



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

- Estudio teórico-práctico de un instrumento de medida de campos electromagnéticos. Aplicación a una práctica docente.
- Theoretical and practical study of an electromagnetic fields measurement instrument. Application to a practical class.
- Étude théorique et pratique d'un instrument de mesure des champs électromagnétiques. Application à une pratique pédagogique.

Autor

Álvaro Domínguez Tomás

Director

Antonio Usón Sardaña

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2022



Índice

1. Resumen, Abstract, Résumé	5
Estudio teórico-práctico de un instrumento de medida de campos electromagnéticos. Aplicación a una práctica docente.	5
Theoretical and practical study of an electromagnetic fields measurement instrument. Application to a practical class.	5
Étude théorique et pratique d'un instrument de mesure des champs électromagnétiques. Application à une pratique pédagogique.	6
2. Objetivos	7
3. Introducción	8
4. Campos electromagnéticos: principios físicos y cálculo numérico	10
4.1. Campos electromagnéticos estáticos.	10
4.2. Campos electromagnéticos variables.	11
4.3. Simulación numérica mediante métodos de elementos finitos.	12
5. Impactos de los campos electromagnéticos	13
5.1. Energía de las radiaciones electromagnéticas.	13
5.2. Evolución de la investigación sobre efectos fisiológicos los CEMs de muy baja frecuencia.	14
5.3. Efectos fisiológicos de los CEMs de alta intensidad durante la exposición puntual.	15
5.4. Dificultad en las investigaciones.	16
5.5. Estudios sobre los posibles efectos fisiológicos de los CEMs a largo plazo.	17
5.6. Impacto social y opinión pública.	18
5.7. Campos electromagnéticos y Objetivos de Desarrollo Sostenible.	19
6. Medición de CEMs	21
7. Estudio del instrumento	23
7.1. Descripción del instrumento de medidas de CEMs.	23
7.2. Puesta a punto y verificación de medidas.	24
8. Integración del analizador en la práctica docente, participación activa	25
8.1. Concepto de la práctica.	25
8.2. Aportaciones activas a la práctica.	25
9. Conclusión, líneas futuras de trabajo.	27
Bibliografía	28

Listado de figuras

<i>Figura 1: Representación de onda electromagnética A.Usón, LíneasEléctricas 2002.</i>	11
<i>Figura 2: Distribución del campo eléctrico [*]</i>	12
<i>Figura 3: Espectro electromagnético, extraído de Wikipedia, realizado por Horst Frank, 2005.</i>	13
<i>Figura 4: Inducción en el sistema nervioso central, magnitudes, A. Usón. Líneas Eléctricas 2002.</i>	15
<i>Figura 5: Iconos de ODS, www.un.org (2022).</i>	19
<i>Figura 6: Spectran NF-5035, aaronia-shop.com</i>	22
<i>Figura 7: Valores de inducción magnética para líneas de diferentes niveles de tensión respecto a la distancia vertical a los conductores.</i>	36
<i>Figura 8: Comparación entre el campo magnético generado en línea aérea y línea subterránea de características similares.</i>	37
<i>Figura 9: Spectran NF-5035, aaroniaag/shop.com</i>	48
<i>Figura 10: Sanwa TM 200, ref [35]</i>	48
<i>Figura 11: Línea de 45kV en Zaragoza, Procedimiento de medida, 2022.</i>	49
<i>Figura 12: Distribución del campo eléctrico en línea 45kV Duplex con Spectran NF.</i>	49
<i>Figura 13: Distribución de campo magnético en línea 45kV Duplex con Spectran NF y Sanwa TM bajo un apoyo.</i>	50
<i>Figura 14: Distribución de campo magnético en línea 45kV Duplex con Spectran NF y Sanwa TM en la mitad del vano.</i>	51
<i>Figura 15: Línea aérea de 220kV Duplex, subestación de Peñaflo, 2022.</i>	51
<i>Figura 16: Distribución de campo eléctrico en línea 220kV Duplex con Spectran NF.</i>	52
<i>Figura 17: Línea aérea de 400kV y procedimiento de medida, subestación de Peñaflo, 2022.</i>	53
<i>Figura 18: Distribución de componente vertical del campo eléctrico en línea 400kV con Spectran NF, variación del tiempo de muestreo.</i>	54
<i>Figura 19: Distribución de componente horizontal del campo eléctrico en línea 400kV con Spectran NF, variación del tiempo de muestreo.</i>	55
<i>Figura 20: Distribución del campo magnético en línea 400kV con Spectran NF, variación de la altura respecto al suelo.</i>	56
<i>Figura 21: Esquema del relieve de la zona de medidas. Icono [36]</i>	57
<i>Figura 22: Comparación de mediciones de campo magnético entre Spectran NF [Tabla 20] y Sanwa TM [Tabla 21], línea 400kV.</i>	58
<i>Figura 23: Preparación de los experimentos en el laboratorio.</i>	59
<i>Figura 24: Distribución de medidas de campo eléctrico del Experimento 1.</i>	60
<i>Figura 25: Distribución de medidas de campo eléctrico del Experimento 2.</i>	61
<i>Figura 26: Distribución de medidas de campo eléctrico del Experimento 3.</i>	62
<i>Figura 27: Comparación de los resultados</i>	62
<i>Figura 28: Evolución temporal del campo eléctrico medido por el Spectran NF funcionando como Logger.</i>	64
<i>Figura 29: Análisis del desarrollo del experimento con los resultados del Logger.</i>	65

Listado de tablas

<i>Tabla 1: Basic restrictions for human exposure to time-varying electric and magnetic fields. [37]</i>	15
<i>Tabla 2: Niveles de referencia para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (0 Hz-300 GHz, valores rms imperturbados, frecuencias en kHz).</i>	32
<i>Tabla 3: Niveles de referencia para corrientes de contacto procedentes de objetos conductores.</i>	32
<i>Tabla 4: Niveles de acción para campo eléctrico (E) de 1 Hz a 10 MHz</i>	33
<i>Tabla 5: Niveles de acción para campo magnético (B) de 1Hz a 10MHz</i>	33
<i>Tabla 6: Niveles de acción para la corriente de contacto IC</i>	33
<i>Tabla 7: Niveles de referencia para la exposición del público en general a CEMs variables.</i>	34
<i>Tabla 8: Niveles de referencia para la exposición del profesional a CEMs variables.</i>	35
<i>Tabla 9: Niveles de referencia de corrientes de contacto transitorias.</i>	35
<i>Tabla 10: Rangos límites de corrientes de contacto para efectos indirectos en las personas.</i>	35
<i>Tabla 11: Campos magnéticos producidos por electrodomésticos.</i>	37
<i>Tabla 12: Valores de campo magnético para algunos equipos de la industria ligera.</i>	38
<i>Tabla 13: Límites de exposición, recopilación.</i>	39
<i>Tabla 14: Medidas de campo eléctrico en línea 45kV Duplex con Spectran NF</i>	49
<i>Tabla 15: Medidas de campo magnético en línea 45kV Duplex con Spectran NF y Sanwa TM bajo un apoyo.</i>	50
<i>Tabla 16: Medidas de campo magnético en línea 45kV Duplex con Spectran NF y Sanwa TM en la mitad del vano.</i>	50
<i>Tabla 17: Medidas de campo eléctrico en línea 220kV Duplex con Spectran NF</i>	52
<i>Tabla 18: Medidas de componente vertical del campo eléctrico en línea 400kV con Spectran NF, variación del tiempo de muestreo.</i>	54
<i>Tabla 19: Medidas de componente horizontal del campo eléctrico en línea 400kV con Spectran NF, variación del tiempo de muestreo.</i>	55
<i>Tabla 20: Medición del campo magnético en línea 400kV con Spectran NF, variación de la altura respecto al suelo.</i>	56
<i>Tabla 21: Medición y módulo de componentes direccionales del campo magnético, línea 400kV con Sanwa TM 200.</i>	58
<i>Tabla 22: Experimento 1, medidas de campo eléctrico sin pantalla.</i>	60
<i>Tabla 23: Experimento 2, medidas de campo eléctrico con pantalla aislada de tierra.</i>	60
<i>Tabla 24: Experimento 3, medidas de campo eléctrico con pantalla conectada a tierra.</i>	61
<i>Tabla 25: Datos de campo eléctrico proporcionados por la función Logger del Spectran NF, Experimento con pantalla conectada a tierra.</i>	64

Listado de fórmulas

Fórmula 1.1: Relación de frecuencia y longitud de una onda	12
Fórmula 1.2: Relación de Planck-Einstein	12



1. Resumen, Abstract, Résumé

*Estudio teórico-práctico de un instrumento de medida de campos electromagnéticos.
Aplicación a una práctica docente.*

Este trabajo se dedica al estudio teórico-práctico del analizador de espectros electromagnéticos Spectran NF-5035 de la marca AARONIA AG para implementar su utilización en las prácticas docentes universitarias en el ámbito de los campos electromagnéticos de baja frecuencia. La intención es aprovechar las posibilidades que ofrece este aparato para suplementar la formación de los alumnos con experimentos y mediciones que no se podían realizar previamente.

Se complementa con una reflexión sobre la importancia de la formación en el ámbito de los campos electromagnéticos para un ingeniero eléctrico, con un repaso a la teoría relativa a la creación de estos campos y con un trabajo de revisión de los conocimientos científicos actuales sobre el impacto fisiológico y medioambiental que estos pueden llegar a tener.

Posteriormente se presenta un manual “adaptado” para su implementación en prácticas docentes junto con las medidas realizadas durante la puesta a punto del analizador y durante los primeros experimentos que se realizaron en las prácticas docentes.

*Theoretical and practical study of an electromagnetic fields measurement instrument.
Application to a practical class.*

This Project is dedicated to the theoretical and practical study of the Sprectran NF-5035 electromagnetic field analyzer, from the brand Aaronia AG. The objective is to implement its utilization in the university practical classes, in the ambit of low frequency electromagnetic fields. The intention is to take advantage of the possibilities offered by this instrument to supplement the formation of the students. This will be achieved through experiments and measurements that could not be previously performed.

This project is completed with a reflection on the importance of training in the subject of EMFs for an electrical engineer and a study of the theory referent to their creation. It is followed by a review of the scientific knowledge available about the physiological and environmental impacts the EMFs could have.

Subsequently, a manual “adapted” to the utilization of the instrument for practical classes is presented, as well as the measurements that took place during the instrument’s initial adjustments and during the experiments performed in the practical classes taught.



Étude théorique et pratique d'un instrument de mesure des champs électromagnétiques.
Application à une pratique pédagogique.

Ce projet a pour but l'étude théorique et pratique de l'analyseur de champs électromagnétiques Spectran NF-5035 de la marque AARONIA AG, qui pourra ensuite être utilisé lors de futurs travaux pédagogiques universitaires dans le domaine des champs électromagnétiques de basse fréquence . L'objectif est de profiter des possibilités qu'offre l'appareil avec des expériences et des mesures qui ne pouvaient pas être contemplées auparavant, ce rajouti rendant les futures études pratiques plus riches.

Le projet continue ensuite avec une réflexion sur l'importance d'une formation de qualité pour un ingénieur électrique qui se développe dans le domaine des champs électromagnétiques, d'une révision de la théorie en relation avec la création des CEMs, ainsi que d'un résumé des connaissances scientifiques actuelles sur l'impact physiologique et ambiental que les CEMs peuvent provoquer.

Postérieurement se trouvent un manuel « simplifié » de l'appareil pour son intégration dans les pratiques pédagogiques et les mesures réalisées pendant la mise au point de l'appareil et pendant les premières séances de pratiques réalisées.



2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es poner a disposición de los futuros alumnos una herramienta que complemente su formación en el ámbito de los campos electromagnéticos de baja frecuencia (CEMs).

Se pretende aprender a utilizar con destreza un analizador de CEMs, que pertenece al departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza para usarlo durante las prácticas docentes de la asignatura “Líneas Eléctricas”, entre otras, impartida en el segundo semestre del tercer curso del Grado en Ingeniería Eléctrica.

Los apartados iniciales de este trabajo se dedican a una introducción didáctica a la teoría de creación de CEMs, así como al estudio del impacto ambiental y fisiológico demostrado que pueden llegar a tener estos mismos. También se describen las líneas de investigación actuales sobre los posibles efectos de los CEMs todavía desconocidos.

Posteriormente, se realiza un estudio del instrumento en cuestión. Inicialmente se repasa brevemente el funcionamiento físico de los principales tipos de sensores de CEMs y posteriormente se explican las principales características del Spectran NF-5035 y sus modos de operación, con la intención de exponer el abanico de posibilidades que ofrece este aparato al estudiar CEMs.

Finalmente, en esta línea de trabajo se propone redactar un pequeño manual del instrumento, adaptado para que futuros alumnos y profesores entiendan rápidamente, de manera sencilla y en profundidad el funcionamiento y las principales características del analizador para implementar su utilización en prácticas docentes.



3. Introducción

En el contexto de la ingeniería eléctrica y el transporte de energía, la Transición ecológica y la Agenda 2030 son temas a la orden del día. La comunidad internacional se comprometió a alcanzar la neutralidad de emisiones antes del 2100. En 2011, la Unión Europea confirmó sus objetivos de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 80% y un 95% respecto al nivel de 1990, esto antes del 2050. Ligadas a este desarrollo sostenible, la demanda energética y la generación eléctrica están destinadas a evolucionar de manera muy importante a lo largo de los próximos años. Por ejemplo, el sector del transporte se expandirá hacia la movilidad eléctrica: se prevé que para 2050 la gran mayoría de coches serán eléctricos y se pretende que el transporte de mercancías se realice principalmente con ferrocarril eléctrico (en el 2015 el 95% del tránsito de mercancías a nivel mundial conllevó un tránsito con vehículo de combustión). [1, 2]

Para alcanzar estos objetivos, es necesario modificar el tipo de energía consumida (a fecha de hoy solo el 42% de la energía utilizada en España es eléctrica) así como su generación (alrededor del 40% de la energía producida en España en 2021 fue renovable). [1, 2]

Conseguir estos niveles de penetración significaría instalar entre 150 y 200 GW de generación eléctrica renovable (eólica, solar fotovoltaica y bombeo hidráulico) en los próximos años, lo que impulsará la creación de numerosas líneas de alta tensión en la Península Ibérica. [1, 2]

Por estas razones, muchos ingenieros eléctricos se dedicarán al sector del transporte de energía eléctrica y la construcción de líneas de alta tensión en el futuro. En el contexto de la formación de un ingeniero eléctrico y de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), es importante incluir la educación sobre el impacto a nivel económico, social y medioambiental de este tipo de proyectos en alta tensión.

Complementariamente y cómo se explicará más adelante, la opinión pública tiene una visión extremadamente negativa sobre las líneas de alta tensión. La realidad es que la mayoría de la población cree profundamente que las líneas de transporte eléctrico tienen efectos muy negativos para su salud, a menudo desde el desconocimiento más básico de los fenómenos físicos en juego. Es también muy común que la persona media sin formación técnica no se pare a reflexionar sobre la importancia que tiene la electricidad en sus vidas y como esta llega a sus casas, dándola por sentado en la mayoría de los casos. Tampoco se suelen mencionar otras fuentes de CEMs menos aparentes a las que estamos expuestos a diario y que podrían tener efectos perjudiciales. Un ingeniero que planifique nuevas líneas se enfrentará a un rechazo generalizado por parte de ayuntamientos, particulares y asociaciones. Es por ello que deberá ser responsable y conocer que impactos provoca y cómo afectan al medio, así como aspirar a minimizarlos en tanto y cuanto sean posibles. El técnico debe intentar tener una opinión sólida y fundamentada



para informar al público de forma didáctica, precisa y honesta sobre este tema cuando surjan conflictos.



4. Campos electromagnéticos: principios físicos y cálculo numérico

Un campo electromagnético se manifiesta como una modificación de las propiedades físicas del espacio, produciendo fuerzas en las cargas eléctricas tanto estáticas como en movimiento.

Usualmente, el campo electromagnético se divide en una "parte eléctrica" y en una "parte magnética", pero para explicar ciertos fenómenos, es necesario tratarlas conjuntamente como una unidad que cumple unas leyes físicas definidas (Ecuaciones de Maxwell).

La oscilación o aceleración de cargas eléctricas produce una propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas que se desplazan a la velocidad de la luz llamadas radiación electromagnética. La radiación electromagnética no necesita de un medio físico para propagarse (puede propagarse en el vacío).

La forma en la que se manifiestan estas ondas dependen de la fuente que las ha generado (cargas aceleradas, dipolos oscilantes, corrientes).

4.1. Campos electromagnéticos estáticos.

Los campos eléctricos estáticos se originan por la presencia de cargas eléctricas que no se mueven ni varían con el tiempo. Cada carga eléctrica genera a su alrededor un campo eléctrico "E", que es una magnitud vectorial con unidades de [Voltio/metro] y que se atenúa con la distancia, por lo que consiste de un valor numérico, una dirección y un sentido. Un ejemplo de campo eléctrico estático es el que generan las cargas eléctricas de las nubes antes de una descarga atmosférica (rayo).

Los campos magnéticos estáticos son generados por imanes permanentes o por cargas eléctricas constantes que se mueven en forma de corriente continua. Las cargas eléctricas en movimiento (corriente eléctrica) producen un campo magnético "B" que también es una magnitud vectorial con unidades de [Tesla].

La Tierra genera naturalmente un buen ejemplo de campo magnético estático (geomagnético). El movimiento constante entre el núcleo sólido del planeta y los metales fundidos e ionizados a su alrededor, debido a la presión y las altas temperaturas genera una corriente eléctrica tan intensa que el campo magnético estático resultante escapa hasta la atmósfera, donde cumple la importante tarea de desviar otras radiaciones electromagnéticas provenientes del Sol y del espacio. Es también con este campo con el que se orientan las brújulas y muchos de los animales migratorios. El módulo del campo magnético terrestre en la Península Ibérica tiene un valor en torno a los 45 microTeslas, siendo su componente horizontal de 25 microTeslas.

El caso de los imanes permanentes es particular porque no hay corrientes eléctricas involucradas, sino que estos materiales generan un campo magnético debido a ciertos fenómenos atómicos relacionados con el movimiento de los electrones y la existencia de dominios magnéticos. [3, 4]

4.2. Campos electromagnéticos variables.

Los campos electromagnéticos variables se originan por la presencia de cargas eléctricas que se mueven y varían con el tiempo. Si estas variaciones son cíclicas se les asigna una frecuencia [Hertzios]. Los campos de frecuencia extremadamente baja se encuentran en el rango de frecuencia de 1 Hz a 3 kHz y suelen ser generados tanto por las líneas de transporte como por todos los aparatos y maquinaria eléctrica y electrónica que funcionan conectados a la red (50 o 60 Hz), que son el punto de interés de este trabajo.

La principal diferencia entre los campos variables y los estáticos es la inducción mutua entre la parte magnética y la parte eléctrica del campo. Si se da un cambio en el campo magnético, este induce un campo eléctrico. En presencia de cargas libres, un campo eléctrico variable puede desplazar las cargas e inducir una corriente eléctrica variable, la cual genera un campo magnético.

Se pueden considerar ambas partes como vectores y existirá parte magnética y eléctrica al mismo tiempo. A esta combinación de dos ondas perpendiculares en el espacio que viajan en la misma dirección y sentido se les asocia un vector conocido como vector de Poynting que representa la energía que transporta la radiación.

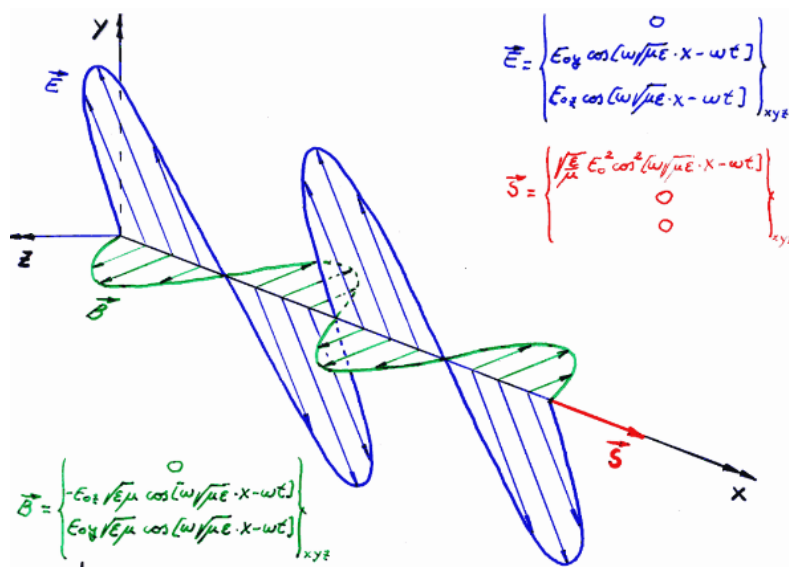


Figura 1: Representación de onda electromagnética A.Usón, LíneasEléctricas 2002.

Este fenómeno se puede explicar con la ley de Faraday-Lenz y la ley de Ampère generalizada, las cuales aparte de relacionar los campos, tienen otras aplicaciones prácticas en motores y generadores eléctricos.

En el transporte de energía eléctrica, la inducción de fuerzas electromotrices debidas a la ley de Faraday puede dar lugar a situaciones muy peligrosas no previstas durante las labores de mantenimiento.

Los fenómenos de inducción electrostática (de origen distinto a los de la inducción electromagnética) también se deben tener en cuenta en las inmediaciones de las líneas de transporte en alta tensión. Los objetos metálicos aislados eléctricamente del suelo y expuestos a campos eléctricos de baja frecuencia o frecuencia cero (continuos) pueden almacenar carga eléctrica. Cuando una persona hace contacto con uno de estos objetos, se produce una descarga en forma de chispas con corrientes transitorias asociadas. La legislación contempla límites admisibles para este tipo de corrientes. [3, 4]

4.3. Simulación numérica mediante métodos de elementos finitos.

Actualmente se emplean herramientas informáticas para realizar simulaciones numéricas capaces de estimar de forma muy exacta el valor de los campos eléctricos y magnéticos.

Cómo ejemplo de los anteriores, se muestran a continuación los resultados obtenidos con una de estas aplicaciones de acceso libre y ampliamente empleada académicamente. Se trata del programa de elementos finitos FEMM 2D desarrollado por D. Meeker.

La figura muestra la distribución de campo eléctrico en el entorno de una línea de doble circuito de 400 kV.

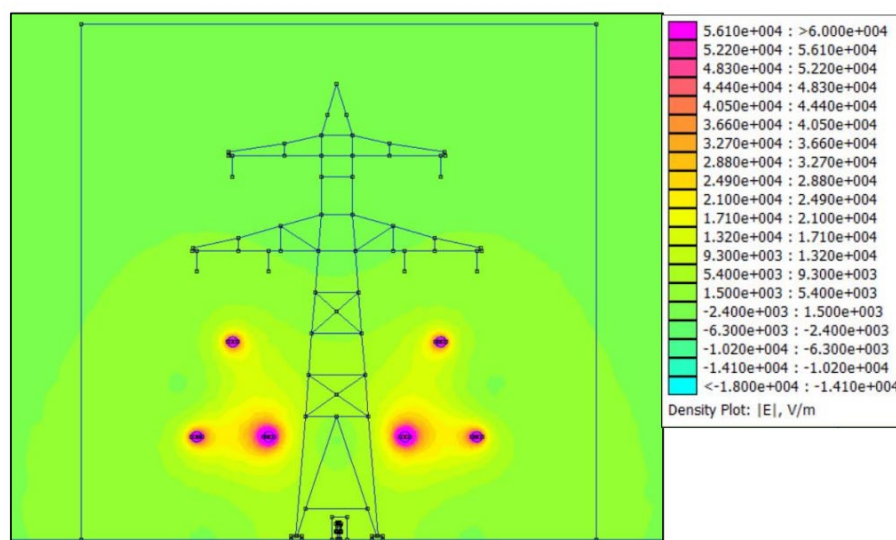


Figura 2: Distribución del campo eléctrico [*]

[*] Figura extraída de : *TFG: Desarrollos de modelos en elementos finitos (MEF) para el estudio de los efectos de campos electromagnéticos (CEMs) en la salud*, Pablo Sedano Sánchez, 2016.

5. Impactos de los campos electromagnéticos

5.1. Energía de las radiaciones electromagnéticas.

Para estudiar los efectos fisiológicos que puede provocar una radiación electromagnética hay que entender las características principales de los diferentes tipos de radiación que pueden existir: al tratarse de un fenómeno ondulatorio, la radiación puede caracterizarse por su longitud de onda λ [m] y su frecuencia f [Hz] y están relacionadas a través de:

$$\lambda * f = c \tag{1.1}$$

dónde c [m/s] es el valor de la velocidad de propagación de la onda, que es constante (velocidad de la luz, $3 * 10^8$ m/s). Esto implica que la frecuencia y longitud de onda son inversamente proporcionales.

Previamente se ha comentado que la radiación electromagnética es una propagación de energía por el espacio. Para cuantificar esta energía se utiliza la relación de Planck-Einstein:

$$E = h * \frac{c}{\lambda} \tag{1.2}$$

dónde h es la constante de Planck ($6,6 * 10^{-34}$ J/s) y c la velocidad de la luz. Esto implica, que cuanto mayor sea la longitud de onda de una radiación electromagnética, menor será la energía que este transporte. Por extrapolación, cuanto menor sea la frecuencia de una radiación, menor será la energía que esta transporte.

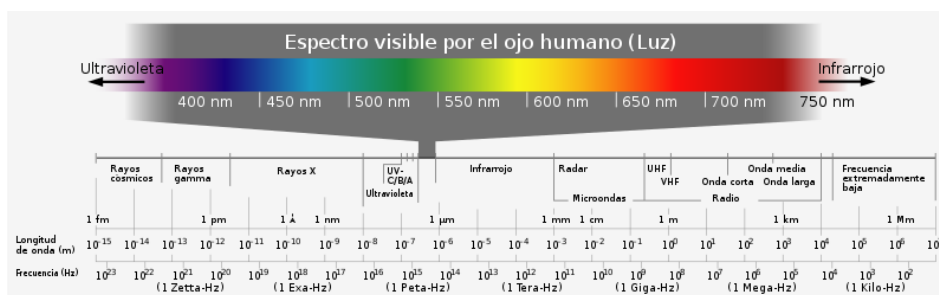


Figura 3: Espectro electromagnético, extraído de Wikipedia, realizado por Horst Frank, 2005.

A día de hoy está ampliamente demostrado que las radiaciones de alta energía o ionizantes ($f > 3 * 10^{15}$ Hz) tienen efectos claramente negativos para los humanos y animales, ya que tienen suficiente energía para romper las cadenas de ADN y provocan cáncer en las células.

En el resto del apartado 5, todos los campos electromagnéticos mencionados son CEMs de muy baja frecuencia, principalmente frecuencias industriales (50-60 Hz).



5.2. Evolución de la investigación sobre efectos fisiológicos los CEMs de muy baja frecuencia.

Históricamente, la investigación sobre los efectos fisiológicos de los CEMs de muy baja frecuencia es un área de trabajo relativamente reciente. La posibilidad de que la exposición a CEMs de baja frecuencia pudiese tener efectos adversos para la salud fue inicialmente planteada a principios de los años 60 en la URSS, a raíz de estudios sobre sistemas de localización por radar y transporte de energía. En 1970, solo en la URSS ya se habían publicado más de un centenar de estudios al respecto, lo que refleja el gran interés científico que surgió sobre la investigación de este tema. Con estándares científicos actuales, muchos de esos estudios se considerarían “poco rigurosos” y los resultados obtenidos se atribuirían a factores externos que no se tuvieron en cuenta en el estudio. Curiosamente, a raíz de estas investigaciones se publicaron los primeros límites de exposición a CEMs para los trabajadores en subestaciones soviéticas, los cuales son similares a los que se consideran adecuados hoy en día. [5, 6]

En 1973 se llevó a cabo el tercer *Congreso Internacional sobre la Protección ante la Radiación*, dónde se organizó por primera vez una sesión sobre la radiación no ionizante. En este congreso se reunieron numerosos expertos internacionales. A raíz de este evento el estudio de los CEMs no ionizantes ganó mucha importancia, y varias asociaciones se fueron desarrollando hasta 1992, cuando se fundó la ICNIRP (Comisión Internacional de Protección de Radiación no Ionizante). A día de hoy esta ONG, junto con la Organización Mundial de la Salud marcan las referencias sobre protección electromagnética y límites de exposición que siguen la mayoría de gobiernos. [7]

En los últimos 30 años, se han publicado más 25.000 estudios y artículos sobre los efectos fisiológicos y aplicaciones médicas de la radiación no ionizante. Los diferentes comités y asociaciones actualizan periódicamente sus recomendaciones, aunque los valores límite que suelen publicar se mantienen invariables.

A nivel nacional, las recomendaciones relativas a exposición a CEMs de baja frecuencia han sido principalmente las dictaminadas por la ICNIRP y la comisión europea, [8, 9, 10]

En 2001, entró en vigor el Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprobó un Reglamento de condiciones de protección, restricciones de emisión y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas en el dominio público. [11.1]

Más recientemente, entró en vigor el 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. [11.2]

Estos Reales Decretos son la base legal que rige los límites de exposición a CEMs no ionizantes en España tanto a nivel público como a nivel profesional.

5.3. Efectos fisiológicos de los CEMs de alta intensidad durante la exposición puntual.

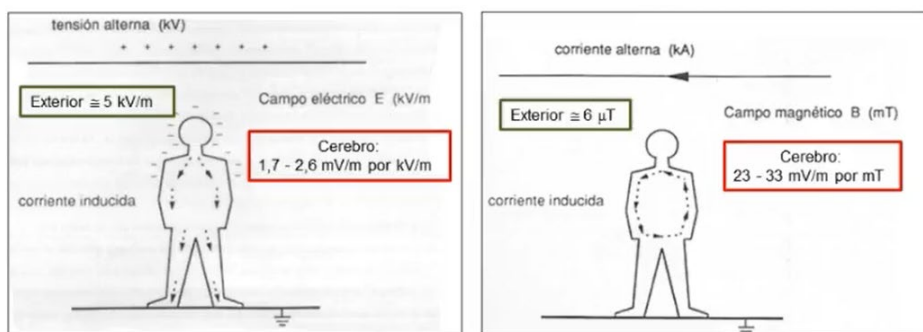


Figura 4: Inducción en el sistema nervioso central, magnitudes, A. Usón. Líneas Eléctricas 2002.

Los CEMs de frecuencia industrial afectan principalmente a nuestro organismo induciendo tensiones eléctricas en el sistema nervioso central. Se admite que los campos eléctricos internos inducidos son del orden de lo indicado en la Figura 4, y que son provocados principalmente por la parte magnética de los CEMs. Estos campos interfieren con las señales eléctricas nerviosas del organismo, provocando los efectos fisiológicos.

El ICNIRP delimita también estos campos eléctricos internos (Tabla 1), aunque por lo general no se tienen en cuenta por la dificultad de su medición.

Exposure characteristic	Frequency range	Internal electric field (V m ⁻¹)
Occupational exposure		
CNS tissue of the head	1–10 Hz	0.5/f
	10 Hz–25 Hz	0.05
	25 Hz–400 Hz	2 × 10 ⁻³ f
	400 Hz–3 kHz	0.8
	3 kHz–10 MHz	2.7 × 10 ⁻⁴ f
All tissues of head and body	1 Hz–3 kHz	0.8
	3 kHz–10 MHz	2.7 × 10 ⁻⁴ f
General public exposure		
CNS tissue of the head	1–10 Hz	0.1/f
	10 Hz–25 Hz	0.01
	25 Hz–1000 Hz	4 × 10 ⁻⁴ f
	1000 Hz–3 kHz	0.4
	3 kHz–10 MHz	1.35 × 10 ⁻⁴ f
All tissues of head and body	1 Hz–3 kHz	0.4
	3 kHz–10 MHz	1.35 × 10 ⁻⁴ f

Tabla 1: Basic restrictions for human exposure to time-varying electric and magnetic fields. [37]



Se admite generalmente que, por encima de los umbrales limitados por las normativas y recomendaciones, los CEMs de baja frecuencia sí que pueden llegar a tener riesgos fisiológicos. Múltiples estudios resaltan que la exposición a corto plazo a niveles muy elevados de radiación de baja frecuencia puede provocar respuestas nerviosas como cosquilleos o espasmos musculares, estimulación de los órganos sensoriales (en especial la visión con la aparición de fosfenos), vértigos, pérdidas de memoria y tiempos de reacción más lentos. En casos extremos, se podrían llegar a dar efectos de calentamiento, quemaduras e incluso la muerte. Estos efectos fisiológicos desaparecen inmediatamente al disminuir la exposición a los CEMs, y la normativa los tiene en cuenta para decidir los límites de exposición. Los valores límites marcados por la normativa actual se encuentran explicados en los anexos.

5.4. Dificultad en las investigaciones.

Al contrario que durante las exposiciones puntuales e intensas, la gran mayoría de estudios actualmente se centran en los efectos fisiológicos que pudiese tener la exposición prolongada a niveles bajos de CEMs. A día de hoy, los conocimientos científicos en este campo son más amplios que los correspondientes a la mayoría de los productos químicos, pero todavía no se considera que se haya demostrado ninguna relación.

La ausencia de pruebas no parece ser suficiente a estándares científicos y sociales modernos, impulsando a que la gran mayoría de investigadores opten por realizar conclusiones genéricas, promoviendo que se continúe investigando el tema. Es en parte comprensible que se extreme la precaución, ya que cualquier conclusión que expusiese los riesgos de los CEMs tendría un impacto inmenso en la sociedad y cambiaría la forma que tenemos de ver la electricidad y cómo la usamos.

Es importante resaltar que, aunque los estudios médicos identifican muy eficazmente las relaciones directas, cómo el consumo de tabaco y la aparición de cáncer, desafortunadamente es mucho más complejo distinguir las relaciones indirectas o la ausencia de relación. Es obvio que si los niveles de los CEMs típicos a los que se expone la población fueran cancerígenos potentes, ya se hubiera demostrado fácilmente este efecto. Por el contrario, está resultando mucho más difícil demostrar si los CEMs de frecuencia e intensidad baja tienen un efecto cancerígeno débil, o si solo afectan a una pequeña proporción de la población. De hecho, aunque los estudios a gran escala no hayan conseguido demostrar esta relación, no se puede estar completamente seguro de que no existan efectos negativos. La ausencia de un efecto podría significar sencillamente que el efecto no es detectable con el método de medición utilizado. Es por ello que resultados negativos son generalmente menos convincentes que los resultados positivos claros.

La existencia de un conjunto de estudios con resultados positivos (existencia de efectos), pero poco contundentes y que no son coherentes del todo entre sí tampoco ayuda al ecosistema científico. Es probable que los propios investigadores no se pongan de



acuerdo sobre las conclusiones que deben extraerse de los datos obtenidos. Aún así, por lo general y mientras se realiza más trabajo de investigación, la comunidad científica está de acuerdo con que no se puede confirmar que los CEMs de baja intensidad y frecuencia industrial no tengan ningún efecto negativo a largo plazo. Mantenerse bajo los límites de exposición es considerado por ahora suficiente protección ante CEMs de este tipo.

5.5. Estudios sobre los posibles efectos fisiológicos de los CEMs a largo plazo.

Cualquier aparato que funciona con corriente eléctrica produce un campo magnético a su alrededor. Mientras que la opinión general es que los mayores campos magnéticos se encuentran cerca de las líneas aéreas de transporte de alta tensión, a menudo ciertos electrodomésticos de gran potencia, maquinaria o elementos de la red eléctrica urbana pueden estar exponiendo al público a campos magnéticos mucho mayores que a los que se expondrían debajo de una torre de alta tensión.

En los últimos años, se han publicado una variedad de artículos de gran interés sobre posibles efectos, hasta ahora desconocidos, de los CEMs en organismos, células e incluso plantas. Es importante recordar que estos resultados no son pruebas definitivas y es necesaria mucha más investigación al respecto antes de poder considerarlos como válidos. Dicho esto, es beneficioso estudiarlos para entender qué direcciones lleva la investigación y qué nos podemos esperar en el futuro.

Una de las principales líneas de investigación actuales considera a los CEMs de baja frecuencia similares a un compuesto químico absorbido, ya que afectan a los organismos de una forma más similar a un principio activo que a una radiación ionizante. De esta manera, los CEMs podrían llegar a afectar a los procesos internos del organismo. Estas alteraciones en los sistemas biológicos podrían llegar a provocar afecciones a la salud humana si no se pudiese restaurar el nivel de funcionamiento normal. [13]

Las membranas celulares juegan un papel clave en cualquier organismo. Un CEM podría afectar a las señales eléctricas que se dirigen al interior de la célula afectando de esa forma el equilibrio electroquímico de esta. Esta distorsión eléctrica podría afectar a la síntesis de proteínas, sistema inmunológico y funciones bioeléctricas corporales. [14]

Aunque estos tipos de radiación no tiene suficiente energía para afectar directamente a moléculas grandes como la del ADN, algunos estudios han expuesto que podrían influir en algún tipo de redistribución o movimiento de cargas, que podrían llevar a cambios de mayor escala en la propia molécula. Estos cambios podrían reducir la capacidad de auto reparación del ADN [15]

Se ha propuesto que los CEMs podrían provocar un desequilibrio en los iones de calcio dentro de las células, lo que originaría alteraciones enzimáticas y facilitarían la activación de los procesos cancerígenos y el aumento de la oxidación. [16]



Se cree que la melatonina es una hormona que actúa como un poderoso antioxidante, con propiedades anticancerígenas y anti-fatiga. Su producción está normalmente regulada por el ciclo de luz solar. Se ha conjeturado que los CEMs artificiales podrían llegar a producir un efecto similar sobre la glándula pineal que la luz visible, lo que afectaría a la producción nocturna de melatonina, disminuyendo sus niveles y pudiendo perjudicar al sistema inmunológico y a los órganos endocrinos. Ciertos CEMs también podrían afectar ligeramente a algunas fases del sueño. [17, 18]

Asimismo, parece ser que ciertos animales podrían sufrir efectos similares a los humanos ante la exposición a CEMs. Estos efectos serían más intensos en sus primeras etapas de la vida, desde su forma embrionaria hasta las primeras semanas de crecimiento. En algunos estudios se expone cómo los CEMs pueden llegar a afectar al desarrollo de los procesos biológicos: mientras que parece que la formación del sistema inmune y endocrino se ven afectadas negativamente, la exposición a CEMs puede favorecer el crecimiento en tamaño de estos animales de forma perceptible. [19]

Los CEMs también han sido relacionados con cambios en las concentraciones de lípidos en sangre de ratas y con sus posibles efectos relajantes en estos animales. [20, 21]

Los animales que utilizan sistemas de guiado magnético biológico pueden llegar a verse ligeramente desorientados en las proximidades de líneas de alta tensión. Algunos insectos, como las abejas son muy sensibles a los campos electromagnéticos, y se ha detectado que en presencia de CEMs como los que pueden presentarse debajo de las torres de alta tensión las abejas se comportan de manera más estresada, teniendo problemas con la polinización y desorientándose. [22]

Recientemente se han publicado varios estudios sobre el impacto que podrían tener los CEMs de baja frecuencia en las primeras etapas del desarrollo de una planta; en este caso, una exposición a CEMs podría acelerar la germinación. Los CEMs no parecen tener impacto en los estados más avanzados de su desarrollo. [23, 24]

También se ha descrito que ciertas terapias con CEMs pulsantes de baja frecuencia podrían ser beneficiosas para el tratamiento del Parkinson, artritis e incluso la regeneración de fracturas óseas debido a su supuesto efecto antiinflamatorio. [25, 26]

5.6. Impacto social y opinión pública.

Se percibe una clara preocupación social por los posibles efectos sobre la salud humana asociados a la exposición a CEMs. Esta preocupación se ha visto incrementada en los últimos años por la instalación de múltiples antenas de telecomunicaciones y del uso masivo de teléfonos móviles. Estos aparatos, entre muchos otros, han contribuido a elevar significativamente la exposición de los ciudadanos a CEMs en el rango de las radiofrecuencias.

Todavía no disponemos de pruebas experimentales convincentes y no se ha demostrado un modelo biológico plausible que justifique el desarrollo de enfermedades relacionadas con la exposición a CEMs. Otro factor relevante es que los CEMs, excepto en el rango del espectro visible, no se manifiestan para nuestros sentidos. Los posibles riesgos son intangibles, no se perciben de forma clara y directa. La exposición a CEM se percibe como un riesgo invisible. Los CEMs se pueden medir, pero no con instrumentos y técnicas disponibles para el público general.

Los posibles riesgos derivados de una exposición voluntaria son más aceptables por los ciudadanos que los involuntarios o los que dependen de las decisiones de entidades, sean estas públicas o privadas. Prueba de ello es la preocupación social por las líneas alta tensión o por la instalación de antenas de telefonía móvil. No se percibe la misma inquietud por el uso del teléfono móvil que, por operar en contacto directo con el cuerpo, deposita mayor cantidad de energía en los tejidos que por los otros sistemas citados.

La población desconoce la naturaleza de estos fenómenos. Por esta razón las informaciones alarmistas o poco rigurosas desde el punto de vista científico contribuyen a generar un clima de rechazo, miedo y desconfianza sobre los efectos reales de la exposición a los CEMs, independientemente de que su fuente se encuentre en las líneas de alta tensión, los electrodomésticos, las antenas de radio y televisión o las antenas de telefonía móvil. Es por ello que las noticias al respecto deben de estar redactadas desde el conocimiento técnico y la razón. [9, 10]

5.7. Campos electromagnéticos y Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Para garantizar un desarrollo sostenible, se deben identificar los impactos medioambientales y sociales que pueden tener los CEMs de muy baja frecuencia, los ODS relacionados con estos impactos y las medidas que se han de tomar para garantizar su cumplimiento. [27] Aunque todos los ODS están interrelacionados, los que se ven más afectados son los siguientes:



Figura 5: Iconos de ODS, www.un.org (2022).

ODS 3, en particular la Meta 3.9: Reducir considerablemente el número de muertes y enfermedades causadas por productos químicos peligrosos y por la polución y contaminación del aire, el agua y el suelo.



ODS 8, en particular la Meta 8.4: Mejorar progresivamente, de aquí a 2030, la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente, conforme al Marco Decenal de Programas sobre Modalidades de Consumo y Producción Sostenibles, empezando por los países desarrollados.

ODS 9, en particular la Meta 9.1: Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo especial hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos.

También afecta a la meta 9.4: de aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas.

ODS 12, en particular la Meta 12.8: De aquí a 2030, asegurar que las personas de todo el mundo tengan la información y los conocimientos pertinentes para el desarrollo sostenible y los estilos de vida en armonía con la naturaleza.

Un cambio en la producción y consumo de energía es cada vez más necesario y se verá ligado a la creación de nuevas líneas de transporte de alta tensión con sus CEMs asociados. Es importante que esta expansión se haga de manera sostenible y con consideración de los impactos medioambientales asociados. El desarrollo de infraestructura eléctrica también deberá ser respetuoso y de calidad. Los factores medioambientales serán claves durante la toma de decisiones.

Los CEMs actúan como contaminantes del aire, ya que sus efectos pueden ser perjudiciales para seres vivos del entorno. Es por ello que será esencial tener en cuenta los límites de exposición permitidos en las instalaciones eléctricas y sus alrededores, así como instalar mecanismos de protección en caso de que estos no se cumplan. Se deberán monitorizar los niveles de exposición periódicamente en zonas residenciales y continuar la investigación sobre potenciales efectos negativos a largo plazo que pudiesen tener los CEMs de baja frecuencia e intensidad.

Finalmente, es muy importante que la información respectiva a CEMs sea accesible a cualquier persona que lo desee. Esta información debe de ser rigurosa, técnica, pero a la vez sencilla y comprensible para que las personas sin formación científica puedan formar sus propias opiniones.

La divulgación científica y la formación académica tienen una función clave en la transmisión de los valores sostenibles a todos los sectores de la población.



6. Medición de CEMs

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, el comportamiento físico de los CEMs viene determinado por su frecuencia, de forma tal que un único instrumento es incapaz de medir los campos eléctricos y magnéticos en todo el rango de frecuencias del espectro. Tanto los sensores como el posterior acondicionamiento de la señal varían de forma notable en función del rango de las frecuencias que se pretenden medir.

La medición de campos magnéticos en el rango de las frecuencias industriales se realiza de forma muy exacta con sensores inductivos como las bobinas y los basados en el efecto Hall. Los transformadores de corriente y las pinzas amperimétricas miden primero el campo magnético y, a partir de ese valor, determinan el valor de la intensidad de corriente que circula por los conductores.

Las bobinas detectan los cambios en el flujo del campo magnético que las atraviesa dando lugar a la inducción de fuerzas electromotrices de fácil detección y medida. [28] Las bobinas son incapaces de medir campos magnéticos estáticos (invariantes con el tiempo) siendo en estos casos sustituidos por los sensores de efecto Hall, que utilizan el efecto de mismo nombre para inducir una fuerza electromotriz perpendicular al campo magnético. [29]

Otros sensores capaces de medir campos magnéticos estáticos son los magnetoresistivos, cuyos materiales semiconductores o ferromagnéticos modifican su resistencia eléctrica al ser expuestos a campos magnéticos, [30] Existen otros sensores con aplicaciones muy específicas y con principios de funcionamiento muy complejos, como los protónicos, de efecto overhauser, de bombeo óptico o SQUID. [31]

El sensor de campo magnético utilizado por nuestro instrumento es un conjunto de tres bobinas inductivas en miniatura orientadas en las tres dimensiones espaciales. La electrónica del instrumento permite realizar tanto mediciones unidireccionales como mediciones tridimensionales. [32]

La medición de campos eléctricos en el rango de los 50 - 60 Hz está muy condicionada al sensor empleado en el instrumento, siendo difícil una medida exacta de su módulo. Una de las limitaciones es la importante influencia que el cuerpo humano tiene sobre el propio campo eléctrico que se pretende conocer, al provocar distorsiones en la distribución espacial de las cargas eléctricas. La forma más sencilla de medida es mediante sensores capacitivos que actúan como divisores de tensión [33]. También se emplean sensores ópticos junto con elementos semiconductores, de funcionamiento más sofisticado [34].

Respecto al sensor utilizado por nuestro instrumento, desconocemos su principio de funcionamiento. Se trata de un sensor direccional que permite medir el campo eléctrico en una dirección perpendicular hasta un límite de 4,5 kV/m.



Figura 6: Spectran NF-5035, aaronia-shop.com

7. Estudio del instrumento

7.1. Descripción del instrumento de medidas de CEMs.

El Spectran NF-5035 es un instrumento diseñado para medir campos electromagnéticos de baja frecuencia (0 Hz a 1 MHz). Sus sensores en miniatura le permiten medir CEMs con una precisión profesional sin la necesidad de sondas externas ni de puesta a tierra del aparato. Las diferentes configuraciones del instrumento permiten medir campos eléctricos y magnéticos variables y campos magnéticos estáticos.

La principal ventaja de este aparato es su versatilidad. Al tener un tamaño reducido y no requerir de puesta a tierra es muy sencillo reposicionarlo entre mediciones. También puede ser útil para hacer barridos en habitaciones o instalaciones. Además, la medición de campos magnéticos se realiza en las tres dimensiones del espacio, por lo que la orientación del aparato no afecta a las medidas tomadas, simplificando enormemente el manejo y eliminando posibles errores del operador. Los rangos de medición son de 0,1 V/m hasta 4500 V/m para el campo eléctrico y de 1 nT hasta 500 μ T para el magnético.

A demás de su modo de funcionamiento normal cómo medidor, el Spectran NF tiene una gama de prestaciones complementarias que pueden facilitar la tarea de medición de CEMs:

- Puede funcionar como Logger (registrador). Tras configurar una duración y un intervalo entre mediciones, el instrumento las realiza y las almacena automáticamente. Los resultados se obtienen en un fichero de texto que se puede organizar posteriormente para hacer estudios tanto de campos como de frecuencias.
- También se dispone de un programa informático que permite conectar el instrumento con un ordenador y realizar la configuración y las mediciones de manera remota.
- La pantalla integrada del instrumento contiene una pequeña interfaz que realiza gráficos en tiempo real de la distribución de campos máximos medidos en el intervalo de frecuencias configurado. Esta herramienta se puede utilizar para visualizar fácilmente los efectos armónicos de ciertos CEMs o hacer mediciones en varias frecuencias simultáneamente. Desafortunadamente, por limitaciones de los sensores, no se pueden medir los armónicos de CEMs a frecuencias industriales, lo que podría ser interesante en el contexto de este trabajo.
- Finalmente, el instrumento puede funcionar como “demodulador”, reemplazando las medidas numéricas por una respuesta sonora similar a la de un medidor Geiger de radiación nuclear. Esta configuración es principalmente útil en ambientes con poca luz o cuando se realizan barridos rápidos para detectar puntos de interés. Puede utilizarse también de manera muy didáctica para localizar cables eléctricos detrás de las paredes y explorar los cuadros eléctricos de las instalaciones.



7.2. Puesta a punto y verificación de medidas.

El instrumento pertenece al departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad, pero no había sido utilizado previamente a este trabajo.

El primer paso para su puesta a punto ha consistido en un estudio en profundidad del manual de instrucciones proporcionado por el fabricante. Tras conseguir configurarlo de manera adecuada, se han realizado múltiples mediciones tanto en el laboratorio cómo en el entorno de las líneas de alta tensión con el objetivo de comprobar el funcionamiento correcto del aparato.

Para verificar las medidas, se han comparado con las obtenidas con otro analizador de CEMs del departamento y con valores típicos de referencia en líneas aéreas de alta tensión proporcionados por R.E.E.

Todas las mediciones realizadas se encuentran en los anexos, acompañadas con los valores máximos legales marcados por la normativa.

Se ha buscado que las mediciones realizadas, tanto en el laboratorio cómo en el terreno, expongan magnitudes razonables y que sean fácilmente reproducibles.

8. Integración del analizador en la práctica docente, participación activa

8.1. Concepto de la práctica.

La práctica en la que se ha implementado la utilización de este instrumento se imparte en el segundo semestre del tercer curso del grado en ingeniería eléctrica, en la asignatura de “Líneas Eléctricas”.

Esta práctica consiste de tres partes:

La primera es una exposición sobre CEMs de baja frecuencia, su creación, efectos fisiológicos y la normativa asociada a los límites de exposición, seguida por un repaso a la normativa referente a la protección de la avifauna en líneas de alta tensión.

La segunda parte es experimental. En esta parte se realizan los experimentos en el laboratorio de alta tensión. Se observan algunos fenómenos electromagnéticos y se realizan mediciones para llegar entre todos a una conclusión. Es en esta parte en la que juega un papel clave el instrumento ya que es la base de todos los experimentos que se puedan realizar.

La tercera parte se dedica a realizar simulaciones con elementos finitos de campos eléctricos y magnéticos producidos por líneas de alta tensión. Con los conocimientos adquiridos a lo largo de la práctica los alumnos pueden comparar los resultados con otros valores expuestos a lo largo de la práctica.

8.2. Aportaciones activas a la práctica.

Se me ha ofrecido la posibilidad de impartir varias charlas sobre la exposición a CEMs procedentes de líneas eléctricas a mis compañeros durante las sesiones del curso 2022 (primera parte de la práctica). He podido aportar el conocimiento que he adquirido a lo largo del desarrollo de mi TFG para completar estas exposiciones, abarcando temas nuevos y haciendo hincapié en los valores sostenibles. Para los próximos cursos, este trabajo se podrá usar como previo o complemento a las exposiciones.

Al ser la primera vez que se utiliza el instrumento, también he tenido la ocasión de organizar los experimentos que se han realizado (segunda parte de la práctica). Me he encargado de preparar el instrumento, cumplir las medidas de seguridad y manejar la aparatada de alta tensión con la supervisión de mi director. He intentado crear un desarrollo lógico de los experimentos para que los alumnos encuentren intuitivamente las relaciones entre los diferentes elementos presentes y lleguen a su propia conclusión. Estas sesiones se han acompañado con preguntas y otras aportaciones de los compañeros más curiosos.



El manual que he redactado es una adaptación del manual oficial del instrumento y contiene indicaciones útiles para que las prácticas se desarrollen adecuadamente.

En la primera sección del manual se repasan los conceptos de seguridad en el laboratorio, así como una lista de precauciones a considerar durante el manejo del instrumento. Posteriormente, se explica paso a paso el proceso de configuración del aparato en función de la medición que se desee realizar.

Se ha intentado que el manual contenga la mayor cantidad de información posible, pero manteniendo su carácter didáctico y liviano para que un alumno o profesor pueda aprender a manejar el aparato en pocos minutos. Inicialmente, el manejo adecuado de este instrumento no es tarea fácil. Cuando el usuario adquiere cierta experiencia, el analizador permite alternar entre configuraciones de una manera rápida y sencilla.

A lo largo de la práctica, se ha intentado recalcar la importancia que tiene el manejo de herramientas e instrumentos reales durante la formación para entender las diferencias entre la teoría que se estudia y los fenómenos que ocurren realmente, y cómo estos se ven afectados por su entorno.



9. Conclusión, líneas futuras de trabajo.

Durante el desarrollo del presente trabajo, he tenido la oportunidad de realizar una parte experimental de la asignatura "Líneas Eléctricas" que fue eliminada durante el curso en la que estuve matriculado debido a las restricciones de la pandemia de Covid.

La Práctica 4 se dedica al impacto medioambiental del transporte de energía eléctrica mediante líneas de alta tensión (tanto aéreas como subterráneas), y contiene una parte que exige el uso del laboratorio de alta tensión y de instrumentación específica que he debido aprender a utilizar.

Este documento, que resume todas las lecturas, horas de trabajo con el instrumento, realización de las prácticas colaborando con los profesores, trabajo de campo en el entorno de líneas aéreas y subestaciones, puede usarse como referencia para adquirir un nivel de conocimiento bastante completo sobre campos electromagnéticos y sus efectos fisiológicos. Su estructura divulgativa está diseñada para ser comprensible para la mayoría del público al que le pudiese interesar este tema.

Crear interés en el estudio de campos electromagnéticos de baja frecuencia es esencial para que continúe la investigación sobre sus posibles efectos negativos a largo plazo.

La transmisión de valores sostenibles en los aspectos tecnológicos de la sociedad es importante durante la formación de futuros ingenieros para garantizar un desarrollo sostenible en el futuro.

En el contexto de la práctica docente, ahora el departamento de ingeniería eléctrica dispone de una nueva herramienta que puede aportar valor a la formación de los alumnos. Se ha realizado la primera iteración de un proceso que se irá perfeccionando en cada nuevo curso, abriéndose la posibilidad de desarrollar nuevos experimentos tanto con campos eléctricos como magnéticos, con otras frecuencias y en otros campos del conocimiento.

Bibliografía

[1] *Un modelo energético sostenible para España en 2050. Recomendaciones de política energética para la transición*, Monitor Deloitte, 2016.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

https://www.congreso.es/docu/docum/ddocum/dosieres/sleg/legislatura_12/spl_28/pdfs/37.pdf

[2] *Plan nacional integrado de energía y clima 2021-2030*, MITECO, 2020.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

https://www.miteco.gob.es/images/es/pniecCompleto_tcm30-508410.pdf

[3] *Fundamentos de la teoría electromagnética*, John R. Reitz, Addison-Wesley Iberoamericana, 1996.

[4] *Física para la ciencia y la tecnología, Vol. 2*, Paul Allen Tipler, Gene Mosca, Reverté, 2010.

[5] *Health of workers exposed to electric fields*, D.E. Broadbent, British Journal of Industrial Medicine 1985 ;42 ;75-84.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1007427/pdf/brjindmed00178-0003.pdf>

[6] *Biological effects of extremely low frequency electric and magnetic fields : A review*, A.A. Mariano and R.O. Becker, PHYSIOLOGICAL CHEMISTRY and PHYSICS Volume 9, Number 2, 1977.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<http://www.dankalia.com/science/elf210.pdf>

[7] *A History of the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*, Repacholi, M.H. Health Physics: October 2017 - Volume 113 - Issue 4 - p 282-300.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<https://www.icnirp.org/en/about-icnirp/aim-status-history/index.html>

[8] *1999/519/CE: 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)*, Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 1999.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/9509b04f-1df0-4221-bfa2-c7af77975556/language-es/format-PDF>

[9] *Campos electromagnéticos y salud pública. Informe técnico elaborado por el comité de expertos*, Subdirección General de Sanidad Ambiental y Salud Laboral, Ministerio de Sanidad y Consumo 2001.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

https://www.murciasalud.es/recursos/ficheros/111540-informe_tecnico.pdf

[10] *¿Qué son los campos electromagnéticos?*, OMS, 2016.

<https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/electromagnetic-fields>

[11.1] Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas.

[11.2] 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.

[12] *¿Qué son los campos electromagnéticos y como afectan al ser humano?*, Sector Electricidad, 2017.

<https://www.sectorelectricidad.com/16915/que-son-los-campos-electromagneticos-y-como-afectan-al-ser-humano/>

[13] *Emerging synergisms between drugs and physiologically-patterned weak magnetic fields: Implications for Neuropharmacology and the Human population in the Twenty-First Century*, P. D. Whissell and M. A. Persinger, *Curr Neuropharmacol. Dec*; 5(4): 278–288. 2007.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2644491/>

[14] *Increased protein synthesis by cells exposed to a 1,800-MHz radio-frequency mobile phone electromagnetic field, detected by proteome profiling*, Christopher Gerner, *Int Arch Occup Environ Health*. 2010; 83(6): 691–702.

[15] *Protein and DNA reactions stimulated by electromagnetic fields*, Martin Blank, *Electromagn Biol Med*. 2008;27(1):3-23. doi: 10.1080/15368370701878820.s

[16] *Biologically Based Epidemiological Studies of Electric Power and Cancer*, Richard G. Stevens, *Environmental Health Perspectives Supplements Volume 101, Supplement 4, December 1993*.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<https://ehp.niehs.nih.gov/doi/pdf/10.1289/ehp.93101s493>

[17] *Magnetic Field Exposure: Melatonin Production; Alzheimer's Disease; Breast Cancer*, Zorech Davanipour and Eugene Sobel, Prepared for the BioInitiative Working Group, July 2007.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

http://www.eloverkanslig.se/rapporter/Bioinitiative/section_12.pdf

[18] *A 50-Hz electromagnetic field impairs sleep*, Tobjörn Åkerstedt, *Journal of Sleep Research* 8(1):77-81, April 1999.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

https://www.researchgate.net/publication/13110269_A_50-Hz_electromagnetic_field_impairs_sleep

[19] *Efectos experimentales del campo magnético pulsante de 52 gauss sobre el desarrollo embrionario y postnatal de la rata albina, con especial referencia al órgano tiroides*, María de los Desamparados Pérez Ferriols, Universitat de València, 1989.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=227840>

[20] *Effects of whole body exposure to extremely low frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) on serum and liver lipid levels, in the rat*, Patricia V. Torres-Duran, *Lipids in Health and Disease* 6:31, 2007.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<https://link.springer.com/article/10.1186/1476-511X-6-31>



[21] *Effect of extremely low frequency magnetic fields on oxidative balance in rat brains subjected to an experimental model of chronic unpredictable mild stress*, Leticia R. Quesnel-Galván, BMC Neuroscience 22:52, 2021.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<https://bmcneurosci.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12868-021-00656-x>

[22] *Investigación demuestra efectos dañinos de líneas eléctricas en abejas y en polinización*, Talca Noticias 2019.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<https://www.utralca.cl/noticias/investigacion-demuestra-efectos-daninos-de-lineas-electricas-en-abejas-y-en-polinizacion/>

[23] *Efectos positivos del campo magnético en plantas cultivadas*, Nilsen Lasso-Rivas, Intropica volumen 14(2), julio-diciembre de 2019.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

[https://revistas.unimagdalena.edu.co/index.php/intropica/article/view/3066/2680#:~:text=Se%20sabe%20que%20el%20campo,pulsado%20\(CEP\)%203%20Hz](https://revistas.unimagdalena.edu.co/index.php/intropica/article/view/3066/2680#:~:text=Se%20sabe%20que%20el%20campo,pulsado%20(CEP)%203%20Hz)

[24] *Investigation of pulsed electromagnetic field as a novel organic pre-sowing method on germination and initial growth stages of cotton*, Dimitrios J. Bilalis, Electromagnetic Biology and Medicine Volume 31, 2012.

[25] *Efecto de la exposición a campos magnéticos de extrema baja frecuencia en un modelo de hemiparkinson en ratas*, Jacqueline Moreno-Fitz, Neurobiología Revista electrónica, 2015.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<https://www.uv.mx/eneurobiologia/vols/2015/12/Moreno/HTML.html>

[26] *TFG: Efectividad de la terapia con campos magnéticos pulsados (PEMF) en la regeneración de tejido en pacientes con lesiones o patologías óseas*, Jesús Castiñeira Montoro, Grado de Fisioterapia, Universitat de les Illes Balears, 2019.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<https://www.uv.mx/eneurobiologia/vols/2015/12/Moreno/HTML.html>

[27] *17 objetivos para transformar nuestro mundo*, United Nations, 2015.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

[28] *Induction coil sensors- a revoiew*, Slawomir Tumanski 2007 *Meas. Sci. Technol.* 18 R31

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/18/3/R01/meta>

[29] *A review of magnetic sensors*, J.E. Lenz, Proceedings of the IEEE (Volume:78, Issue: 6, June 1990).

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/56910>

[30] https://www.globalspec.com/learnmore/magnetic_field_sensors

[31] *What's a Magnetic Sensor?*, Asahi Kasei Microdevices.

<https://www.akm.com/us/en/products/hall-sensor/tutorial/magnetic-sensor/>



[32] Datasheet oficial del Spectran NF, Aaronia Ag, 2022.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

https://downloads.aaronia.com/datasheets/analyzers/NF/Spectran_NF_Datasheet_V5.pdf

[33] *A Power-Frequency Electric Field Sensor for Portable Measurement Sensors*, Dongping Xiao et al. *Sensors*, 2018, 18(4), 1053.

Disponible en: (última consulta 19/06/2022)

<https://doi.org/10.3390/s18041053>

[34] *Recent Progress on Electromagnetic Field Measurement Based on Optical Sensors*.

Shuhai Jia et al. *Sensors*. 2019, 19(13), 2860;

Disponible en: (última consulta 19/06/2022)

<https://doi.org/10.3390/s19132860>

[35] *TFG: Campos Electromagnéticos en el entorno de una línea eléctrica de 400 kV: el caso de la línea "Aragón"* (Red Eléctrica de España), José Luis Ibáñez Baños, 2020.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<http://zaguan.unizar.es/record/96361>

[36] Icono,

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<https://electricidad-viatger.blogspot.com/2010/05/postes-de-alta-y-baja-tension-1.html>

[37] *ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1HZ – 100 kHz)*, ICNIRP, HEALTH PHYSICS 99(6):818-836; 2010.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPLFgdl.pdf>

[38] *Campos Electricos y Magnéticos de 50 Hz*, REE, UNESA, ISBN 84-9320590-7, 2001.

[39] *Las "5 reglas de oro" del mantenimiento eléctrico*.

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<https://www.sectorelectricidad.com/4148/las-5-reglas-de-oro-del-mantenimiento-electrico/>

Pie de página 11: *TFG: Desarrollos de modelos en elementos finitos (MEF) para el estudio de los efectos de campos electromagnéticos (CEMs) en la salud*, Pablo Sedano Sánchez, 2016

Disponible en: (última consulta 22/06/2022)

<http://zaguan.unizar.es/record/61155>

Anexos

Anexo 1: Normativa y recomendaciones. Valores límite de exposición a CEMs.

Reales Decretos:

En España existen dos Reales Decretos que legislan sobre la intensidad máxima de los CEMs a los que pueden verse expuestos los diferentes sectores de la población.

El Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre [11.1], establece los valores límite de exposición a CEMs para el público, así como los valores máximos de corrientes de contacto que se pudiesen dar en las zonas de acceso público.

Gama de frecuencia	Intensidad de campo E (V/m)	Intensidad de campo H (A/m)	Campo B (μ T)	Densidad de potencia equivalente de onda plana (W/m^2)
0-1 Hz		$3,2 \times 10^4$	4×10^4	
1-8 Hz	10.000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	
8-25 Hz	10.000	$4.000/f$	$5.000/f$	
0,025-0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	
0,8-3 kHz	$250/f$	5	6,25	
3-150 kHz	87	5	6,25	
0,15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2.000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f/200$
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

Tabla 2: Niveles de referencia para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (0 Hz-300 GHz, valores rms imperturbados, frecuencias en kHz).

A 50 Hz, valores límites indicados son de 5000 V/m para el campo eléctrico y 100 μ T para el magnético.

Gama de frecuencia	Corriente máxima de contacto (mA)
0 Hz-2,5 kHz	0,5
2,5 KHz-100 kHz	$0,2 f$
100 KHz-110 MHz	20

Tabla 3: Niveles de referencia para corrientes de contacto procedentes de objetos conductores.

La corriente máxima permitida de contacto indirecto es de 0,5 mA.

En este Real Decreto, se referencia el Informe “*Campos electromagnéticos y salud pública. Informe técnico elaborado por el comité de expertos*” encargado por el ministerio de Sanidad y Consumo [9] cómo referencia sobre los efectos fisiológicos de los CEMs de baja frecuencia.

El Real Decreto 299/2016, de 22 de julio [11.2], sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos marca los límites de exposición a aplicar en entornos profesionales.

Intervalo frecuencias	NA (E) inferior [V/m] (RMS)	NA (E) superior [V/m] (RMS)
$1 \leq f < 25$ Hz	$2,0 \times 10^4$	$2,0 \times 10^4$
$25 \leq f < 50$ Hz	$5,0 \times 10^5/f$	$2,0 \times 10^4$
$50 \text{ Hz} \leq f < 1,64$ kHz	$5,0 \times 10^5/f$	$1,0 \times 10^6/f$
$1,64 \leq f < 3$ kHz	$5,0 \times 10^5/f$	$6,1 \times 10^2$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10$ MHz	$1,7 \times 10^2$	$6,1 \times 10^2$

Tabla 4: Niveles de acción para campo eléctrico (E) de 1 Hz a 10 MHz

A 50 Hz, los valores límites indicados son de entre 10 y 20 kV/m para el campo eléctrico.

Intervalo frecuencias	NA (B) inferior [μ T] (RMS)	NA (B) superior [μ T] (RMS)	NA para exposición de las extremidades a campo magnético localizado [μ T] (RMS)
$1 \leq f < 8$ Hz	$2,0 \times 10^5/f^2$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$8 \leq f < 25$ Hz	$2,5 \times 10^4/f$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$25 \leq f < 300$ Hz	$1,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$300 \text{ Hz} \leq f < 3$ kHz	$3,0 \times 10^5/f$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10$ MHz	$1,0 \times 10^2$	$1,0 \times 10^2$	$3,0 \times 10^2$

Tabla 5: Niveles de acción para campo magnético (B) de 1Hz a 10MHz

A 50 Hz, los valores límites indicados son de entre 1000 y 6000 μ T para el campo magnético.

Intervalo frecuencias	NA (I_c) en estado estacionario [mA] (RMS)
Hasta 2,5 kHz	1,0
$2,5 \leq f < 100$ kHz	$0,4 \times f$
$100 \text{ kHz} \leq f \leq 10$ GHz	40

Tabla 6: Niveles de acción para la corriente de contacto I_C

La corriente máxima permitida de contacto indirecto es de 1 mA.

En este Real Decreto, se describen los efectos sobre el organismo de los CEMs en la sección de definiciones del Artículo 2 [11.2]:

b) Efectos biofísicos directos: los efectos en el cuerpo humano causados directamente por su presencia en campos electromagnéticos, entre ellos:

1. Efectos térmicos: como el calentamiento de los tejidos por la absorción de energía procedente de campos electromagnéticos.

2. Efectos no térmicos: como la estimulación de los músculos, de los nervios o de los órganos sensoriales; estos efectos podrían ser perjudiciales para la salud física y mental de los trabajadores expuestos; además, la estimulación de los órganos sensoriales podría dar lugar a síntomas transitorios, como vértigo o fosfenos retinianos. Estos efectos podrían provocar molestias temporales, alterar el conocimiento u otras funciones cerebrales o musculares y por tanto podrían repercutir en la capacidad del trabajador para trabajar de manera segura; en definitiva, podrían suponer riesgos para la seguridad.

3. Corrientes en las extremidades.

En este Real Decreto, no se tienen en cuenta los posibles efectos a largo plazo de la exposición a CEMs de frecuencia industrial. El objetivo principal de esta normativa es el de evitar posibles efectos molestos que pudiesen afectar a la concentración o a la capacidad cognitiva de un trabajador que se encuentre en un entorno peligroso. Estos efectos podrían provocar errores de procedimiento o el incumplimiento de las reglas de seguridad por parte del trabajador.

Otras recomendaciones:

Previamente mencionado en el apartado 5.2. de este trabajo, el ICNIRP es un organismo internacional ligado a la Organización Mundial de la Salud que emite periódicamente recomendaciones al respecto de los CEMs de baja frecuencia. Las últimas recomendaciones sobre límites de exposición publicadas datan del 2010. [37]

Frequency range	E-field strength E (kV m ⁻¹)	Magnetic field strength H (A m ⁻¹)	Magnetic flux density B (T)
1 Hz–8 Hz	5	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^{-2}/f^2$
8 Hz–25 Hz	5	$4 \times 10^3/f$	$5 \times 10^{-3}/f$
25 Hz–50 Hz	5	1.6×10^2	2×10^{-4}
50 Hz–400 Hz	$2.5 \times 10^2/f$	1.6×10^2	2×10^{-4}
400 Hz–3 kHz	$2.5 \times 10^2/f$	$6.4 \times 10^4/f$	$8 \times 10^{-2}/f$
3 kHz–10 MHz	8.3×10^{-2}	21	2.7×10^{-5}

Tabla 7: Niveles de referencia para la exposición del público en general a CEMs variables.

En la tabla 6 se encuentran las recomendaciones para el público en general. A 50 Hz, los límites marcados son de 5 kV/m para el campo eléctrico y 200 μ T para el campo magnético.

Frequency range	E-field strength E (kV m ⁻¹)	Magnetic field strength H (A m ⁻¹)	Magnetic flux density B (T)
1 Hz–8 Hz	20	$1.63 \times 10^5/f^2$	$0.2/f^2$
8 Hz–25 Hz	20	$2 \times 10^4/f$	$2.5 \times 10^{-2}/f$
25 Hz–300 Hz	$5 \times 10^2/f$	8×10^2	1×10^{-3}
300 Hz–3 kHz	$5 \times 10^2/f$	$2.4 \times 10^5/f$	$0.3/f$
3 kHz–10 MHz	1.7×10^{-1}	80	1×10^{-4}

Tabla 8: Niveles de referencia para la exposición del profesional a CEMs variables.

En la tabla 7 se encuentran las recomendaciones para la exposición a CEMs en ámbitos profesionales. A 50 Hz, los límites marcados son de 20 kV/m para el campo eléctrico y 1000 μ T para el campo magnético.

Exposure characteristics	Frequency range	Maximum contact current (mA)
Occupational exposure	Up to 2.5 kHz	1.0
	2.5–100 kHz	$0.4f$
	100 kHz–10 MHz	40
General public exposure	Up to 2.5 kHz	0.5
	2.5–100 kHz	$0.2f$
	100 kHz–10 MHz	20

Tabla 9: Niveles de referencia de corrientes de contacto transitorias.

Indirect effect	Threshold current (mA) at frequency:		
	50/60 Hz	1 kHz	100 kHz
Touch perception	0.2–0.4	0.4–0.8	25–40
Pain on finger contact	0.9–1.8	1.6–3.3	33–55
Painful shock/let-go threshold	8–16	12–24	112–224
Severe shock/breathing difficulty	12–23	21–41	160–320

Tabla 10: Rangos límites de corrientes de contacto para efectos indirectos en las personas.

En la tabla 8 se encuentran los límites recomendados de corrientes de contacto indirecto. En este caso el ICNIRP determina 1 mA para entornos profesionales y 0,5 mA para el público.

La tabla 9 explica los niveles de dolor que provoca una corriente de contacto indirecto. Cumpliendo los límites recomendados, una descarga de este estilo no debería ser dolorosa para una persona en general. En situaciones profesionales, el límite garantiza que esas

corrientes no sean dolorosas (pinchazo) y no puedan afectar a la respuesta nerviosa del cuerpo.

Campos magnéticos de referencia, REE:

En el libro sobre CEMS de 50 Hz, publicado en 2001 por Red Eléctrica Española [38], se exponen valores de referencia de campos magnéticos producidos por una multitud de líneas aéreas y aparatos eléctricos.

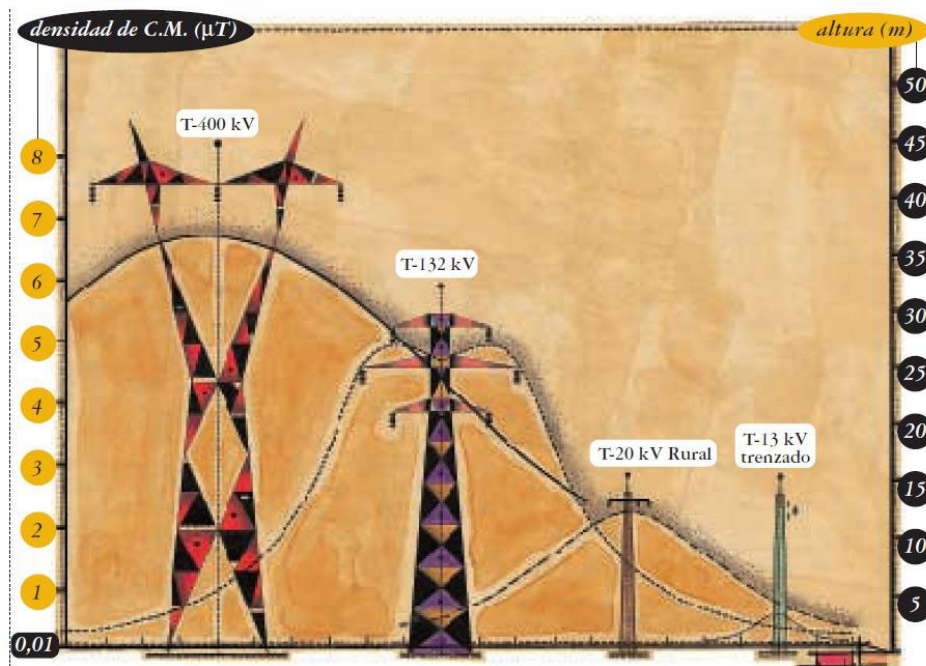


Figura 7: Valores de inducción magnética para líneas de diferentes niveles de tensión respecto a la distancia vertical a los conductores.

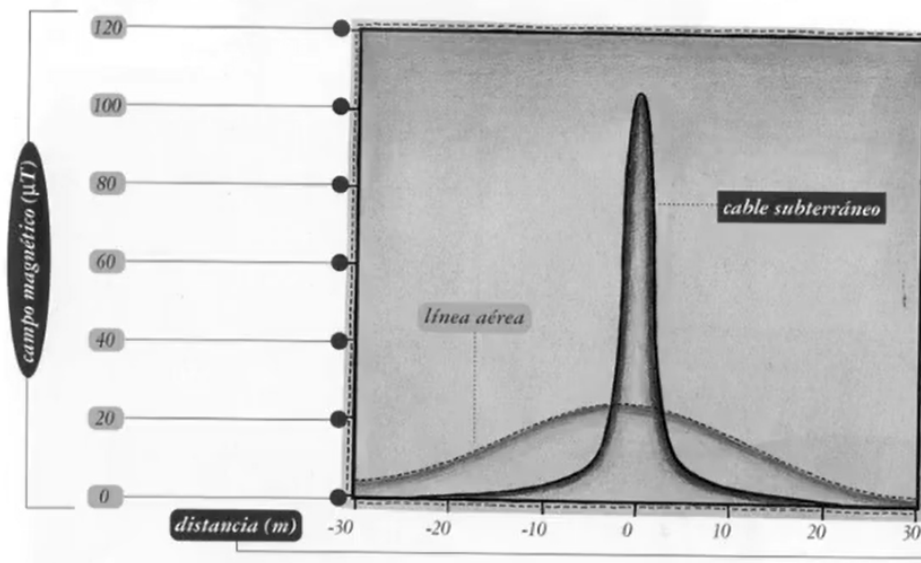


Figura 8: Comparación entre el campo magnético generado en línea aérea y línea subterránea de características similares.

Las figuras 5 y 6 muestran varios valores de interés que se pueden tomar como referencia. Una línea aérea de 400 kV genera típicamente un campo magnético de unos 6 μT . Una línea de transporte eléctrico subterránea generar campos magnéticos 5 veces más intensos que su equivalente aérea. A la hora de construir líneas subterráneas, se evita el impacto visual de las líneas aéreas, pero hay que tener en cuenta el incremento masivo de CEMs a su alrededor.

APARATO	Campo magnético de 50Hz (μT)		
	domicilio		
	a 10 cm	a 30 cm	a 1 m
▶ Frigorífico	0,06	0,05	0,02
▶ Afeitadora	0,24	0,01	0,01
▶ Cocina eléctrica	0,29	0,11	0,03
▶ Reloj despertador	0,59	0,23	0,03
▶ Teléfono portátil	0,80	0,02	0,02
▶ Tostadora	1,14	0,13	0,00
▶ Secador de pelo	1,34	0,20	0,01
▶ Televisor	1,40	0,50	0,09
▶ Freidora	1,70	0,08	0,01
▶ Acondicionador	1,80	0,38	0,12
▶ Picadora	2,84	0,33	0,04
▶ Suelo radiante	3,01	0,38	0,02
▶ Aspiradora	5,16	1,52	0,31
▶ Lámpara halógena	10,64	1,42	0,14
▶ Lavadora	16,14	8,20	2,38
▶ Zona de acometida	16,82	9,52	2,76
▶ Hornos de microondas	30,04	6,04	0,61

Tabla 11: Campos magnéticos producidos por electrodomésticos.

<i>industria ligera</i>			
APARATO	Campo magnético de 50Hz (μT)		
	10 cm	30 cm	1 m
▶ Pantalla de alumbrado	0,05	0,05	0,05
▶ Taladro	0,13	0,09	0,03
▶ Sierra	0,24	0,13	0,04
▶ Torno	0,56	0,08	0,04
▶ Cargador de baterías	1,42	0,31	0,02
▶ Calentador de aire	2,52	0,30	0,13
▶ Compresor	3,18	0,54	0,05
▶ Taladro portátil	34,56	7,10	0,89
▶ Montacargas	38,72	2,96	0,50
▶ Piedra esmélil	56,32	10,24	0,98
▶ Máquina de soldar	564,00	191,00	78,40

Tabla 3. Valores de campo magnético para algunos equipos de la industria ligera.

Tabla 12: Valores de campo magnético para algunos equipos de la industria ligera.

Las tablas 10 y 11 muestran valores de campo magnético generado por electrodomésticos y maquinaria eléctrica. Se puede observar que los electrodomésticos como el microondas o los ascensores pueden exponernos a campos magnéticos del orden de los 30 μT . Algunos aparatos como las máquinas de soldar exceden los límites marcados por la normativa, por lo que su utilización debe estar monitorizada y se deben implantar medidas de protección contra CEMs.

Límites de exposición, conclusión:

	Público en general		Trabajadores		
	RD1066-2001	ICNIRP_2010	RD299_2016	ICNIRP_2010	
E (rms)	5	5	10 - 20	10	kV/m
B (rms)	100	200	1000 - 6000	1000	μT
I_L	0,5	0,5	1	1	mA

Tabla 13: Límites de exposición, recopilación.

En la tabla 13 se recopilan los límites de exposición a CEMs de frecuencia industrial tratados en este anexo. Se puede observar que los límites de campo magnético para el público en general son especialmente restrictivos, ya que es esta parte de la radiación es más propensa a la inducción de efectos fisiológicos.

Si se comparan los límites de exposición a los valores de referencia de campos magnéticos de REE, se puede observar que una persona cualquiera no suele alcanzar estos valores límites de exposición en el día a día. Sin embargo, es importante recalcar que ciertos aparatos como el microondas pueden estar exponiendo al público a campos magnéticos múltiples veces más intensos que los que genera una línea aérea de alta tensión sin que este se percate o se alarme.

Las medidas realizadas en los siguientes apartados también se compararán con los límites de exposición mencionados.



Anexo 2: Manual adaptado.

El manual está planteado para que se imprima en formato de folleto A5.

Referencia de las imágenes de las páginas 1, 5 y 6 [[aaroniaag/shop.com](https://aaroniaag.shop.com)]

Referencia de la imagen + contenido de la segunda página [39]

Analizador de Espectros Electromagnéticos

AARONIA AG SPECTRAN NF-5035

MANUAL SIMPLIFICADO



Para la realización de las prácticas es imprescindible leer este manual antes de manejar el analizador.

Este manual no es el oficial de la empresa fabricante del aparato. Forma parte del TFG: *“Estudio teórico-práctico de un instrumento de medida de campos electromagnéticos. Aplicación a una práctica docente.”* Realizado por Álvaro Domínguez Tomás.

Para más información el manual completo del analizador se encuentra en la carpeta de la práctica 4 del ADD de la asignatura o en la página web de Aaronia AG.



El objetivo de las Reglas de Oro es garantizar la seguridad cuando se trabaja con sistemas eléctricos. En alta tensión, su cumplimiento es **OBLIGATORIO**

1. **DESCONECTAR, CORTE VISIBLE O EFECTIVO**

Desconectar todas las posibles fuentes de alimentación. Tener en cuenta la posible alimentación a través de grupos electrógenos y otros generadores, baterías, etc.

2. **ENCLAVAMIENTO, BLOQUEO Y SEÑALIZACIÓN**

Prevenir cualquier posible re-conexión, utilizar para ello medios mecánicos. Señalar que se están realizando trabajos en los dispositivos de mando enclavados. Advertir a otros compañeros de la acción que se va a realizar.

3. **COMPROBACIÓN AUSENCIA DE TENSION**

Comprobar la ausencia de tensión antes de iniciar cualquier trabajo, comprobar los elementos conductores más cercanos a la zona de trabajo.

4. **PUESTA A TIERRA Y EN CORTOCIRCUITO**

Si por accidente se volviese a poner en tensión el equipo o la línea, se produciría un cortocircuito y se derivaría la corriente de falta a Tierra, eliminando así el peligro.

5. **SEÑALIZACIÓN DE LA ZONA DE TRABAJO**

La zona dónde se están realizando los trabajos se señalará por medio de vallas, conos o dispositivos análogos. Si procede, también se señalarán las zonas seguras para el personal que no está trabajando en la instalación.

Solo se manejará la aparamenta bajo la supervisión de un profesor.

Precauciones al manejar el analizador:

Debido a la alta sensibilidad del analizador, tanto la pantalla como los sensores del aparato son muy sensibles a los golpes. Es por eso que debe de ser tratado con cuidado.

Se deben evitar temperaturas excesivas. No dejar el aparato cerca de radiadores o expuesto directamente a la luz solar.

El aparato no es hermético. No usar bajo la lluvia o poner en contacto con líquidos, ya que se podría dañar la electrónica interna.

Preparación del analizador para medida de campos EM:

En la medida de lo posible, se intentará cargar el aparato antes de realizar mediciones para garantizar los resultados más precisos posibles.



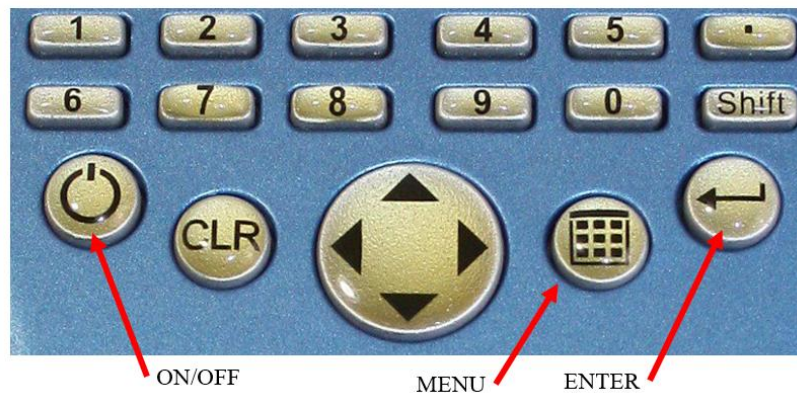
Display:

En la pantalla del aparato aparecen varios datos importantes para realizar medidas. El valor principal en medio de la pantalla es la magnitud del campo que se está midiendo. Encima de este, las letras indican que tipo de campo se está midiendo y a que escala. Es importante verificar que en el cuadro de texto de la derecha aparece la palabra “SPECTRUM”, lo que indica que el modo de medición es el adecuado. Este aparato mide en intervalos de frecuencias. El valor en Hz, debajo del valor principal indica a que frecuencia se ha detectado la medición máxima. En el contexto de las prácticas este valor siempre será muy cercano a los 50Hz (Red).



El analizador también dispone de un display gráfico dónde visualizar más fácilmente campos de varias frecuencias. En el contexto de las prácticas no lo utilizaremos.

El analizador es un aparato complejo, y puede ser utilizado para medidas en entornos muy diferentes al de las prácticas, es por eso que es recomendable “resetear” el aparato al empezar la sesión.



Para resetear el aparato, presionar MENU y con la flecha hacia abajo moverse por el menú hasta la última opción **Setup**, presionar ENTER y seguir bajando en el sub-menú hasta la opción **Factor**, presionar de nuevo ENTER y esperar varios segundos, apagar y volver a encender. El aparato está listo para ser configurado.

Configuración del aparato

Presionar MENU. Para configurar y confirmar cada parámetro presionar ENTER.

1• Sensor: Selecciona el sensor que utilizará el aparato.

- Mag → Sensor de campos **magnéticos** alternos 1,2 y 3D
- E-Fld → Sensor de campos **eléctricos** alternos 1D
- Msta → Sensor de campos magnéticos estáticos (*manual p.41*)
- Analog → Entrada analógica, no se utiliza.

2• Center + Span / fLow + fHigh: Configuración de la frecuencia.

En la práctica trabajaremos con la frecuencia de red (50Hz), para configurarla se hace de **una de las dos** formas:

- En Center, presionar ENTER de nuevo para seleccionar “Hz” y escribir **50** → ENTER, en Span seleccionar Hz de la misma forma y escribir **15** → ENTER.
- En fLow seleccionar Hz, y escribir **42.5** → ENTER, en fHigh seleccionar Hz, y escribir **57,5** → ENTER.

Atención: De vez en cuando hay que repetir este proceso una segunda vez. Presionar el botón MENU para volver al display principal y comprobar que aparecen 3 valores de frecuencia debajo del valor principal, los cuales deben indicar **aproximadamente** 50 Hz



fMin detectada

Frecuencia a la que
se detecta el campo
máximo

fMax detectada

Es **necesario** que el rango de frecuencia configurado sea **exactamente 15 Hz** debido al funcionamiento del aparato con frecuencias bajas. Si se configura cualquier otro valor las medidas serán erróneas.

3· Dim: Configura en cuantas dimensiones se miden los campos.

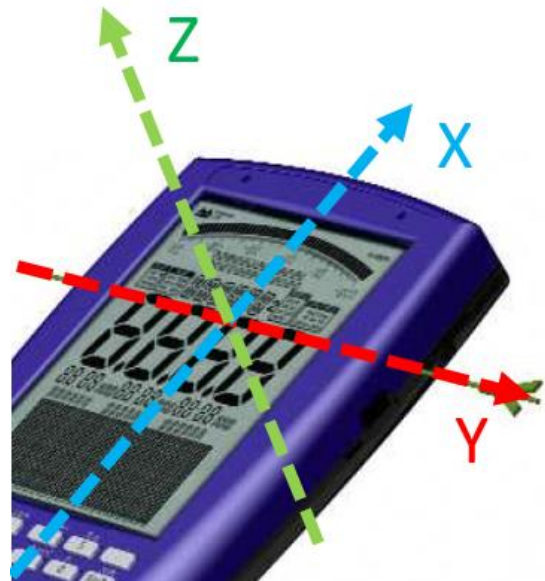
Para el sensor de **campo eléctrico** sólo está disponible 1D y se mide en esta dirección:

Es muy importante orientar el aparato apropiadamente para la medida que se desee realizar



Para el sensor de **campo magnético** están disponibles 1,2 y 3D. Hay que tener en cuenta que aumentar las dimensiones implica también duplicar o triplicar el tiempo de medida, además que el valor indicado es la media cuadrática de las mediciones en cada dimensión, y no el valor máximo.

Al seleccionar el sensor se configura automáticamente en 2D, para medir en 1D, la dirección medida será la primera letra del sensor:



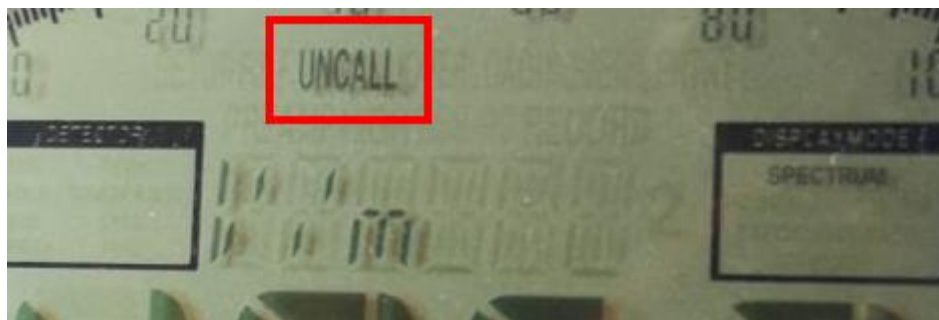
ZX-Mag en 1D medirá el campo magnético alterno en la dirección Z.

4· RBW: Configura el ancho de banda del filtro, se recomienda que sea al menos 10 veces menor que el rango de frecuencias (15Hz).

Por defecto estará configurado en los kHz, con las flechas bajar hasta **1Hz** → ENTER.

El VBW se ajustará automáticamente al mismo valor que el RBW, pero no es un ajuste que importe en nuestro contexto.

5· SpTime: Configura el tiempo de barrido del sensor. Cuanto más corto sea el barrido, más rápida será la medición, pero al mismo tiempo será más imprecisa. Como regla general, entre 1.5 y 2 segundos suele ser suficiente para obtener resultados satisfactorios. En el caso que el SpTime sea insuficiente, aparecerá el mensaje “UNCALL” en el display.



Seleccionar **ms** (milisegundos) y escribir **≈1500** o más si sigue **UNCALL** → ENTER

6• RefLev: Configura la escala (submúltiplos) en la que se mide. Se recomienda seleccionar **Auto** (Cambio automático), que es la primera opción del menú. Navegar con las flechas y ENTER para guardar elección.

7• Demod: Configura la precisión y limitación del campo máximo que puede medir el aparato. Por ejemplo, seleccionando **0dB**, el analizador puede medir hasta 800 V/m de campo eléctrico antes de saturarse, mientras que con **40dB** alcanza unos 4600 V/m con un poco menos de precisión ($\approx 5-10\%$). En el contexto de la práctica y para proteger los sensores del aparato, se selecciona siempre **40Db**.

Cuando el aparato se sature por un campo superior a su máximo medible, los valores indicados se mantendrán alrededor del valor máximo (≈ 4600 V/m) y aparecerá el indicador **HIGH**. Estas mediciones ya no son adecuadas y no se deben tener en cuenta.



8• Detec: Configura si se mide valor máximo (**MinMax**) o valor eficaz (**RMS**)

Una vez terminada la configuración, volver a presionar ENTER para salir del menú, el analizador está preparado para medir. Se recomienda tener **MAXIMO CUIDADO** al manejar el aparato a partir de ahora, ya que presionar cualquier botón puede cambiar la configuración completamente (el botón ● activa el modo **HOLD**, el cual mantiene en pantalla el resultado máximo medido hasta el momento. Volver a presionar para desactivar).

Una vez terminada la sesión asegurarse de dejar el analizador apagado y en su funda con su cargador para el siguiente grupo.

Anexo 3: Medidas en líneas aéreas.



Figura 9: Spectran NF-5035, aaroniaag/shop.com



Figura 10: Sanwa TM 200, ref [35]

En esta sección se presentan todas las mediciones realizadas en líneas aéreas de alta tensión ordenadas cronológicamente.

Se utilizaron inicialmente los instrumentos Spectran y Sanwa ya que ambos permiten medir campos eléctricos y magnéticos. El Sanwa es un instrumento muy sencillo empleado hasta ahora en las prácticas y será sustituido por el Spectran.

Conforme se realizaron las medidas, observé que las medidas de campo eléctrico del Sanwa no eran fiables y he decidido no incluirlas en este trabajo. Por lo contrario, las medidas de campo magnético si que parecen adecuadas como reflejan los apartados posteriores.

Línea de 45 kV Doble circuito:

Las primeras mediciones de CEMs se realizaron bajo una línea aérea de 45 kV de doble circuito cercana a la carretera N-330 en la salida de Zaragoza. Se utilizaron el Spectran 5035NF y el Sanwa TM200. El procedimiento de medida consistió en desplazarse perpendicularmente a la línea, manteniendo los instrumentos a la misma altura respecto al suelo y con la misma orientación. Se realizaron medidas cada 8 metros de distancia.



Figura 11: Línea de 45kV en Zaragoza, Procedimiento de medida, 2022.

Medición del campo eléctrico:

Distancia [m]	Medida 1 C.E. [kV/m]	Medida 2 C.E. [kV/m]	Medida 3 C.E.[kV/m]	Medida 4 C.E. [kV/m]	Medida 5 C.E. [kV/m]
0	1350	1326	1392	1372	1402
8	1500	1470	1562	1495	1521
16	640	774	740	520	750
24	251	181	240	120	284
32	70	100	97	100	100

Tabla 14: Medidas de campo eléctrico en línea 45kV Duplex con Spectran NF

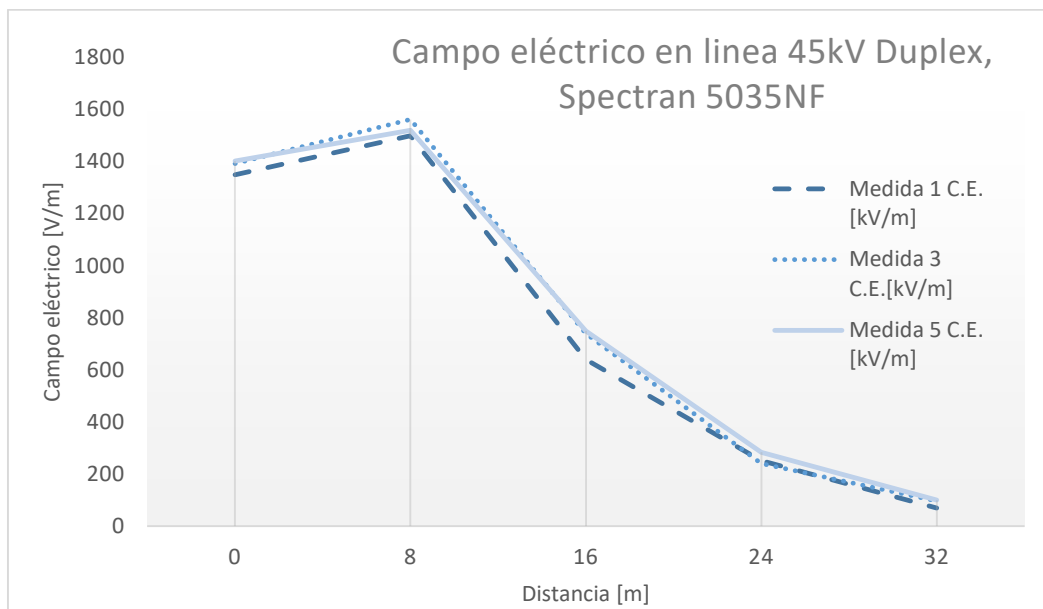


Figura 12: Distribución del campo eléctrico en línea 45kV Duplex con Spectran NF.

Se puede observar que el campo eléctrico es ligeramente menos intenso justo debajo de la línea. Este fenómeno es común en las líneas dúplex y se debe a la geometría de los circuitos. Los valores se mantienen por debajo de los límites establecidos.

Medición del campo magnético: Se utilizan ambos instrumentos.

Medición debajo de apoyo:

Distancia [m]	Spectran NF			Sanwa Tm 200	
	Medida 1 C.M. [μ T]	Medida 2 C.M. [μ T]	Medida 3 C.M. [μ T]	Medida 4 C.M. [μ T]	Medida 5 C.M. [μ T]
8	0,47	0,46	0,43	0,4	0,43
16	0,4	0,36	0,39	0,51	0,54
24	0,25	0,27	0,28	0,36	0,4
32	0,155	0,17	0,15	0,23	0,21

Tabla 15: Medidas de campo magnético en línea 45kV Duplex con Spectran NF y Sanwa TM bajo un apoyo.

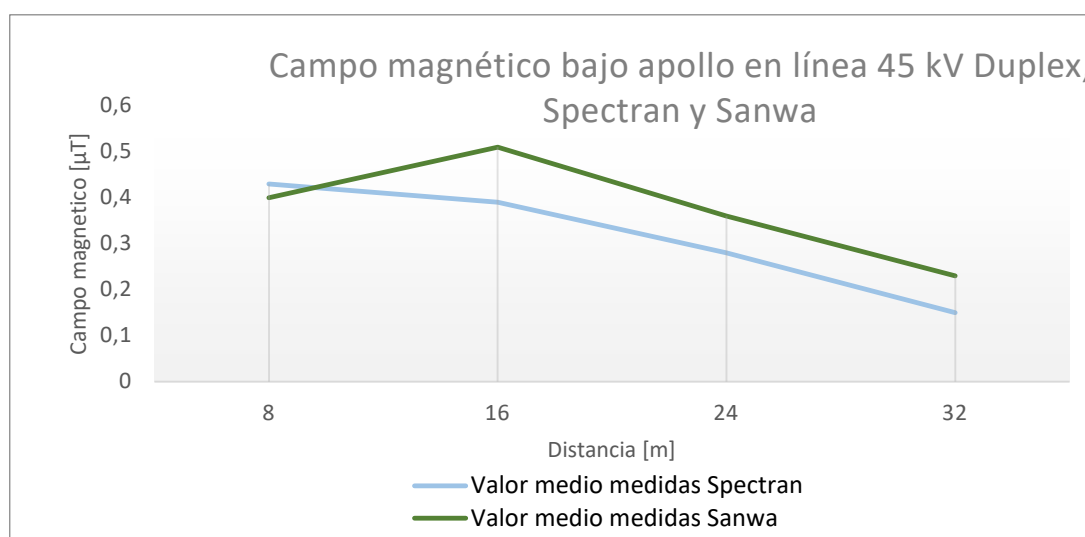


Figura 13: Distribución de campo magnético en línea 45kV Duplex con Spectran NF y Sanwa TM bajo un apoyo.

Medición a mitad del vano:

Distancia [m]	Spectran NF		Sanwa Tm 200	
	Medida 1 C.M. [μ T]	Medida 2 C.M. [μ T]	Medida 4 C.M. [μ T]	Medida 5 C.M. [μ T]
8	0,46	0,5	0,4	0,42
16	0,423	0,48	0,52	0,47
24	0,3	0,38	0,47	0,44
32	0,258	0,28	0,36	0,37

Tabla 16: Medidas de campo magnético en línea 45kV Duplex con Spectran NF y Sanwa TM en la mitad del vano.

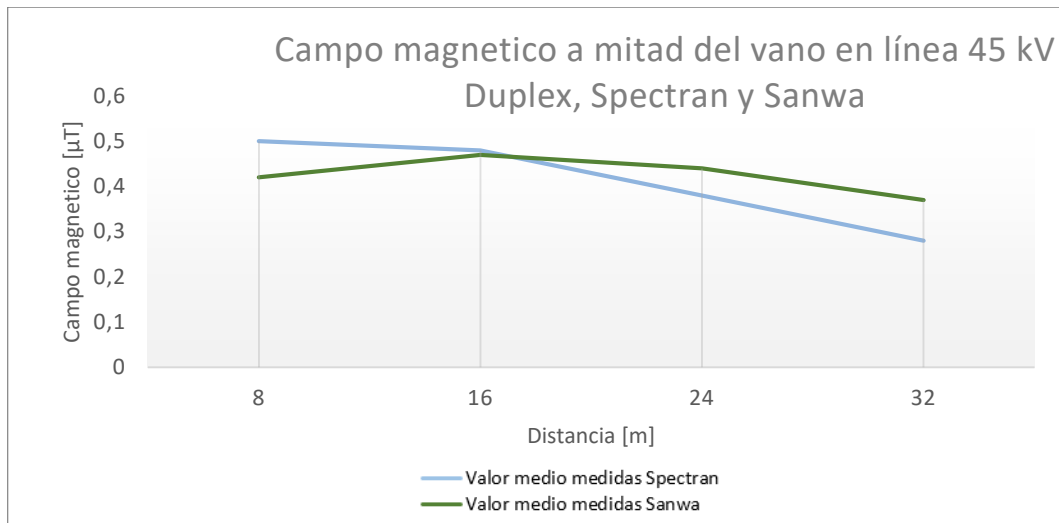


Figura 14: Distribución de campo magnético en línea 45kV Duplex con Spectran NF y Sanwa TM en la mitad del vano.

Se realizaron mediciones justo debajo del apoyo y en la mitad del vano. La diferencia en los resultados se debe principalmente a la flecha de los conductores y al desnivel entre ambos puntos. El campo magnético medido debajo de esta línea es sorprendentemente poco intenso. Esto se puede deber principalmente a que en el momento de las mediciones (12-14h) pudo haber poca demanda energética, por lo que pasaba muy poca corriente por la línea.

Línea de 220 kV Doble circuito:



Figura 15: Línea aérea de 220kV Duplex, subestación de Peñaflo, 2022.

Cuando se realizaron las medidas, esta línea no producía campo magnético. Durante una visita a la subestación de Peñaflores, los ingenieros nos confirmaron que esto se debía a que se estaban realizando maniobras de descargo para el posterior mantenimiento de esta línea. El campo eléctrico se pudo medir sin problemas.

Distancia [m]	Medida 1 C.E. [kV/m]	Medida 2 C.E. [kV/m]	Medida 3 C.E. [kV/m]
0-10	sat	sat	sat
11	4,5	sat	sat
12	4,47	4,5	4,5
13	4,1	4,2	4,1
14	3,5	3,63	3,54
15	3,42	3,4	3,39
16	2,9	2,87	3
17	2,4	2,42	2,38
18	1,9	2,01	1,88
19	1,36	1,4	1,42
20	1,06	1,03	1,1
21	0,83	0,8	0,85
22	0,63	0,64	0,63
23	0,43	0,41	0,39
24	0,32	0,31	0,33
25	0,18	0,2	0,2
26	0,18	0,18	0,19
27	0,18	0,18	0,18

Tabla 17: Medidas de campo eléctrico en línea 220kV Duplex con Spectran NF

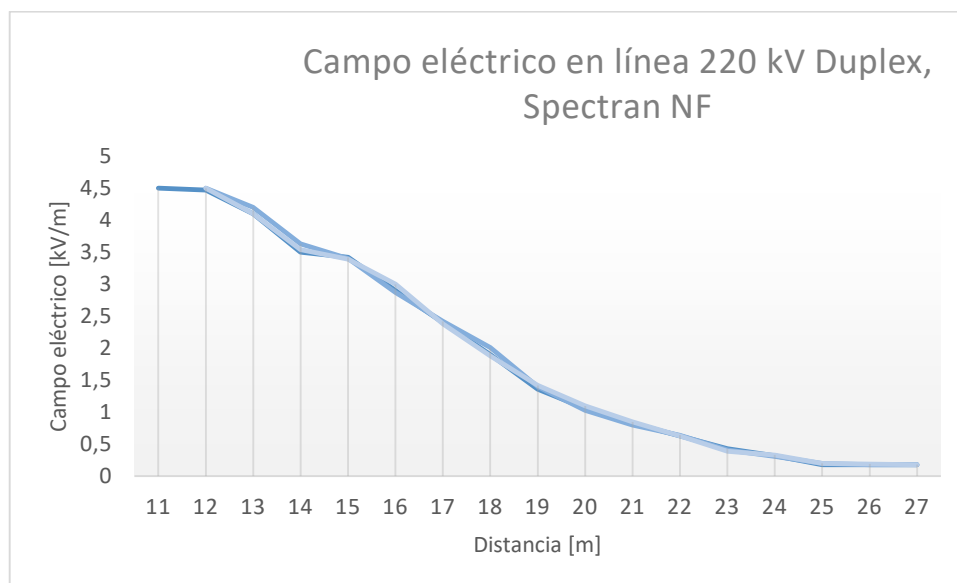


Figura 16: Distribución de campo eléctrico en línea 220kV Duplex con Spectran NF.

El campo máximo que puede medir el Spectran es de 4,5 kV/m. En todas las medidas realizadas entre 0 y 11 metros del apoyo se saturó el instrumento, indicando que el campo eléctrico era más intenso.

El límite marcado de exposición a campos eléctricos es de 5 kV/m para el público en general. Debajo de esta línea se excede ese límite de exposición.

Línea de 400 kV:



Figura 17: Línea aérea de 400kV y procedimiento de medida, subestación de Peñaflor, 2022.

Debajo de esta línea se realizaron mediciones de campo eléctrico y magnético con el Spectran NF y de campo magnético con el Sanwa TM. Las mediciones se realizaron a las 13h20 de un día entre semana.

Las mediciones de campo eléctrico con el Spectran se realizaron en la dirección horizontal y en la vertical.

Medición del campo eléctrico vertical:

Distancia [m]	Med.1: C.E. vert [kV/m]	Med.2: C.E. vert [kV/m]	Med.2: C.E. vert [kV/m]
0	sat	sat	3,3
2	sat	sat	3,5
4	sat	sat	4,48
6	sat	sat	4,4
8	sat	sat	3,25
10	4,5	4,4	4,5
12	4	4,1	4,5
15	3,5	4	4,5
20	3,4	2,7	4,4
25	2,8	1,9	4,14
30	1	1,15	3,3
Muestreo [s]	Ts=2	Ts=5	Ts=10

Tabla 18: Medidas de componente vertical del campo eléctrico en línea 400kV con Spectran NF, variación del tiempo de muestreo.

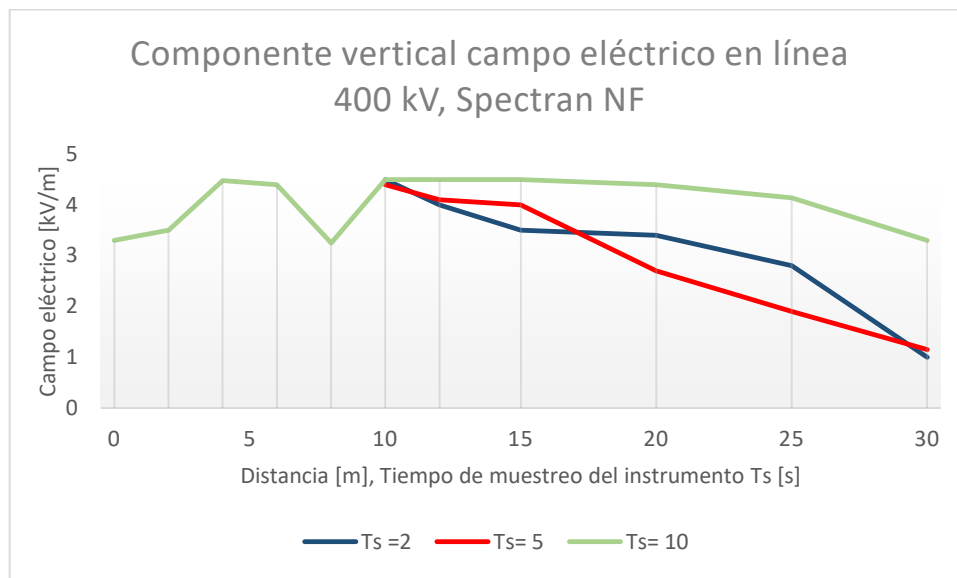


Figura 18: Distribución de componente vertical del campo eléctrico en línea 400kV con Spectran NF, variación del tiempo de muestreo.

Medición del campo eléctrico horizontal:

Distancia [m]	Med.1: C.E. horz [kV/m]	Med.2: C.E. horz [kV/m]
0	sat	sat
2	sat	sat
4	sat	sat
6	sat	sat
8	sat	sat
10	sat	sat
12	sat	sat
15	4,2	sat
20	4	4,5
25	2,9	4,4
30	2,13	2,7
35	1,4	1,9
40	1,4	1,6
Muestreo [s]	Ts =2	Ts= 5

Tabla 19: Medidas de componente horizontal del campo eléctrico en línea 400kV con Spectran NF, variación del tiempo de muestreo.

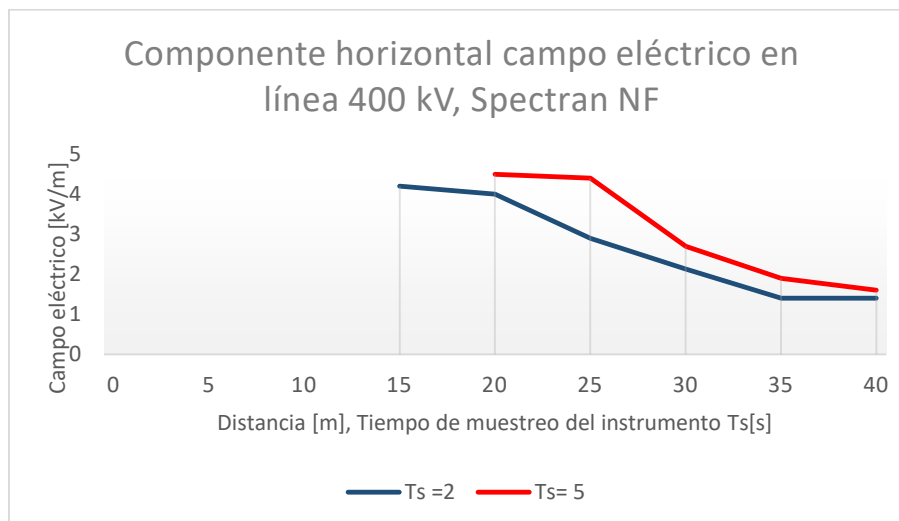


Figura 19: Distribución de componente horizontal del campo eléctrico en línea 400kV con Spectran NF, variación del tiempo de muestreo.

El Spectran NF tiene un tiempo de muestreo configurable. La direccionalidad del sensor de campo eléctrico condiciona negativamente la realización de medidas ya que en el terreno es complicado mantener el aparato quieto y orientado en la dirección adecuada. Un tiempo de muestreo de unos 2 segundos es el recomendado por los fabricantes para

este tipo de aplicaciones. Tiempos más largos aumentan las posibilidades de mover el instrumento y que los valores sean erróneos (como en el caso de $T_s=10s$).

Se puede observar que el campo eléctrico debajo de esta línea es muy intenso e incumple los límites de exposición al público en general. No se puede verificar el límite profesional con este instrumento.

Medición del campo magnético Spectran NF:

Distancia [m]	Med.1: C.M. [μT]	Med.2: C.M. [μT]
0	4,8	5,6
2	4,8	5,5
4	4,6	5,15
6	4,4	5
8	3,74	4,5
10	3,5	4,2
12	3	3,1
15	2,4	2,2
20	1,64	2
25	1,66	2,5
30	1,64	2,5
Altura suelo [m]	h=1m	h=2m

Tabla 20: Medición del campo magnético en línea 400kV con Spectran NF, variación de la altura respecto al suelo.

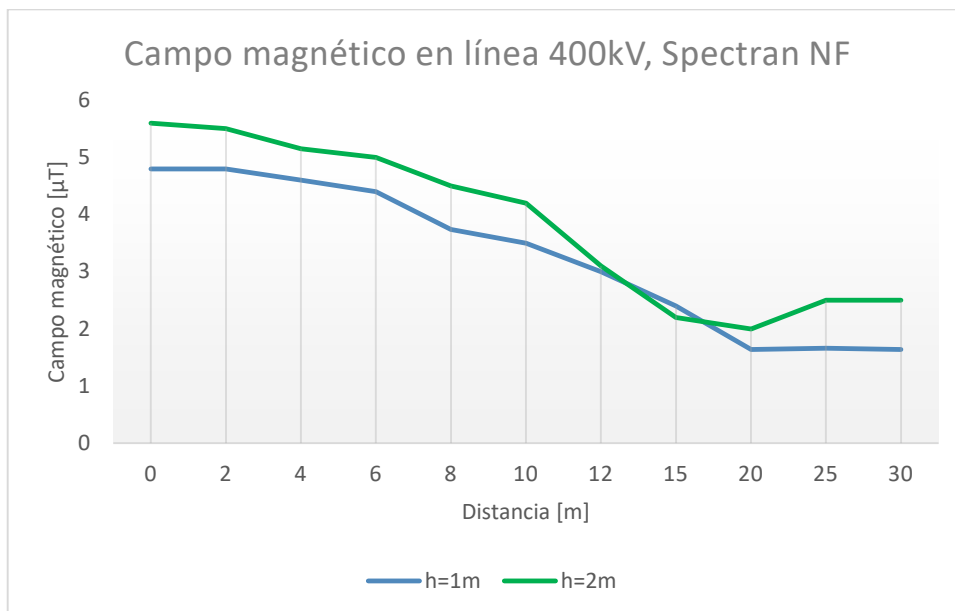


Figura 20: Distribución del campo magnético en línea 400kV con Spectran NF, variación de la altura respecto al suelo.

El campo magnético se mide de una manera muy conveniente debido a la tridimensionalidad de los sensores magnéticos. Aunque al aparato le cuesta más tiempo realizar la medición, la orientación no importa en los resultados obtenidos.

El terreno adyacente a la línea estudiada no era perfectamente plano. A los 12 metros había un escalón de unos 80 cm como ilustra la figura 21. En estas mediciones prestamos especial atención a mantener el instrumento a la misma altura en cada punto. Cuando se realizan medidas de este estilo es muy importante intentar mantener el aparato equidistante verticalmente a la línea, ya que un pequeño alejamiento o acercamiento puede variar mucho el resultado.

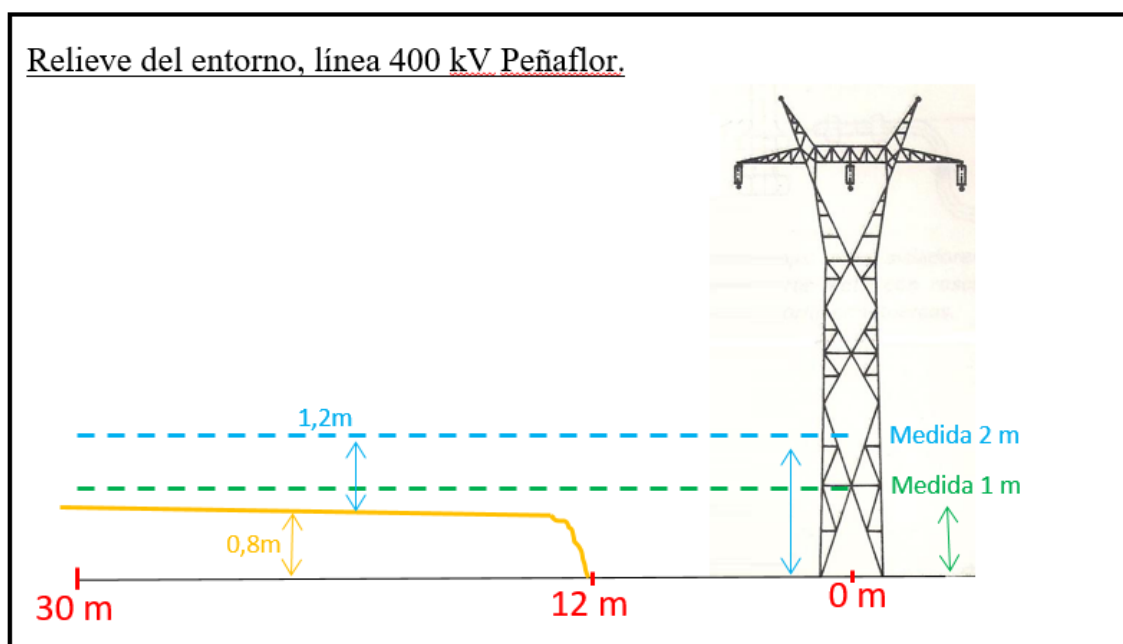


Figura 21: Esquema del relieve de la zona de medidas. Icono [36]

Medición del campo magnético Sanwa TM:

Distancia [m]	Med.1: C.M. vert [μT]	Med.1: C.M. horz [μT]	Módulo B [μT]
0	1,8	4,2	4,569463864
2	2,8	4	4,882622246
4	2,6	3,7	4,522167622
6	3,2	3	4,38634244
8	3,7	2,7	4,580392996
10	4	1,7	4,346262762
12	3,7	0,85	3,796379855
15	3,3	0,6	3,354101966
20	2,5	1	2,692582404
25	1,5	1,2	1,920937271
30	1	0,9	1,345362405

Tabla 21: Medición y módulo de componentes direccionales del campo magnético, línea 400kV con Sanwa TM 200.

El instrumento Sanwa TM también tiene el problema de tener una única direccionalidad. En un esfuerzo para comparar las mediciones realizadas por ambos aparatos se midieron las componentes verticales y horizontales del campo magnético y se calculó el módulo de este. Los valores obtenidos son satisfactoriamente similares.

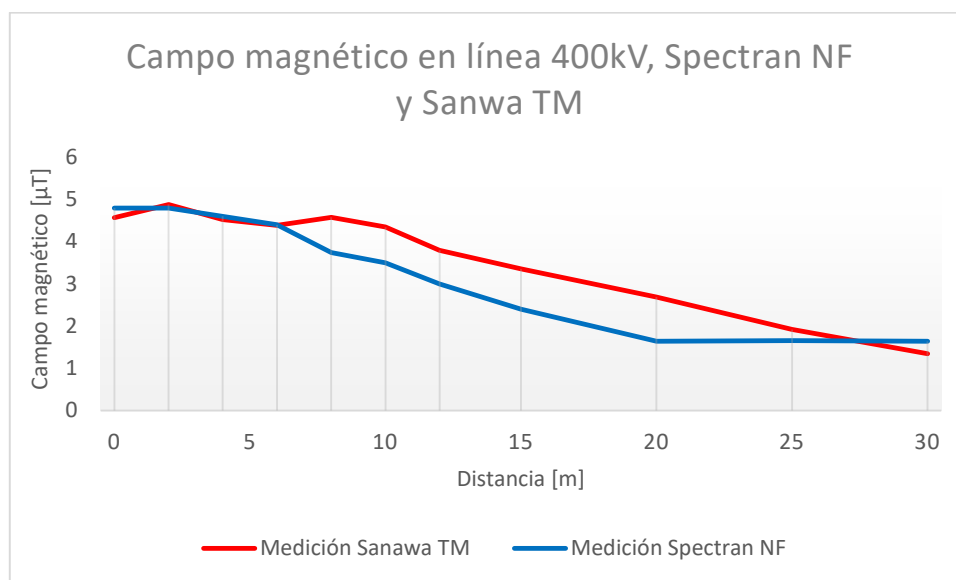


Figura 22: Comparación de mediciones de campo magnético entre Spectran NF [Tabla 20] y Sanwa TM [Tabla 21], línea 400kV.

Cabe destacar que los valores de campo magnético obtenido son muy similares a los que indica REE en la figura 5 (en torno a $6 \mu\text{T}$).

Anexo 4: Mediciones en laboratorio, experimentos.

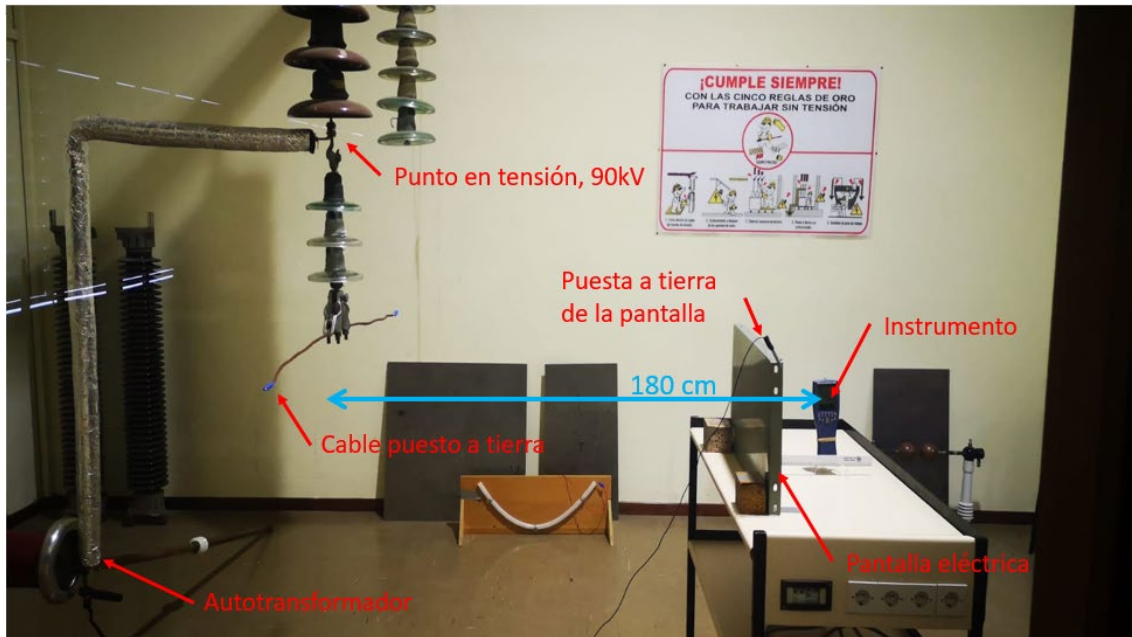


Figura 23: Preparación de los experimentos en el laboratorio.

El laboratorio está dispuesto de tal forma que se simula el cable de una línea aérea de alta tensión y su apoyo, a través de una cadena de aisladores. Un autotransformador pone en tensión el punto indicado en la figura lo que crea un campo eléctrico de 50 Hz en la sala que puede ser fácilmente medido con el instrumento.

Los experimentos están diseñados para demostrar el efecto apantallador de campo eléctrico que tiene un elemento metálico puesto a tierra.

Se realizan tres mediciones de campo eléctrico horizontal manteniendo la posición y orientación del instrumento: una sin pantalla, una con pantalla aislada de tierra y otra con pantalla conectada a tierra.

El proceso de manejo del autotransformador consiste en ir aumentando la tensión en sus bornes progresivamente desde 5 kV hasta 90 kV.

En las tablas, las medidas denominadas como “Medida sesión X” son las medidas realizadas por los alumnos en las sesiones de prácticas del curso 2022.

Experimento 1: Medición del campo eléctrico sin pantalla.

Tensión trafo [kV]	Medida control [kV/m]	Medida sesión 1 [kV/m]	Medida sesión 2 [kV/m]	Medida sesión 3 [kV/m]
5	0,525	0,54	0,53	0,55
10	1,066	1,02	1,04	1,01
20	2,13	2,06	2,12	2,05
30	3,21	2,96	3,1	3,04
40	4,01	3,92	4,03	3,95
50	4,44	4,32	4,38	4,41
60	4,5	4,4	4,5	4,5

Tabla 22: Experimento 1, medidas de campo eléctrico sin pantalla.

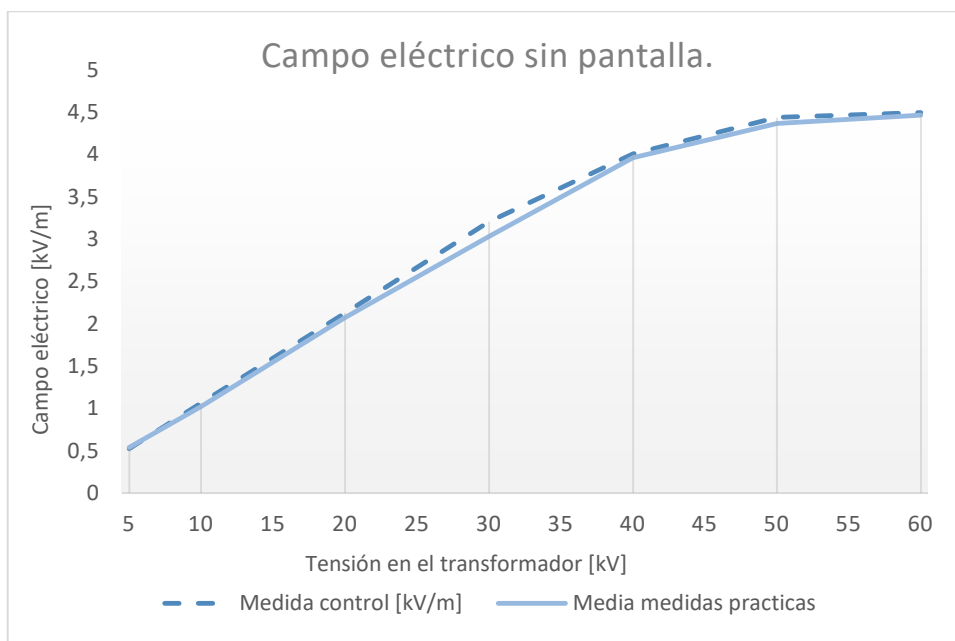


Figura 24: Distribución de medidas de campo eléctrico del Experimento 1.

Experimento 2: Medición del campo eléctrico con pantalla sin poner a tierra.

Tensión trafo [kV]	Medida control 1 [kV/m]	Medida control 2 [kV/m]	Medida sesión 1 [kV/m]	Medida sesión 2 [kV/m]	Medida sesión 3 [kV/m]
5	0,366	0,36	0,359	0,36	0,38
10	0,725	0,745	0,722	0,735	0,738
20	1,426	1,435	1,44	1,442	1,41
30	2,133	2,15	1,9	2	1,94
40	2,792	2,843	2,739	2,79	2,72
50	3,495	3,53	3,49	3,51	3,51
60	4,025	4,115	4	4,02	4,13
70	4,3	4,37	4,303	4,29	4,32
80	4,47	4,48	4,44	4,5	4,39
90	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5

Tabla 23: Experimento 2, medidas de campo eléctrico con pantalla aislada de tierra.

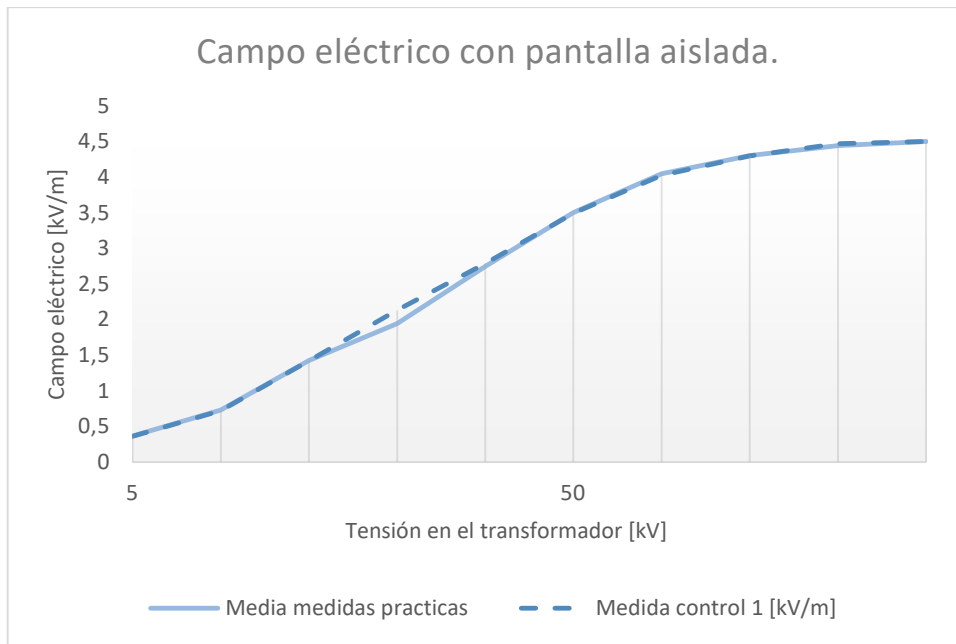


Figura 25: Distribución de medidas de campo eléctrico del Experimento 2.

Experimento 3: Medición del campo eléctrico con pantalla puesta a tierra.

Tensión trafo [kV]	Medida control 1 [kV/m]	Medida control 2 [kV/m]	Medida sesión 1 [kV/m]	Medida sesión 2 [kV/m]	Medida sesión 3 [kV/m]
5	0,041	0,024	0,031	0,042	0,029
10	0,079	0,082	0,068	0,073	0,08
20	0,162	0,163	0,165	0,159	0,165
30	0,235	0,243	0,242	0,248	0,237
40	0,315	0,315	0,319	0,317	0,304
50	0,392	0,397	0,389	0,402	0,394
60	0,463	0,47	0,466	0,472	0,468
70	0,54	0,543	0,537	0,541	0,54
80	0,616	0,616	0,621	0,614	0,625
90	0,686	0,686	0,689	0,703	0,692

Tabla 24: Experimento 3, medidas de campo eléctrico con pantalla conectada a tierra.

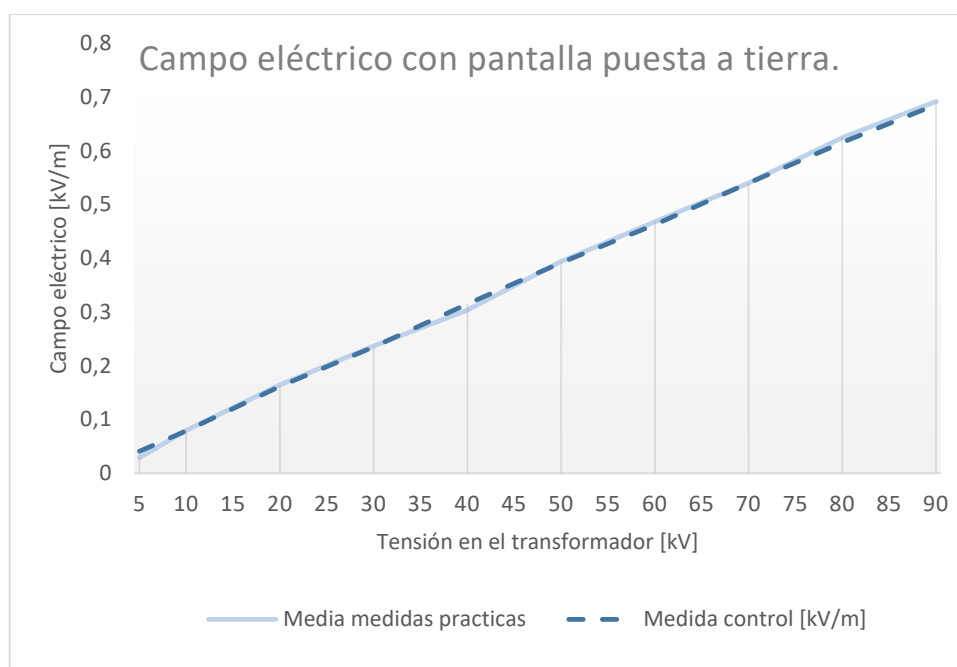


Figura 26: Distribución de medidas de campo eléctrico del Experimento 3.

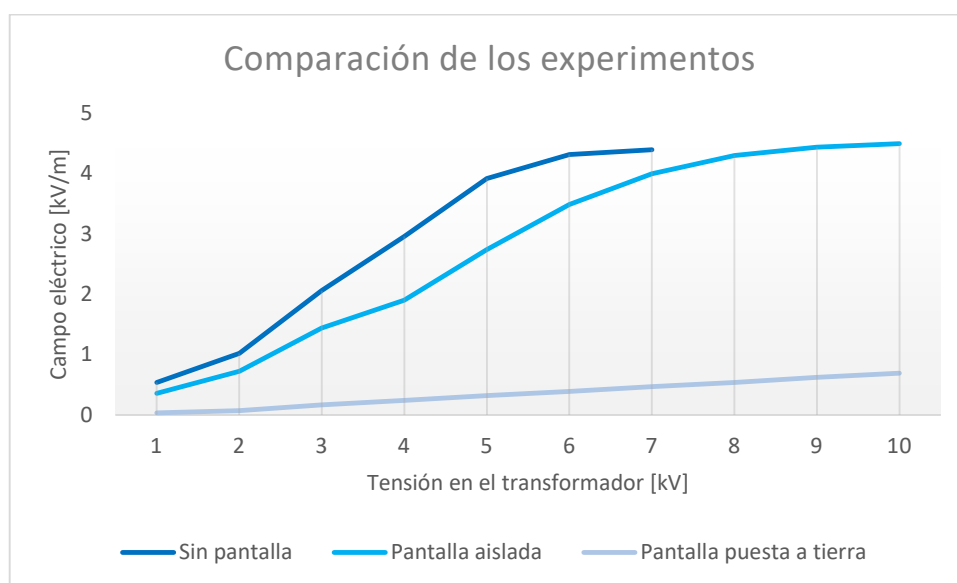


Figura 27: Comparación de los resultados

Comparación de los experimentos, conclusión:

Los resultados de los experimentos son muy claros, fácilmente repetibles y demuestran de forma clara el fenómeno que se deseaba observar.

Con estos experimentos se ha comprobado que el Spectran NF es capaz de realizar mediciones de campo eléctrico muy precisas siempre que el instrumento se mantenga totalmente quieto.



La conclusión a la que llegaron los alumnos después de realizar las mediciones es que una pantalla es un método muy efectivo de amortiguar campos eléctricos siempre que esta esté correctamente puesta a tierra.

Cómo análisis general de las capacidades y limitaciones del Spectran NF-5035, considero que cada sensor tiene ventajas e inconvenientes en diferentes situaciones:

El sensor eléctrico es muy preciso, pero a la vez necesita estar absolutamente quieto para realizar las mediciones, además que su limitación de 4,5 kV/m se suele quedar un poco corta en líneas aéreas. Para sacar el mayor partido se debe utilizar en ambientes de laboratorio.

El sensor magnético es más versátil y su tridimensionalidad facilita enormemente las mediciones en el terreno y la realización de barridos. No se ha podido comprobar su precisión en un laboratorio, pero los resultados obtenidos tienen magnitudes razonables y similares a las del otro aparato utilizado.

Configuración del Spectran NF como Logger.

Se ha realizado una prueba de la función Logger del instrumento.

En este caso se ha realizado el mismo experimento que en los apartados anteriores, precisamente la versión con la pantalla puesta a tierra (la distancia de la pantalla al instrumento cambió ligeramente al realizarse otro momento). Se configuró el instrumento para que realizase una medida cada 2 segundos durante 4,5 minutos.

El resultado que se obtiene es un fichero de texto, cómo en la tabla y que se puede organizar fácilmente en un programa de tratamiento de datos.

T	Logger	T	Logger	T	Logger	T	Logger
0	51,2 Hz 3,414665 V/m	68	51,2 Hz 26,886711 V/m	136	50 Hz 297,333069 V/m	204	43,2 Hz 26,801575 V/m
2	51,2 Hz 3,747649 V/m	70	51,2 Hz 26,790747 V/m	138	50,4 Hz 320,220886 V/m	206	57,2 Hz 27,468872 V/m
4	48,8 Hz 8,806893 V/m	72	51,2 Hz 26,954378 V/m	140	50 Hz 325,485962 V/m	208	48,8 Hz 27,00894 V/m
6	48,8 Hz 20,945168 V/m	74	51,2 Hz 27,222834 V/m	142	50,8 Hz 323,224243 V/m	210	48,8 Hz 27,203966 V/m
8	52,8 Hz 5,488661 V/m	76	51,2 Hz 26,942284 V/m	144	43,2 Hz 323,838806 V/m	212	51,2 Hz 27,013252 V/m
10	51,2 Hz 6,359158 V/m	78	51,2 Hz 26,853621 V/m	146	49,2 Hz 348,226257 V/m	214	48,8 Hz 27,036913 V/m
12	51,2 Hz 7,149067 V/m	80	51,2 Hz 27,02816 V/m	148	43,6 Hz 363,224365 V/m	216	48,8 Hz 26,974466 V/m
14	51,2 Hz 7,207276 V/m	82	51,2 Hz 27,057673 V/m	150	43,6 Hz 390,458679 V/m	218	48,8 Hz 27,061838 V/m
16	51,2 Hz 7,160484 V/m	84	51,2 Hz 27,056181 V/m	152	56,4 Hz 387,66687 V/m	220	51,2 Hz 26,967541 V/m
18	48,8 Hz 7,218081 V/m	86	51,2 Hz 26,764904 V/m	154	50 Hz 389,953003 V/m	222	51,2 Hz 27,145191 V/m
20	48,8 Hz 7,3191 V/m	88	51,2 Hz 26,862709 V/m	156	56,8 Hz 389,273804 V/m	224	51,2 Hz 27,120583 V/m
22	51,2 Hz 7,122751 V/m	90	51,2 Hz 26,967295 V/m	158	51,6 Hz 403,309875 V/m	226	51,2 Hz 7,094484 V/m
24	51,2 Hz 7,148279 V/m	92	48,8 Hz 26,922167 V/m	160	56,4 Hz 438,308044 V/m	228	51,2 Hz 7,000958 V/m
26	51,2 Hz 7,143942 V/m	94	51,2 Hz 26,926842 V/m	162	56,4 Hz 466,596375 V/m	230	48,8 Hz 6,988071 V/m
28	51,2 Hz 7,297258 V/m	96	51,2 Hz 26,87557 V/m	164	42,8 Hz 466,529968 V/m	232	51,2 Hz 7,312811 V/m
30	51,2 Hz 7,130261 V/m	98	51,2 Hz 43,063755 V/m	166	50,8 Hz 468,686035 V/m	234	48,8 Hz 7,263597 V/m
32	51,2 Hz 7,214047 V/m	100	51,2 Hz 59,51474 V/m	168	43,2 Hz 469,597473 V/m	236	51,2 Hz 7,168086 V/m
34	48,8 Hz 7,258942 V/m	102	51,2 Hz 59,495285 V/m	170	50 Hz 469,723572 V/m	238	51,2 Hz 7,220552 V/m
36	51,2 Hz 7,234194 V/m	104	51,2 Hz 59,482059 V/m	172	56,4 Hz 492,188171 V/m	240	48,8 Hz 7,425953 V/m
38	48,8 Hz 7,227441 V/m	106	51,2 Hz 59,429668 V/m	174	50,4 Hz 524,937561 V/m	242	51,2 Hz 7,308573 V/m
40	51,2 Hz 7,219512 V/m	108	51,2 Hz 59,416904 V/m	176	43,6 Hz 537,524292 V/m	244	51,2 Hz 7,286184 V/m
42	51,2 Hz 6,858141 V/m	110	51,2 Hz 80,594868 V/m	178	42,8 Hz 538,518005 V/m	246	51,2 Hz 7,234064 V/m
44	51,2 Hz 6,662864 V/m	112	51,2 Hz 103,062302 V/m	180	43,2 Hz 538,84375 V/m	248	51,2 Hz 7,191234 V/m
46	51,2 Hz 7,093293 V/m	114	51,2 Hz 173,021637 V/m	182	43,2 Hz 578,717163 V/m	250	51,2 Hz 7,208578 V/m
48	48,8 Hz 7,10731 V/m	116	51,2 Hz 176,696411 V/m	184	43,6 Hz 602,614014 V/m	252	48,8 Hz 7,382074 V/m
50	48,8 Hz 7,094881 V/m	118	48,8 Hz 175,333679 V/m	186	43,2 Hz 629,839111 V/m	254	48,8 Hz 7,264372 V/m
52	48,8 Hz 7,203106 V/m	120	48,8 Hz 176,363708 V/m	188	51,6 Hz 630,820435 V/m	256	48,8 Hz 7,211314 V/m
54	51,2 Hz 7,030803 V/m	122	51,2 Hz 181,623108 V/m	190	43,2 Hz 630,84375 V/m	258	51,2 Hz 7,191495 V/m
56	51,2 Hz 7,138026 V/m	124	50,4 Hz 203,321777 V/m	192	43,6 Hz 629,02887 V/m	260	51,2 Hz 7,254025 V/m
58	51,2 Hz 10,230419 V/m	126	48,4 Hz 241,105164 V/m	194	43,2 Hz 652,24115 V/m	262	51,2 Hz 7,246643 V/m
60	51,2 Hz 26,791239 V/m	128	50,4 Hz 241,514404 V/m	196	43,6 Hz 689,990356 V/m	264	51,2 Hz 7,190451 V/m
62	51,2 Hz 26,776585 V/m	130	50,4 Hz 242,497253 V/m	198	43,2 Hz 689,907349 V/m	266	48,8 Hz 7,324998 V/m
64	51,2 Hz 26,775007 V/m	132	50,4 Hz 241,19519 V/m	200	43,2 Hz 201,115662 V/m	268	48,8 Hz 7,297773 V/m
66	51,2 Hz 26,75136 V/m	134	51,6 Hz 274,580933 V/m	202	56,4 Hz 26,171021 V/m	270	51,2 Hz 7,35289 V/m

Tabla 25: Datos de campo eléctrico proporcionados por la función Logger del Spectran NF, Experimento con pantalla conectada a tierra.

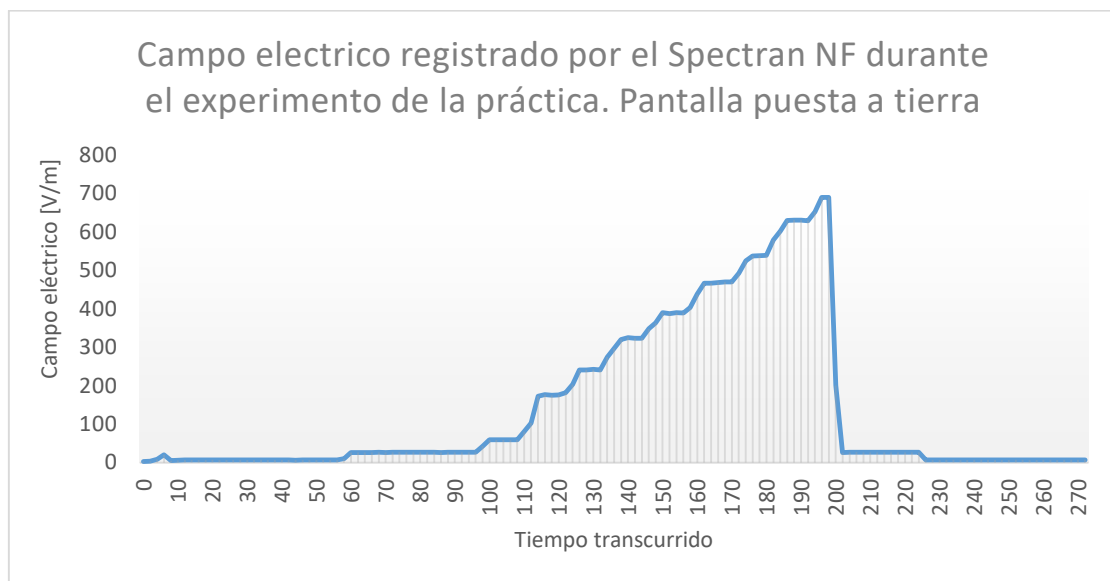


Figura 28: Evolución temporal del campo eléctrico medido por el Spectran NF funcionando como Logger.

La figura 28 muestra las medidas de campo eléctrico obtenidas con el modo Logger. Con estos gráficos es muy fácil explicar el desarrollo temporal del experimento, como se puede observar en la figura 29.

Evolución del campo eléctrico durante el experimento.

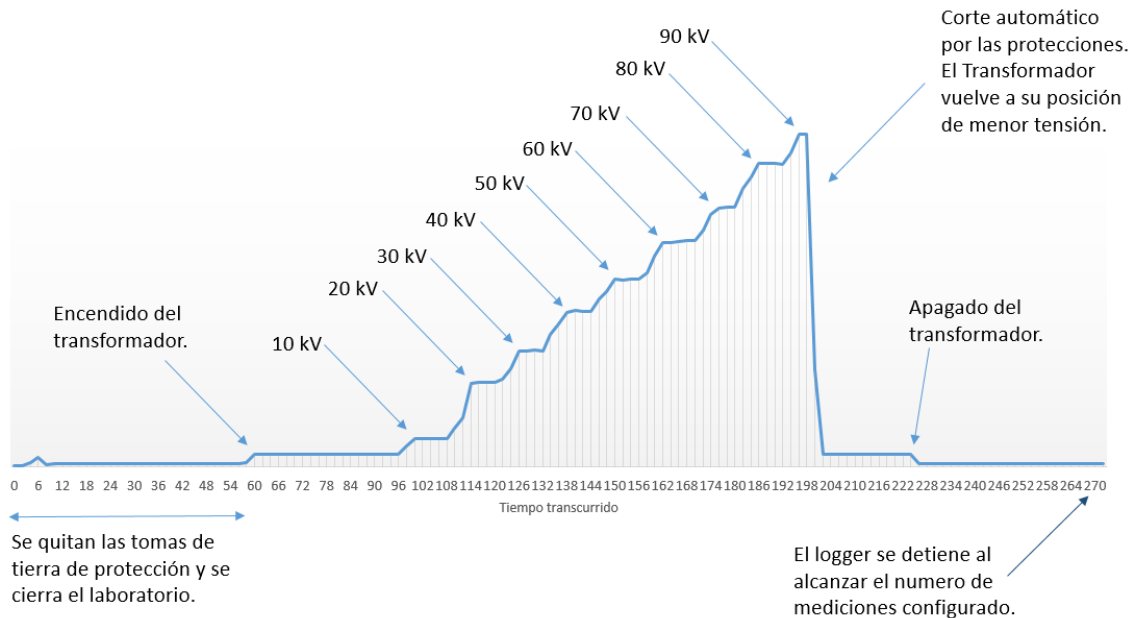


Figura 29: Análisis del desarrollo del experimento con los resultados del Logger.