del alumbrado exterior están más cerca del magnetómetro que del CPD y por tanto los datos que obtiene el sensor están más influenciados por esta línea.

Al igual que ocurre con la frecuencia de red, la medida de la THD_I se realiza también por métodos directos que requieren una conexión a la red de distribución, por lo que este método disfrutaría de las mismas ventajas expuestas anteriormente, al ser una medida no invasiva.

E. Mejoras y Futuros Trabajos

Un progreso tangible del sistema podría ser alcanzado realizando algunas de las siguientes mejoras:

- Rediseñar el sistema en un dispositivo compacto y portátil. Esto requeriría reducir el tamaño del sensor, que podría llevarse a cabo usando alambre ultrafino y un núcleo de ferrita de alta permeabilidad para la bobina.
- Aumentar el ancho de banda del sistema hasta los 9 kHz, ya que algunas normas de CEE alcanzan esta frecuencia.
- Implementar un filtro paso bajo analógico para atenuar los armónicos e interarmónicos antes del procesamiento de la señal. Así, el método ZC podría llevarse a cabo con un menor coste computacional por la ausencia de la etapa de filtrado digital

Y como trabajo futuro para esta línea de investigación se propone:

- Monitorizar más edificios del campus de la UAL para determinar el rango de influencia de nuestro sensor y poder relacionar el consumo eléctrico con el campo magnético generado.
- Modelar el entorno para conseguir una medida de la THD más precisa.
- Llevar a cabo medidas en otros entornos más estresantes, como en el interior del CPD de la UAL o en el interior de algún CT, y de esta manera encontrar las posibles fuentes de frecuencias espurias.

Con estas posibles mejoras y trabajos futuros se avanzaría en el campo de la monitorización de la calidad de la energía de la red eléctrica y también se contribuiría a una mejor comprensión del comportamiento de los CEM de baja frecuencia.

ANEXOS



Anexo I.

LISTA DE VARIABLES



LISTA DE VARIABLES

B	<i>Módulo del vector densidad de flujo magnético.</i>	ω	<i>Frecuencia angular.</i>
\vec{B}	<i>Vector densidad de flujo magnético.</i>		
\vec{E}	<i>Vector campo eléctrico.</i>		
f	<i>Frecuencia.</i>		
f_w	<i>Resolución en frecuencia.</i>		
\vec{H}	<i>Vector inducción magnética.</i>		
I	<i>Intensidad de corriente.</i>		
n	<i>Número de espiras.</i>		
R	<i>Resistencia</i>		
R_b	<i>Radio de la bobina</i>		
S	<i>Sección transversal.</i>		
S/R	<i>Relación señal ruido.</i>		
t	<i>Tiempo.</i>		
T	<i>Temperatura.</i>		
THD_B	<i>Tasa de distorsión armónica de la densidad de flujo magnético.</i>		
THD_I	<i>Tasa de distorsión armónica en corriente.</i>		
T_w	<i>Ancho de ventana.</i>		
V	<i>Tensión eléctrica.</i>		
W	<i>Ancho de banda.</i>		



Anexo II.

**REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Portillo, R. M. García, A. Alcayde, J. A. Gázquez, M. Fernández-Ros, and N. Novas, "Prospective Environmental and Economic Assessment of a Sensor Network," *Sustainability*, vol. 13, no. 18, p. 10306, Sep. 2021, doi: 10.3390/su131810306.
- [2] F. Portillo, A. Alcayde, R. M. García, N. Novas, J. A. Gázquez, and M. Fernández-Ros, "Grid Frequency Measurement through a PLHR Analysis Obtained from an ELF Magnetometer," *Sensors*, vol. 22, no. 8, p. 2954, Apr. 2022, doi: 10.3390/s22082954.
- [3] R. M. García, N. Novas, A. Alcayde, D. El Khaled, M. Fernández-Ros, and J. A. Gázquez, "Progress in the Knowledge, Application and Influence of Extremely Low Frequency Signals," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 10, p. 3494, May 2020, doi: 10.3390/app10103494.
- [4] G. Xi, Y. J. Yang, K. Liu, and X. H. Zhang, "Effect of extremely low frequency pulsed electric field based on plant potential fluctuations on growth of mung bean," *Gaodiyana Jishu/High Volt. Eng.*, vol. 38, no. 1, pp. 199–204, 2012, doi: 10.3969/j.issn.1003-6520.2012.01.028.
- [5] E. Salmerón-Manzano, M. Rahmani-Andebili, A. Alcayde, and F. Manzano-Agugliaro, "Worldwide Research Trends on Smart Homes," in *Operation of Smart Homes*, M. Rahmani-Andebili, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1–31. doi: 10.1007/978-3-030-64915-9_1.
- [6] M. Aboubakar, M. Kellil, and P. Roux, "A review of IoT network management: Current status and perspectives," *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 34, no. 7, pp. 4163–4176, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.jksuci.2021.03.006.
- [7] R. Kandaswamy and D. Furlonger, "Blockchain-Based Transformation: A Gartner Trend Insight Report," *Gart. Res.*, no. March 2018, p. 4486, 2018, [Online]. Available: <https://www.gartner.com/document/code/352362?ref=grbody&refval=3841665>
- [8] N. Novas, R. M. García, J. M. Camacho, and A. Alcayde, "Advances in Solar Energy towards Efficient and Sustainable Energy," *Sustainability*, vol. 13, no. 11, p. 6295, Jun. 2021, doi: 10.3390/su13116295.
- [9] S. Walker, N. Coleman, P. Hodgson, N. Collins, and L. Brimacombe, "Evaluating the Environmental Dimension of Material Efficiency Strategies Relating to the Circular Economy," *Sustainability*, vol. 10, no. 3, p. 666, Mar. 2018, doi: 10.3390/su10030666.
- [10] P. Katarzyna, P. Izabela, B.-W. Patrycja, K. Weronika, and T. Andrzej, "LCA as a Tool for the Environmental Management of Car Tire Manufacturing," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 20, p. 7015, Oct. 2020, doi: 10.3390/app10207015.

- [11] B. Cheng, K. Lu, J. Li, H. Chen, X. Luo, and M. Shafique, "Comprehensive assessment of embodied environmental impacts of buildings using normalized environmental impact factors," *J. Clean. Prod.*, vol. 334, p. 130083, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130083.
- [12] S. Hellweg and L. Milà i Canals, "Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment," *Science (80-.)*, vol. 344, no. 6188, pp. 1109–1113, Jun. 2014, doi: 10.1126/science.1248361.
- [13] J. B. Guinée *et al.*, "Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 1, pp. 90–96, Jan. 2011, doi: 10.1021/es101316v.
- [14] R. Heijungs, E. Settanni, and J. Guinée, "Toward a computational structure for life cycle sustainability analysis: unifying LCA and LCC," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 18, no. 9, pp. 1722–1733, Nov. 2013, doi: 10.1007/s11367-012-0461-4.
- [15] M. Barbušová, I. Medvecká, and M. Gašo, "Use of TCO Analysis in Industry 4.0," in *Průmyslové inženýrství 2019: Mezinárodní studentská vědecká konference*, 2019. doi: 10.24132/PI.2019.08948.010-017.
- [16] "Berkshire encyclopedia of sustainability: v.6: Measurements, indicators, and research methods for sustainability," *Choice Rev. Online*, vol. 50, no. 03, pp. 50-1228b-50-1228b, Nov. 2012, doi: 10.5860/CHOICE.50-1228b.
- [17] B. Wohner, V. H. Gabriel, B. Krenn, V. Krauter, and M. Tacker, "Environmental and economic assessment of food-packaging systems with a focus on food waste. Case study on tomato ketchup," *Sci. Total Environ.*, vol. 738, p. 139846, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139846.
- [18] C. Moro Piekarski, L. Mendes da Luz, L. Zocche, and A. C. de Francisco, "Life Cycle Assessment as Entrepreneurial Tool for Business Management and Green Innovations," *J. Technol. Manag. Innov.*, vol. 8, no. 1, pp. 44–53, Mar. 2013, doi: 10.4067/S0718-27242013000100005.
- [19] I. Ribeiro, P. Peças, A. Silva, and E. Henriques, "Life cycle engineering methodology applied to material selection, a fender case study," *J. Clean. Prod.*, vol. 16, no. 17, pp. 1887–1899, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.jclepro.2008.01.002.
- [20] P. Peças, I. Ribeiro, R. Folgado, and E. Henriques, "A Life Cycle Engineering model for technology selection: a case study on plastic injection moulds for low production volumes," *J. Clean. Prod.*, vol. 17, no. 9, pp. 846–856, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.jclepro.2009.01.001.
- [21] C. Alves, P. M. C. Ferrão, M. Freitas, A. J. Silva, S. M. Luz, and D. E. Alves, "Sustainable design procedure: The role of composite materials to combine mechanical and environmental features for agricultural machines," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 10, pp. 4060–4068, Dec. 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2009.05.015.
- [22] C. L. Simões, S. M. Xará, and C. Bernardo, "Life cycle assessment of a road safety product made with virgin and recycled HDPE," *Waste Manag. Res. J. a Sustain. Circ. Econ.*, vol. 29, no. 4, pp. 414–422, Apr. 2011, doi: 10.1177/0734242X10379146.

-
- [23] C. L. Simões, L. M. C. Pinto, and C. A. Bernardo, "Modelling the environmental performance of composite products: Benchmark with traditional materials," *Mater. Des.*, vol. 39, pp. 121–130, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2012.02.027.
- [24] E. Pauer, B. Wohner, and M. Tacker, "The Influence of Database Selection on Environmental Impact Results. Life Cycle Assessment of Packaging Using GaBi, Ecoinvent 3.6, and the Environmental Footprint Database," *Sustainability*, vol. 12, no. 23, p. 9948, Nov. 2020, doi: 10.3390/su12239948.
- [25] European Union, "Directiva 2014/24/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de febrero de 2014, sobre contratación pública.," *Off. J. Eur. Union*, vol. L94/65, 2014.
- [26] European Union, "Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios.," *Off. J. Eur. Union*, vol. L153/13, 2010.
- [27] European Union, "Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética.," *Off. J. Eur. Union*, vol. L315/1, 2012.
- [28] Ministerio de la Presidencia de España, "Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética," *Boletín Of. del Estado*, 2021.
- [29] V. Muteri *et al.*, "Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels," *Energies*, vol. 13, no. 1, p. 252, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13010252.
- [30] S. Wiedemann *et al.*, "Environmental impacts and resource use of Australian beef and lamb exported to the USA determined using life cycle assessment," *J. Clean. Prod.*, vol. 94, pp. 67–75, May 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.01.073.
- [31] E. Oğuz and A. E. Şentürk, "Selection of the Most Sustainable Renewable Energy System for Bozcaada Island: Wind vs. Photovoltaic," *Sustainability*, vol. 11, no. 15, p. 4098, Jul. 2019, doi: 10.3390/su11154098.
- [32] I. Muñoz *et al.*, "Prospective environmental and economic assessment of solar-assisted thermal energy recovery from wastewater through a sequencing batch biofilter granular reactor," *J. Clean. Prod.*, vol. 212, pp. 1300–1309, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.074.
- [33] International Organization for Standardization, *ISO 14040*. Ginebra, Suiza, 2006.
- [34] International Organization for Standardization, *ISO 14044*. Ginebra, Suiza, 2007.
- [35] D. Millet, L. Bistagnino, C. Lanzavecchia, R. Camous, and T. Poldma, "Does the potential of the use of LCA match the design team needs?," *J. Clean. Prod.*, vol. 15, no. 4, pp. 335–346, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.jclepro.2005.07.016.
- [36] K. Nakano and M. Hirao, "Collaborative activity with business partners for improvement of product environmental performance using LCA," *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 11, pp. 1189–1197, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.03.007.
- [37] B. Hollerud, J. Bowyer, J. Howe, E. Pepke, and K. Fernholz, "A review of Life Cycle Assessment Tools," 2017.

- [38] J. H. Miah, S. C. L. Koh, and D. Stone, "A hybridised framework combining integrated methods for environmental Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing," *J. Clean. Prod.*, vol. 168, pp. 846–866, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.187.
- [39] A. Laurent *et al.*, "Methodological review and detailed guidance for the life cycle interpretation phase," *J. Ind. Ecol.*, vol. 24, no. 5, pp. 986–1003, Oct. 2020, doi: 10.1111/jiec.13012.
- [40] B. P. Weidema, "Consistency check for life cycle assessments," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 24, no. 5, pp. 926–934, May 2019, doi: 10.1007/s11367-018-1542-9.
- [41] A. Shahabian, A. Fadai, and T. Peruzzi, "Future of Life-Cycle Assessment in a Smart and/or Sustainable World," 2020, pp. 177–207. doi: 10.4018/978-1-7998-0315-7.ch009.
- [42] N. Onat, M. Kucukvar, A. Halog, and S. Cloutier, "Systems Thinking for Life Cycle Sustainability Assessment: A Review of Recent Developments, Applications, and Future Perspectives," *Sustainability*, vol. 9, no. 5, p. 706, Apr. 2017, doi: 10.3390/su9050706.
- [43] J. Reap, F. Roman, S. Duncan, and B. Bras, "A survey of unresolved problems in life cycle assessment," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 13, no. 5, pp. 374–388, Aug. 2008, doi: 10.1007/s11367-008-0009-9.
- [44] Y. Saadah and B. AbuHijleh, "Decreasing CO₂ Emissions and Embodied Energy during the Construction Phase Using Sustainable Building Materials," *Int. J. Sustain. Build. Technol. Urban Dev.*, vol. 1, no. 2, pp. 115–120, Dec. 2010, doi: 10.5390/SUSB.2010.1.2.115.
- [45] European Commission., "Commission recommendation of 9 April 2013 on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations.," Brussels, Belgium, 2013.
- [46] European Commission., "PEFCR guidance document," Brussels, Belgium, 2018.
- [47] A. Lehmann, V. Bach, and M. Finkbeiner, "EU Product Environmental Footprint—Mid-Term Review of the Pilot Phase," *Sustainability*, vol. 8, no. 1, p. 92, Jan. 2016, doi: 10.3390/su8010092.
- [48] V. Bach, A. Lehmann, M. Görmer, and M. Finkbeiner, "Product Environmental Footprint (PEF) Pilot Phase—Comparability over Flexibility?," *Sustainability*, vol. 10, no. 8, p. 2898, Aug. 2018, doi: 10.3390/su10082898.
- [49] G. Page, B. Ridoutt, and B. Bellotti, "Carbon and water footprint tradeoffs in fresh tomato production," *J. Clean. Prod.*, vol. 32, pp. 219–226, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.03.036.
- [50] A. Lehmann, V. Bach, and M. Finkbeiner, "Product environmental footprint in policy and market decisions: Applicability and impact assessment," *Integr. Environ. Assess. Manag.*, vol. 11, no. 3, pp. 417–424, Jul. 2015, doi: 10.1002/ieam.1658.
- [51] S. Manfredi *et al.*, "Comparing the European Commission product environmental footprint method with other environmental accounting methods," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 20, no. 3, pp. 389–404, Mar. 2015, doi: 10.1007/s11367-014-0839-6.

-
- [52] Y. Wu and D. Su, "LCA of an industrial luminaire using product environmental footprint method," *J. Clean. Prod.*, vol. 305, p. 127159, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127159.
- [53] C. Russo *et al.*, "Product environmental footprint in the olive oil sector: state of the art," *Environ. Eng. Manag. J.*, vol. 15, no. 9, pp. 2019–2027, 2016, doi: 10.30638/eemj.2016.218.
- [54] L. Six *et al.*, "Using the product environmental footprint for supply chain management: lessons learned from a case study on pork," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 9, pp. 1354–1372, Sep. 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1249-8.
- [55] E. Soode-Schimonsky, K. Richter, and G. Weber-Blaschke, "Product environmental footprint of strawberries: Case studies in Estonia and Germany," *J. Environ. Manage.*, vol. 203, pp. 564–577, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.03.090.
- [56] J. Famiglietti, M. Guerci, C. Proserpio, P. Ravaglia, and M. Motta, "Development and testing of the Product Environmental Footprint Milk Tool: A comprehensive LCA tool for dairy products," *Sci. Total Environ.*, vol. 648, pp. 1614–1626, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.142.
- [57] S. Pyay, W. Thanungkano, J. Mungkalasiri, and C. Musikavong, "A life cycle assessment of intermediate rubber products in Thailand from the product environmental footprint perspective," *J. Clean. Prod.*, vol. 237, p. 117632, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117632.
- [58] G. Corradini, F. Pierobon, and M. Zanetti, "Product environmental footprint of a cross-laminated timber system: a case study in Italy," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 24, no. 5, pp. 975–988, May 2019, doi: 10.1007/s11367-018-1541-x.
- [59] T. Kuo and Y. Lee, "Using Pareto Optimization to Support Supply Chain Network Design within Environmental Footprint Impact Assessment," *Sustainability*, vol. 11, no. 2, p. 452, Jan. 2019, doi: 10.3390/su11020452.
- [60] D. Egas, S. Ponsá, and J. Colon, "CalcPEFDairy: A Product Environmental Footprint compliant tool for a tailored assessment of raw milk and dairy products," *J. Environ. Manage.*, vol. 260, p. 110049, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.110049.
- [61] J. Wu, J.-J. Fu, and C. Zhang, "Propagation characteristics of power line harmonic radiation in the ionosphere," *Chinese Phys. B*, vol. 23, no. 3, p. 034102, Mar. 2014, doi: 10.1088/1674-1056/23/3/034102.
- [62] J. Wu, Q. Guo, C. Yue, L. Xie, and C. Zhang, "Special Electromagnetic Interference in the Ionosphere Directly Correlated With Power System," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 62, no. 3, pp. 947–954, Jun. 2020, doi: 10.1109/TEM.2019.2918280.
- [63] J. Wu, Q. Guo, X. Yan, and C. Zhang, "Theoretical Analysis on Affecting Factors of Power Line Harmonic Radiation," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 47, no. 1, pp. 770–775, Jan. 2019, doi: 10.1109/TPS.2018.2865827.
- [64] F. Němec, O. Santolík, M. Parrot, and J. J. Berthelie, "Power line harmonic radiation: A systematic study using DEMETER spacecraft," *Adv. Sp. Res.*, vol. 40, no. 3, pp. 398–403, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.asr.2007.01.074.

- [65] A. V. Kostrov, M. E. Gushchin, and A. V. Strikovskii, "Generation and radiation of high power line harmonics," *Geomagn. Aeron.*, vol. 57, no. 4, pp. 482–490, Jul. 2017, doi: 10.1134/S0016793217030094.
- [66] S. M. Werner, C. J. Rodger, and N. R. Thomson, "Identifying power line harmonic radiation from an electrical network," *Ann. Geophys.*, vol. 23, no. 6, pp. 2107–2116, Sep. 2005, doi: 10.5194/angeo-23-2107-2005.
- [67] F. Němec, M. Parrot, and O. Santolík, "Power line harmonic radiation observed by the DEMETER spacecraft at 50/60 Hz and low harmonics," *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, vol. 120, no. 10, pp. 8954–8967, Oct. 2015, doi: 10.1002/2015JA021682.
- [68] F. Němec, M. Parrot, and O. Santolík, "Influence of power line harmonic radiation on the VLF wave activity in the upper ionosphere: Is it capable to trigger new emissions?," *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, vol. 115, no. A11, Nov. 2010, doi: 10.1029/2010JA015718.
- [69] M. Parrot, F. Němec, and O. Santolík, "Statistical analysis of VLF radio emissions triggered by power line harmonic radiation and observed by the low-altitude satellite DEMETER," *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, vol. 119, no. 7, pp. 5744–5754, Jul. 2014, doi: 10.1002/2014JA020139.
- [70] K. Bullough, A. R. L. Tatnall, and M. Denby, "Man-made e.l.f./v.l.f. emissions and the radiation belts," *Nature*, vol. 260, no. 5550, pp. 401–403, Apr. 1976, doi: 10.1038/260401a0.
- [71] O. Molchanov and M. Parrot, "PLHR emissions observed on satellites," *J. Atmos. Terr. Phys.*, vol. 57, no. 5, pp. 493–505, Apr. 1995, doi: 10.1016/0021-9169(94)00077-2.
- [72] Y. Ando, M. Hayakawa, and O. A. Molchanov, "Theoretical analysis on the penetration of power line harmonic radiation into the ionosphere," *Radio Sci.*, vol. 37, no. 6, pp. 5-1-5–12, Dec. 2002, doi: 10.1029/2001RS002486.
- [73] U. I. de Telecomunicaciones, "Recomendación UIT-R V431.8 (08/2015): Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones.," 2015. [Online]. Available: <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>
- [74] M. Parrot, F. Němec, M. B. Cohen, and M. Gołkowski, "On the use of ELF/VLF emissions triggered by HAARP to simulate PLHR and to study associated MLR events," *Earth, Planets Sp.*, vol. 74, no. 1, p. 4, Dec. 2022, doi: 10.1186/s40623-021-01551-9.
- [75] M. Parrot, "DEMETER observations of manmade waves that propagate in the ionosphere," *Comptes Rendus Phys.*, vol. 19, no. 1–2, pp. 26–35, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.crhy.2018.02.001.
- [76] European Space Agency (ESA), "DEMETER." <https://www.eoportal.org/satellite-missions/demeter#eop-quick-facts-section> (accessed Sep. 30, 2022).
- [77] R. A. Helliwell, "Whistlers and Related Ionospheric Phenomena," *Geophys. J. Int.*, vol. 11, no. 5, pp. 563–564, Jan. 1966, doi: 10.1111/j.1365-246X.1966.tb03172.x.
- [78] D. Nunn, M. Rycroft, and V. Trakhtengerts, "A parametric study of the numerical simulations of triggered VLF emissions," *Ann. Geophys.*, vol. 23, no. 12, pp. 3655–3666, 2005, doi: 10.5194/angeo-23-3655-2005.

- [79] R. A. Helliwell and J. P. Katsufakis, "VLF wave injection into the magnetosphere from Siple Station, Antarctica," *J. Geophys. Res.*, vol. 79, no. 16, pp. 2511–2518, Jun. 1974, doi: 10.1029/JA079i016p02511.
- [80] R. A. Helliwell, J. P. Katsufakis, T. F. Bell, and R. Raghuram, "VLF line radiation in the Earth's magnetosphere and its association with power system radiation," *J. Geophys. Res.*, vol. 80, no. 31, pp. 4249–4258, Nov. 1975, doi: 10.1029/JA080i031p04249.
- [81] C. G. Park, "VLF wave activity during a magnetic storm: A case study of the role of power line radiation," *J. Geophys. Res.*, vol. 82, no. 22, pp. 3251–3260, Aug. 1977, doi: 10.1029/JA082i022p03251.
- [82] C. G. Park and R. A. Helliwell, "Magnetospheric Effects of Power Line Radiation," *Science (80-.)*, vol. 200, no. 4343, pp. 727–730, May 1978, doi: 10.1126/science.200.4343.727.
- [83] C. G. Park and T. R. Miller, "Sunday decreases in magnetospheric VLF wave activity," *J. Geophys. Res.*, vol. 84, no. A3, p. 943, 1979, doi: 10.1029/JA084iA03p00943.
- [84] R. Barr, "ELF radiation from the New Zealand power system," *Planet. Space Sci.*, vol. 27, no. 4, pp. 537–540, Apr. 1979, doi: 10.1016/0032-0633(79)90130-2.
- [85] K. H. Yearby, A. J. Smith, T. R. Kaiser, and K. Bullough, "Power line harmonic radiation in Newfoundland," *J. Atmos. Terr. Phys.*, vol. 45, no. 6, pp. 409–419, Jun. 1983, doi: 10.1016/S0021-9169(83)81100-3.
- [86] Science and Technology Facilities Council, "Ariel 3." <https://www.ralspace.stfc.ac.uk/Pages/Ariel-3.aspx> (accessed Sep. 30, 2022).
- [87] Science and Technology Facilities Council, "Ariel 4." <https://www.ralspace.stfc.ac.uk/Pages/Ariel-4.aspx> (accessed Sep. 30, 2022).
- [88] A. R. L. Tatnall, J. P. Matthews, K. Bullough, and T. R. Kaiser, "Power-line harmonic radiation and the electron slot," *Space Sci. Rev.*, vol. 35, no. 2, Jun. 1983, doi: 10.1007/BF00242241.
- [89] K. Bullough, "Satellite observations of power line harmonic radiation," *Space Sci. Rev.*, vol. 35, no. 2, Jun. 1983, doi: 10.1007/BF00242242.
- [90] K. Bullough, T. . Kaiser, and H. . Strangeways, "Unintentional man-made modification effects in the magnetosphere," *J. Atmos. Terr. Phys.*, vol. 47, no. 12, pp. 1211–1223, Dec. 1985, doi: 10.1016/0021-9169(85)90089-3.
- [91] J. P. Lurette, C. G. Park, and R. A. Helliwell, "Longitudinal variations of very-low-frequency chorus activity in the magnetosphere: Evidence of excitation by electrical power transmission lines," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 4, no. 7, pp. 275–278, Jul. 1977, doi: 10.1029/GL004i007p00275.
- [92] National Aeronautics and Space Administration (NASA), "OGO 3." <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1966-049A> (accessed Sep. 30, 2022).

- [93] J. P. Luetete, C. G. Park, and R. A. Helliwell, "The control of the magnetosphere by power line radiation," *J. Geophys. Res.*, vol. 84, no. A6, p. 2657, 1979, doi: 10.1029/JA084iA06p02657.
- [94] National Aeronautics and Space Administration (NASA), "OGO 4." <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1967-073A> (accessed Sep. 30, 2022).
- [95] T. F. Bell, J. P. Luetete, and U. S. Inan, "ISEE 1 observations of VLF line radiation in the Earth's magnetosphere," *J. Geophys. Res.*, vol. 87, no. A5, p. 3530, 1982, doi: 10.1029/JA087iA05p03530.
- [96] European Space Agency (ESA), "ISEE." <https://www.eoportal.org/satellite-missions/isee#isee-international-sun-earth-explorer-program> (accessed Sep. 30, 2022).
- [97] C. G. Park and R. A. Helliwell, "Power line radiation in the magnetosphere," *Adv. Sp. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 423–437, Jan. 1981, doi: 10.1016/0273-1177(81)90317-3.
- [98] National Aeronautics and Space Administration (NASA), "ISIS 2." <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1971-024A> (accessed Sep. 30, 2022).
- [99] I. Tomizawa, T. Yoshino, and H. Sasaki, "Geomagnetic effect on electromagnetic field strength of power line radiation over northern Europe observed on the balloons B15-1N and B15-2N," *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. issue*, vol. 36, pp. 181–190, 1985.
- [100] Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), "OHZORA." <https://www.isas.jaxa.jp/en/missions/spacecraft/past/ohzora.html> (accessed Sep. 30, 2022).
- [101] I. Tomizawa and T. Yoshino, "Power line radiation observed by the satellite 'OHZORA,'" *J. Geomagn. Geoelectr.*, vol. 37, no. 3, pp. 309–327, 1985, doi: 10.5636/jgg.37.309.
- [102] National Aeronautics and Space Administration (NASA), "Aureol 3." <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1981-094A> (accessed Sep. 30, 2022).
- [103] M. Parrot, "World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite," *Ann. Geophys. Atmos. Hydrospheres Sp. Sci.*, vol. 8, pp. 135–146, 1990.
- [104] M. Parrot, "Observations of power line harmonic radiation by the low-altitude AUREOL 3 satellite," *J. Geophys. Res.*, vol. 99, no. A3, p. 3961, 1994, doi: 10.1029/93JA02544.
- [105] C. J. Rodger, N. R. Thomson, and R. L. Dowden, "VLF line radiation observed by satellite," *J. Geophys. Res.*, vol. 100, no. A4, p. 5681, 1995, doi: 10.1029/94JA02865.
- [106] National Aeronautics and Space Administration (NASA), "ISIS 1." <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1969-009A> (accessed Sep. 30, 2022).

-
- [107] C. J. Rodger, M. A. Clilverd, K. H. Yearby, and A. J. Smith, "Magnetospheric line radiation observations at Halley, Antarctica," *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, vol. 104, no. A8, pp. 17441–17447, Aug. 1999, doi: 10.1029/1999JA900153.
- [108] C. J. Rodger, M. A. Clilverd, K. H. Yearby, and A. J. Smith, "Is magnetospheric line radiation man-made?," *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, vol. 105, no. A7, pp. 15981–15990, Jul. 2000, doi: 10.1029/1999JA000413.
- [109] C. J. Rodger, M. A. Clilverd, K. H. Yearby, and A. J. Smith, "Temporal properties of magnetospheric line radiation," *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, vol. 105, no. A1, pp. 329–336, Jan. 2000, doi: 10.1029/1999JA900420.
- [110] K. Bullough, *Handbook of Atmospheric Electrodynamics (1995)*. CRC Press, 2017. doi: 10.1201/9780203713297.
- [111] M. Parrot, F. Němec, O. Santolík, and J. J. Berthelier, "ELF magnetospheric lines observed by DEMETER," *Ann. Geophys.*, vol. 23, no. 10, pp. 3301–3311, Nov. 2005, doi: 10.5194/angeo-23-3301-2005.
- [112] F. Němec, O. Santolík, M. Parrot, and J. J. Berthelier, "Power line harmonic radiation (PLHR) observed by the DEMETER spacecraft," *J. Geophys. Res.*, vol. 111, no. A4, p. A04308, 2006, doi: 10.1029/2005JA011480.
- [113] F. Němec, O. Santolík, M. Parrot, and J. J. Berthelier, "Comparison of magnetospheric line radiation and power line harmonic radiation: A systematic survey using the DEMETER spacecraft," *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, vol. 112, no. A4, Apr. 2007, doi: 10.1029/2006JA012134.
- [114] J. Wu, C. Zhang, L. Zeng, and Q. Ma, "Systematic investigation of power line harmonic radiation in near-Earth space above China based on observed satellite data," *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, vol. 122, no. 3, pp. 3448–3458, Mar. 2017, doi: 10.1002/2016JA023131.
- [115] T. Cussac *et al.*, "The Demeter microsatellite and ground segment," *Planet. Space Sci.*, vol. 54, no. 5, pp. 413–427, Apr. 2006, doi: 10.1016/j.pss.2005.10.013.
- [116] A. De Santis *et al.*, "Geospace perturbations induced by the Earth: The state of the art and future trends," *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*, vol. 85–86, pp. 17–33, 2015, doi: 10.1016/j.pce.2015.05.004.
- [117] R. Pfaff, H. Freudenreich, F. Simoes, and C. Liebrecht, "Observations of 50/60 Hz power line radiation in the low latitude ionosphere detected by the electric field instrument on the C/NOFS satellite," in *2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, Aug. 2014, pp. 1–1. doi: 10.1109/URSIGASS.2014.6929584.
- [118] European Space Agency (ESA), "C/NOFS." <https://www.eoportal.org/satellite-missions/cnofs#cnofs-communicationnavigation-outage-forecast-system> (accessed Sep. 30, 2022).
- [119] F. Dudkin, V. Korepanov, D. Dudkin, V. Pilipenko, V. Pronenko, and S. Klimov, "Electric field of the power terrestrial sources observed by microsatellite Chibis-M in the Earth's ionosphere in frequency range 1-60 Hz," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 42, no. 14, pp. 5686–5693, Jul. 2015, doi: 10.1002/2015GL064595.

- [120] European Space Agency (ESA), “Chibis-M.” <https://www.eoportal.org/satellite-missions/chibis-m> (accessed Sep. 30, 2022).
- [121] National Aeronautics and Space Administration (NASA), “S3-3.” <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1976-065B> (accessed Sep. 30, 2022).
- [122] H. C. Koons, M. H. Dazey, and B. C. Edgar, “Satellite observation of discrete VLF line radiation within transmitter-induced amplification bands,” *J. Geophys. Res.*, vol. 83, no. A8, p. 3887, 1978, doi: 10.1029/JA083iA08p03887.
- [123] C. Zhang and Q. Ma, “Influences of radiation from terrestrial power sources on the ionosphere above China based on satellite observation,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 153, no. 4, p. 042002, May 2018, doi: 10.1088/1755-1315/153/4/042002.
- [124] Q. Guo, J. Wu, C. Yue, and L. Xie, “Correlation Between Power Line Harmonic Radiation and Magnetospheric Line Radiation Over China,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 146857–146865, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2946099.
- [125] M. Amirkhanyan and F. Bryukhan, “Measurement errors of electromagnetic fields of industrial frequency in urban areas,” *MATEC Web Conf.*, vol. 170, p. 02020, Jun. 2018, doi: 10.1051/mateconf/201817002020.
- [126] J. T. Hambly and T. A. Zia, “Towards Detecting Extremely Low Frequency Fields Using a Wireless Sensor Network,” in *2011 12th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing*, Jul. 2011, pp. 150–156. doi: 10.1109/SNPD.2011.25.
- [127] National Centers for Environmental Information., “Geomagnetic coordinates,” 2010. https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/icons/WMM2010_coor.png (accessed Oct. 19, 2021).
- [128] C. P. Burke and D. L. Jones, “An experimental investigation of ELF attenuation rates in the Earth-ionosphere duct,” *J. Atmos. Terr. Phys.*, vol. 54, no. 3–4, pp. 243–250, Mar. 1992, doi: 10.1016/0021-9169(92)90005-6.
- [129] Yi Wang, Ye Zhou, and Qunsheng Cao, “Study of ELF Propagation Parameters Based on the Simulated Schumann Resonances,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 13, pp. 63–66, 2014, doi: 10.1109/LAWP.2013.2295630.
- [130] J. R. Carson, “Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return,” *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 5, no. 4, pp. 539–554, Oct. 1926, doi: 10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x.
- [131] M. Parise, “On the Electromagnetic Field of an Overhead Line Current Source,” *Electronics*, vol. 9, no. 12, p. 2009, Nov. 2020, doi: 10.3390/electronics9122009.
- [132] L. M. Wedepohl and A. E. Efthymiadis, “Wave propagation in transmission lines over lossy ground: a new, complete field solution,” *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 125, no. 6, p. 505, 1978, doi: 10.1049/piee.1978.0123.
- [133] A. Geri, A. Locatelli, and G. M. Veca, “Magnetic fields generated by power lines,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 31, no. 3, pp. 1508–1511, May 1995, doi: 10.1109/20.376316.

-
- [134] H. Kikuchi, "Power line transmission and radiation," *Space Sci. Rev.*, vol. 35, no. 1, May 1983, doi: 10.1007/BF00173693.
- [135] Z. Mei, S. M. Chen, F. Ma, and C. G. Deng, "Electromagnetic field in home near high voltage transmission line and shielding efficiency of structure," *Gaodianya Jishu/High Volt. Eng.*, vol. 34, no. 1, pp. 60–63, 2008.
- [136] I. Habiballah and M. M. Dawoud, "Magnetic field measurement & simulation of a 230 kV," in *Proceedings of the International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN (ICNIR 2003) Electromagnetic Fields and Our Health 20th*, 2003, p. 13.
- [137] A. Ayad, W. Krika, H. Boudjella, F. Benhamida, and A. Horch, "Simulation of the Electromagnetic Field in the Vicinity of the Overhead Power Transmission Line," *Eur. J. Electr. Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 49–53, Apr. 2019, doi: 10.18280/ejee.210108.
- [138] G. Göcsei, B. Németh, and I. Kiss, "Examination of electric and magnetic fields around high voltage equipment," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1322, no. 1, p. 012030, Oct. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1322/1/012030.
- [139] C. P. Nicolaou, A. P. Papadakis, P. A. Razis, G. A. Kyriacou, and J. N. Sahalos, "Measurements and predictions of electric and magnetic fields from power lines," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 5, pp. 1107–1116, May 2011, doi: 10.1016/j.epsr.2010.12.014.
- [140] International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)," *Health Phys.*, vol. 99, no. 6, pp. 818–836, Dec. 2010, doi: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86.
- [141] O. K. Likkason, "Exploring and Using the Magnetic Methods," in *Advanced Geoscience Remote Sensing*, InTech, 2014. doi: 10.5772/57163.
- [142] M. Sosa *et al.*, "A tangent magnetometer to measure the earth magnetic field," *Rev. Mex. Física*, vol. 49, no. 4, pp. 379–383, 2003.
- [143] R. M. Garcia Salvador, J. A. Gazquez Parra, and N. Novas Castellano, "Characterization and Modeling of High-Value Inductors in ELF Band Using a Vector Network Analyzer," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 2, pp. 415–423, Feb. 2013, doi: 10.1109/TIM.2012.2215141.
- [144] J. Wang, L. Yang, L. Gao, and Q. Miao, "Current progress on weak signal detection," in *2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*, Jul. 2013, pp. 1812–1818. doi: 10.1109/QR2MSE.2013.6625929.
- [145] X. Liu and X. Feng, "Research on weak signal detection for downhole acoustic telemetry system," in *2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing*, Oct. 2010, vol. 9, pp. 4432–4435. doi: 10.1109/CISP.2010.5647911.
- [146] S. Tajima, T. Uchiyama, Y. Okuda, and K. Wang, "Brain activity measurement in the occipital region of the head using a magneto-impedance sensor," in *2013 Seventh International Conference on Sensing Technology (ICST)*, Dec. 2013, pp. 267–270. doi: 10.1109/ICSensT.2013.6727656.

- [147] A. Mujezinović, E. Turajlić, A. Alihodžić, M. M. Dedović, and N. Dautbašić, "Calculation of Magnetic Flux Density Harmonics in the Vicinity of Overhead Lines," *Electronics*, vol. 11, no. 4, p. 512, Feb. 2022, doi: 10.3390/electronics11040512.
- [148] J. Barros, M. De Apraiz, and R. I. Diego, "Characterization of even harmonics in power system networks," in *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, May 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/I2MTC43012.2020.9128756.
- [149] P. Sivaraman and C. Sharmeela, "Power quality and its characteristics," in *Power Quality in Modern Power Systems*, Elsevier, 2021, pp. 1–60. doi: 10.1016/B978-0-12-823346-7.00001-3.
- [150] E. W. Gunther, "Interharmonics in power systems," in *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*, 2001, vol. 2, no. SUMMER, pp. 813–817. doi: 10.1109/PSS.2001.970156.
- [151] F. G. Montoya, R. Baños, A. Alcayde, and F. M. Arrabal-Campos, "Analysis of power flow under non-sinusoidal conditions in the presence of harmonics and interharmonics using geometric algebra," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 111, pp. 486–492, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.04.032.
- [152] J. Arrillaga, B. C. Smith, N. R. Watson, and A. R. Wood, *Power System Harmonic Analysis*. West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd., 1997. doi: 10.1002/9781118878316.
- [153] M. Mohammad, Y. A. Mohammad, and A. S. A. Amir, "3D electromagnetic study of transformers flux line distribution and losses determination under harmonic distortion caused by electronic equipments," *Sci. Res. Essays*, vol. 6, no. 20, pp. 4414–4420, Sep. 2011, doi: 10.5897/SRE11.901.
- [154] A. Priyadarshini, N. Devarajan, A. R. Uma Saranya, and R. Anitt, "Survey of Harmonics in Non Linear Loads," *Int. J. Recent Technol. Eng.*, pp. 2277–3878, 2012.
- [155] Jasiński *et al.*, "Influence of Measurement Aggregation Algorithms on Power Quality Assessment and Correlation Analysis in Electrical Power Network with PV Power Plant," *Energies*, vol. 12, no. 18, p. 3547, Sep. 2019, doi: 10.3390/en12183547.
- [156] I. C. Barutcu, E. Karatepe, and M. Boztepe, "Impact of harmonic limits on PV penetration levels in unbalanced distribution networks considering load and irradiance uncertainty," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 118, p. 105780, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105780.
- [157] R. Wang, J. Tian, F. Wu, Z. Zhang, and H. Liu, "PSO/GA Combined with Charge Simulation Method for the Electric Field Under Transmission Lines in 3D Calculation Model," *Electronics*, vol. 8, no. 10, p. 1140, Oct. 2019, doi: 10.3390/electronics8101140.
- [158] Ł. Michalec, M. Jasiński, T. Sikorski, Z. Leonowicz, Ł. Jasiński, and V. Suresh, "Impact of Harmonic Currents of Nonlinear Loads on Power Quality of a Low Voltage Network—Review and Case Study," *Energies*, vol. 14, no. 12, p. 3665, Jun. 2021, doi: 10.3390/en14123665.
- [159] S. Fan, "Visual analysis of electrical signals," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1865, no. 2, p. 022060, Apr. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1865/2/022060.

-
- [160] L. S. Xavier, A. F. Cupertino, H. A. Pereira, and V. F. Mendes, "Partial Harmonic Current Compensation for Multifunctional Photovoltaic Inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 12, pp. 11868–11879, Dec. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2019.2909394.
- [161] I. Hunter, "Power quality issues: a distribution company perspective," *Power Eng. J.*, vol. 15, no. 2, pp. 75–80, Apr. 2001, doi: 10.1049/pe:20010203.
- [162] T. L. Skvarenina, "The Power electronics handbook," *Choice Rev. Online*, vol. 40, no. 01, pp. 40-0320-40-0320, Sep. 2002, doi: 10.5860/CHOICE.40-0320.
- [163] D. Lumbreras, E. Gálvez, A. Collado, and J. Zaragoza, "Trends in power quality, harmonic mitigation and standards for light and heavy industries: A review," *Energies*, vol. 13, no. 21, 2020, doi: 10.3390/en13215792.
- [164] K. Alam, T. Chakraborty, S. Pramanik (Chaudhury), D. Sarddar, and S. Mal, "Measurement of Power Frequency with Higher Accuracy Using PIC Microcontroller," *Procedia Technol.*, vol. 10, pp. 849–855, 2013, doi: 10.1016/j.protcy.2013.12.430.
- [165] S. M. Ashraf, A. Gupta, D. K. Choudhary, and S. Chakrabarti, "Voltage stability monitoring of power systems using reduced network and artificial neural network," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 87, pp. 43–51, 2017, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.11.008.
- [166] R. Sinvula, K. M. Abo-Al-Ez, and M. T. Kahn, "A Proposed Harmonic Monitoring System for Large Power Users Considering Harmonic Limits," *Energies*, vol. 13, no. 17, p. 4507, Sep. 2020, doi: 10.3390/en13174507.
- [167] C. S. Kumar, P. Ramesh, G. Kasilingam, D. Ragul, and C. Bharatiraja, "The power quality measurements and real time monitoring in distribution feeders," in *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 45, pp. 2987–2992. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.980.
- [168] B. Byman, T. Yarborough, R. Schnorr Von Carolsfeld, and J. Van Gorp, "Using distributed power quality monitoring for better electrical system management," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 5, pp. 1481–1485, 2000, doi: 10.1109/28.871298.
- [169] Collins Dictionary, "Electric System." <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/electric-system> (accessed Sep. 30, 2022).
- [170] L. Matikainen *et al.*, "Remote sensing methods for power line corridor surveys," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 119, pp. 10–31, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.04.011.
- [171] Red Eléctrica de España., "El sistema eléctrico español 2021," 2022. https://www.ree.es/sites/default/files/publication/2022/03/downloadable/Avance_ISE_2021.pdf (accessed Apr. 13, 2022).
- [172] P. Gajšek, P. Ravazzani, J. Grellier, T. Samaras, J. Bakos, and G. Thuróczy, "Review of Studies Concerning Electromagnetic Field (EMF) Exposure Assessment in Europe: Low Frequency Fields (50 Hz–100 kHz)," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 13, no. 9, p. 875, Sep. 2016, doi: 10.3390/ijerph13090875.
- [173] H. Haehne, J. Schottler, M. Waechter, J. Peinke, and O. Kamps, "The footprint of atmospheric turbulence in power grid frequency measurements," *EPL (Europhysics Lett.)*, vol. 121, no. 3, p. 30001, Feb. 2018, doi: 10.1209/0295-5075/121/30001.

- [174] Boletín Oficial del Estado, *Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.*, no. 310. Madrid, 27 de diciembre de 2000, pp. 45988–46040. [Online]. Available: <http://www.boe.es/buscar/pdf/2000/BOE-A-2000-24019-consolidado.pdf>
- [175] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), “UNE-EN 50160:2011 Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución,” Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, España, 2011.
- [176] Boletín Oficial del Estado, *Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.*, no. 310. Madrid, 27 de diciembre de 2013, pp. 105198–105294.
- [177] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), “UNE-EN 50160:2011/A1 Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución,” Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, España, 2015.
- [178] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), “UNE-EN 50160:2011/A2 Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución,” Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, España, 2020.
- [179] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), “UNE-EN 50160:2011/A3 Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución,” Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, España, 2020.
- [180] M. J. Ghorbani and H. Mokhtari, “Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 5, no. 1, p. 166, Feb. 2015, doi: 10.11591/ijece.v5i1.pp166-174.
- [181] S. Kufeoglu, M. Pollitt, and K. Anaya, “Electric Power Distribution in the World: Today and Tomorrow,” 2018. doi: 10.17863/CAM.27667.
- [182] L. L. Grigsby, *Power System Stability and Control, Third Edition*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016. doi: 10.4324/b12113.
- [183] L. Rydin Gorjão *et al.*, “Open database analysis of scaling and spatio-temporal properties of power grid frequencies,” *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 1, p. 6362, 2020, doi: 10.1038/s41467-020-19732-7.
- [184] B. Hartmann, I. Vokony, and I. Táci, “Effects of decreasing synchronous inertia on power system dynamics—Overview of recent experiences and marketisation of services,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 29, no. 12, p. e12128, 2019, doi: 10.1002/2050-7038.12128.
- [185] Z. Wu *et al.*, “State-of-the-art review on frequency response of wind power plants in power systems,” *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 1–16, 2018, doi: 10.1007/s40565-017-0315-y.

-
- [186] B. S. Abdulraheem and C. K. Gan, "Power system frequency stability and control: Survey," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 11, no. 8, pp. 5688–5695, 2016.
- [187] H. Bevrani and J. Raisch, "On Virtual inertia Application in Power Grid Frequency Control," in *Energy Procedia*, 2017, vol. 141, pp. 681–688. doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.093.
- [188] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), "UNE-EN 61000-4-30:2015 Compatibilidad electromagnética (CEM) - Parte 4-30: Técnicas de ensayo y medida - Métodos de medida de la calidad de suministro.," Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, España, 2015.
- [189] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), "UNE-EN 61000-4-30:2015/AC:2017-01 Compatibilidad electromagnética (CEM) - Parte 4-30: Técnicas de ensayo y medida - Métodos de medida de la calidad de suministro.," Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, España, 2017.
- [190] Y. Liu, L. Xu, S. Zhou, L. Yang, Y. Li, and D. Feng, "Identification of Major Power Quality Disturbance Sources in Regional Grid based on Monitoring Data Correlation Analysis," in *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Nov. 2018, pp. 4257–4263. doi: 10.1109/POWERCON.2018.8602140.
- [191] A. Vinogradov, A. Vinogradova, and V. Bolshev, "Analysis of the quantity and causes of outages in LV/MV electrical grids," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 6, no. 3, 2020, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.01920.
- [192] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), "UNE-EN IEC 61000-3-2:2019 Compatibilidad electromagnética (EMC) —Parte 3-2: Límites—Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase.," Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, España, 2019.
- [193] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), "UNE-EN IEC 61000-3-12:2012 Compatibilidad electromagnética (EMC) —Parte 3-12: Límites—Límites para las corrientes armónicas producidas por los equipos conectados a las redes públicas de baja tensión con corriente de entrada >16 A y ≤ 75 A por fase.," Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, España, 2012.
- [194] D. Bellan, "On the Statistics of IEC 61000-4-7 Distortion Factors in Power Supply Systems," in *2011 First International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control*, Oct. 2011, pp. 254–257. doi: 10.1109/IMCCC.2011.259.
- [195] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), "UNE-EN 61000-4-7:2004 Compatibilidad electromagnética (CEM)— Técnicas de ensayo y medida. Guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos conectados.," Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, España, 2004.

- [196] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), "UNE-EN 61000-4-7:2004/A1:2010 Compatibilidad electromagnética (CEM)— Técnicas de ensayo y medida. Guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos co," Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, España, 2010.
- [197] I. Belyaev *et al.*, "EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses," *Rev. Environ. Health*, vol. 31, no. 3, pp. 363–369, Jan. 2016, doi: 10.1515/reveh-2016-0011.
- [198] I. C. Ahlbom, E. Cardis, A. Green, M. Linet, D. Savitz, and A. Swerdlow, "Review of the epidemiologic literature on EMF and Health.," *Environ. Health Perspect.*, vol. 109, no. suppl 6, pp. 911–933, Dec. 2001, doi: 10.1289/ehp.109-1240626.
- [199] O. Johansson, "Disturbance of the immune system by electromagnetic fields—A potentially underlying cause for cellular damage and tissue repair reduction which could lead to disease and impairment," *Pathophysiology*, vol. 16, no. 2–3, pp. 157–177, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.pathophys.2009.03.004.
- [200] S. A. Hanna, Y. Motai, W. Varhue, and S. Titcomb, "Measurement evaluations of static and low frequency magnetic fields in the near field region," *Measurement*, vol. 44, no. 8, pp. 1412–1421, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.measurement.2011.05.008.
- [201] D. F. Hollenbach and J. M. Herndon, "Deep-Earth reactor: Nuclear fission, helium, and the geomagnetic field," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 98, no. 20, pp. 11085–11090, Sep. 2001, doi: 10.1073/pnas.201393998.
- [202] WHO, "Extremely Low Frequency Fields, Environmental Health Criteria Monograph No. 238," WHO: Geneva, Switzerland, 2007.
- [203] J. H. Kim, J. K. Lee, H. G. Kim, K. B. Kim, and H. R. Kim, "Possible effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on central nerve system," *Biomolecules and Therapeutics*, vol. 27, no. 3. Korean Society of Applied Pharmacology, pp. 265–275, 2019. doi: 10.4062/biomolther.2018.152.
- [204] A. Lacy-hulbert, J. C. Metcalfe, and R. Hesketh, "Biological responses to electromagnetic fields 1," *FASEB J.*, vol. 12, no. 6, pp. 395–420, Apr. 1998, doi: 10.1096/fasebj.12.6.395.
- [205] F. Leccese, G. Salvadori, M. Casini, and M. Bertozzi, "Analysis and Measurements of Artificial Optical Radiation (AOR) Emitted by Lighting Sources Found in Offices," *Sustainability*, vol. 6, no. 9, pp. 5941–5954, Sep. 2014, doi: 10.3390/su6095941.
- [206] P. Sowa, J. Rutkowska-Talipska, K. Rutkowski, B. Kosztyła-Hojna, and R. Rutkowski, "Optical radiation in modern medicine," *Adv. Dermatology Allergol.*, vol. 4, pp. 246–251, 2013, doi: 10.5114/pdia.2013.37035.
- [207] Boletín Oficial del Estado, *Real Decreto 486/2010, de 23 de abril, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a radiaciones ópticas artificiales.*, no. 99. Madrid, 24 de abril de 2010, pp. 36103–36120.

- [208] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), *Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con las radiaciones ópticas artificiales*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), 2015. [Online]. Available: <https://www.insst.es/documents/94886/203536/Guía+técnica+para+la+evaluación+y+prevención+de+los+riesgos+relacionados+con+las+radiaciones+ópticas+artificiales/398e51ba-3a70-473c-9dde-e6eb19e4cd7c>
- [209] SCENIHR, "Possible effects of Electromagnetic Fields (EMF) on Human Health," 2007.
- [210] M. A. Persinger and W. S. Forster, "ELF rotating magnetic fields: Prenatal exposure and adult behavior," *Arch. für Meteorol. Geophys. und Bioklimatologie Ser. B*, vol. 18, no. 3–4, pp. 363–369, Sep. 1970, doi: 10.1007/BF02242887.
- [211] M. Misakian, "Extremely Low Frequency Electric and Magnetic Field Measurement Methods," in *Gaseous Dielectrics VIII*, Boston, MA: Springer US, 1998, pp. 451–457. doi: 10.1007/978-1-4615-4899-7_60.
- [212] N. Wertheimer and E. Leeper, "Electrical wiring configurations and childhood cancer," *Am. J. Epidemiol.*, vol. 109, no. 3, pp. 273–284, Mar. 1979, doi: 10.1093/oxfordjournals.aje.a112681.
- [213] M. W. Miller, "Re 'Electrical wiring configurations and childhood cancer,'" *Am. J. Epidemiol.*, vol. 112, no. 1, pp. 165–167, Jul. 1980, doi: 10.1093/oxfordjournals.aje.a112968.
- [214] A. Barker, "The possible biological effects of low-frequency electromagnetic fields. Supplement to the Public Affairs Board Report No. 10 June 1994," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 11, no. 1, pp. 27–31, Jan. 1995, doi: 10.1109/57.342042.
- [215] G. Draper, T. Vincent, M. E. Kroll, and J. Swanson, "Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study," *BMJ*, vol. 330, no. 7503, p. 1290, Jun. 2005, doi: 10.1136/bmj.330.7503.1290.
- [216] M. Feychting and M. Alhbolm, "Magnetic Fields and Cancer in Children Residing Near Swedish High-voltage Power Lines," *Am. J. Epidemiol.*, vol. 138, no. 7, pp. 467–481, Oct. 1993, doi: 10.1093/oxfordjournals.aje.a116881.
- [217] R. Górski, M. Kotwicka, I. Skibińska, M. Jendraszak, and S. Wosiński, "Effect of low-frequency electric field screening on motility of human sperm," *Ann. Agric. Environ. Med.*, vol. 27, no. 3, pp. 427–434, Sep. 2020, doi: 10.26444/aaem/116019.
- [218] F. I. Wolf *et al.*, "50-Hz extremely low frequency electromagnetic fields enhance cell proliferation and DNA damage: possible involvement of a redox mechanism," *Biochim. Biophys. Acta - Mol. Cell Res.*, vol. 1743, no. 1–2, pp. 120–129, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.bbamcr.2004.09.005.
- [219] D. A. McNamee, A. G. Legros, D. R. Krewski, G. Wisenberg, F. S. Prato, and A. W. Thomas, "A literature review: the cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields," *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, vol. 82, no. 8, pp. 919–933, Aug. 2009, doi: 10.1007/s00420-009-0404-y.

- [220] A. Trigano, O. Blandeau, M. Souques, J. P. Gernez, and I. Magne, "Clinical study of interference with cardiac pacemakers by a magnetic field at power line frequencies," *J. Am. Coll. Cardiol.*, vol. 45, no. 6, pp. 896–900, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.jacc.2004.10.072.
- [221] V. Di Lazzaro *et al.*, "A Consensus Panel Review of Central Nervous System Effects of the Exposure to Low-Intensity Extremely Low-Frequency Magnetic Fields," *Brain Stimul.*, vol. 6, no. 4, pp. 469–476, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.brs.2013.01.004.
- [222] E. B. Lyskov, J. Juutilainen, V. Jousmäki, J. Partanen, S. Medvedev, and O. Hänninen, "Effects of 45-Hz magnetic fields on the functional state of the human brain," *Bioelectromagnetics*, vol. 14, no. 2, pp. 87–95, 1993, doi: 10.1002/bem.2250140202.
- [223] A. A. Warille *et al.*, "Controversies on electromagnetic field exposure and the nervous systems of children," *Histology and Histopathology*, vol. 31, no. 5, pp. 461–468, 2016. doi: 10.14670/HH-11-707.
- [224] T. Åkerstedt, B. Arnetz, G. Ficca, L.-E. Paulsson, and A. Kallner, "A 50-Hz electromagnetic field impairs sleep," *J. Sleep Res.*, vol. 8, no. 1, pp. 77–81, Mar. 1999, doi: 10.1046/j.1365-2869.1999.00100.x.
- [225] M. S. Markov, "Expanding Use of Pulsed Electromagnetic Field Therapies," *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 26, no. 3, pp. 257–274, Jan. 2007, doi: 10.1080/15368370701580806.
- [226] V. Walsh and A. Cowey, "Transcranial magnetic stimulation and cognitive neuroscience," *Nat. Rev. Neurosci.*, vol. 1, no. 1, pp. 73–80, Oct. 2000, doi: 10.1038/35036239.
- [227] S. T. Sutbeyaz, N. Sezer, F. Koseoglu, and S. Kibar, "Low-frequency Pulsed Electromagnetic Field Therapy in Fibromyalgia," *Clin. J. Pain*, vol. 25, no. 8, pp. 722–728, Oct. 2009, doi: 10.1097/AJP.0b013e3181a68a6c.
- [228] K. Martiny, M. Lunde, and P. Bech, "Transcranial Low Voltage Pulsed Electromagnetic Fields in Patients with Treatment-Resistant Depression," *Biol. Psychiatry*, vol. 68, no. 2, pp. 163–169, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.biopsych.2010.02.017.
- [229] M. S. Lappin, F. W. Lawrie, T. L. Richards, and E. D. Kramer, "Effects of a pulsed electromagnetic therapy on multiple sclerosis fatigue and quality of life: A double-blind, placebo controlled trial," *Altern. Ther. Health Med.*, vol. 9, no. 4, pp. 38–48, 2003.
- [230] G. Bertolino, A. de Freitas Braga, K. de Oliveira Lima do Couto Rosa, L. C. de Brito Junior, and J. E. de Araujo, "Macroscopic and histological effects of magnetic field exposition in the process of tissue reparation in Wistar rats," *Arch. Dermatol. Res.*, vol. 298, no. 3, pp. 121–126, Aug. 2006, doi: 10.1007/s00403-006-0667-z.
- [231] M. Fiorani, B. Biagiarelli, F. Vetrano, G. Guidi, M. Dachà, and V. Stocchi, "In vitro effects of 50 Hz magnetic fields on oxidatively damaged rabbit red blood cells," *Bioelectromagnetics*, vol. 18, no. 2, pp. 125–131, 1997, doi: 10.1002/(SICI)1521-186X(1997)18:2<125::AID-BEM5>3.0.CO;2-4.

- [232] H. Mahaki, H. Tanzadehpanah, N. Jabarivasal, K. Sardanian, and A. Zamani, "A review on the effects of extremely low frequency electromagnetic field (ELF-EMF) on cytokines of innate and adaptive immunity," *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 38, no. 1, pp. 84–95, Jan. 2019, doi: 10.1080/15368378.2018.1545668.
- [233] Consejo de la Unión Europea, "Recomendación del Consejo de 12 de julio de 1999 relativa a la exposición del público en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz) (1999/519/CE)," *D. Of. Las Comunidades Eur.*, 1999.
- [234] A. Ahlbom *et al.*, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 74, no. 4, pp. 494–521, 1998.
- [235] European Union, "Directive 2013/35/EU, of 26 June 2013, on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields)," *Off. J. Eur. Union*, vol. L179, no. June, 2013.
- [236] Scientific Committee on Emerging Newly Identified Health Risks, "Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields," *Bioelectromagnetics*, vol. 36, no. 6, pp. 480–484, Sep. 2015, doi: 10.1002/bem.21930.
- [237] J. Park, E. Jeong, and G. Seomun, "Extremely Low-Frequency Magnetic Fields Exposure Measurement during Lessons in Elementary Schools," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 15, p. 5284, Jul. 2020, doi: 10.3390/ijerph17155284.
- [238] IEEE_SCC39, "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz," IEEE: New York, USA, 2019.
- [239] IEEE_SCC39, "IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields with Respect to Human Exposure to Such Fields, 0 Hz to 300 GHz," IEEE: New York, USA, 2021. doi: 10.1109/IEEESTD.2021.9444273.
- [240] Boletín Oficial del Estado, *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*, no. 234. Madrid, 29 de septiembre de 2001, pp. 36217–36227.
- [241] Boletín Oficial del Estado, *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*, no. 182. Madrid, 29 de julio de 2016, pp. 52811–52829.
- [242] Ministerio de Sanidad y Consumo, "Campos electromagnéticos y salud pública," 2001. <https://sanidadambiental.com/wp-content/uploads/2009/04/cemysaludpublica.pdf> (accessed Oct. 03, 2022).
- [243] Red Eléctrica de España, "Resumen sobre los campos eléctricos y magnéticos generados por las instalaciones eléctricas de alta tensión," 2016. https://www.ree.es/sites/default/files/04_SOSTENIBILIDAD/Documentos/Resumen_CEM_enero2016_v2.pdf (accessed May 10, 2021).

- [244] S. Kuusiluoma, T. Keikko, J. Hovila, and L. Korpinen, "Comparison of electric and magnetic fields from electric power systems with exposure recommendations of the European Union," in *PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409)*, 2000, vol. 2, pp. 843–848. doi: 10.1109/ICPST.2000.897131.
- [245] T. Keikko, S. Kuusiluoma, T. Sauramaki, and L. Korpinen, "Comparison of electric and magnetic fields near 400 kV electric substation with exposure recommendations of the European Union," in *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, 2002, vol. 2, no. ASIA PACIFIC, pp. 1230–1234. doi: 10.1109/TDC.2002.1177654.
- [246] S. Helhel and S. Ozen, "Assessment of occupational exposure to magnetic fields in high-voltage substations (154/34.5 kV)," *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 128, no. 4, pp. 464–470, Oct. 2007, doi: 10.1093/rpd/ncm443.
- [247] S. Ozen, "Evaluation and measurement of magnetic field exposure at a typical high-voltage substation and its power lines," *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 128, no. 2, pp. 198–205, Jun. 2007, doi: 10.1093/rpd/ncm326.
- [248] D. Vatau, F.-D. Surianu, S. Musuroi, F.-M. Frigura-Iliasa, and O. Prosteau, "220 kV and 400 kV power plant electromagnetic pollution analysis," in *2011 IEEE EUROCON - International Conference on Computer as a Tool*, Apr. 2011, pp. 1–4. doi: 10.1109/EUROCON.2011.5929407.
- [249] S. Kandel, R. Hareuveny, N.-M. Yitzhak, and R. Ruppim, "Magnetic field measurements near stand-alone transformer stations," *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 157, no. 4, pp. 619–622, Dec. 2013, doi: 10.1093/rpd/nct170.
- [250] C. P. Nicolaou, A. P. Papadakis, P. A. Razis, G. A. Kyriacou, and J. N. Sahalos, "Experimental measurement, analysis and prediction of electric and magnetic fields in open type air substations," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 90, pp. 42–54, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.epsr.2012.03.014.
- [251] K. A. Aravind *et al.*, "Extremely low frequency electric and magnetic field strengths of 400 kV transmission lines and 400kV sub-stations," in *2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition*, Apr. 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/TDC.2014.6863510.
- [252] B. A. Rachedi, A. Babouri, and Z. Xun, "Electromagnetic pollution inside high voltage substation," *Rev. Roum. des Sci. Tech. Ser. Electrotech. Energ.*, vol. 61, no. 2, pp. 178–182, 2016.
- [253] Z. H. Salih, G. T. Hasan, and M. A. Mohammed, "Investigate and analyze the levels of electromagnetic radiations emitted from underground power cables extended in modern cities," in *2017 9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, Jun. 2017, vol. 2017-Janua, pp. 1–4. doi: 10.1109/ECAI.2017.8166452.
- [254] P. C. Rathebe and T. P. Mbonane, "Emission levels of ELF magnetic fields from 132 kV distribution substations," in *2018 IEEE 4th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON)*, Nov. 2018, pp. 1–3. doi: 10.1109/GEMCCON.2018.8628573.
- [255] W. G. NIEHS, "Assessment of Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields Working Group Report," *Niehs Emfrapid*, pp. 1–523, 1998.

- [256] F. El-Marakby, "Personal Exposure to Electromagnetic Fields Emitted from Household Electrical Appliances in Alexandria," *J. High Inst. Public Heal.*, vol. 42, no. 2, pp. 224–234, Oct. 2012, doi: 10.21608/jhiph.2012.20134.
- [257] Red Eléctrica de España, "Campos eléctricos y magnéticos de 50 Hz," 2001. https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/ree_unesa_cem_2001.pdf (accessed May 10, 2021).
- [258] A. Tardon, "Exposure to extremely low frequency magnetic fields among primary school children in Spain," *J. Epidemiol. Community Heal.*, vol. 56, no. 6, pp. 432–433, Jun. 2002, doi: 10.1136/jech.56.6.432.
- [259] K. Ilonen, A. Markkanen, G. Mezei, and J. Juutilainen, "Indoor transformer stations as predictors of residential ELF magnetic field exposure," *Bioelectromagnetics*, vol. 29, no. 3, pp. 213–218, Apr. 2008, doi: 10.1002/bem.20385.
- [260] G. Thuroczy, G. Janossy, N. Nagy, J. Bakos, J. Szabo, and G. Mezei, "Exposure to 50 Hz magnetic field in apartment buildings with built-in transformer stations in Hungary," *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 131, no. 4, pp. 469–473, Jul. 2008, doi: 10.1093/rpd/ncn199.
- [261] Q. Qin, Y. Chen, T. Fu, L. Ding, J. Li, and L. Han, "Measurement and Analysis of Electromagnetic Radiation of 110KV High-Voltage Lines in One Urban Location in Chongqing P.R. China," in *2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, Jun. 2010, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICBBE.2010.5518151.
- [262] R. Hareuveny, S. Kandel, N.-M. Yitzhak, L. Kheifets, and G. Mezei, "Exposure to 50 Hz magnetic fields in apartment buildings with indoor transformer stations in Israel," *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 21, no. 4, pp. 365–371, Jul. 2011, doi: 10.1038/jes.2010.20.
- [263] M. Rössli, D. Jenni, L. Kheifets, and G. Mezei, "Extremely low frequency magnetic field measurements in buildings with transformer stations in Switzerland," *Sci. Total Environ.*, vol. 409, no. 18, pp. 3364–3369, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.05.041.
- [264] P. Nassiri *et al.*, "Investigation of extremely low frequency magnetic field (ELF-MF) flux densities in the vicinity of schools in tehran," *World Appl. Sci. J.*, vol. 20, no. 6, 2012, doi: 10.5829/idosi.wasj.2012.20.06.393.
- [265] B. S. Maluckov *et al.*, "Measurement of extremely low frequent magnetic induction in residential buildings," *Int. J. Environ. Res.*, vol. 8, no. 3, pp. 583–590, 2014, doi: 10.22059/ijer.2014.753.
- [266] P. Chadwick, "Magnetic Fields on British Trains," *Ann. Occup. Hyg.*, vol. 42, no. 5, pp. 331–335, Jul. 1998, doi: 10.1016/S0003-4878(98)00025-8.
- [267] A.-M. Hämäläinen, M. Hietanen, P. Juuti, and J. Juutilainen, "Exposure to Magnetic Fields at Work and Public Areas at the Finnish Railways," in *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*, Boston, MA: Springer US, 1999, pp. 785–787. doi: 10.1007/978-1-4615-4867-6_187.
- [268] I. Nordenson *et al.*, "Chromosomal aberrations in peripheral lymphocytes of train engine drivers," *Bioelectromagnetics*, vol. 22, no. 5, pp. 306–315, Jul. 2001, doi: 10.1002/bem.55.

- [269] Yang *et al.*, "Long-Term Monitoring of Extremely Low Frequency Magnetic Fields in Electric Vehicles," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 16, no. 19, p. 3765, Oct. 2019, doi: 10.3390/ijerph16193765.
- [270] G. Trentadue *et al.*, "Assessment of Low-Frequency Magnetic Fields Emitted by DC Fast Charging Columns," *Bioelectromagnetics*, vol. 41, no. 4, pp. 308–317, May 2020, doi: 10.1002/bem.22254.
- [271] A. Alexias *et al.*, "Extremely Low Frequency Electromagnetic Field Exposure Measurement in the Vicinity of Wind Turbines," *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 189, no. 3, pp. 395–400, Jul. 2020, doi: 10.1093/rpd/ncaa053.
- [272] M. Bagheri Hosseinabadi, N. Khanjani, M. H. Ebrahimi, and J. Biganeh, "Estimation of Thermal Power Plant Workers Exposure to Magnetic Fields and Simulation of Hazard Zones," *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 190, no. 3, pp. 289–296, Sep. 2020, doi: 10.1093/rpd/ncaa101.
- [273] J. A. Gázquez Parra, M. Fernández-Ros, N. Novas Castellano, and R. M. García Salvador, "Techniques for Schumann Resonance Measurements: A Comparison of Four Amplifiers With a Noise Floor Estimate," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 64, no. 10, pp. 2759–2768, Oct. 2015, doi: 10.1109/TIM.2015.2420376.
- [274] C. Cano Domingo, M. Fernandez Ros, N. Novas Castellano, and J. A. G. Parra, "Diurnal and Seasonal Results of the Schumann Resonance Observatory in Sierra De Filabres, Spain," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 69, no. 10, pp. 6680–6690, Oct. 2021, doi: 10.1109/TAP.2021.3069537.
- [275] M. Soler-Ortiz, M. Fernández-Ros, N. Novas Castellano, and J. A. Gázquez Parra, "A New Way of Analyzing the Schumann Resonances: A Statistical Approach," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, pp. 1–11, 2021, doi: 10.1109/TIM.2021.3073435.
- [276] E. and E. Scientific Committee on Health and Scientific Committee on Emerging Newly Identified Health Risks, "Opinion on the need of a revision of the annexes in the Council Recommendation 1999/519/EC and Directive 2013/35/EU, in view of the latest scientific evidence available with regard to 18 radiofrequency (100kHz - 300GHz)," 2022. https://health.ec.europa.eu/system/files/2022-08/scheer_o_044_0.pdf (accessed Sep. 20, 2022).
- [277] J. E. Moulder, Commission on Life Sciences, and N. R. Council, "Possible Health Effects of Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields," *Radiat. Res.*, vol. 148, no. 1, p. 101, Jul. 1997, doi: 10.2307/3579544.
- [278] B. Weidema, H. Wenzel, C. Petersen, and K. Hansen, "The product, functional unit and reference flows in LCA," 2004. [Online]. Available: <http://gfc.force.dk/resources/777.pdf>
- [279] Texas Instruments, "INA 188 datasheet." https://www.ti.com/product/INA188?keyMatch=INA_188&tisearch=search-everything (accessed Nov. 24, 2021).
- [280] Linear Technology, "LT1490 datasheet." <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/14901fb.pdf> (accessed Jun. 24, 2021).

- [281] Texas Instruments, "CC3220SF datasheet." https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc3220sf.pdf?ts=1624459354119&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FC3220SF%253FkeyMatch%253DCC3220SF%2526tsearch%253Dsearch-everything (accessed Jun. 24, 2021).
- [282] Texas Instruments., "Microcontroller LaunchPad." <https://www.ti.com/tool/CC3220SF-LAUNCHXL> (accessed Aug. 31, 2021).
- [283] European Commission., "Photovoltaic Geographical Information System." <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis> (accessed Jun. 24, 2021).
- [284] PowerFilm Solar, "MP7.2-150F." <https://www.powerfilmsolar.com/products/electronic-component-solar-panels/classic-application-series/mp7-2-150f> (accessed Sep. 30, 2022).
- [285] H. Beltran, P. Ayuso, and E. Pérez, "Lifetime Expectancy of Li-Ion Batteries used for Residential Solar Storage," *Energies*, vol. 13, no. 3, p. 568, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13030568.
- [286] International Energy Agency, "Spain 2021 Energy Policy Review." <https://iea.blob.core.windows.net/assets/2f405ae0-4617-4e16-884c-7956d1945f64/Spain2021.pdf> (accessed Feb. 09, 2021).
- [287] European Union, "Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).," *Off. J. Eur. Union*, vol. L197/38, 2012.
- [288] Boletín Oficial del Estado, *Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos*, no. 45. Madrid, 21 de febrero de 2015, pp. 14211–14312.
- [289] European Central Bank (ECB), "ECB Economic Bulletin, Issue 4," 2021.
- [290] Eurostats, "Electricity prices components for industrial consumers - annual data (from 2007 onwards) [nrg_pc_205_c]," 2021. <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do> (accessed Jun. 07, 2021).
- [291] GreenDelta, "OpenLCA Software." <http://openlca.org> (accessed May 31, 2021).
- [292] SimaPro, "SimaPro Software." <http://simapro.com> (accessed May 31, 2021).
- [293] Sphere Solutions, "GaBi Software." <http://gabi-software.com> (accessed May 31, 2021).
- [294] NIST, "BEES Software." <https://www.nist.gov/services-resources/software/bees> (accessed May 31, 2021).
- [295] D. A. Lopes Silva, A. Oliveira Nunes, V. A. da Silva Moris, C. Moro Piekarski, and T. Oliveira Rodrigues, "How important is the LCA software tool you choose? Comparative results from GaBi, openLCA, SimaPro and Umberto," in *VII Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida en Latinoamérica (CILCA)*, 2017, pp. 1–6.
- [296] A. Ciroth, C. Di Noi, S. Burhan, and M. Srocka, "LCA database creation," *Indones. J. Life Cycle Assess. Sustain.*, vol. 3, no. 2, Dec. 2019, doi: 10.52394/ijolcas.v3i2.105.

- [297] “The New Circular Economy Action Plan,” *FEEM Policy Br.*, no. 09–2020, 2020, [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-consumption-production/>
- [298] C. L. Simões, L. M. Costa Pinto, R. Simoes, and C. A. Bernardo, “Integrating environmental and economic life cycle analysis in product development: a material selection case study,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 18, no. 9, pp. 1734–1746, Nov. 2013, doi: 10.1007/s11367-013-0561-9.
- [299] W. Klöpffer and B. Grahl, *Life Cycle Assessment (LCA)*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2014. doi: 10.1002/9783527655625.
- [300] M. Fernández-Ros, J. A. Gázquez Parra, R. M. García Salvador, and N. N. Castellano, “Optimization of the periodogram average for the estimation of the power spectral density (PSD) of weak signals in the ELF band,” *Measurement*, vol. 78, pp. 207–218, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.measurement.2015.10.006.
- [301] “openZmeter, What is openZmeter? Smart metering and power quality analysis for the people,” 2018. <https://openzmeter.com/> (accessed Dec. 17, 2021).
- [302] E. Viciano *et al.*, “OpenZmeter: An Efficient Low-Cost Energy Smart Meter and Power Quality Analyzer,” *Sustainability*, vol. 10, no. 11, p. 4038, Nov. 2018, doi: 10.3390/su10114038.
- [303] E. Viciano, A. Alcayde, F. Montoya, R. Baños, F. Arrabal-Campos, and F. Manzano-Agugliaro, “An Open Hardware Design for Internet of Things Power Quality and Energy Saving Solutions,” *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 627, Feb. 2019, doi: 10.3390/s19030627.
- [304] Y.-Y. Chen and Y.-H. Lin, “A Smart Autonomous Time- and Frequency-Domain Analysis Current Sensor-Based Power Meter Prototype Developed over Fog-Cloud Analytics for Demand-Side Management,” *Sensors*, vol. 19, no. 20, p. 4443, Oct. 2019, doi: 10.3390/s19204443.
- [305] Y.-Y. Chen, Y.-H. Lin, C.-C. Kung, M.-H. Chung, and I.-H. Yen, “Design and Implementation of Cloud Analytics-Assisted Smart Power Meters Considering Advanced Artificial Intelligence as Edge Analytics in Demand-Side Management for Smart Homes,” *Sensors*, vol. 19, no. 9, p. 2047, May 2019, doi: 10.3390/s19092047.
- [306] J. Luque, D. Anguita, F. Pérez, and R. Denda, “Spectral Analysis of Electricity Demand Using Hilbert–Huang Transform,” *Sensors*, vol. 20, no. 10, p. 2912, May 2020, doi: 10.3390/s20102912.
- [307] G. Artale *et al.*, “PQ and Harmonic Assessment Issues on Low-Cost Smart Metering Platforms: A Case Study,” *Sensors*, vol. 20, no. 21, p. 6361, Nov. 2020, doi: 10.3390/s20216361.
- [308] F. Montoya, F G; Baños, R; Alcayde, A; Arrabal-Campos, “Efficient open-source power quality analyser and smart meter,” *25th Int. Conf. Electr. Distrib. CIRED 2019*, 2019.
- [309] M. Sundling, N. Sukumar, H. Zhang, M. J. Embrechts, and C. M. Breneman, “Wavelets in Chemistry and Cheminformatics,” in *Reviews in Computational Chemistry*, vol. 22, 2006, pp. 295–329. doi: 10.1002/0471780367.ch5.

-
- [310] M. Aiello, A. Cataliotti, and S. Nuccio, "A PC-based instrument for harmonics and interharmonics measurement in power supply systems," *Measurement*, vol. 35, no. 4, pp. 371–380, Jun. 2004, doi: 10.1016/j.measurement.2004.03.005.
- [311] Comisión Europea - Dirección General de Empleo Asuntos sociales e Inclusión, "Guía no vinculante de buenas prácticas para la aplicación de la Directiva 2013/35/UE sobre campos electromagnéticos: guía para las pymes," *Of. Publicaciones*, 2015, doi: 10.2767/07708.
- [312] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), "Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de la exposición a campos electromagnéticos en los lugares de trabajo.," *INSHT*, p. 71, 2019.
- [313] C. Price, "ELF Electromagnetic Waves from Lightning: The Schumann Resonances," *Atmosphere (Basel)*, vol. 7, no. 9, p. 116, Sep. 2016, doi: 10.3390/atmos7090116.
- [314] S. Y. Sondkar, S. Dudhane, and H. K. Abhyankar, "Frequency measurement methods by signal processing techniques," in *Procedia Engineering*, 2012, vol. 38, pp. 2590–2594. doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.304.
- [315] A. Waris *et al.*, "The effect of time on EMG classification of hand motions in able-bodied and transradial amputees," *J. Electromyogr. Kinesiol.*, vol. 40, pp. 72–80, 2018, doi: 10.1016/j.jelekin.2018.04.004.
- [316] D. C. Toledo-Perez, J. Rodriguez-Resendiz, and R. A. Gomez-Loenzo, "A study of computing zero crossing methods and an improved proposal for EMG signals," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 8783–8790, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2964678.
- [317] M. N. Nehdi, W. Nsibi, A. Chammam, A. Sellami, and G. Zissis, "Harmonic characterization of HPS lamp fed by two supply modes," in *2015 7th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, Dec. 2015, pp. 1–3. doi: 10.1109/ICMIC.2015.7409420.
- [318] Instituto Nacional de Estadística (INE), "2011-2015 climatology." <https://www.ine.es/daco/daco42/bme/c19.pdf> (accessed Jun. 24, 2021).
- [319] N. El-Sayed, I. A. Stefanovici, G. Amvrosiadis, A. A. Hwang, and B. Schroeder, "Temperature management in data centers," in *Proceedings of the 12th ACM SIGMETRICS/PERFORMANCE joint international conference on Measurement and Modeling of Computer Systems - SIGMETRICS '12*, 2012, vol. 40, no. 1 SPEC. ISS., p. 163. doi: 10.1145/2254756.2254778.
- [320] F. Baena, F. J. Muñoz-Rodríguez, P. Gómez Vidal, and G. Almonacid, "A New Approach to Estimate from Monitored Demand Data the Limit of the Coverage of Electricity Demand through Photovoltaics in Large Electricity Grids," *Sensors*, vol. 20, no. 16, p. 4390, Aug. 2020, doi: 10.3390/s20164390.
- [321] T. M. Blooming and D. J. Carnovale, "Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits," in *Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, 2006, pp. 1–9. doi: 10.1109/PAPCON.2006.1673767.

Resumen

El objetivo de esta tesis se centra en el estudio de las ondas electromagnéticas en el rango de frecuencia de 3 Hz a 2,2 kHz producidas por las líneas de distribución de energía eléctrica y los dispositivos conectados a ella. Estas emisiones fueron medidas por un magnetómetro diseñado específicamente para tal fin, junto con todo el sistema de adquisición de datos, procesado de señal, etc. Se va a detallar como se tuvieron en cuenta parámetros medioambientales y económicos para escoger la mejor opción de diseño del hardware mediante el análisis del ciclo de vida y el análisis de costes del ciclo de vida. Una vez hecho esto, con los datos obtenidos por el sistema, se estudiaron algunos parámetros de calidad de energía eléctrica de una manera no invasiva, tales como la frecuencia de la red eléctrica y la tasa de distorsión armónica en corriente. Por último, el posible efecto de la exposición a los campos de 50 Hz en entornos residenciales plantea la cuestión de cómo se deben medir y monitorizar, ya que uno de los objetivos que promueve la Organización Mundial de la Salud dentro de su sección de “Campos Electromagnéticos y Salud Pública” es que la exposición, ya sea para trabajadores o para el público en general, debe ser monitorizada para asegurar que los límites no se superan. De esta manera hemos establecido una metodología para analizar la ratio de exposición humana al campo magnético y estudiar como contribuyen las diferentes bandas de frecuencia a esta ratio de exposición. Además otras características de los campos magnéticos, tales como armónicos, transitorios, cambios espaciales y temporales, entre otros, han recibido relativamente poca atención en los estudios de posibles efectos biológicos y de salud. Tras una profunda revisión de la normativa internacional y estatal actual, tanto en materia de calidad eléctrica como en relación con los posibles efectos de los campos magnéticos a la salud, pensamos que esta tesis podría aportar una valiosa información no disponible en este momento sobre los niveles de este tipo de campos en el entorno de un campus universitario como el de la Universidad de Almería, donde diariamente hay una gran cantidad de personas que trabajan y estudian.

