



Trabajo Fin de Grado

Emisión de campos electromagnéticos en sistemas de transporte de energía eléctrica. Medición y análisis en una subestación de 400 kV.

Electromagnetic field emission in electric power transmission system. Measurement and analysis in a 400 kV substation.

Autor/es

Gabriel Gimeno Lázaro

Director/es

Antonio Usón Sardaña

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)

2025

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. Resumen..... | 3 |
| 2. Objetivos..... | 4 |
| 3. Introducción | 5 |
| 4. Medidas de seguridad | 6 |
| 4.1 ¿Qué son los CEMs? | 6 |
| 4.2 Medidas campos eléctricos y magnéticos | 7 |
| 5. Impacto social | 9 |
| 6. Riesgos..... | 9 |
| 6.1 Estudios previos..... | 11 |
| 7. Instrumento y medidas de CEMs | 14 |
| 7.1 Prestaciones | 16 |
| 7.2 Puesta a punto | 16 |
| 8. Prácticas laboratorio | 17 |
| 8.1 Vector intensidad de campo eléctrico | 17 |
| 8.2 Vector inducción magnética | 21 |
| 9. Subestación | 23 |
| 9.1 Lugares más desfavorables | 25 |
| 10. Conclusiones..... | 28 |
| 11. Referencias bibliográficas..... | 30 |

1. RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado trata sobre la medición de campos electromagnéticos en una subestación de 400 kV, con el objetivo de determinar si los valores registrados podrían resultar perjudiciales para los trabajadores o para personas con presencia puntual en la subestación.

En primer lugar, se introduce el concepto de campos electromagnéticos, sus características principales, los posibles riesgos asociados y estudios previos relevantes.

Las mediciones se llevarán a cabo utilizando el instrumento SMP2, cedido por el Instituto Universitario de Investigación Mixto de la Energía y Eficiencia de los Recursos de Aragón (anteriormente fundación CIRCE). Antes de su aplicación en la subestación, se realizarán mediciones prácticas preliminares con el fin de familiarizarse con el equipo y validar su funcionamiento.

Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos tanto en las pruebas previas como en la subestación, extrayendo conclusiones sobre los niveles de exposición y su posible impacto sobre la salud.

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on the measurement of electromagnetic fields in a 400 kV substation, aiming to determine whether the recorded values could be harmful to workers or individuals who occasionally access the facility.

First, the concept of electromagnetic fields is introduced, along with their main characteristics, potential associated risks, and a review of relevant previous studies.

The measurements will be carried out using the SMP2 device provided by the Instituto Universitario de Investigación Mixto de la Energía y Eficiencia de los Recursos de Aragón. Before conducting measurements in the substation, preliminary tests will be performed to familiarize with the equipment and verify its proper functioning.

Finally, the results from both the preliminary tests and the substation measurements will be analyzed, leading to conclusions regarding exposure levels and their potential impact on human health.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es proporcionar información sobre el nivel de exposición a los campos electromagnéticos de baja frecuencia (CEMs) en instalaciones de muy alta tensión, analizando su distribución y fluctuaciones. Estas observaciones se compararán con distintos estudios de la bibliografía, que tratan sobre los efectos que pueden resultar debidos a las exposiciones a distintos niveles de campo, tanto eléctrico como magnético.

Uno de los aspectos clave del estudio será la introducción y explicación del origen de los CEMs, así como su posible impacto ambiental, fisiológico y en la salud humana, de los trabajadores de la subestación.

Para ello, se llevará a cabo un análisis crítico de los resultados enfocado en el uso, configuración y funcionamiento del analizador de CEMs proporcionado por el Instituto Universitario de Investigación Mixto de la Energía y Eficiencia de los Recursos de Aragón (WaveControl SMP2).

Con este instrumento se medirán las intensidades de los campos electromagnéticos durante las prácticas de laboratorio de la asignatura de Líneas Eléctricas, con el fin de verificar el cumplimiento de los límites permitidos, garantizar la seguridad de los alumnos expuestos y comparar las mediciones con la obtenidas mediante el instrumento utilizado por la EINA para dicha práctica.

Finalmente, se presentarán las conclusiones sobre el estudio realizado en la subestación, así como de las mediciones llevadas a cabo en las clases prácticas, con el objetivo de determinar si hay algún riesgo asociado al trabajo cercano a CEMs de frecuencia industrial.

3. INTRODUCCIÓN

Los CEMs son parte consustancial con la naturaleza, pero su exposición ha aumentado considerablemente en el siglo XX debido al uso de la electricidad y cambios en las prácticas laborales y sociales. Esto ha generado preocupación sobre sus posibles efectos en la salud, especialmente en relación con el cáncer y el sistema nervioso. Aunque la Comisión Internacional para la Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP) establece límites para evitar efectos en el sistema nervioso, la controversia sobre otros posibles riesgos continúa.

Sin duda, el crecimiento de aplicaciones prácticas del electromagnetismo desde los primeros estudios científicos ha sido muy notable, tanto que ha convertido a los CEMs y más directamente a la energía eléctrica en un pilar fundamental de nuestra sociedad actual, haciendo difícil imaginar nuestra vida, nuestras relaciones sociales y laborales sin la existencia de la misma.

En el contexto de la transición ecológica y la Agenda 2030, la demanda energética está evolucionando hacia fuentes renovables. Se prevé una expansión significativa de la movilidad eléctrica y el transporte ferroviario, lo que requerirá la instalación de nuevas infraestructuras de alta tensión. Esto plantea desafíos técnicos y sociales, ya que la opinión pública suele percibir negativamente estas infraestructuras.

En este marco la Organización de Naciones Unidas subraya mediante la Agenda 2030 la importancia de garantizar el acceso a energía asequible y sostenible (Objetivo de Desarrollo Sostenible [ODS] 7), así como garantizar la salud y el bienestar de las personas (ODS 3). De la misma forma estos objetivos se encuentran interrelacionados con los ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) y ODS 12 (Producción y Consumo Responsables).

Es crucial que los ingenieros eléctricos que sean responsables, comprendan el impacto de las instalaciones de alta tensión y comuniquen de manera clara y fundamentada sus efectos reales. Para asegurar la sostenibilidad y minimizar riesgos, es fundamental medir correctamente los CEMs y cumplir con normativas vigentes.

Este trabajo busca mejorar la precisión de las mediciones realizadas en anteriores trabajos, utilizando nuevos dispositivos y técnicas, contribuyendo a una mejor comprensión de los CEMs y su impacto en la salud y el medio ambiente.

En este documento no trataré la parte de la explicación y el origen de los campos electromagnéticos, ya que otros estudiantes en cursos anteriores ya lo han desarrollado exhaustivamente. En este nos centraremos más en las medidas. En momentos puntuales, sí que explicaré o tomaré referencias para aclarar ciertos aspectos de los CEMs.

4. MEDIDAS DE SEGURIDAD

4.1 ¿Qué son los CEMs?

El campo electromagnético se divide en campos eléctricos y magnéticos. El concepto de campo describe una zona donde se ejerce la influencia de un agente, en este caso físico. Los campos eléctricos y magnéticos ya sean de origen natural o producidos por el hombre forman parte de nuestra vida diaria.

Los campos eléctricos tienen su origen en las cargas electrostáticas y en la variación temporal del campo magnético, mientras que los campos magnéticos necesitan que la carga que lo crea tenga movimiento como en las corrientes eléctricas. El campo magnético también puede ser creado por un imán permanente y por la variación temporal del campo eléctrico.

Por un lado, tenemos el campo eléctrico, el cual se mide en voltios por metro [V/m], o en su múltiplo, que para este trabajo resulta más adecuado: kilovoltios por metro [kV/m]. Para demostrar que es posible vivir sometidos a campos eléctricos, se puede mencionar el campo eléctrico natural, creado por las cargas eléctricas presentes en la ionosfera y en los cumulonimbos, cuyos valores varían desde los 100 V/m hasta los 20 kV/m [1], dependiendo de si hay buen tiempo o una fuerte tormenta, respectivamente.

Por otro lado, tenemos el campo magnético, el cual se mide en teslas [T], o en su fracción, que para este trabajo resulta más adecuada: microteslas [μ T], una millonésima parte de un tesla. Al igual que en el caso anterior, es posible vivir sometidos a campos magnéticos, como el campo magnético natural estático terrestre. La intensidad de este campo varía con la latitud: desde 30 μ T en el ecuador hasta unos 67 μ T en los polos. Como dato, en España el campo magnético es de aproximadamente 40 μ T [1].

Estos campos juntos crean el campo electromagnético. Actualmente estamos sometidos a numerosos tipos de CEMs de origen artificial: radiofrecuencias, ondas de radio, radares, manos a distancia y un largo etcétera. Todos estos forman parte del espectro electromagnético y se diferencian en su frecuencia, que determina sus características físicas y también los efectos biológicos que pueden producir.

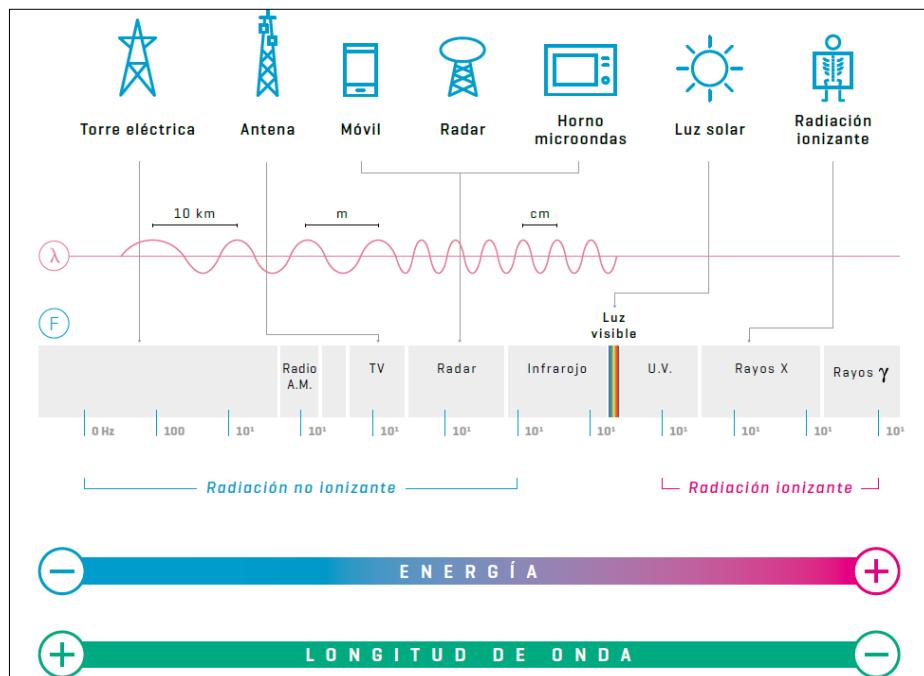


Figura 1. Espectro electromagnético¹

Como se puede observar en las frecuencias más altas la energía es mayor, son radiaciones ionizantes con energía para romper enlaces químicos incluido el material genético de la célula (ADN), siendo capaz de iniciar un proceso cancerígeno. A frecuencias intermedias como microondas o radiofrecuencias la energía no es suficiente para romper moléculas, pero sí que transmiten energía como para producir un calentamiento. Y por último las frecuencias extremadamente bajas, que son con las que funciona todos los sistemas eléctricos 50-60 Hz (frecuencia industrial). Estas frecuencias son tan bajas que no producen ni calentamiento al medio que atraviesan.

4.2 Medidas campos eléctricos y magnéticos

En este trabajo nos centraremos en frecuencias extremadamente bajas (50-60 Hz) que, aunque no son ionizantes, también tienen valores de exposición recomendados. Normalmente, cada país establece sus propias normas nacionales relativas a la exposición a campos electromagnéticos. Sin embargo, estas normas suelen basarse en las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y de su Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP), como es el caso de España con el Real Decreto 299/2016 [2].

¹ Campos Eléctricos REDEIA

La última actualización de estas directrices se realizó en abril de 1998. Según la ICNIRP, los valores recomendados para los campos eléctricos son de 5 kV/m para el público en general y 10 kV/m para los trabajadores. En cuanto a los campos magnéticos, el límite recomendado es de 100 µT para la población general (83 µT a 60 Hz) y de 1000 µT para los trabajadores [OMS].

A continuación, se mostrarán algunas medidas a distintas distancias. A pesar de que algunos valores son bastante elevados, y están por encima de lo recomendado por la normativa vigente, se autoriza su uso ya que el tiempo de exposición suele ser muy corto.

| Electrodoméstico | Campo eléctrico [kV/m] |
|------------------|------------------------|
| Plancha | 0,12 |
| Frigorífico | 0,12 |
| Mezcladora | 0,1 |
| Tostadora | 0,08 |
| Secador de pelo | 0,08 |
| Televisión | 0,06 |
| Máquina de café | 0,06 |
| Aspiradora | 0,05 |
| Horno eléctrico | 0,008 |
| Bombilla | 0,005 |

Tabla 1. Campo eléctrico para diferentes electrodomésticos² medido a 30 cm

| Electrodoméstico | 3 cm | 30 cm | 1 m |
|----------------------|------------|-------------|-------------|
| Secador de pelo | 6 - 2.000 | 0,01 - 7 | 0,01 - 0,03 |
| Afeitadora eléctrica | 15 - 1.500 | 0,08 - 9 | 0,01 - 0,03 |
| Aspiradora | 200 - 800 | 2 - 20 | 0,13 - 2 |
| Tubo fluorescente | 40 - 400 | 0,5 - 2 | 0,02 - 0,25 |
| Horno microondas | 73 - 200 | 4 - 8 | 0,25 - 0,6 |
| Radio | 16 - 56 | 1 | < 0,01 |
| Horno eléctrico | 1 - 50 | 0,15 - 0,5 | 0,01 - 0,04 |
| Lavadora | 0,8 - 50 | 0,15 - 3 | 0,01 - 0,15 |
| Plancha | 8 - 30 | 0,12 - 0,3 | 0,01 - 0,03 |
| Lavaplatos | 3,5 - 20 | 0,6 - 3 | 0,07 - 0,3 |
| Ordenador | 0,5 - 30 | < 0,01 | |
| Frigorífico | 0,5 - 1,7 | 0,01 - 0,25 | < 0,01 |
| Televisión | 2,5 - 50 | 0,04 - 2 | 0,01 - 0,15 |

Tabla 2. Campo magnético [µT] a diferentes distancias de varios electrodomésticos³

Como podemos observar, la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos disminuye rápidamente al alejarnos, siendo muy baja ya a una distancia de 30 cm. Esto también sucede en las líneas eléctricas, aunque a una escala mayor. En una línea de 400 kV, midiendo lo más cercano al conductor, los valores son de 3-5 kV/m y 1-15 µT, mientras que a 30 metros de reducen a 0,2-2 kV/m y 0,1-3 µT. Estos datos serán verificados más adelante con las mediciones realizadas en este proyecto [REDEIA].

² Oficina federal alemana de seguridad radiológica, 1999

³ Oficina federal alemana de seguridad radiológica, 1999

| Tensión [kV] | Campo magnético de 50 Hz [μ T] | | | Campo eléctrico de 50 Hz [kV/m] | | |
|--------------|-------------------------------------|---------|---------|---------------------------------|---------|---------|
| | Bejo conductores | a 30 m | a 100 m | Bejo conductores | a 30 m | a 100 m |
| 400 | 0,4-15 | 0,1-3 | <0,3 | 1,2-5 | 0,2-2 | <0,2 |
| 220 | 0,4-6 | 0,1-1,5 | <0,2 | 0,7-3 | 0,1-0,5 | <0,1 |
| 132 | 0,5-2 | 0,1-1 | <0,08 | 0,5-0,8 | 0,1-0,3 | <0,05 |
| 66 | 0,2-0,5 | <0,1 | <0,03 | 0,5-0,8 | <0,1 | <0,04 |

Tabla 3. Campo eléctrico y magnético de diferentes tipos de líneas⁴

5. IMPACTO SOCIAL

La preocupación por la salud humana y los factores que pudieran influir en ella han aumentado desde los años 70, debido al aumento de los CEMs. Esto se aprecia mirando los titulares de las noticias, que permiten hacerse una idea de los diversos aspectos que preocupan a la sociedad.

La sociedad tiene mejor aceptado los riesgos derivados de una exposición voluntaria que a los involuntarios o los impuestos por entidades. Como prueba, tenemos la preocupación por las líneas de alta tensión o por la instalación de antenas. Esta inquietud no se percibe por el uso del teléfono móvil, que, por operar en contacto directo con el cuerpo, deposita mayor energía que las líneas o antenas.

La población desconoce la verdadera naturaleza de estos fenómenos, por eso, las informaciones falsas o poco rigurosas ayudan a generar rechazo, miedo y desconfianza sobre los efectos reales de los CEMs. Por ello, es recomendable que las noticias relativas a estas cuestiones estén redactadas con rigor, desde el conocimiento técnico y la razón.

6. RIESGOS

Los riesgos dependen tanto de la frecuencia como de la intensidad de los CEMs. Está demostrado que los CEMs de altas frecuencias son perjudiciales, pero lo que se estudia es si los campos de frecuencias bajas, pero con una intensidad elevada, también son perjudiciales a largo plazo.

Los CEMs provocan el movimiento de cargas eléctricas en el interior de nuestro organismo. Estas corrientes, originadas por fuentes externas al propio cuerpo humano, pueden, de alguna forma, interferir con las que se encargan de transmitir los impulsos

⁴ Medidas realizadas por Red Eléctrica en sus propias líneas

nerviosos a distintas partes del organismo y, de esta forma, provocar anomalías o un mal funcionamiento del sistema nervioso.

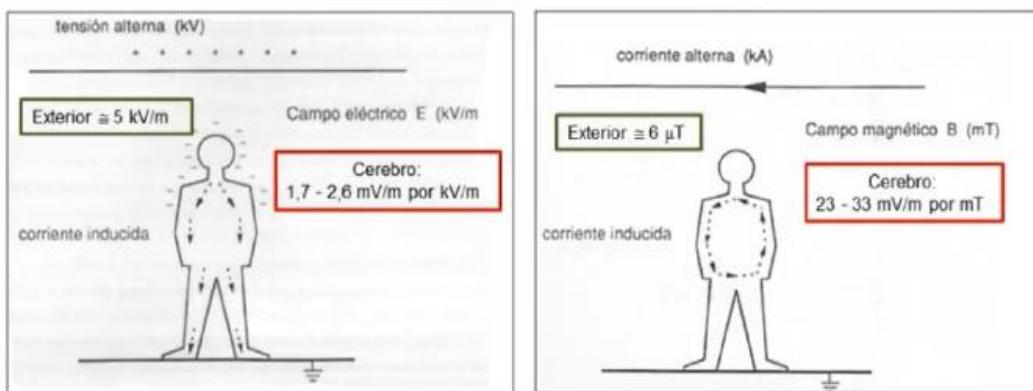


Figura 2. Inducción en el sistema nervioso central, magnitudes⁵

Se admite que, valores por encima de los umbrales limitados por las normativas y recomendaciones, los CEMs de baja frecuencia sí que pueden llegar a tener riesgos fisiológicos. Los primeros efectos que se podrían originar en el cuerpo serían “sensitivos”, como movimiento y erizado del cabello y del vello corporal, o ligeros cosquilleos. En campos que indujeran corrientes en el cuerpo cuya intensidad fuera entre 10 y 100 veces mayor que la inducida anteriormente, podrían darse episodios de contracciones, movimientos musculares involuntarios, estimulación de los órganos sensoriales (como destellos en la visión) y pérdida del tiempo de reacción. En casos extremos, se podrían llegar a producir efectos de calentamiento, quemaduras e incluso la muerte. Estos efectos fisiológicos desaparecen inmediatamente al disminuir la exposición a los CEMs.

Estos riesgos ocurren cuando sobrepasamos los límites establecidos por las recomendaciones sobre CEMs. Aun así, se cree que hay otros riesgos relacionados con la exposición prolongada a CEMs de baja frecuencia, como dolores de cabeza, ansiedad, suicidios y depresiones, náuseas, fatiga y pérdida de la libido. Sin embargo, las pruebas científicas no apoyan la existencia de una relación entre estos síntomas y la exposición a CEMs.

Al parecer la ausencia de pruebas no es suficiente para los 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

⁵ A. Usón. Líneas Eléctricas 2002

comprendible 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.

A continuación, nombramos algunos estudios sobre los posibles riesgos más graves, como alteraciones cardiovasculares y cerebrales, riesgo de cáncer, estrés oxidativo, efectos sobre el embarazo, etc.

6.1 Estudios previos

Según la OMS en los últimos 30 años, se han publicado aproximadamente 25000 artículos sobre los efectos biológicos y aplicaciones médicas de la radicación no ionizante, lo que posiblemente les convierta en el agente más estudiado de la historia. Muchas personas piensan que se necesita más investigación, pero los conocimientos en este campo son mas amplios que los correspondientes a la mayoría de productos químicos.

- Estudios sobre el riesgo de cáncer

Los resultados de los últimos estudios —como [3] - [8] — no modifican la conclusión expresada en la publicación conjunta de AELEC (Asociación de Empresas de Energía Eléctrica) con Red Eléctrica en 2001. “*No se ha concluido, por el momento, que los campos electromagnéticos de frecuencia industrial tengan una influencia en el desarrollo de leucemias o tumores cerebrales.*”.

La Agencia Internacional para la investigación del Cáncer (IARC) clasificó en 2002 —a partir del estudio [9] — los campos magnéticos en relación con la leucemia infantil en la categoría 2B, es decir, como posiblemente carcinógenos para las personas. Para ponerlo en contexto y evitar alarmas innecesarias, en esta misma categoría también se encuentra el café, y son conocidos como agentes cuya acción cancerígena está escasamente probada.

- Estudios sobre el riesgo de leucemia

Los estudios de AELEC no muestran una clara relación entre un mayor riesgo de leucemia infantil y la exposición a campos magnéticos en función de la distancia a líneas eléctricas. Cuando se agrupan los datos en un meta-análisis, se observa un aumento del riesgo a partir de exposiciones promediadas de 0,3 – 0,4 µT, niveles presentes en el 0,5% y 7% de los domicilios.

Sin embargo, ningún organismo ha dictaminado que estos datos permitan concluir que los campos magnéticos sean cancerígenos, ya que tendríamos que descartar aquellos indicios que se deban al azar o factores de confusión. Por esta razón, y a pesar de otros estudios —como [10] - [12]—, no se ha conseguido cambiar la clasificación del IARC.

En conclusión, no se ha constatado una relación causa-efecto entre la exposición a campos magnéticos de frecuencia industrial y el riesgo de leucemia infantil.

- Estudios sobre el riesgo de tumores cerebrales

Los estudios sobre tumores cerebrales son menos numerosos que los de leucemia, pero no por ello muestran un aumento de riesgo.

Los estudios más determinantes en este campo se llevaron a cabo hasta el 2010 —[13] - [16]—, y en estudios más recientes, a pesar de haber mejorado la metodología de los estudios, se ha llegado a la misma conclusión.

De todo lo anterior podemos concluir que los estudios no han demostrado que existe un aumento de riesgo de tumores cerebrales por la exposición doméstica a los campos electromagnéticos.

- Estudios sobre el riesgo de enfermedades neurodegenerativas

Se estudia si hay un riesgo aumentado de enfermedades como Alzheimer, la enfermedad de neurona motora (ELA) o el Parkinson. Por su importancia, no solo se estudia si existe una relación, sino también se investiga el posible mecanismo responsable de este efecto.

Los estudios publicados por la OMS —como [17] - [19]— no pueden interpretarse como evidencia de un aumento del riesgo de estas enfermedades. A este tipo de resultados se les denomina “evidencia inadecuada”.

- Estudios sobre el riesgo de fertilidad, reproducción y desarrollo

En más de 20 estudios con animales, AELEC concluyó que los campos de frecuencia industrial no parecen interferir en el crecimiento fetal ni ocasionar una mayor incidencia de abortos o malformaciones.

La OMS realizó estudios para campos eléctricos de hasta 150 kV/m sin ver efectos adversos. De igual manera, para campos magnéticos de hasta 20 mT no se detectaron malformaciones.

Como conclusión, salvo por dos estudios realizados en 2002 —[20], [21]—, no se ha visto una relación entre la exposición a campos magnéticos de frecuencia industrial y efectos adversos sobre el embarazo o desarrollo fetal.

- Estudios sobre el riesgo de hipersensibilidad

La hipersensibilidad electromagnética o para la OMS la intolerancia idiopática ambiental atribuida a los CEMs, presentan síntomas poco específicos atribuidos a estos fenómenos.

En los estudios, destacando los 6 más importantes —[22] - [27]—, se ha observado que las personas denominadas como hipersensibles no detectan la existencia de un campo electromagnético mejor que las no hipersensibles.

La conclusión es que no hay evidencia científica de que los problemas de las personas hipersensibles estén causados por los CEMs.

- Estudios sobre el riesgo de cáncer en trabajadores expuestos a CEMs

Durante los últimos años se han realizado más de 50 estudios sobre el riesgo de cáncer en relación con la exposición laboral a CEMs de frecuencia industrial. En los primeros estudios se pudo mostrar un ligero aumento del riesgo de ciertos tipos de cáncer. Sin embargo, estudios posteriores, con grupos más numerosos y un mejor conocimiento del nivel de exposición, no se han corroborado los hallazgos iniciales.

La OMS en 2007 se pronuncio sobre la exposición laboral, concluyendo que para ellos la evidencia es inadecuada. De manera similar, la IARC (Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer) declaró que no existe una asociación coherente ni hallazgos concluyentes entre la intensidad del campo eléctrico y algún tipo de cáncer.

En conclusión, tras el análisis de los estudios más relevantes —como [28] - [31]—, no se puede afirmar que la exposición laboral a CEMs esté asociada a un riesgo aumentado de desarrollar distintos tipos de cáncer.

- Estudios sobre el riesgo de cáncer en hijos de trabajadores expuestos a campos de frecuencia industrial

En estos estudios —como [32] - [35]— se investiga si la exposición prenatal, o incluso la exposición previa al embarazo, podría tener efectos adversos para la salud de los hijos de los trabajadores.

Para la exposición prenatal, la hipótesis es que podría producirse una modificación del material genético, provocando alteraciones que lleven a un posterior cáncer. En cuanto a la exposición previa al embarazo, la hipótesis sería que las CEMs podrían afectar directamente el material genético de las células germinales, como óvulos o espermatozoides.

Los estudios de cáncer en hijos de trabajadores son, en general, negativos, aunque están basado en el análisis de un reducido número de casos. Además, hay que resaltar que los trabajadores también están expuestos a diferentes agentes que no se tienen en cuenta en la valoración de los estudios.

Como conclusión, no se observa que la exposición a CEMs de padres o madres en su puesto de trabajo incremente el riesgo de cáncer en sus hijos.

7. INSTRUMENTO Y MEDIDAS DE CEMs

El **Wavecontrol SMP2** es un instrumento multifunción diseñado para la medición precisa de CEMs en un amplio rango de frecuencias, según la sonda utilizada (de 0 Hz a 60 GHz). Los rangos de medición son de 1 V/m hasta 100 kV/m para el campo eléctrico y de 50 nT hasta 10 mT para el magnético [Manual SMP2].

Los rangos de medición dependen de la sonda utilizada. Por ejemplo, la sonda EHP-50F cubre desde 1 Hz hasta 400 kHz con medición simultánea de campos eléctricos y magnéticos. La sonda que vamos a utilizar en las mediciones es la **WP400** que como la anterior, cubre una frecuencia de hasta 400 kHz en análisis FFT y hasta 40 GHz en banda ancha. También mide tanto campo eléctrico (E) como campo magnético (H).

Una de sus principales ventajas es la rapidez de adaptación y precisión. El SMP2 reconoce automáticamente la sonda conectada y ajusta su configuración, reduciendo errores y aumentando la rapidez de las mediciones. Además, su diseño portátil con pantalla a color y GPS integrado (dependiendo en qué versión este el instrumento) permite hacer mediciones de forma cómoda, con visualización en tiempo real.

El SMP2 puede evaluar el cumplimiento de límites de exposición de organismos como ICNIRP, IEEE, FCC, SC6 y la Directiva Europea 2013/35/EU. Gracias a que puede medir de manera tridimensional, no requiere una orientación específica para obtener datos fiables, lo que simplifica el uso en campo y evita errores debidos a posición del operador, como pasa con otros instrumentos.



Figura 3. Instrumento SMP2 y Sonda WP400⁶

⁶ Fotos tomadas en el laboratorio

7.1 Prestaciones

Modo registrador (logger): permite configurar una duración y un intervalo de muestreo entre mediciones. El instrumento realiza las mediciones, las registra 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.

Software SMP2 Reader: programa informático de Wavecontrol, específico para sus instrumentos, que permite conectar el instrumento con un ordenador. Permite la descarga y análisis de datos, así como la configuración del dispositivo desde un ordenador.

La pantalla integrada del instrumento contiene una pequeña interfaz que realiza gráficos en tiempo real de las mediciones que va tomando.

7.2 Puesta a punto

La primera tarea que tuve que realizar fue instalar la nueva actualización proporcionada por la empresa para asegurar su correcto funcionamiento, así como la instalación del software SMP2 Reader.

El siguiente paso consistió en un estudio en profundidad del manual de instrucciones. Aunque nos proporcionaron el manual del SMP3, no hay grandes diferencias, por lo que se ha podido seguir correctamente.

Tras su configuración de manera adecuada, realicé múltiples mediciones con el objetivo de comprobar el funcionamiento correcto del instrumento. Para esto hemos utilizado las prácticas de líneas eléctricas y las mediciones de los alumnos.

8. PRÁCTICAS LABORATORIO

En este apartado nos centraremos en las prácticas de laboratorio de la asignatura de Líneas Eléctricas, y particularmente en la práctica número 4. Durante esta práctica se realizan ensayos que constan de dos partes: por un lado, probaremos y compararemos el nuevo instrumento (SMP2), con el que tiene el departamento (TM-200), y se verifican las propiedades de apantallamiento de los conductores puestos a tierra. El instrumento TM-200 se encuentra descrito en [TFG2].

Las prácticas se realizan en dos laboratorios del departamento. En el laboratorio de alta tensión se realizan las medidas de campo eléctrico y en una instalación de alta corriente eléctrica se miden los campos magnéticos. Siempre en una frecuencia de 50 Hz.

8.1 Vector Intensidad de Campo Eléctrico \vec{E}

Esta práctica la hemos realizado en el laboratorio de alta tensión del departamento de Ingeniería Eléctrica. Para cada cambio de situación durante el ensayo, se cumplió con las medidas de seguridad pertinentes, cumpliendo las 5 reglas de oro.

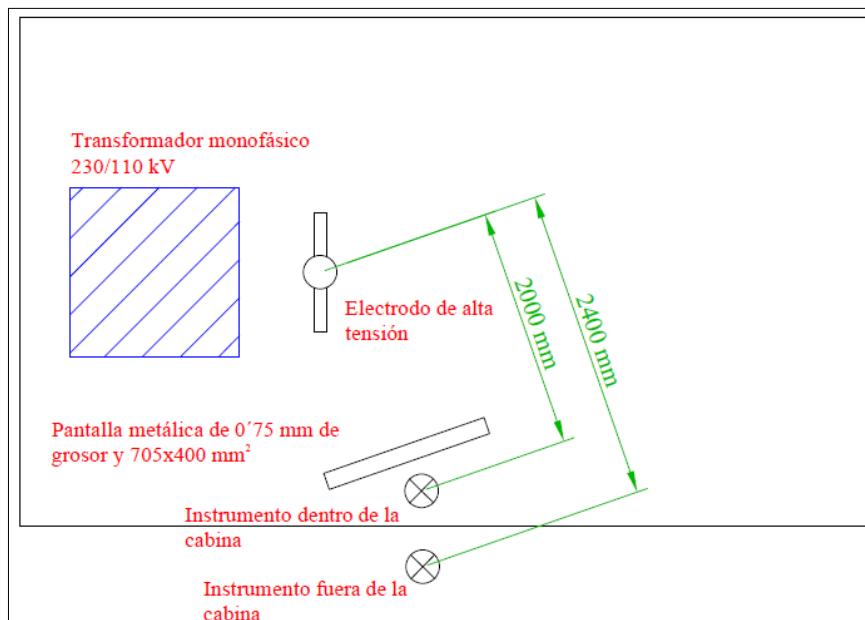


Figura 4. Vista en planta del laboratorio durante las medidas de campo eléctrico⁷

⁷ Montaje en Laboratorio de alta tensión EINA

En el montaje utilizaremos un transformador monofásico (230 V/100 kV) para aplicar una tensión de hasta 80 kV en el electrodo de alta tensión. Situaremos el instrumento TM-200 dentro de la cabina y el SMP2 en el exterior, y realizaremos mediciones en cada situación con ambos instrumentos.

A modo de simplificación para la tabla y la gráfica, hemos asignado un numero a cada medidor y una letra a cada situación dada del experimento:

- | | |
|--|---|
| (1) Instrumento dentro de la cabina (TM-200) | (2) Instrumento fuera de la cabina (SMP2) |
| (a) Sin pantalla | (b) Con pantalla |
| | (c) Con pantalla a tierra |

| Campo Eléctrico [V/m] | | | | | | |
|-----------------------|------|------|-----|--------|--------|-------|
| kV | 1a | 1b | 1c | 2a | 2b | 2c |
| 20 | 454 | 1665 | 46 | 151,29 | 133,67 | 105,7 |
| 40 | 936 | 1950 | 100 | 302,1 | 260,1 | 206,9 |
| 60 | 1400 | - | 150 | 451,78 | 392,58 | 307,9 |
| 80 | 1676 | - | 205 | 598,9 | - | 407,8 |

Tabla 4. Resultados mediciones Intensidad de campo eléctrico \vec{E}

Con los datos obtenidos podemos hacer dos gráficas para ver cómo varían los campos a medida que se aumenta la tensión del electrodo de alta.

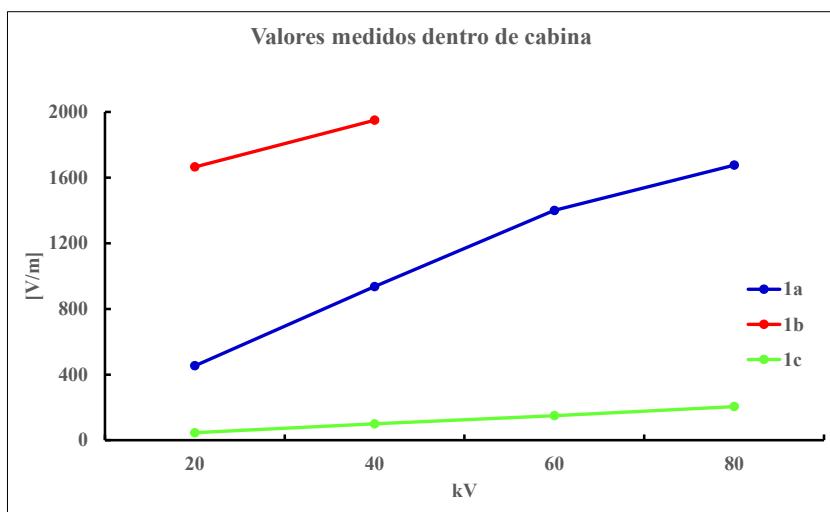


Figura 5. Mediciones de la intensidad de campo eléctrico con TM-200

En todos los casos se observa que el campo eléctrico aumenta a medida que lo hace la tensión. También se observa que el ritmo de aumento del campo varía según el tipo de apantallamiento utilizado.

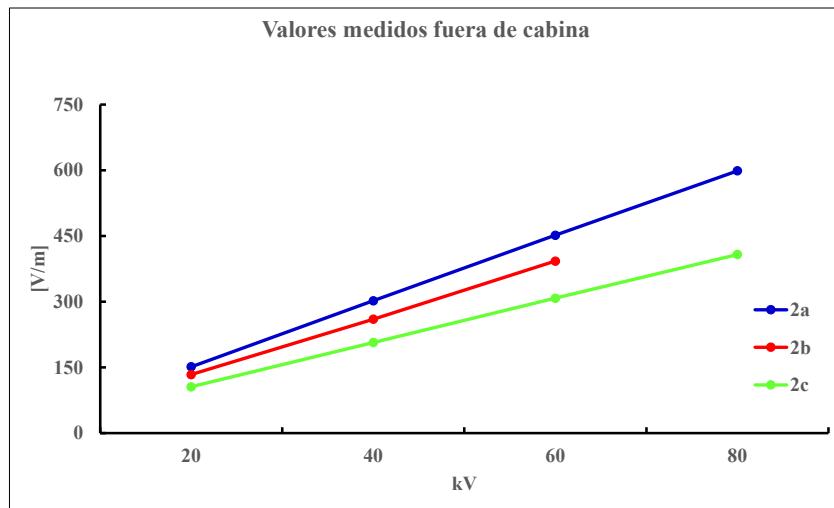


Figura 6. Mediciones de la intensidad de campo eléctrico con SMP2

En este caso, el medidor esta más alejado, y se puede observar que, al aumentar la tensión del electrodo, el campo comienza de forma similar en todas las situaciones y aumenta prácticamente con la misma pendiente.

También se comprueba que el efecto de apantallamiento se reduce drásticamente al estar el sensor muy alejado de la chapa metálica que se emplea en este experimento.

- Prueba con los TM-200 fuera de cabina sin apantallamiento

El departamento tiene para las prácticas dos unidades del TM-200, que están numeradas como #1 y #2. Como con cada instrumento se obtienen medidas algo diferentes, hemos sacado la media de los dos para usarlo en las gráficas y compararlas con el SMP2.

A continuación, en la tabla 2 se muestran el conjunto de medidas realizados con los tres instrumentos., para facilitar la comparación entre ellos.

| Campo Eléctrico [V/m] | | | | | |
|-----------------------|------------------|-----------------|---------------------|---------------------|------------------|
| kV | 2000mm TM-200 | 2400 mm SMP2 | 2400mm TM-200 #1 | 2400mm TM-200 #2 | 2400mm TM-200 |
| 20 | 454 | 151,29 | 280 | 370 | 325 |
| 40 | 936 | 302,1 | 540 | 830 | 685 |
| 60 | 1400 | 451,78 | 940 | 1200 | 1070 |
| 80 | 1676 | 598,9 | 1260 | 1610 | 1435 |

Tabla 5. Resultados mediciones Intensidad de campo eléctrico \vec{E}

De la tabla anterior y como se observa en la siguiente figura, las medidas obtenidas para el campo eléctrico en ambos instrumentos son proporcionales a la tensión aplicada en el electrodo. Se observa una importante diferencia de medida entre los instrumentos TM-200 y el SMP2, que llega a ser del 140%.

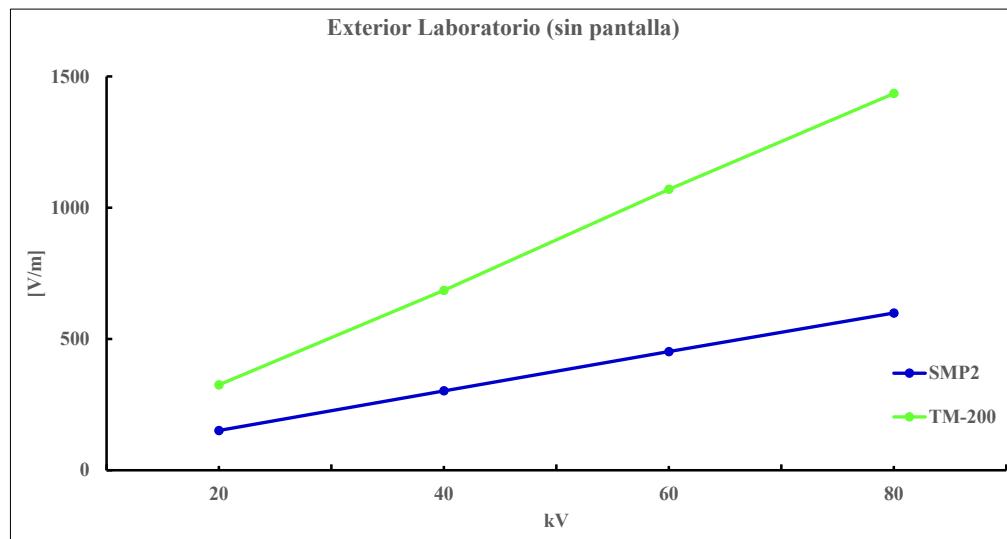


Figura 7. Resultados mediciones Intensidad de campo eléctrico \vec{E}

8.2 Vector Inducción Magnética \vec{B}

Esta práctica la hemos realizado en el laboratorio de Líneas y Centrales del departamento de Ingeniería Eléctrica. Para las mediciones con el TM-200 hemos contado con la colaboración de los alumnos del curso tercero del grado de Ingeniería Eléctrica.

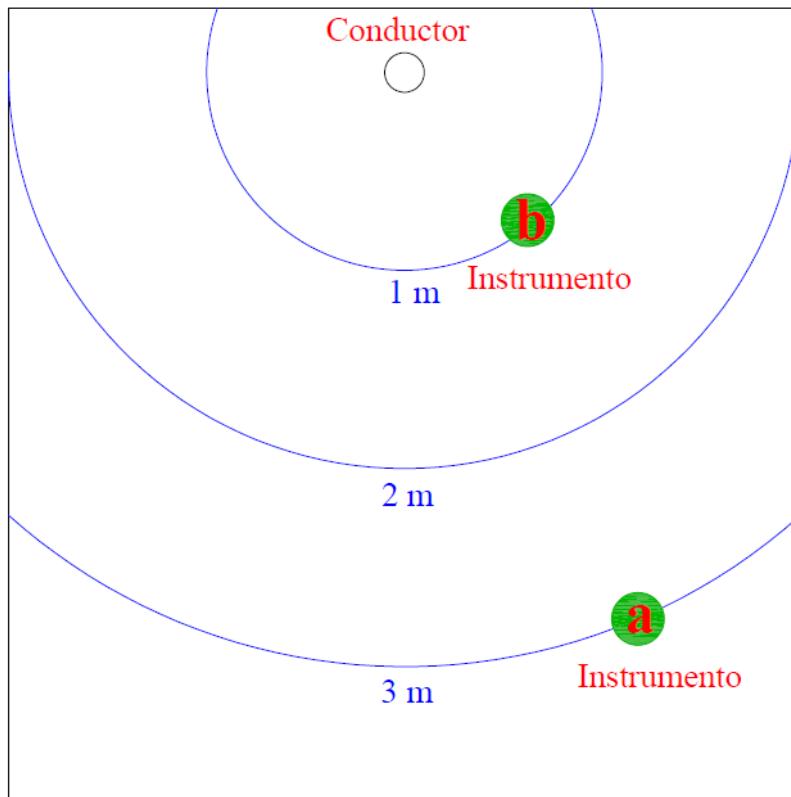


Figura 8. Vista en planta del laboratorio durante las medidas de campo magnético⁸

En el montaje utilizaremos un circuito cerrado de corriente eléctrica para crear el campo magnético. La corriente eléctrica circulando a través de una varilla de cobre actuará como fuente de campo magnético. Iremos aumentando la corriente eléctrica y observaremos cómo varía el campo magnético.

A modo de simplificación para la tabla y la gráfica, hemos asignado un número a cada medidor y una letra a cada distancia considerada en el experimento:

(1) Medición TM-200

(2) Medición SMP2

(a) a 3 m de distancia

(b) a 1 m de distancia

⁸ Montaje en Laboratorio de Líneas y Centrales del Departamento de Ingeniería Eléctrica

Para la medición con el instrumento TM-200 (#1) se realizaron dos mediciones y se calculó el promedio entre ambas para mayor precisión. A un metro de distancia solo se realizó una medición, con el objetivo de observar hasta qué punto podía aumentar el campo magnético.

| Campo Magnético [μT] | | | | |
|-----------------------------------|------|-------|-----|--------|
| I[A] | 1a | 2a | 1b | 2b |
| 250 | 2,05 | 2,69 | - | - |
| 500 | 4,8 | 5,27 | - | - |
| 750 | 7,8 | 7,63 | - | - |
| 1000 | 9,35 | 10,2 | - | - |
| 1250 | 13 | 14,53 | 120 | 148,23 |

Tabla 6. Resultados mediciones Inducción magnética \vec{B}

Con estos datos he dibujado la gráfica de la figura 12, en donde se observa cómo varía el campo magnético a medida que aumentamos la intensidad de corriente en el conductor y comprobar si las mediciones entre los distintos instrumentos son similares.

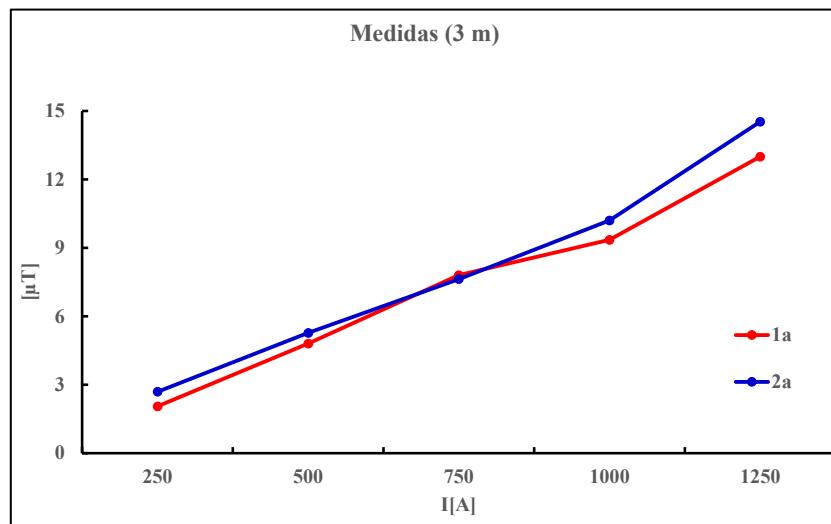


Figura 9. Resultados mediciones Inducción magnética \vec{B}

Se observa que el campo magnético aumenta a medida que se incrementa la corriente, tal y como establece la ley de Ampère. Además, podemos comprobar que, en este caso, ambos instrumentos han registrado datos más cercanos con un error máximo del 24%.

9. SUBESTACIÓN

En este estudio se tomaron medidas en puntos clave de la subestación para determinar si existe algún nivel muy alto de campo electromagnético que pueda representar un riesgo para los trabajadores. Las mediciones las realicé aprovechando un día de visita técnica o práctica de campo organizada por la universidad.

Para los puntos clave de medición, fui asignado junto a dos trabajadores de la subestación, los cuales me indicaron los lugares donde suelen permanecer por más tiempo durante sus labores, así como las zonas por donde circula con mayor frecuencia el personal. Esta información fue fundamental para seleccionar los sitios más representativos y relevantes desde el punto de vista de la exposición al campo electromagnético.

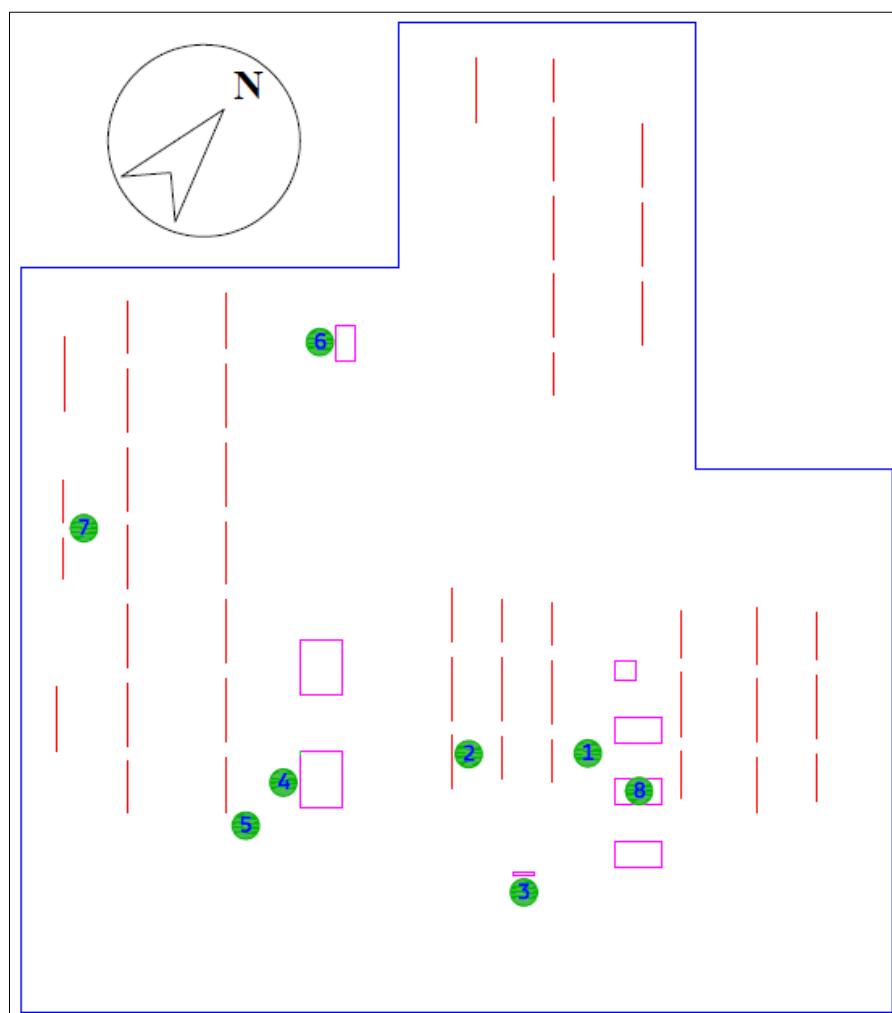


Figura 10. Vista en planta de subestación⁹

⁹ Vista realizada en AutoCAD con representación aproximada de la original

- (1) Debajo del seccionador (400 kV)
- (2) Debajo del transformador de intensidad (400 kV)
- (3) Entrada a la subestación
- (4) Debajo del transformador (400/200 kV), apantallado y puesto a tierra
- (5) Al lado del transformador (400/200 kV), fuera del apantallamiento
- (6) Debajo del transformador (220/132 kV), sin apantallamiento a tierra
- (7) Apoyos de principio de líneas (220 kV)
- (8) Dentro de la caseta

Para las mediciones tanto de campo eléctrico como de campo magnético se estableció una duración de 1 minuto, tiempo suficiente para observar las ligeras variaciones en los flujos de energía eléctrica en la subestación. Asimismo, nos aseguramos de mantener una distancia adecuada al equipo durante las mediciones, especialmente en el caso del campo eléctrico, con el fin de no interferir en los resultados.

| Intensidad de campo eléctrico | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|---------|-------|
| Ud. | Loc. 1 | Loc. 2 | Loc. 3 | Loc. 4 | Loc. 5 | Loc. 6 | Loc. 7 | Loc.8 |
| V/m | 4539,4 | 4843,35 | 456,4 | 82,3 | 2228,85 | 860,17 | 1438,78 | 44,7 |

Tabla 7. 8/Abril/2025 de 10:24 a 11:14¹⁰

| Inducción magnética | | | | | | | | |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Ud. | Loc. 1 | Loc. 2 | Loc. 3 | Loc. 4 | Loc. 5 | Loc. 6 | Loc. 7 | Loc.8 |
| μT | 5,05 | 8,68 | 0,23 | 6,34 | 2,25 | 2,3 | 4,12 | 1,12 |

Tabla 8. 8/Abril/2025 de 10:24 a 11:14¹¹

Los valores observados en ambos casos están dentro del rango de los que se encuentran incluidos en la bibliografía para este tipo de instalaciones [REDEIA].

9.1 Lugares más desfavorables

¹⁰ Medida con SMP2 de Intensidad de campo eléctrico

¹¹ Medida con SMP2 de Inducción magnética

Las medidas más altas, tanto del campo eléctrico como del campo magnético, se registraron en la localización 2, ya que nos encontrábamos justo debajo del transformador de intensidad y bastante cerca de él.

También destaca la medición en la localización 1, donde, al igual que en la anterior medición, estábamos bastante cerca de los transformadores de medida.

A continuación, expongo detalladamente las medidas obtenidas en la localización más desfavorable.

- Campo Eléctrico

Algunos datos que nos aporta el software de WaveControl en el momento de tomar la medición, están incluidos en la tabla 9. En la figura 11 se observa la evolución temporal de las medidas.

| Información de la medida | |
|--------------------------|---------------------|
| Modelo sonda | WP400 |
| Frecuencias de la sonda | 1Hz-400kHz |
| Fecha inicial | 08/04/2025 10:32:12 |
| Fecha final | 08/04/2025 10:33:12 |
| Tiempo de medida | 0:01:00 |
| Intervalo promedio | 10s |
| Tipo de promedio | deslizante |
| Filtro paso altos | 10 Hz |
| Unidades | V/m |
| Último promedio | 4772,3 |
| Máximo | 5031,5 |
| Mínimo | 4747,1 |
| Pico | 6425 |

Tabla 9. Datos de medición de campo eléctrico más desfavorable¹²

¹² Los datos de la tabla nos los proporciona el software SMP2 Reader

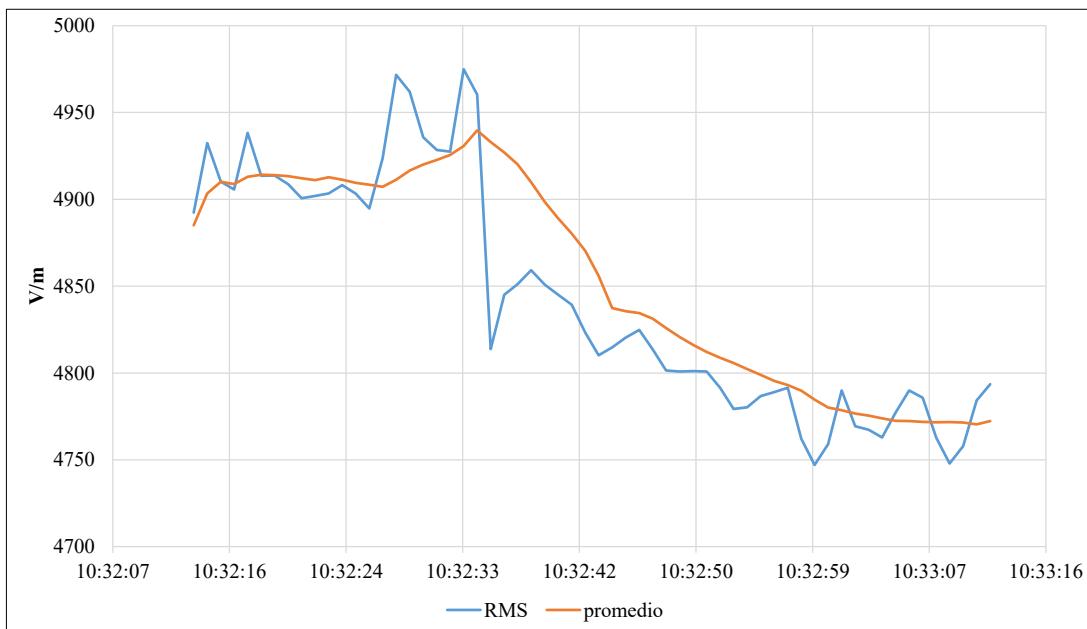


Figura 11. Gráfica con los datos de campo eléctrico durante 1 minuto¹³

- Campo magnético

Como ya he indicado anteriormente, estos son algunos datos que nos aporta el software de WaveControl en el momento de tomar la medición, están incluidos en la tabla 10. En la figura 12 se observa la evolución temporal de las medidas.

| Información de la medida | |
|--------------------------|---------------------|
| Modelo sonda | WP400 |
| Frecuencias de la sonda | 1Hz-400kHz |
| Fecha inicial | 08/04/2025 10:29:27 |
| Fecha final | 08/04/2025 10:30:27 |
| Tiempo de medida | 0:01:00 |
| Intervalo promedio | 10s |
| Tipo de promedio | deslizante |
| Filtro paso altos | 10 Hz |
| Unidades | µT |
| Último promedio | 8,49 |
| Máximo | 9,149 |
| Mínimo | 8,258 |
| Pico | 11,53 |

Tabla 10. Datos de medición de campo magnético más desfavorable¹⁴

¹³ Esta gráfica nos la proporciona el software SMP2 Reader

¹⁴ Los datos de la tabla nos los proporciona el software SMP2 Reader

Emisión de campos electromagnéticos en sistemas de transporte de energía eléctrica. Medición y análisis en una subestación de 400 kV.

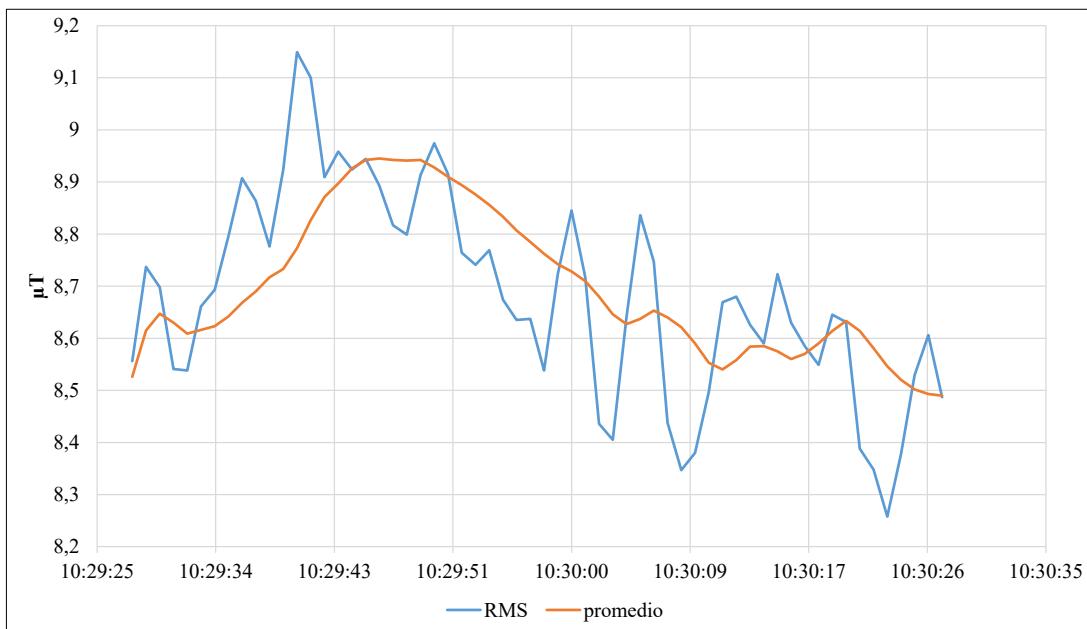


Figura 12. Gráfica con los datos de campo magnético durante 1 minuto¹⁵

¹⁵ Esta gráfica nos la proporciona el software SMP2 Reader

10. CONCLUSIONES

En la primera parte de mi estudio, y haciendo uso de las prácticas de la asignatura Líneas Eléctricas, he podido analizar el comportamiento de los distintos instrumentos de medición que he tenido a mi alcance. Durante este proceso, se ha podido observar que cada instrumento presenta características particulares en cuanto a precisión, sensibilidad y respuesta frente a diferentes condiciones de trabajo.

Si considero como más fiables las medidas del SMP2 debido a sus características técnicas y prestaciones, he podido observar que el TM-200 ofrece una mayor precisión en la medición del campo magnético, con un error del 24%. No obstante, en lo que respecta a la medición del campo eléctrico, el TM-200 tiende a mostrar un mayor margen de error, alcanzando un 140%, en comparación con el SMP2. Tal como se ha observado en trabajo anteriores, la medición del campo eléctrico resulta considerablemente más compleja que la del campo magnético. Esta dificultad se debe a diversos factores, lo que exige el uso de instrumentos de mayor precisión y calidad para obtener resultados verdaderamente fiables. En cambio, la medición del campo magnético suele ser más estable y menos susceptible a estas variables, lo que permite utilizar equipos más simples o menos sofisticados sin comprometer significativamente la exactitud de los datos obtenidos.

Pasando a la segunda parte del estudio, y a partir de las mediciones realizadas en la subestación, he llevado a cabo un análisis del comportamiento de los CEMs en los puntos de trabajo habituales del personal. A continuación, comento algunas observaciones relativas a los campos eléctricos y campos magnéticos en los puntos clave, con el objetivo de valorar posibles riesgos y establecer medidas de prevención adecuadas si fuera necesario.

Como conclusión de las mediciones realizadas de campo eléctrico, se puede afirmar que ninguno de los valores medidos resulta alarmantemente elevado. Todos los niveles medidos se encuentran por debajo de los umbrales establecidos por la OMS, que fija un límite de exposición de 5 kV/m para el público en general y de 10 kV/m para trabajadores expuestos.

Emisión de campos electromagnéticos en sistemas de transporte de energía eléctrica. Medición y análisis en una subestación de 400 kV.

En relación con las mediciones del campo magnético, se puede concluir que ninguno de los valores registrados alcanza niveles preocupantes. Todos los datos obtenidos se encuentran muy por debajo de los límites de exposición establecidos por la OMS, que recomienda un umbral máximo de 100 μT para el público en general y de 1000 μT para trabajadores expuestos.

Estos resultados permiten afirmar que, en cuanto al campo magnético, las condiciones en la zona evaluada son seguras y no representan un riesgo relevante para la salud, ni para el personal que trabaja habitualmente en el área ni para otras que puedan estar presentes de forma ocasional.

Como futuras líneas de trabajo propondría completar los modelos numéricos desarrollados mediante el método de elementos finitos del laboratorio de alta tensión y su aparenta, así como continuar realizando medidas en otros entornos como pueden ser los sistemas de transporte público (tranvía, tren, autobús eléctrico, coche eléctrico, etc.).

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[REDEIA]: última consulta 24/06/2025 <https://www.ree.es/es/sostenibilidad/integracion-territorio/campos-electromagneticos>

[Manual SMP2]: file:///D:/Trabajo%201/SMP2_Manual_EN.pdf

[LIBRO]: Cortés-Soria, H., Roldán-Bassas, E., Goitia-Blanco, J., García-Mayobre, C., Llanos-Lecumberri, C., Bernar-Solano, J., (2001). Campos eléctricos y magnéticos de 50 HZ. Grupo Pandora S.A.

[OMS]: última consulta 24/06/2025 <https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/electromagnetic-fields>

[TFG1]: Sedano-Sánchez, P., Desarrollos de modelos en elementos finitos (MEF) para el estudio de los efectos de campos electromagnéticos (CEMs) en la salud

[TFG2]: Ibáñez-Baños, J.L., Campo Electromagnéticos en el entorno de una línea eléctrica de 400 kV: el caso de la línea “Aragón” (Red Eléctrica de España)

[TFG3]: Domínguez-Tomás, A., Estudio teórico-práctico de un instrumento de medida de campos electromagnéticos. Aplicación a una práctica docente

[TFG4]: Carbó-Labrador, J., Análisis del Impacto de los Campos Electromagnéticos en la Salud Humana. Perspectivas desde entornos domésticos a profesionales

[ODS]: última consulta 25/06/2025 <https://www.pactomundial.org/>

[1]: Journal of Geophysical Research, Vol. 90, No. B3, Pág 2495-2509, February. 28, 1985: The Near-Earth Magnetic Field at 1980 Determined From Magsat Data; R. A. Langel, R. H. Estes

[2]: última consulta 24/06/2025 https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2016-7303

[3]: Sommer AM, Lerchl A. The risk of lymphoma in AKR/J mice does not rise with chronic exposure to 50 Hz magnetic fields (1 mu T and 100 mu T). Radiat.Res. 162[2], 194-200. 2004.

Sommer AM, Lerchl A. 50 Hz magnetic fields of 1 mT do not promote lymphoma development in AKR/J mice. Radiat.Res. 1625[3], 343-349. 2006.

[4]: Chung MK, Yu WJ, Kim YB, Myung SH. Lack of a co-promotion effect of 60 Hz circularly polarized magnetic fields on spontaneous development of lymphoma in AKR mice. Bioelectromagnetics 2010 31(2); 130-139.

- [5]: Bernard N, Alberdi AJ, Tanguy ML, Brugere H, Helissey P, Hubert C y cols. Assessing the potential leukemogenic effects of 50 Hz magnetic fields and their harmonics using an animal leukemia model. *J Radiat Res (Tokyo)* 2008 Nov 49; 565-577.
- [6]: Negishi T, Imai S, Shibuya K, Nishimura I, Shigemitsu T. Lack of promotion effects of 50 Hz magnetic fields on 7,12-dimethylbenz(a) anthracene-induced malignant lymphoma/lymphatic leukemia in mice. *Bioelectromagnetics* 2008 Jan 29; 29-38.
- [7]: Thunbattersby S, et al. Exposure of Sprague-Dawley rats to a 50-Hertz, 100 µT magnetic field for 27 weeks facilitates mammary tumorigenesis in the 7,12dimethylbenz[a]anthrancene model of breast cancer. *Cancer Res.* 1999; 59:(15)3627-3633.
- [8]: Harris J et al. A test of lymphoma induction by long term exposure of Em-Pim1 transgenic mice to 50 Hz magnetic fields. *Radiat. Res.* 1998; 149:300-307.
- [9]: International Agency for Research on Cancer. Volume 80. Non Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely low Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields. IARC Press Lyon, France 2002.
- [10]: Kabuto M, Nitta H, Yamamoto S, Yamaguchi N, Akiba S, Honda Y y cols. Childhood leukemia and magnetic fields in Japan: A case-control study of child-hood leukemia and residential power-frequency magnetic fields in Japan. *INT.J.CANCER* 119[3], 643-650. 2006.
- [11]: Kroll ME, Swanson J, Vincent TJ, Draper GJ. Childhood cancer and magnetic fields from high-voltage power lines in England and Wales: a case-control study. *Br J Cancer* 2010 Sep 28 103;1122-1127
- [12]: Shen YH, et al. The effects of 50 Hz magnetic field exposure on dimethylbenz(alpha)anthrancene induced thymic lymphoma/leukemia in mice. *Bioelectromagnetics* 1997; 18:360-364.
- [13]: Saito,T.; Nitta,H.; Kubo,O. y cols. Power-frequency magnetic fields and childhood brain tumors: a case-control study in Japan. *J Epidemiol* 2010, 20 (1) 54-61.
- [14]: Kheifets L, Ahlbom A, Crespi CM y cols. A pooled analysis of extremely low-frequency magnetic fields and childhood brain tumors. *Am J Epidemiol.* 2010 172(7):752-61.
- [15]: Schmiedel S and Blettner M. The association between extremely lowfrequency electromagnetic fields and childhood leukaemia in epidemiology: enough is enough? *Br J Cancer*, 2010; 103(7): 931–932.

- [16]: Savitz DA. The etiology of epidemiologic perseveration: when enough is enough. *Epidemiology*. 2010;21 (3):281–283.
- [17]: Zhang C, Li Y, Wang C, Lv R, Song T. Extremely low-frequency magnetic exposure appears to have no effect on pathogenesis of Alzheimer's disease in alu-minum-overloaded rat. *PLoS One* 2013 Aug 12 8(8) e71087. doi: 10.1371/journal.pone.0071087. eCollection.
- [18]: Van der MM, Vermeulen R, Nijssen PC, Mullenens WM, Sas AM, van Laar T et al. Extremely low-frequency magnetic field exposure, electrical shocks and risk of Parkinson's disease. *Int Arch Occup Environ Health* 2014 Jun 18.
- [19]: Ahlbom A. Neurodegenerative diseases, suicide and depressive symptoms in relation to EMF. *Bioelectromagnetics* 2001; S132-S143.
- [20]: Li, D.K.; Odouli, R.; Wi, S.; Janevic, T.; Golditch, I; Bracken, T.D.; Senior, R.; Rankin, R.; Iriye, R.A population-based prospective cohort study of personal exposure to magnetic fields during pregnancy and the risk of miscarriage. *Epidemiology* 2002, 13 (1) 9-20.
- [21]: Lee, G.M.; Neutra, R.R.; Hristova, L.; Yost, M.; Hiatt, R.A.A nested case-control study of residential and personal magnetic field measures and miscarriages. *Epidemiology* 2002, 13 (1) 21-31.
- [22]: Baliatsas C, Van K, I, Bolte J, Schipper M, Yzermans J, Lebret E. Non-specific physical symptoms and electromagnetic field exposure in the general population: Can we get more specific? A systematic review. *Environ Int* 2012 Jan 13 1941;15-28.
- [23]: Rubin GJ, Das MJ, Wessely S. Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies. *Psychosom Med* 2005 Mar-Apr 1967;224-232.
- [24]: Rubin GJ, Nieto-Hernández R, Wessely S. Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (formerly ‘electromagnetic hypersensitivity’): An updated systematic review of provocation studies. *Bioelectromagnetics* 2010 Jan 1931;1-11.
- [25]: Rubin GJ, Hillert L, Nieto- Hernández R, van Rongen E, Oftedal G. Do people with idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields display physiological effects when exposed to electromagnetic fields? A systematic review of provocation studies. *Bioelectromagnetics* 2011, 32 (8) 593-609

[26]: última consulta 24/06/2025. Organización Mundial de la Salud (OMS). Campos electromagnéticos y salud pública. Hipersensibilidad electromagnética. Hoja descriptiva N° 296-Diciembre 2005. Disponible en http://www.who.int/pehmf/publications/facts/ehs_fs_296_spanish.pdf?ua=1

[27]: última consulta 24/06/2025. EHFRAN. Red Europea sobre Evaluación de Riesgos por la Exposición a Campos Electromagnéticos, 2012, http://efhran.polimi.it/docs/D2_Finalversion_oct2012.pdf

[28]: Johansen C, Raaschou y cols. Risk for leukaemia and brain and breast cancer among Danish utility workers: a second follow-up. Occup Environ Med 2007; 64:782-4.

[29]: Nichols L, Sorahan T. Mortality of UK electricity generation and transmission workers, 1973-2002. Occup Med (Lond) 2005 55(7); 541-548.

[30]: Sorahan T. Cancer incidence in UK electricity generation and transmission workers, 1973- 2008. Occupational Medicine 2012, 62(7): 496-505.

[31]: Sorahan T. Magnetic fields and brain tumour risks in UK electricity supply workers. Occup Med (Lond) 2014, 64(3): 157-65.

[32]: Wilkins JR. y cols. Paternal occupation and brain cancer in offspring: a mortality based casecontrol study. Am. J. Ind. Med. 1988, 14, 299-318.

[33]: McKinney PA. y cols. Parental occupation at periconception: findings from the UK childhood cancer study. Occup Environ Med. 2003; 60:901-909.

[34]: Smulevich VB. y cols. Parental occupation and other factors and cancer risk in children: II. Occupational factors. Int J Cancer. 1999; 83(6): 718-22.

[35]: Reid A. y cols. Risk of childhood acute lymphoblastic leukemia following parental occupational exposure to extremely low frequency electromagnetic fields. Br J Cancer 2011; 105 (9): 1409–1413.