

Trabajo Fin de Grado

Campos Electromagnéticos en el entorno de una
línea eléctrica de 400 kV: el caso de la línea
``Aragón`` (Red Eléctrica de España)

Electromagnetic Fields in the vicinity of a 400 kV
overhead power line: the case of the line ``Aragón``
(Red Eléctrica de España)

Autor/es

José Luis Ibáñez Baños

Director/es

Antonio Usón Sardaña

Escuela de ingeniería y arquitectura

2020

Campos electromagnéticos en el entorno de una línea eléctrica de 400 kV: el caso de la línea "Aragón" (Red Eléctrica de España).

- **RESUMEN:**

Este trabajo se dedica a la descripción de una actividad docente realizada en el grado de Ingeniería Eléctrica de la E.I.N.A. (Universidad de Zaragoza). Consiste en la estimación de las intensidades de los campos electromagnéticos presentes en una línea eléctrica de Alta Tensión, así como a describir el origen de estos. Posteriormente, se comparan las intensidades de campo con los valores permitidos en la legislación vigente en España y otras recomendaciones internacionales, con el fin de conocer si estas pueden presentar un riesgo para la salud.

La determinación de las intensidades de campo eléctrico y de campo magnético ha sido realizada *in situ* en la línea, con mediciones llevadas a cabo por alumnos del grado de Ingeniería Eléctrica.

Electromagnetic Fields in the vicinity of a 400 kV overhead power line: the case of the line "Aragón" (Red Eléctrica de España).

- **ABSTRACT:**

This work is dedicated to the description of a teaching activity carried out by students of the Electrical Engineering degree at the EINA (University of Zaragoza). It consists of the estimation of the intensities of electromagnetic fields present in a high voltage overhead power line, as well as describing the origin of these fields. Subsequently, the field intensities are compared with the permitted limits of the Spanish legislation and other international recommendations, in order to know if they may present a health risk.

The determination of the electric field and magnetic field intensities has been made *in situ* on the line, with measurements carried out by the students.

ÍNDICE

1.- OBJETIVO DEL ESTUDIO.	1
2.- INTRODUCCIÓN.....	1
3.- ORIGEN Y DESCRIPCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO Y DEL CAMPO MAGNÉTICO.....	2
3.1.- CAMPO ELÉCTRICO.....	3
3.2.- CAMPO MAGNÉTICO.....	15
4.- DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD Y TRABAJO DE CAMPO.....	27
5.- RECOPIACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS DATOS Y LECTURAS.	33
6.- CONCLUSIONES.	45
BIBLIOGRAFÍA.	46
ANEXOS.	47
ANEXO I.- LEGISLACIÓN Y NORMATIVA. VALORES DE CAMPO ADMITIDOS.	47
ANEXO II.- EFECTOS SOBRE LA SALUD DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS.	49

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Símil de la distorsión espacial creada por un cuerpo de masa m..	3
Figura 2. Una varilla adquiere carga eléctrica al ser frotada con un paño.....	5
Figura 3. Líneas de campo eléctrico para diferentes configuraciones de cargas.....	7
Figura 4. Esquema de la configuración utilizada para el cálculo del campo eléctrico creado por un conductor.	9
Figura 5. Resultado del cálculo integral correspondiente a (12)..	11
Figura 6. Líneas de campo eléctrico y vector superficie para diferentes disposiciones geométricas.....	13
Figura 7. Superficie gaussiana cilíndrica que encierra la carga del conductor.....	14
Figura 8. Esquema básico de las líneas de campo magnético terrestre.	16
Figura 9. Determinación del sentido de la fuerza magnética mediante la regla de la mano derecha.....	18
Figura 10. Líneas de campo magnético para un conductor recto por el que fluye una corriente I.....	21
Figura 11. Esquema de línea trifásica aérea formada tres conductores unipolares.....	22
Figura 12. Descomposición vectorial de β_1	23
Figura 13. Descomposición vectorial de β_2	24
Figura 14. Descomposición vectorial de β_3	25
Figura 15. Terreno donde se realiza la actividad.	29
Figura 16. Esquema de los puntos alrededor del apoyo donde se realizan las medidas.....	31
Figura 17. TM-200 con su sensor y el cable de tierra.	32
Figura 18. Alumno realizando medidas de campo eléctrico cerca del apoyo.....	32
Figura 19. SMP y diferentes sondas.	32
Figura 20. Medidas realizadas con la pandereta cerca del apoyo de la línea.	33

Figura 21. Valores de inducción magnética [μT] frente a la distancia al apoyo[m]. Puntos ``A''.	36
Figura 22. Valores de intensidad de campo eléctrico [V/m] frente a la distancia al apoyo[m]. Puntos ``A''	36
Figura 23. Valores de inducción magnética [μT] frente a la distancia al apoyo[m]. Puntos ``B''.	38
Figura 24. Valores de intensidad de campo eléctrico [V/m] frente a la distancia al apoyo[m]. Puntos ``B''	38
Figura 25. Valores de inducción magnética [μT] frente a la distancia al apoyo[m]. Puntos ``C''.	39
Figura 26. Valores de intensidad de campo eléctrico [V/m] frente a la distancia al apoyo[m]. Puntos ``C''	39
Figura 27. Valores de intensidad de campo eléctrico para una línea de 735 kV respecto a la distancia horizontal a la línea.	43
Figura 28. Valores de inducción magnética para líneas de diferentes niveles de tensión respecto a la distancia vertical a los conductores.	44
Figura 29. Niveles de referencia de campos electromagnéticos.	48
Figura 30. Niveles de referencia de intensidad de campo eléctrico.	48
Figura 31. Niveles de referencia de inducción magnética.	49

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Valores teóricos de inducción magnética en la dirección ``A'' para distintas distancias verticales.	35
Tabla 2. Valores medidos por el TM-200 en la dirección ``A'.	35
Tabla 3. Valores medidos por el SMP2 en la dirección ``A''.	36
Tabla 4. Valores medidos por la Pandereta en la dirección ``A'.	36
Tabla 5. Valores medidos por el TM-200 en la dirección ``B''.	37
Tabla 6. Valores medidos por el SMP2 en la dirección ``B''.	37
Tabla 7. Valores medidos por la Pandereta en la dirección ``B''.	38
Tabla 8. Valores medidos por el TM-200 en la dirección ``C''.	38
Tabla 9. Valores medidos por el SMP2 en la dirección ``C''.	39
Tabla 10. Valores medidos por la Pandereta en la dirección ``C''.	39

A mi padre, su recuerdo me acompañará para siempre.

1.- OBJETIVO DEL ESTUDIO.

Dentro de las prácticas de la asignatura *Líneas Eléctricas*, incluida en el sexto cuatrimestre del grado de Ingeniería Eléctrica, se desarrolla una actividad que por sus planteamientos, contenidos y puesta en práctica me llamaron la atención. El objetivo de dicha actividad es realizar un trabajo de campo durante el cual los estudiantes aprendan a manejar instrumentos, unos más sofisticados que otros, realizar y analizar medidas y se familiaricen con las fuentes de campos electromagnéticos en baja frecuencia procedentes de instalaciones de generación, transporte y distribución de energía eléctrica.

A este objetivo técnico-científico se une la introducción de conceptos básicos en la formación actual de un ingeniero, como son los relativos a la salud pública y la prevención de riesgos laborales. La segunda parte de esta práctica incluye una reflexión de cómo estos campos electromagnéticos pueden afectar a las células de los seres vivos (especialmente a las del sistema nervioso central) y cuáles son los límites de exposición recomendados por los estudios biológicos y las autoridades sanitarias.

Mi propósito de dedicarme profesionalmente a la docencia me animaron a dedicarle a esta actividad el trabajo fin de grado, con la intención de repasar su génesis, ordenar los contenidos que en ella se incluían y analizar sus resultados tanto técnicos como docentes. Esta es también la razón de que el texto tenga una orientación fundamentalmente docente, que priorizo sobre las descripciones técnicas o científicas, con la intención de poder ser utilizado en un futuro como material de enseñanza.

2.- INTRODUCCIÓN.

En los tiempos de la Edad Antigua, diversas civilizaciones como sumerios, egipcios y griegos recogieron y documentaron diversas manifestaciones de los campos electromagnéticos que tenían lugar en la naturaleza. Pudieron observar como había materiales que eran capaces de atraer a otros elementos e incluso curiosos mecanismos de algunos animales marinos para atacar o defenderse, aplicando descargas eléctricas. Si bien no fueron capaces de encontrar el origen de los fenómenos que se producían sí eran conscientes, por mera observación, que podían ser perjudiciales para su integridad física. No fue hasta los siglos XVII y XVIII cuando empezó el estudio científico acerca de estos fenómenos, con el descubrimiento de la botella de Leyden o el estudio de las descargas eléctricas atmosféricas, cuando se comenzó a tener evidencia de las consecuencias peligrosas para la salud que podía conllevar la manipulación de cargas eléctricas, creadoras de campos electrostáticos. Desde entonces, como a lo largo de toda la historia, el ser humano ha buscado el conocimiento y ha intentado manejar y controlar los fenómenos físicos que tienen lugar para así poder sacar un rendimiento práctico de los mismos. Es de esta forma como tuvo lugar la aparición en la industria de las primeras máquinas eléctricas. De la misma manera, el proceso de generación y distribución de la energía eléctrica, con líneas de transporte desde las áreas donde es generada hasta los puntos de consumo. Sin duda, el crecimiento en este campo desde los primeros estudios científicos ha sido muy notable, tanto que ha convertido a la energía eléctrica como el pilar fundamental

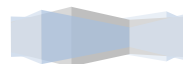
de nuestra sociedad actual, haciendo difícil imaginar nuestra vida, nuestras relaciones sociales y laborales sin la existencia de la misma. Como podemos comprobar, hoy en día, estamos rodeados de campos electromagnéticos, como producto del avance tecnológico que ha hecho llegar hasta nuestros hogares electrodomésticos como microondas, placas eléctricas de cocina, secadores, televisores, lavadoras, etc. En el campo de la medicina, se han asentado métodos de diagnóstico que utilizan la radiación electromagnética, como las resonancias magnéticas. En la industria existe una cantidad enorme de máquinas y procesos que generan campos electromagnéticos, sin olvidarnos de la propia actividad del transporte de la energía, pues tenemos que hacer llegar el suministro eléctrico a los consumidores. No hay duda de que gracias a la labor de científicos e ingenieros, hemos podido materializar los conocimientos en beneficios tangibles.

Todo el mundo conoce el peligro que conlleva sufrir descargas eléctricas de magnitud considerable, como pueden ser las que se producen en las tormentas eléctricas, y como se ha comentado ya comenzaron a estudiarse hace unos 200 años, o en general cualquier proceso en el que existan tensiones y corrientes ya que pueden implicar daños físicos en el organismo visibles con el contacto, como pueden ser las quemaduras o fibrilaciones. Sin embargo, dada esta vorágine de campos eléctricos y magnéticos que nos rodea y que de alguna forma pasan más desapercibidos, presentes en infinidad de aparatos y procesos surge una pregunta: ¿cómo pueden afectarnos a nuestra salud?, ¿tienen efectos nocivos?

Uno de los aspectos ambientales más estudiados en los últimos años ha sido el de los campos eléctricos y magnéticos, dado el interés e inquietud que ha mostrado la sociedad acerca de los efectos que estos puedan tener en nuestro organismo. Se han elaborado estudios e informes por diferentes entidades sobre estos aspectos, realizados por la *Organización Mundial de la Salud*, la *Comisión Europea*, el *Consejo Nacional de Investigación* de Estados Unidos, entre otras. La práctica realizada en la asignatura se centra en los campos generados por una línea de alta tensión, y trata de comprobar si los resultados obtenidos pueden presentar un riesgo real para las personas en base a los límites de exposición a campos electromagnéticos que hayan sido validadas por diferentes organizaciones internacionales. En concreto, la práctica toma como objeto de estudio una línea de alta tensión en la subestación eléctrica de Peñaflores. Para ello, se han hecho varias visitas a la subestación a lo largo de diferentes cursos académicos, donde los alumnos del grado de Ingeniería Eléctrica de la *Universidad de Zaragoza* han realizado mediciones sobre los valores de los campos electromagnéticos que allí se producen. Estas mediciones han sido tomadas con diferentes aparatos y en diferentes puntos de la línea con el fin de evaluar las diferentes intensidades de campo que se puedan presentar en función de la cercanía a los apoyos o los conductores.

3.- ORIGEN Y DESCRIPCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO Y DEL CAMPO MAGNÉTICO.

En Física se denomina campo a aquellas zonas del espacio en las que se manifiestan o se sufren fuerzas. Desde el principio de los tiempos hemos convivido con campos de



distinta naturaleza, que son originados por diferentes características físicas de los cuerpos. Sin duda, el más conocido por todos es el campo gravitatorio. El origen de la existencia de los campos gravitatorios radica en que un cuerpo, por el hecho de tener materia, es capaz de generar una perturbación en el espacio que le rodea, y que se manifestará en forma de fuerza en aquellos cuerpos que se encuentren en el seno de dicho campo gravitatorio. El caso más visible de la existencia de estos campos lo encontramos en los originados por los planetas, en los que los cuerpos con una determinada masa m sufren una fuerza llamada *peso*, $P = m \cdot g$. Dependiendo de la cantidad de masa del cuerpo que se encuentre bajo el seno del campo y de la *gravedad* del planeta, que en la Tierra es de $9,8 \frac{m}{s^2}$, seremos atraídos hacia el centro del mismo con mayor o menor intensidad. La realidad es que hay otro tipo de campos que no se manifiestan con la misma magnitud o forma y por lo tanto pueden pasar desapercibidos para las personas, ya que no los sufrimos de forma tan notable o visible. Es el caso de los campos electromagnéticos, los cuales pasaremos a describir a continuación.



Figura 1. Símil de la distorsión espacial creada por un cuerpo de masa m . Si imaginamos el espacio como una superficie cubierta de material elástico, al colocar un objeto de masa m este va a hacer que el espacio circundante se hunda. Al introducir otro cuerpo de masa mucho menor, m' , este caerá hacia el centro del "hoyo" que m ha generado a su alrededor. Esta caída que sufre m' representa la fuerza de atracción que experimentamos hacia el centro de la Tierra debido a que tenemos masa. [Imagen obtenida del portal digital *FISICALAB*].

3.1.- CAMPO ELÉCTRICO.

Hacia el siglo VII A.C., los griegos descubrieron que si se frotaban trozos de una resina fosilizada llamada ámbar, contra fibras de lana por ejemplo, este adquiría la capacidad de atraer a ciertos objetos¹. Este fenómeno que se observó hace muchos siglos quizá haya sido reproducido por muchos de nosotros en la escuela frotando un bolígrafo contra nuestro antebrazo y de un modo semejante se podía comprobar cómo el bolígrafo se convertía en una especie de "imán" que podía atraer hacia sí algunos objetos ligeros como por ejemplo trozos de papel. Es lógico y acertado pensar que durante ese proceso de frote de algún modo las propiedades del bolígrafo cambian (y del papel), pues simplemente basta con ver como después de dicho proceso desarrolla la capacidad de atraer el papel, cuando *a priori* no lo hacía. De igual modo que este pequeño experimento ha sido presenciado por un gran número de personas,

¹ Extraído del libro *Física Universitaria*, Sears Zemansky; Hugh D.Young, Roger A.Freedman.

es también conocido por la mayoría que el cambio que sufre el objeto es que este ha adquirido carga eléctrica, y que a raíz de ello es capaz de interactuar con otros objetos o materiales de una manera distinta a la que lo hacía antes de tener esa carga eléctrica. Toca preguntarse entonces como se produce ese cambio en los materiales y como son las nuevas interacciones que van a tener lugar. Para poder entender un poco mejor como es este proceso vamos a detenernos superficialmente en cómo es la estructura de la materia. Conocemos en la actualidad que la materia está formada por átomos, y que estos agrupándose dan lugar a una entidad mayor llamada molécula. La más conocida probablemente sea la del agua, formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Los átomos, a su vez, tienen una estructura compuesta por un núcleo, donde se encuentran los protones y los neutrones, y una especie de corteza con electrones. Los protones tienen carga positiva, mientras que los electrones poseen carga negativa y los neutrones nula, pues son neutros. Por los mismos principios físicos que permitían al bolígrafo de nuestro estuche atraer a los trocitos de papel, los electrones se encuentran "orbitando" alrededor del núcleo del átomo. Esta carga positiva de los protones y negativa de los electrones tiene el mismo valor, y si a esto le sumamos que podemos tener el mismo número de electrones que de protones hablaremos entonces de que el átomo es neutro. Esto se debe a que si por un lado se proporciona carga positiva y por otro lado se contribuye con carga negativa en la misma cantidad, la carga global que vamos a obtener va a ser cero. En estas condiciones, podemos hablar que el objeto no está cargado, que es en definitiva lo que le ocurre al bolígrafo antes de ser frotado. Sin embargo, se puede dar el hecho de que la carga total de un átomo no sea cero, bien debido a que existe más carga positiva que negativa o viceversa. Estos "desequilibrios" que hacen que el átomo adquiera carga tienen su origen en la capacidad de movimiento que tienen los electrones, así por ejemplo al frotar una varilla de un determinado material contra una gamuza o un trapo los electrones son capaces de "saltar" bien de la varilla al trapo o del trapo a esta. Como hemos mencionado los electrones tienen carga negativa, por lo tanto para el objeto neutro que los adquiere el balance de carga total va a adoptar un signo negativo debido a la mayor cantidad de carga negativa que posee. Se dice entonces que el objeto se ha cargado negativamente. Similarmente, el objeto del cual los electrones han saltado hacia el otro objeto se va a cargar positivamente, pues si se hace un balance de su carga resultaría que hay más protones que electrones. De este modo, podemos encontrar partículas denominadas positivas o negativas, y las interacciones entre estas que se observaron o hemos observado en algún momento de nuestra vida nos dicen que cuando dos cargas tienen el mismo signo va a existir una fuerza de repulsión, que tiende a distanciarlas, y que cuando tienen signos opuestos esta fuerza pasa a ser de atracción, que tiende a unirlos.



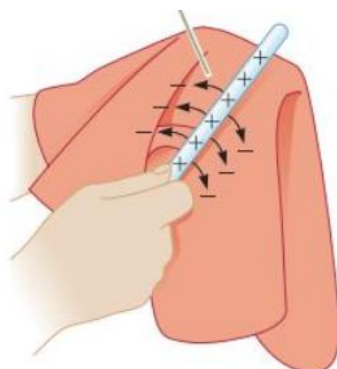


Figura 2. Una varilla adquiere carga eléctrica al ser frotada con un paño. En este caso, debido a los materiales de los que estén hechos la varilla y el paño, los electrones de la varilla pasan de esta al paño, dando lugar a carga positiva en la primera y negativa en este último. Si se hiciera lo mismo con otros materiales, de manera que la segunda varilla adquiriera carga negativa, se podría comprobar la fuerza de atracción que aparecería entre ambas varillas. [Imagen obtenida del libro *Física: electricidad y magnetismo*, Raymond A. Serway, John W. Jewett, Jr.

Estas fuerzas de atracción o repulsión de las que hemos hablado pueden expresarse de forma analítica. A finales del siglo XVIII Charles Augustin de Coulomb² tras una profunda investigación consiguió encontrar una fórmula para describir las interacciones entre cargas, conocida como la ley de Coulomb. Para describir estas fuerzas se van a considerar lo que se conoce como cargas puntuales, lo que viene a significar que las cargas que queremos estudiar son de magnitud muy pequeña en relación con la distancia que las separa. De ahí viene su nombre, ya que las podríamos visualizar como meros puntos en el espacio. De esta ley podemos extraer las siguientes ideas:

- La fuerza que existe entre dos cargas puntuales es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa, es decir, la magnitud de la fuerza entre ambas decrece cuadráticamente conforme aumenta la separación entre cargas. Supongamos que inicialmente las cargas se encuentran a una distancia L , y que la fuerza resultante es F . Si triplicáramos la distancia L , la fuerza F pasaría a valer $\frac{1}{9}$ del valor que presentaba con una distancia de separación L .
- Experimentalmente se descubrió también que la magnitud de dicha fuerza depende de la cantidad de carga existente, cuya unidad en el Sistema Internacional es el culombio, C , y es directamente proporcional al producto de ambas cargas.
- Como ya hemos comentado, esta fuerza tiene un carácter repulsivo si ambas cargas tienen el mismo signo, o un carácter atractivo si poseen signos distintos.

² En el año 1785 el matemático y físico francés Charles Augustin de Coulomb enunció la mencionada ley que lleva su nombre, sentando las bases de la electrostática. Fuente: *Física para la ciencia y la tecnología*; Paul A. Tipler.



- Además de conocer su magnitud, es igual de relevante conocer la dirección en la que actúa esta fuerza dado que como cualquier fuerza posee carácter vectorial. Dicha dirección es la de una línea imaginaria que une ambas cargas.
- La ley de Coulomb describe la interacción entre dos cargas, pudiendo calcular la fuerza que una ejerce sobre la otra. Si tuviéramos una distribución de más de dos cargas puntuales y quisiéramos obtener la fuerza que sufre una de ellas, debida a la presencia de las demás, tendríamos que utilizar el conocido principio de superposición. De esta manera, la fuerza que experimenta una carga es la suma de las fuerzas que cada una de las cargas ejercen sobre esta, calculadas de forma individual como si las otras no existieran.
- El módulo viene dado por la siguiente expresión:

$$F = \frac{k \cdot |q_1 \cdot q_2|}{r^2} \quad (1)$$

- q [Culombio, C]
- r [metros, m]
- $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, donde ϵ_0 es la permitividad eléctrica del vacío

Ahora que conocemos una expresión que nos permite determinar la fuerza existente entre cargas y conocemos también sus características, cabe preguntarnos cómo se "transmiten" estas fuerzas entre cargas. Si pensamos en esto, nos damos cuenta que este tipo de fuerzas no se transmiten entre cuerpos por medio del contacto físico, o mediante poleas, cuerdas o cualquier elemento mecánico. Las fuerzas que sufren las cargas debido a las interacciones eléctricas no precisan de un medio material para su propagación, sino que son fuerzas a distancia, como la fuerza gravitatoria. Lo que ocurre es que una carga eléctrica por el hecho de poseer carga es capaz de modificar de alguna forma el espacio de su alrededor, como también los cuerpos por el hecho de tener masa. Como comentamos al inicio del presente apartado, a esta modificación del espacio la denominamos campo, y en concreto al creado por una carga eléctrica lo denominaremos campo eléctrico. Por tanto, cuando tenemos una carga eléctrica, esta genera un campo eléctrico en el espacio circundante. En el momento que introducimos otra carga en el seno de dicho campo, esta última experimentará una fuerza. Así, podemos concluir que la fuerza que sentirá una carga eléctrica es en realidad responsabilidad de un campo eléctrico que ha sido creado por otras cargas. El vector intensidad de campo eléctrico E se define como la fuerza que experimenta una carga de prueba q dividida por dicha carga q . Es decir, se trata de la fuerza por unidad de carga.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \left[\frac{N}{C} \right] \quad (2)$$

Dado el carácter vectorial del campo eléctrico, resulta necesario además de determinar su magnitud conocer cuál es la dirección y sentido de este. Para ello, nos ayudaremos de las líneas de campo, que fueron introducidas por Michael Faraday en el siglo XIX. Estas líneas nos permitirán una mejor visualización del campo eléctrico, y para comprenderlo mejor pensaremos en el caso de una única carga positiva. Las



líneas de campo son una serie de trayectorias o curvas en las que en cualquier punto de las mismas el vector campo es tangente a ellas. En el caso de una carga positiva, las líneas de campo parten de esta hacia afuera en una estructura radial. Aquí el vector campo veremos que sí que coincide con las líneas de campo, pues la forma de estas resultan ser líneas rectas. Lo que ocurre con una carga negativa es muy similar, sin embargo las líneas de campo apuntan hacia la propia carga. Si pensamos en la carga positiva aislada, las líneas de campo de esta partirían radialmente y se perderían en el infinito, suponiendo que la intensidad del campo fuera lo suficientemente importante para que esto ocurriera. Imaginemos que a una cierta distancia colocáramos la carga negativa, en la que las líneas de campo apuntan hacia ella. El dibujo o el mapa de las líneas de campo nos indicaría que las líneas que parten hacia fuera de la carga positiva acaban en la carga negativa. Si en vez de tener una sola carga positiva tuviéramos dos, ocurriría exactamente lo mismo, las líneas de estas terminarían en la carga negativa. Si bien hay que tener en cuenta que dada la estructura radial de las líneas de campo en determinados puntos del espacio las relativas a cada carga positiva se encontrarían, es importante destacar que en estas situaciones las trayectorias no se cruzan, pues en cada punto del espacio el campo eléctrico solo puede tener una dirección. Si no fuera así, en el punto de intersección de dos líneas de fuerza el vector intensidad de campo podría ser tangente a dos curvas diferentes pues el punto pertenecería a ambas. En conclusión, podemos obtener que las líneas parten de las positivas hacia las negativas, y que estas nunca se cruzan. En la siguiente figura podemos observar el caso sencillo de una única carga positiva, y otros donde la presencia de otra carga hace que las líneas adopten trayectorias curvas.

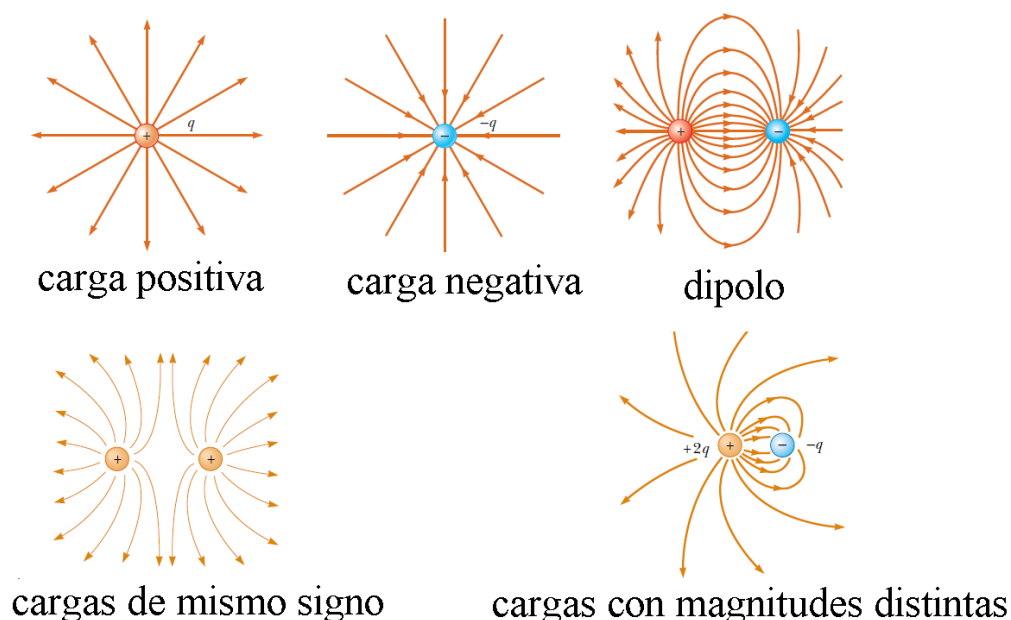


Figura 3. Líneas de campo eléctrico para diferentes configuraciones de cargas. Se observa para los casos en los que tenemos cargas solitarias como las líneas de campo se estructuran radialmente dando lugar a trayectorias rectas. Cuando aparecen otras cargas como en el caso del dipolo, adoptan curvaturas dado que las que parten de las positivas tienen que terminar en las negativas y que no se pueden cruzar. También cuando tenemos cargas de idéntico signo pues no se pueden cruzar las líneas. [Imagen obtenida del libro *Física Universitaria*, Sears Zemansky; Hugh D.Young, Roger A.Freedman].



Hasta ahora hemos hablado de fuerzas y campos eléctricos en las que intervenían una o dos cargas puntuales. En la práctica, en aplicaciones industriales e ingenieriles existe una gran cantidad de máquinas, conductores, aislantes, en definitiva instalaciones eléctricas en las que podemos encontrar casi una infinidad de elementos sometidos a una diferencia de potencial. Desde un punto de vista más "práctico" diremos que un objeto se cargará cuando le apliquemos una diferencia de potencial distinta de cero, y pasaremos más adelante a expresar la intensidad de campo eléctrico en V/m^3 . Al estar los distintos elementos de las instalaciones bajo tensión no encontraremos situaciones con cargas puntuales, sino diferentes superficies conductoras donde la carga se acumula de forma distribuida. De todos los elementos que pueden estar sometidos a tensión y que son capaces de esta manera de adquirir carga eléctrica, nos detendremos en la figura de los conductores que se utilizan en las líneas de transporte y distribución de energía. Cuando pensamos en una situación donde tenemos varias cargas puntuales, y queremos hallar la fuerza total que sufre una de las cargas, aplicamos el principio de superposición de fuerzas. De la misma manera, si quisiéramos conocer el campo eléctrico creado por todas esas cargas en un punto cualquiera del espacio, tendríamos que proceder de forma similar. Cogeríamos la primera carga puntual, y calcularíamos el campo creado por esta sin atender a las demás. Así, haríamos lo mismo con la segunda y con todas y cada una de las cargas que estuvieran presentes en el espacio de interés y sumaríamos cada uno de los campos individuales obtenidos resultando el campo total. Dependiendo de cómo se distribuyan las cargas, por ejemplo en el caso de un cable conductor, donde podemos suponer que se encuentra distribuida uniformemente en la superficie de este, sería necesario recurrir al cálculo integral, que es en definitiva una suma. Para visualizar mejor estos aspectos, vamos a ver un pequeño ejemplo.

Supongamos que estamos ante una situación similar a la que podemos tener en la línea eléctrica objeto de nuestro estudio. En los conductores que forman la línea existe un campo electrodinámico en el interior de los mismos, que es el encargado de transmitir las fuerzas que mueven a los portadores de carga, pues de otra forma no habría circulación de corriente por los mismos. Además, debido a que los conductores se encuentran sometidos a una diferencia de potencial distinta de cero, en nuestro caso de la línea Aragón es de 400 kV, aparecen en la superficie cargas electrostáticas que como ya conocemos van a originar un campo eléctrico alrededor del cable. Para poder calcular cuál es la magnitud de dicho campo vamos a suponer que las cargas electrostáticas de uno de los conductores están aisladas de las existentes en los otros conductores y por tanto que se distribuyen uniformemente en la superficie del mismo. Tomaremos como objeto de estudio un trozo de esta línea, de longitud $2L$, donde tenemos una carga total Q . El esquema de esta situación es el siguiente:



³ Resulta de la relación existente entre diferencia de potencial y campo eléctrico: $V_A - V_B = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$

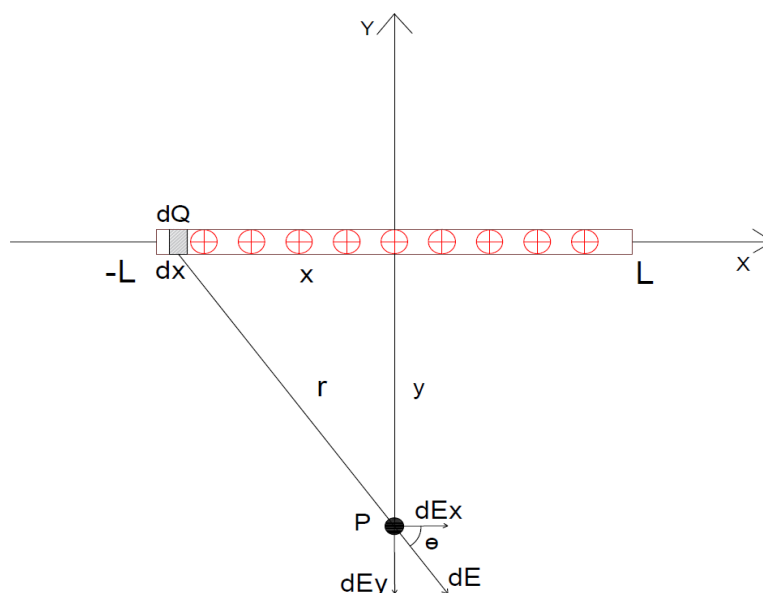


Figura 4. Esquema de la configuración utilizada para el cálculo del campo eléctrico creado por un conductor. La carga, supuesta positiva, se distribuye a lo largo de la longitud del cable. [Imagen de elaboración propia mediante el software de dibujo asistido por ordenador AUTOCAD].

El procedimiento que se va a seguir para calcular la magnitud del campo eléctrico en un punto P en una dirección perpendicular por debajo de un conductor de línea se va a basar en el campo eléctrico creado por una carga puntual, dado que conocemos una expresión que nos lo proporciona, y en el principio de superposición de campos. De esta manera, tomaremos una porción muy pequeña del cable, dx , en el que va a estar presente un diferencial de carga dQ , como si se tratara de una carga puntual, e iremos barriendo toda la longitud del conductor, sumando vectorialmente los campos que cada una de estas cargas puntuales genera en el punto de estudio P. De párrafos anteriores conocemos que una carga puntual origina un campo eléctrico a su alrededor que se distribuye en el espacio de forma radial, en el caso que presentamos al ser una carga positiva parte de esta hacia el ``exterior``. Vamos a recordar la expresión (1), que nos proporciona el valor de la fuerza eléctrica que ejerce una carga eléctrica sobre otra. En el presente caso, la carga que ejerce la fuerza, aunque realmente es el campo eléctrico que esta origina, se encuentra en el cable y la que la sufre en el punto P. Si sustituimos esta expresión en la ecuación (2) el diferencial de campo en el punto P creado por una carga presente en el conductor es:

$$dE = \frac{dQ}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (3)$$

La carga dQ que tenemos presente en el trozo de segmento dx es igual a la densidad de carga, $\gamma = \frac{Q}{2L}$ multiplicada por la longitud del segmento dx . De esta forma, si la

longitud de nuestro segmento diferencial fuera la totalidad del cable, la carga sería la total Q. Así:

$$dQ = \gamma \cdot dx = \frac{Q}{2L} \cdot dx \quad (4)$$

El otro término de la expresión que queda por determinar es la distancia r desde dQ hasta el punto de estudio. Podemos observar en la figura que esta distancia viene dada por:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5)$$

Por tanto,

$$dE = \frac{1}{8L\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{(x^2 + y^2)} dx \quad (6)$$

$$dE_x = dE \cdot \cos \theta \quad (7)$$

$$dE_y = -dE \cdot \sin \theta \quad (8)$$

Por trigonometría,

$$\cos \theta = \frac{x}{(x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}}, \quad \sin \theta = \frac{y}{(x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}},$$

Las expresiones resultantes son:

$$dE_x = \frac{1}{8L\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{(x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot x dx \quad (9)$$

$$dE_y = -\frac{1}{8L\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{(x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot y dx \quad (10)$$

Se trata de la descomposición vectorial del campo creado por un diferencial de carga, y como hemos comentado anteriormente, debemos sumar todos los que están presentes en el cable; para ello, no queda más remedio que recurrir al cálculo integral. De este modo, debemos hacer un "barrido" desde -L hasta L:

$$E_x = \int_{-L}^L \frac{1}{8L\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{(x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot x dx = 0 \quad (11)$$

Para llegar a este resultado no es necesario realizar ningún cálculo, pues si atendemos a la simetría del problema, se puede observar que la componente horizontal del campo creado por las cargas que se encuentran en el eje x negativo es contrarrestada por las que se encuentran en el eje x positivo, de forma que la suma total es nula.



$$E_y = \int_{-L}^L -\frac{1}{8L\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{(x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot y dx$$

$$E_y = -\frac{Qy}{8L\pi\epsilon_0} \int_{-L}^L \frac{1}{(x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} dx \quad (12)$$

Para resolver esta integral nos ayudaremos de un sistema de álgebra computacional, *Maxima*. Introducimos la función dependiente de x , como si fuera indefinida, para luego, una vez obtenida la función correspondiente, multiplicarla por los términos constantes que han podido salir de la integral y evaluar el conjunto en los límites de integración.

Así:

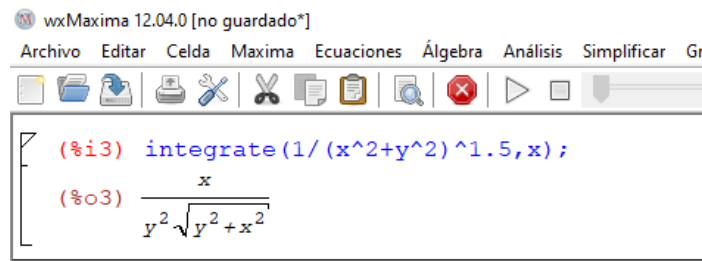


Figura 5. Resultado del cálculo integral correspondiente a (12). En esta expresión solo se han introducido aquellos términos de la función que no han podido salir fuera de la integral debido a su dependencia con la variable x . [Imagen de elaboración propia mediante el software MAXIMA].

Si aplicamos la regla de Barrow,

$$\left| -\frac{Qy}{8L\pi\epsilon_0} \cdot \frac{x}{y^2\sqrt{y^2 + x^2}} \right|_{-L}^L = -\left(\frac{QyL}{8L\pi\epsilon_0 y^2\sqrt{y^2 + L^2}} + \frac{QyL}{8L\pi\epsilon_0 y^2\sqrt{y^2 + L^2}} \right) =$$

$$= -\left(\frac{Q}{8\pi\epsilon_0 y\sqrt{y^2 + L^2}} + \frac{Q}{8\pi\epsilon_0 y\sqrt{y^2 + L^2}} \right) = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 y\sqrt{y^2 + L^2}} \quad (13)$$

El vector intensidad de campo resulta:

$$\vec{E} = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 y\sqrt{y^2 + L^2}} (\hat{y}) \quad (14)$$

Si combinamos (14) y (4)

$$\vec{E} = -\frac{\gamma}{2\pi\epsilon_0 y\sqrt{\frac{y^2}{L^2} + 1}} (\hat{y}) \quad (15)$$

Si consideramos un cable muy largo, como pueden ser los cables de una línea eléctrica de alta tensión, $L \gg y$, la magnitud del campo en el punto P resulta finalmente:



$$E = \frac{\gamma}{2\pi\epsilon_0 y} \quad (16)$$

Con este ejemplo hemos puesto de manifiesto como a partir de la Ley de Coulomb, donde se define el campo eléctrico creado por una carga puntual, podemos obtener el campo eléctrico generado por distribuciones de carga como la existente en los conductores que constituyen las fases de la línea eléctrica a base de sumar el creado individualmente por cada carga puntual. Sin embargo, hemos visto que aún con las aproximaciones geométricas que se han llevado a cabo, pueden resultar integrales cuyas resoluciones conllevan cierta complejidad. Cabe preguntarnos entonces, ¿podemos llegar a obtener un resultado equivalente por otro camino?. La respuesta es sí, y la encontramos en la ley de Gauss, que fue desarrollada por Carl Friedrich Gauss en el siglo XIX⁴. Mediante esta ley podemos encontrar también una relación entre la carga eléctrica y el campo que esta genera. El instrumento que nos va a ayudar a ligar estos conceptos es el flujo eléctrico. Si pensamos en el nombre, nos puede venir a la cabeza el término flujo volumétrico, comúnmente conocido como caudal. El caudal se define como el volumen de fluido que atraviesa una determinada superficie. Se trata de un concepto bastante arraigado y extendido en la sociedad pues es bastante visible y se usa mucho al hablar de ríos y precipitaciones. Aunque realmente el campo eléctrico no fluye, como sí lo pueden hacer líquidos o gases a través de las superficies, nos puede resultar útil a la hora de una mejor visualización. Si el caudal se define como el producto de la velocidad del fluido al atravesar la superficie, por el área de dicha superficie, la definición de flujo eléctrico la obtenemos de sustituir dicha velocidad por la magnitud del campo eléctrico. Así, podemos pensar que a *grosso modo* el flujo eléctrico es la cantidad de líneas de campo eléctrico que atraviesan una superficie. Imaginemos que tenemos una manguera a través de la cual puede fluir agua bombeada. Colocamos enfrente una cartulina cuadrada a una altura tal que el chorro pueda impactar. Si posicionamos dicha cartulina en un plano perpendicular a la dirección del chorro, este impactará de lleno en la cartulina. Sin embargo, si la vamos abatiendo hasta que la sección que antes era perpendicular quede paralela a la dirección del chorro, podremos comprobar que el agua no la atraviesa. El flujo eléctrico respondería a un comportamiento similar, de modo que la sección frontal de una superficie perpendicular al campo eléctrico se verá atravesada por el mayor número posible de líneas de campo. A medida que esta sección se vaya inclinando el flujo eléctrico irá disminuyendo, pues menos líneas la atravesarán, hasta que llegue a ser nulo cuando la superficie quede paralela al campo. En la siguiente figura podemos ver estas situaciones:

⁴ Enunciada por el físico y matemático Carl Friedrich Gauss en 1835 y publicada en 1867. Fuente: *El mundo en papel: Segunda Revolución Científica*. Enrico Bellone.



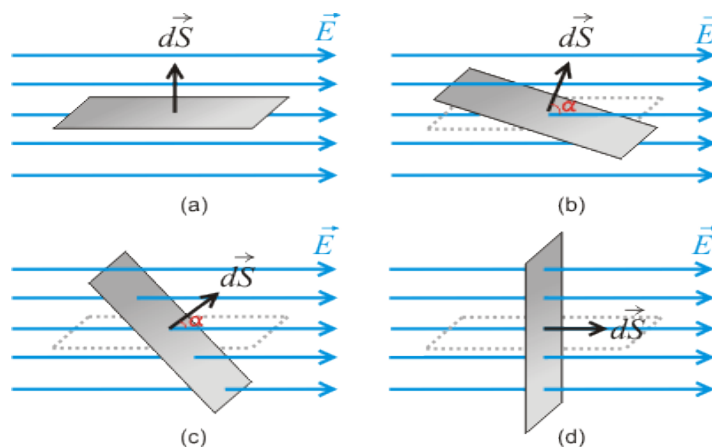


Figura 6. Líneas de campo eléctrico y vector superficie para diferentes disposiciones geométricas. [Imagen obtenida de la web *Curso de física básica* realizado por Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández. Universidad Politécnica de Madrid.

En la figura aparece el vector superficie $d\vec{S}$, que por convenio se dirige hacia fuera de la superficie y perpendicular a esta. Al tener dibujados el vector superficie y el vector campo, resulta fácil de comprobar que cuando estos son paralelos, el flujo es máximo, y cuando estos son perpendiculares, el flujo es nulo. Este resultado viene dado por el producto escalar de ambos vectores, y si el campo eléctrico es uniforme en la superficie de interés, el flujo viene dado por:

$$\phi_E = \vec{E} \cdot \vec{S} \quad (17)$$

Si se da el caso de que el campo eléctrico no es uniforme en toda la superficie, sería necesario determinar la dependencia que existe entre el campo y la propia superficie, y tomando un pequeño trozo diferencial de la misma, realizar el producto escalar de ambos vectores. Repetiríamos este proceso hasta completar la totalidad del área y sumariamos todo mediante una integral. Así, con esta relación, se puede calcular el flujo eléctrico en una sección conocido el campo eléctrico existente, pero, ¿qué ocurre si no conocemos cómo es el campo eléctrico?. Imaginemos de nuevo el caso de una carga puntual en el espacio, y que encerramos a esta en una superficie cerrada, a la que denominaremos superficie gaussiana. Se observó que el flujo eléctrico en la superficie gaussiana era mayor cuanto mayor era la cantidad de carga que quedaba encerrada en dicha área, y dependiente a su vez del medio en el que nos encontrábamos. Con esta dependencia y con la propia definición de flujo eléctrico, Gauss fue capaz de determinar una expresión matemática general que relacionaba el campo eléctrico con la carga eléctrica:

$$\phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{\text{encerrada}}}{\epsilon_0} \quad (18)$$

Vamos a retomar el caso anterior de la línea cargada, sin embargo esta vez vamos a utilizar la ley de Gauss que acabamos de ver para poder obtener una expresión que nos indique el campo eléctrico existente en un punto por debajo de la línea. Tomemos

también la suposición de que la carga se encuentra distribuida uniformemente, y que la densidad de carga es γ . Podemos pensar en el conductor como si fuera un cilindro cargado, así que quizá resulte más intuitivo que la superficie gaussiana utilizada sea un cilindro con radio r y altura l que encierre parte de la carga. Como ya adelantamos en el ejemplo anterior, las líneas de campo van a tener una geometría radial:

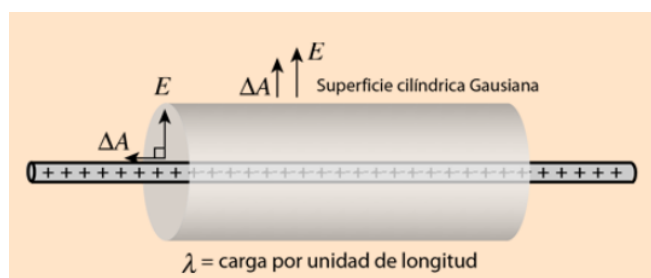


Figura 7. Superficie gaussiana cilíndrica que encierra la carga del conductor. En la superficie lateral, los vectores forman un ángulo de cero grados. En las bases, estos forman un ángulo recto, de modo que no hay líneas de campo que atraviesen dichas superficies, de ahí que digamos que no existe flujo eléctrico. [Imagen obtenida del blog web [hyperphysics](#)].

En la figura se puede observar como en toda la superficie lateral los vectores campo y superficie van a ser paralelos, y como en las bases pasan a ser perpendiculares. Si además suponemos el campo eléctrico uniforme en toda la superficie gaussiana:

$$\phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{S}_1 + \oint \vec{E} \cdot d\vec{S}_2 + \oint \vec{E} \cdot d\vec{S}_3 = 0 + 0 + \oint \vec{E} \cdot d\vec{S}_3$$

$$\phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{S}_3 = \oint |\vec{E}| \cdot |d\vec{S}_3| \cdot \cos \alpha = |\vec{E}| \cdot |\vec{S}_3| = |\vec{E}| \cdot 2\pi r l \quad (19)$$

La otra parte de la igualdad nos relaciona el flujo con la carga que ha quedado encerrado, de modo que:

$$|\vec{E}| \cdot 2\pi r l = \frac{q_{\text{encerrada}}}{\epsilon_0} = \frac{\gamma l}{\epsilon_0}$$

$$|\vec{E}| = \frac{\gamma}{2\pi r \epsilon_0} \quad (20)$$

Del resultado obtenido podemos concluir que la ley de Gauss y la ley de Coulomb son equivalentes. Se trata de una expresión general para una superficie de radio r cuyo eje longitudinal es la propia línea o conductor. En ambas expresiones, que en realidad son una sola, se pone de manifiesto como cuanto más carga eléctrica tengamos en el elemento conductor, en nuestro caso en los conductores de línea, y más cerca nos encontremos de los mismos la magnitud del campo eléctrico será mayor.



3.2.- CAMPO MAGNÉTICO.

Los fenómenos magnéticos fueron observados por primera vez hace aproximadamente 2500 años, con trozos de mineral de hierro magnetizado cerca de la ciudad de Magnesia, hoy Manisa, en Turquía. Hoy conocemos que estos fragmentos de hierro magnetizado son en realidad imanes permanentes⁵, que debido a una característica inherente a su naturaleza son capaces de ejercer fuerzas sobre otros imanes y sobre trozos de hierro no magnetizados, atrayéndolos. Existe un concepto ampliamente extendido que nos ayuda a conocer el carácter de las fuerzas que los imanes se ejercen entre sí. Debido al mismo sabemos que un imán posee dos polos, polo norte y polo sur. Dependiendo de qué tipo de polos enfrentemos, las fuerzas que experimentarán los imanes serán de atracción o repulsión. De este modo, cuando intentemos juntar dos polos del mismo signo de dos imanes podremos comprobar que nos resulta imposible, pues aparecen fuerzas de repulsión que tienden a distanciarlos. Por el contrario, al acercar los mismos imanes enfrentando esta vez sus polos de distinto signo, cuando estén a una determinada distancia percibiremos como aparece una fuerza que intenta unirlos, denominada fuerza de atracción. Recuerdo especialmente haber visualizado este fenómeno en la infancia cuando tiraba al aire dos imanes en forma de pila, que podías encontrar en las ferias, viendo como estos se retorcían en el aire y quedaban pegados cuando se cruzaban. Sin embargo no solo podemos observar este tipo de interacciones entre imanes permanentes. Como hemos mencionado estos son capaces de atraer a objetos de hierro que no están magnetizados. Estos objetos, como por ejemplo las llaves de nuestra casa, no son capaces de atraer nada hacia sí mismos, ni de repeler a otros objetos que se les acerquen. Sin embargo si les acercamos a nuestras llaves o a una moneda un imán a una cierta distancia veremos cómo la llave o la moneda queda pegada a este. También lo podemos observar, por ejemplo, en como los imanes que se utilizan para adornar la nevera quedan fijos en su superficie.

Lo que ocurre con los imanes permanentes es que estos son capaces de generar un campo magnético en el espacio que les rodea, y un segundo cuerpo responderá o sufrirá las consecuencias de encontrarse en dicho espacio. Dado que la Tierra es capaz de crear un campo gravitatorio debido a su masa, nos podríamos preguntar si esta, dadas sus características internas, es capaz de generar además un campo magnético. La respuesta a esta pregunta es afirmativa, nuestro planeta genera el conocido campo magnético terrestre. Aunque el origen de este campo magnético se encuentra en el movimiento de hierro líquido en el núcleo del planeta⁶, podemos asemejarlo al producido por un imán en forma de lámina o barra. Lo cierto es que desde hace muchos años se ha utilizado esta propiedad terrestre para beneficios en aspectos prácticos de los seres humanos. El más conocido quizá sea la brújula, que ha servido y sirve a viajeros y exploradores como instrumento para orientarse. Al manipular una brújula, podemos observar como su aguja comienza a moverse. Aunque puede haber muchas personas que no sepan orientarse con ayuda de la

⁵ Citado en el libro *Física Universitaria*, Sears Zemansky; Hugh D.Young, Roger A.Freedman.

⁶ Idea introducida por Joseph Larmor, extraída del artículo *La dinamo terrestre, un desafío centenario* de la revista digital *Investigación y Ciencia*, escrito por Emmanuel Dormy.



brújula, una gran mayoría conoce que ese movimiento se debe al campo magnético de la Tierra. La aguja es en realidad un pequeño imán, y como hemos mencionado responde a la presencia de un campo magnético, en este caso el terrestre. Esta respuesta se basa en la atracción entre polos de distinto signo de dos imanes. Lo que ocurre es que al estar la brújula bajo la influencia del campo magnético terrestre, el polo norte de la aguja es atraído por el polo sur magnético del planeta, que se encuentra en el norte geográfico, y de ahí que digamos que la aguja nos señala el norte.

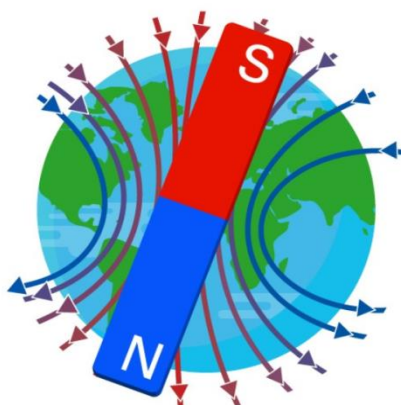


Figura 8. Esquema básico de las líneas de campo magnético terrestre. En el dibujo podemos ver como se ha colocado un imán con sus dos polos que representa al magnetismo de la Tierra. Las curvas que salen de su polo norte hacia su polo sur corresponden a la dirección que tomaría la aguja imantada de la brújula. Como se observa señalaría el polo sur magnético (norte geográfico) [Imagen tomada de la web oficial de *Fundación Endesa, recursos educativos*].

Ya conocemos entonces como los imanes y el campo magnético de estos influyen sobre otros imanes o trozos que contengan hierro. La realidad es que en lo que respecta a nuestro estudio no nos resultan de especial interés los campos magnéticos creados por imanes, ya que en las explotaciones dedicadas al transporte y distribución de la energía eléctrica no los encontramos, o por lo menos no tienen un papel relevante en las mismas. Sin embargo, sí sabemos que en las inmediaciones de las líneas eléctricas podemos detectar la presencia de campos magnéticos, y es además medirlos y cuantificarlos uno de los objetivos de la práctica. De forma similar a lo que ocurre con el campo eléctrico, el origen de estos campos magnéticos está de nuevo en las cargas eléctricas, pero existe una diferencia muy importante en como estas contribuyen a la creación de uno u otro. Dos conceptos básicos que relacionan el campo magnético con las cargas eléctricas son los siguientes:

- Una carga móvil, o un conjunto de cargas, a las que denominaremos corriente, genera un campo magnético en el espacio circundante. Cabe destacar la mención de carga o cargas que se desplazan, pues en ausencia de este movimiento nunca se daría lugar a un campo magnético. Pensemos por ejemplo en dos placas conductoras enfrentadas separadas por aire sin

conexión eléctrica alguna, y que sometemos a estas a una diferencia de potencial de unas pocas decenas de voltios. Como consecuencia de esta tensión que aplicamos las placas se van a cargar, distribuyéndose las cargas eléctricas por las superficies de ambas. Como bien sabemos, en esta situación no podría haber flujo o movimiento de cargas desde la placa de mayor tensión a la otra, pues no existe un "camino" que lo permita. De este modo, en ausencia de portadores de carga, no existirá campo magnético. Si uniéramos estas dos placas mediante un cable de cobre con una resistencia podríamos medir la intensidad de la corriente que circulará y afirmar entonces que existe un campo magnético creado por dicha corriente. De forma semejante esto es lo que ocurre en las líneas eléctricas, donde existe un flujo de portadores de cargas, corrientes, que viajan por los conductores eléctricos desde unos niveles de tensión elevados, en plantas generadoras o subestaciones, hasta niveles de tensión menores que encontramos en los puntos de suministro.

- Ya hemos comentado como un campo, sea de la naturaleza que sea, es capaz de alterar de alguna forma el espacio que le rodea y con él a objetos que puedan estar bajo su influencia. Para que un cuerpo u objeto experimente las consecuencias de estar bajo el seno de un campo magnético, debe este poseer carga eléctrica y que esta se mueva. Queda de manifiesto el aspecto clave que juegan las corrientes, tanto como creadoras de campos magnéticos y como condición expresa para que una carga eléctrica sufra físicamente los efectos de dicho campo. El efecto pues que ejercerá un campo magnético sobre una carga que se desplace será en forma de fuerza magnética.

Al igual que el campo eléctrico, el campo magnético es un campo vectorial. Aunque hablemos en general de campo magnético, en realidad vamos a emplear el vector de inducción magnética, que es comúnmente utilizado a la hora de cuantificar y expresar la intensidad del campo magnético. Usaremos el símbolo \vec{B} para su representación. Además de centrarnos en cómo las corrientes pueden generar un campo magnético, a lo que volveremos después, y cómo podemos definir a este, mediante su módulo, dirección y sentido, vamos a explicar someramente las características de las fuerzas que sufren las cargas en movimiento bajo el dominio de un campo magnético, pues nos puede ayudar a entender mejor el origen de este campo:

- La fuerza que experimenta una carga que se desplace bajo un campo magnético es proporcional al valor de la propia carga que se encuentra bajo el seno de dicho campo. Imaginemos que dos cargas eléctricas se encuentran bajo el mismo campo, y estas además se mueven con la misma velocidad. Se puede verificar que si una de ellas posee un valor de carga del triple de la otra, la magnitud de la fuerza que sufrirá será también del triple que la fuerza que actúe sobre la otra carga.
- De un modo similar, la magnitud de la fuerza es proporcional a la "intensidad" del campo magnético, en definitiva a la magnitud del vector inducción magnética \vec{B} . Pensemos en dos cargas que poseen la misma cantidad de carga eléctrica y que se desplazan a idéntica velocidad, y en dos campos A y B, donde la magnitud de A es del doble que la de B. En este caso, cuando las



cargas permanezcan bajo la influencia del campo A, el valor de la fuerza que experimentarán las cargas será del doble que cuando estas estén bajo el campo B.

- Como ya hemos anunciado, esta fuerza magnética sobre la carga solo existirá en el caso de que esta se desplace. De cualquier otra forma, si la carga permanece estática, la fuerza sobre esta será nula. Así, se entiende que existe una dependencia entre la fuerza magnética y la velocidad \vec{v} de la carga.
- Por último, cabe destacar otro aspecto importante a la hora de definir correctamente a las fuerzas magnéticas y en general a cualquier tipo de fuerza. Hemos hablado de la magnitud de dichas fuerzas, en relación con su dependencia del valor de la carga y de la intensidad del campo. Sin embargo, al tener la fuerza un carácter vectorial, es necesario poder determinar además de su magnitud su dirección y sentido. La dirección en la que actúa la fuerza es perpendicular al plano formado por los vectores de velocidad \vec{v} y de campo magnético $\vec{\beta}$. La magnitud de la fuerza es proporcional a la componente de la velocidad perpendicular al campo, y por lo tanto será máxima cuando ambos vectores sean perpendiculares, y nula cuando sean paralelos o antiparalelos. Para poder determinar el sentido de la fuerza nos ayudaremos de la conocida regla de la mano derecha, pues como comento en el siguiente párrafo, la fuerza se calcula mediante un producto vectorial.
- Todas estas características mencionadas, que han sido corroboradas mediante observación y experimentación, nos conducen a la expresión de la fuerza magnética sobre una carga en movimiento:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{\beta} \quad (21)$$

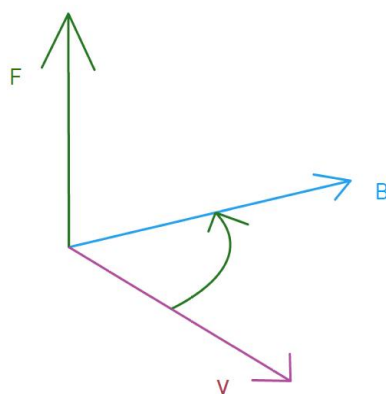


Figura 9. Determinación del sentido de la fuerza magnética mediante la regla de la mano derecha. Para establecer cuál es el sentido de la fuerza, unimos los vectores de campo y velocidad por sus orígenes. Por definición sabemos que la fuerza se situará en una dirección perpendicular al plano formado por \vec{v} y $\vec{\beta}$. Una vez los tenemos como en el diagrama, recorremos el camino desde \vec{v} hasta $\vec{\beta}$ por la trayectoria más corta, resultando el arco con el sentido indicado en el dibujo. Si trazamos este arco con los dedos de la mano derecha encogidos, como si tratáramos de coger la dirección perpendicular de \vec{F} , el dedo pulgar señala el sentido de esta fuerza. En el caso del dibujo, vertical hacia arriba. [Imagen de elaboración propia mediante el software de dibujo asistido por ordenador AUTOCAD].

Escriba aquí la ecuación. Hasta ahora, hemos hablado de la presencia en la naturaleza de imanes permanentes, de su capacidad para generar campos magnéticos y de las fuerzas que experimentan las cargas en movimiento cuando están sometidos a algún campo de esta naturaleza. Desde hace prácticamente un siglo, el desarrollo industrial y científico ha hecho que la energía eléctrica esté presente en nuestras vidas. Donde más presencia tiene quizá sea en el ámbito industrial, en el que existen una cantidad enorme de máquinas eléctricas, en las que circulan corrientes a través de devanados de cobre, y en las que se aprovechan las interacciones y fuerzas magnéticas para diversas aplicaciones. Un ejemplo pueden ser los motores eléctricos y generadores, donde se utiliza por un lado el par de torsión que sufren los devanados del rotor debido a la presencia de un campo magnético y la circulación de corrientes, y en segundo lugar la capacidad que tienen los campos magnéticos variables en el tiempo de inducir una fuerza electromotriz en bornes del generador. Aunque en este estudio no nos centraremos en estas aplicaciones, se pone de manifiesto la importancia del desarrollo de la teoría electromagnética, y de conocer las fuentes de los campos magnéticos y sus consecuencias. En nuestra vida cotidiana, en el hogar, también es notable la importancia y la necesidad de tener suministro eléctrico, para tareas tan insignificantes *a priori* como dar la luz, calentar comida en el microondas, etc. En pocas palabras, se trata de una gran cantidad de cargas que consumen una cierta energía, a las que hay que alimentar. Como bien sabemos, la energía se genera en los grandes centros de producción, como centrales térmicas, hidroeléctricas, nucleares, etc. Estas infraestructuras se encuentran alejadas de los principales centros de consumo, y por lo tanto hay que transportar y distribuir la energía generada, y salvo algunos casos donde la generación y consumo se encuentran próximos, como la generación distribuida, se han de salvar importantes distancias para hacer llegar el suministro a los consumidores. Esto se lleva a cabo gracias a la gran cantidad de líneas eléctricas existentes de alta, media y baja tensión que componen la red eléctrica. Estas líneas son un conjunto de conductores, cables en definitiva, por los que circulan corrientes. A continuación, nos centraremos en cómo dichas corrientes que circulan por los conductores de línea generan campos magnéticos, y en qué basarnos para proceder a su cálculo teórico.

En primer lugar, comenzaremos con la idea de campo magnético generado por una sola carga que se desplaza con velocidad uniforme. De forma similar a lo que ocurre con los campos eléctricos, la magnitud de \vec{B} en un punto del espacio es directamente proporcional al valor de carga q con velocidad \vec{v} , e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa a dicho punto con la carga en cuestión. Existe además una relación fundamental entre el valor de \vec{B} y la velocidad a la que se desplaza la carga, pues es proporcional a esta. Para obtener la dirección de \vec{B} podemos pensar de nuevo en la dirección de aplicación de la fuerza magnética, que se encontraba en la dirección normal al plano formado por el vector campo y el vector velocidad. Sin embargo, ahora es la dirección de \vec{B} lo que queremos determinar, y por lo tanto este será perpendicular al plano formado por \vec{v} y por \vec{r} , la línea que une a la fuente del campo magnético, en este caso la carga, con el punto del espacio en el que



se quiere evaluar $\vec{\beta}$. Ayudándonos de nuevo del producto vectorial, se puede expresar el carácter vectorial de $\vec{\beta}$ en una ecuación:

$$\vec{\beta} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{q\vec{v} \times \hat{r}}{r^2} \quad (22)$$

\hat{r} es el vector unitario del vector dado por vector \vec{r} . μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío.

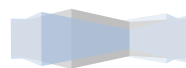
Como ya sabemos, por los conductores de las líneas eléctricas circulan corrientes eléctricas, transportándose la energía desde la generación hasta los distintos puntos de consumo. Podemos pensar en estas corrientes como una multitud de cargas que se mueven, por tanto si queremos conocer el campo magnético que la totalidad de ellas generan lo que tendremos que hacer en definitiva es realizar una suma vectorial de los campos que cada una de ellas generan de forma individual. Para obtener la expresión anterior hemos pensado solamente en el caso de una sola carga, dado que ahora estamos hablando de muchas de ellas que se desplazan en nuestro caso por conductores, podemos imaginarlo directamente como un cable por el que circula una determinada corriente de intensidad I [A]. Así, tomaríamos un pequeño trozo de dicho cable, al que llamaremos elemento diferencial de corriente \vec{dl} y que en definitiva toma en consideración una pequeña parte de todos los portadores de carga. Cabe recalcar que la dirección y sentido de este vector es el mismo que el de la corriente, pues parece lógico que si tenemos un flujo de cargas desde A hasta B, vayamos midiendo "poco a poco" en ese sentido. De esta forma, para un elemento diferencial de corriente \vec{dl} , el campo magnético creado se define como:

$$\vec{d\beta} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I\vec{dl} \times \hat{r}}{r^2} \quad (23)$$

Como ya hemos anunciado, esta expresión nos proporciona el campo creado por un pequeño segmento de conductor. Por lo tanto, si quisiéramos conocer el campo total lo que tendremos que hacer será, como hemos anunciado en el párrafo anterior, sumar la contribución de todos los elementos de corriente que haya. Para realizar dicha suma se recurre al cálculo integral:

$$\vec{\beta} = \int \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I\vec{dl} \times \hat{r}}{r^2} \quad (24)$$

Estas dos ecuaciones, (23) y (24), son conocidas en física como la ley de Biot-Savart. En un párrafo anterior se ha definido la dirección de $\vec{\beta}$ para el caso de una carga con velocidad \vec{v} . También interesará conocer la dirección y sentido de $\vec{\beta}$ en las inmediaciones de un conductor de corriente. Para una correcta



aplicación de la ley de Biot-Savart, es vital conocer que para un conductor de corriente, las líneas de campo magnético forman un círculo con centro en el propio conductor y se sitúan en un plano perpendicular al elemento de corriente en cuestión. Como ocurre en cualquier distribución de líneas de campo, el vector campo en cuestión toma una dirección tangente a estas en cualquier punto de las mismas.

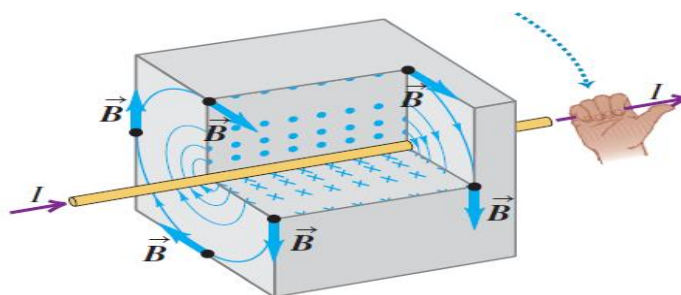


Figura 10. Líneas de campo magnético para un conductor recto por el que fluye una corriente I. Las líneas de campo de esta configuración se sitúan en círculos contenidos en planos transversales al cable, y con centro en el mismo conductor. Si colocamos nuestro pulgar de la mano derecha en el mismo sentido en el que fluye la corriente, los restantes dedos nos indicarán el sentido del vector \vec{B} , que en este caso es el de las agujas del reloj. [Imagen obtenida del libro *Física Universitaria*, Sears Zemansky; Hugh D.Young, Roger A.Freedman].

De este modo, mediante una serie de identidades y sustituciones trigonométricas, se puede obtener una expresión sencilla que nos proporcione la magnitud del campo magnético en puntos situados en un círculo de radio r alrededor de un conductor portador de corriente, que puede obtenerse también mediante la ley de Ampère.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (25)^7$$

- B [Teslas, T]
- μ_0 , permeabilidad magnética del vacío $= 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{T \cdot m}{A} \right]$
- I [Amperios, A]
- r [Metros, m]

Como aplicación de la ley de Biot-Savart, vamos a ver el caso de una línea trifásica de transporte de energía eléctrica, de 400 kV. Esta línea está constituida por tres cables conductores aéreos paralelos, soportados por apoyos metálicos, cuyas dimensiones

⁷ Por simplicidad, se han omitido los cálculos matemáticos que nos permiten llegar a obtener la expresión (5). Esta forma de la ley de Biot-Savart, nos proporciona el módulo de \vec{B} para un conductor de corriente largo y recto, de forma que el valor de r debe ser muy pequeño en comparación con la longitud del cable.



están indicadas en la siguiente figura. Circulará por cada conductor de línea las intensidades de corriente I_1 , I_2 , I_3 , con los sentidos indicados en la figura para un instante t de tiempo. Con estos datos, vamos a calcular el vector de campo magnético que hay en el punto P, situado en el suelo, originado por la circulación de corriente por los tres conductores.

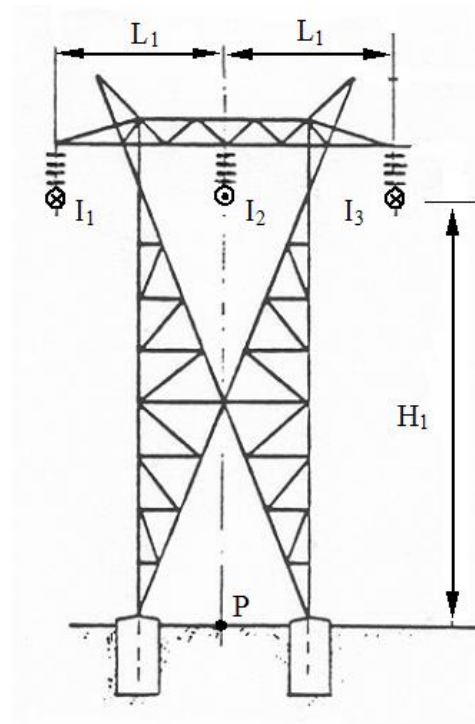


Figura 11. Esquema de línea trifásica aérea formada tres conductores unipolares. Se puede observar la disposición de los tres conductores y el punto P, la distancia que los separa y el sentido de las corrientes. En las que aparece un aspa su sentido es entrante al papel, mientras que el punto representa que sale del papel. [Imagen obtenida del guión de la práctica nº4 de la asignatura *Líneas Eléctricas*, impartida por Antonio Usón Sardaña y Jesús Letosa Fleta, profesores titulares de la *Universidad de Zaragoza*].

Para poder obtener el vector de campo magnético, vamos a utilizar el principio de superposición, mediante el cual calcularemos el campo magnético generado por cada conductor en el punto de interés, de manera individual como si no existieran los demás.

Vamos a utilizar la forma simplificada de la ley de Biot-Savart, (5), dado que podemos considerar que la distancia del punto P a la línea es mucho menor que la longitud de esta. Además, se va a suponer que los cables que forman la línea son cables rectos, cosa que no ocurre en la realidad pues dado su peso estos se curvan hacia abajo, de forma que no los separa la misma distancia del suelo en los apoyos que en el punto medio del cable entre apoyos. A esto se le conoce como flecha, y que en este caso concreto lo vamos a ignorar.



En primer lugar, nos centraremos en el campo magnético debido a I_1

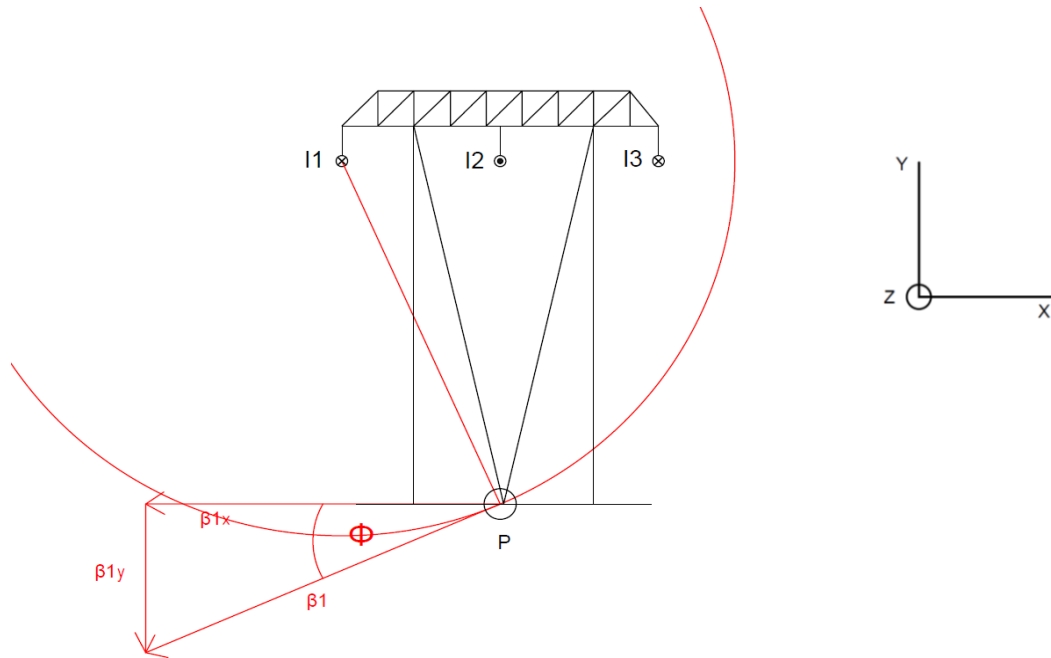


Figura 12. Descomposición vectorial de $\vec{\beta}_1$. La línea de campo es un círculo con centro en I_1 y que pasa por P. [Imagen de elaboración propia mediante el software de dibujo asistido por ordenador AUTOCAD].

Según la ley de Biot-Savart, el módulo de β_1 viene dado por la siguiente expresión:

$$|\beta_1| = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi \cdot r_1}, \quad \text{donde } r_1 = \sqrt{H_1^2 + L_1^2} \quad (26)$$

La descomposición vectorial resulta:

$$\vec{\beta}_1 = \vec{\beta}_{1x} + \vec{\beta}_{1y} = -\beta_1 \cdot \cos \Phi (\hat{x}) - \beta_1 \cdot \sin \Phi (\hat{y}) \quad (27)$$



La corriente I_2 da lugar a β_2 :

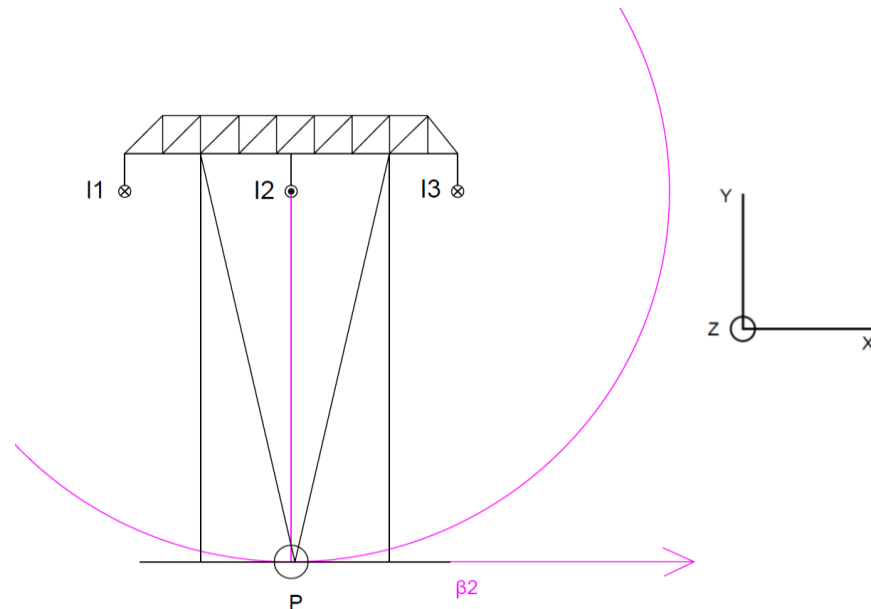


Figura 13. Descomposición vectorial de $\vec{\beta}_2$. La línea de campo es un círculo con centro en I_2 que pasa por P. [Imagen de elaboración propia mediante el software de dibujo asistido por ordenador AUTOCAD].

Según la ley de Biot-Savart, el módulo de β_2 viene dado por la siguiente expresión:

$$|\beta_2| = \frac{\mu_0 \cdot I_2}{2\pi \cdot r_2}, \quad \text{donde } r_2 = H_1 \quad (28)$$

La descomposición vectorial resulta:

$$\vec{\beta}_2 = \vec{\beta}_{2x} + \vec{\beta}_{2y} = \beta_2 (\hat{x}) \quad (29)$$



En lo que respecta a I_3 , tenemos:

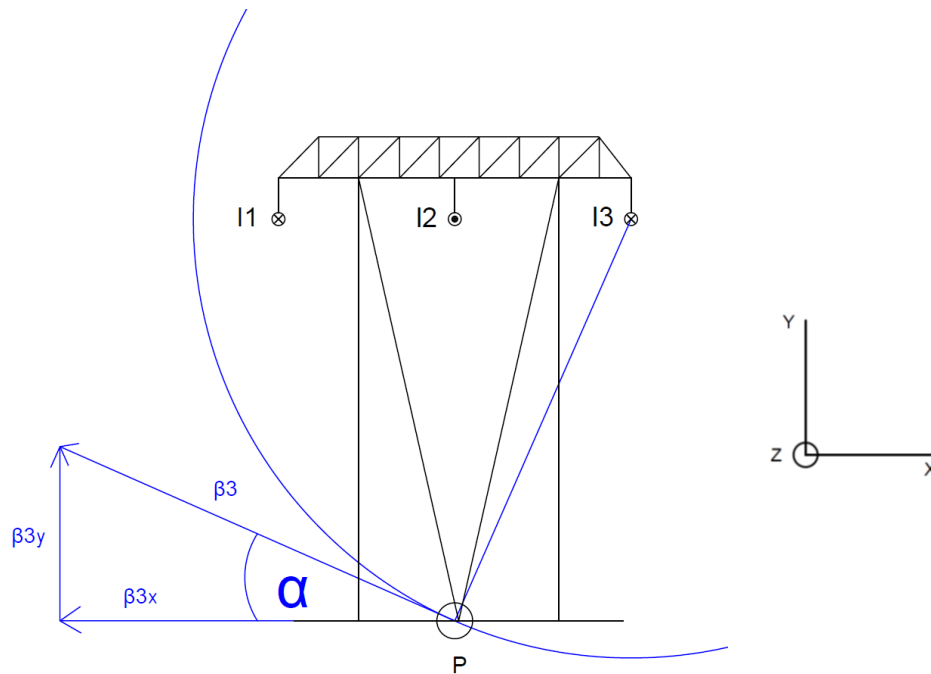


Figura 14. Descomposición vectorial de $\vec{\beta}_3$. La línea de campo es un círculo con centro en I_3 y que pasa por P. [Imagen de elaboración propia mediante el software de dibujo asistido por ordenador AUTOCAD].

Según la ley de Biot-Savart, el módulo de β_3 viene dado por la siguiente expresión:

$$|\beta_3| = \frac{\mu_0 \cdot I_3}{2\pi \cdot r_3}, \quad \text{donde } r_3 = \sqrt{H_1^2 + L_1^2} \quad (30)$$

La descomposición vectorial resulta:

$$\vec{\beta}_3 = \vec{\beta}_{3x} + \vec{\beta}_{3y} = -\beta_3 \cdot \cos \alpha (\hat{x}) + \beta_3 \cdot \sin \alpha (\hat{y}) \quad (31)$$

Por el principio de superposición obtenemos el vector de campo magnético resultante en el punto P, que es la suma vectorial de los tres anteriores.

$$\vec{\beta} = \vec{\beta}_1 + \vec{\beta}_2 + \vec{\beta}_3 \quad (32)$$

$$\vec{\beta} = [-\beta_1 \cdot \cos \Phi + \beta_2 - \beta_3 \cdot \cos \alpha](\hat{x}) + [-\beta_1 \cdot \sin \Phi + \beta_3 \cdot \sin \alpha](\hat{y})$$

$$\vec{\beta}_x = -\frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi \cdot \sqrt{H_1^2 + L_1^2}} \cdot \cos \Phi + \frac{\mu_0 \cdot I_2}{2\pi \cdot H_1} - \frac{\mu_0 \cdot I_3}{2\pi \cdot \sqrt{H_1^2 + L_1^2}} \cdot \cos \alpha \quad (33)$$

$$\vec{\beta}_y = -\frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi \cdot \sqrt{H_1^2 + L_1^2}} \cdot \sin \Phi + \frac{\mu_0 \cdot I_3}{2\pi \cdot \sqrt{H_1^2 + L_1^2}} \cdot \sin \alpha \quad (34)$$



Dado que $\Phi = \alpha$, y la distribución de corrientes es tal que $I_1 = I_3$, la componente vertical del vector es nula.

De esta manera,

$$\vec{\beta} = \left[-\frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi \cdot \sqrt{H_1^2 + L_1^2}} \cdot \cos \Phi + \frac{\mu_0 \cdot I_2}{2\pi \cdot H_1} - \frac{\mu_0 \cdot I_3}{2\pi \cdot \sqrt{H_1^2 + L_1^2}} \cdot \cos \alpha \right] (\hat{x}) \quad (35)$$

$$|\vec{\beta}| = -\frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi \cdot \sqrt{H_1^2 + L_1^2}} \cdot \cos \Phi + \frac{\mu_0 \cdot I_2}{2\pi \cdot H_1} - \frac{\mu_0 \cdot I_3}{2\pi \cdot \sqrt{H_1^2 + L_1^2}} \cdot \cos \alpha$$

$$\text{Además, } \cos \Phi = \cos \alpha = \frac{H_1}{\sqrt{H_1^2 + L_1^2}} \quad (36)$$

$$|\vec{\beta}| = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[-\frac{I_1 \cdot H_1}{H_1^2 + L_1^2} + \frac{I_2}{H_1} - \frac{I_3 \cdot H_1}{H_1^2 + L_1^2} \right] \quad (37)$$

Podemos observar en la expresión que resulta, que existe una dependencia clara con las intensidades de corrientes que tengamos en un instante dado, y de las dimensiones geométricas, en las que influye la altura de los postes, la separación entre conductores, lo cerca que estén del suelo (también influye la anteriormente comentada flecha) y por supuesto la situación espacial del punto donde se quiere medir. Como las intensidades que aparecen son valores para un determinado instante de tiempo, el módulo $|\vec{\beta}|$ obtenido en el punto P es para dicho instante de tiempo. Esto se debe a que la corriente que circula por las líneas es una señal alterna senoidal de 50 Hz, y por lo tanto a lo largo de su período están van adoptando un valor distinto. Esto se traduce en que el vector β va cambiando de módulo, dirección y sentido, realizando un giro de 360 ° alrededor del punto en cuestión. De esta manera, resulta una función periódica no senoidal para la inducción magnética, cuyo valor eficaz viene dado por:

$$|\vec{\beta}|_{rms} = 2,534 \cdot |\vec{\beta}| \quad (38)$$



4.- DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD Y TRABAJO DE CAMPO.

En el último apartado se ha visto como a partir de las leyes físicas capaces de describir a los campos electromagnéticos se han determinado expresiones matemáticas que nos pueden proporcionar un valor numérico bien del campo eléctrico o bien del campo magnético en las cercanías de una línea eléctrica. Cuando a partir de la ley de Coulomb o de Gauss se ha llegado a expresiones equivalentes para poder calcular la magnitud del campo eléctrico en un punto del espacio a una distancia r del conductor, se ha podido constatar la dependencia de la intensidad del campo eléctrico con la carga eléctrica presente en el conductor así como con la propia distancia que separa al cable del punto en el que queremos evaluar la propia intensidad del campo. Gracias a la ley de Biot-Savart se ha podido llegar a una expresión final que nos proporciona el módulo del vector inducción magnética, el cual se utiliza para determinar la intensidad del campo magnético presente. En esta expresión se puede observar la influencia de las intensidades de la corriente que circula por los cables, así como la influencia de las dimensiones de los apoyos o postes o la disposición de los cables en la línea. A la hora de emprender el desarrollo matemático que nos permitiera llegar a una ecuación final donde en base a unas variables, como ya hemos mencionado son la carga eléctrica, la distancia al cable o las intensidades que fluyen por el mismo, pudiéramos obtener el valor de la incógnita a determinar, campo eléctrico o magnético, se han tomado en cuenta una serie de suposiciones o aproximaciones que nos han facilitado esta labor. Parece lógico seguir este camino pues si lo que se quiere saber en resumidas cuentas es que es de lo que depende que el campo eléctrico o magnético tenga mayor o menor magnitud no tiene mucho sentido ser demasiado estricto reproduciendo fielmente las condiciones reales físicas o geométricas de los conductores de línea ya que esto nos puede conducir a encontrarnos con una serie de obstáculos matemáticos que no seamos capaces de esquivar y por tanto no llegar a una ecuación o expresión legible que nos explique un poco lo que ocurre.

Cuando se han introducido los casos prácticos de los que hemos obtenido ecuaciones para el campo eléctrico o campo magnético, hemos representado al cable o conductor como un alambre recto y largo. Si bien la segunda consideración pudiera ser más o menos acertada debida a las largas distancias que recorren las líneas y la pequeña distancia que separa al punto de estudio con la línea respecto a la longitud de la misma, considerar al cable como un alambre recto es una aproximación bastante gruesa, pues como ya comentamos existe la llamada flecha. Dado que los conductores como cualquier objeto en la tierra sufren el peso, estos van curvándose hacia abajo en el espacio que existe entre los apoyos. Además del peso influye en que haya mayor o menor curvatura la tensión mecánica con la que están amarrados a los postes e incluso en condiciones meteorológicas adversas se puede acumular hielo sobre los conductores haciendo que estos se curven más. Gracias a que no hemos considerado esta situación se han obtenido con relativa facilidad las soluciones buscadas y dada la geometría de los problemas resultó fácil expresar la distancia de separación al cable o el campo eléctrico en función de las variables geométricas (x e y). También al considerar el cable recto la superficie gaussiana elegida resultaba fácil



de manejar pues era una superficie cilíndrica recta. Sin esta consideración tampoco se hubiera podido utilizar la ley de Biot-Savart en la forma que se utilizó y nos habríamos encontrado con integrales más complejas de resolver analíticamente. En los casos de cálculo teórico del campo eléctrico ambas expresiones nos daban la magnitud del mismo en función de la carga eléctrica y de la distancia al conductor. La distancia al cable a la que se encuentra el punto donde se quiere medir es más o menos fácil de determinar si se tiene el instrumento adecuado o la información necesaria, sin embargo conocer la magnitud de la carga eléctrica que está presente no resulta tan sencillo o evidente, y sin ella no podemos dar u obtener un valor numérico del campo. Además, no se tuvo en cuenta aquella cantidad de carga eléctrica que puede distribuirse sobre otros elementos de la línea eléctrica que están sometidos a una diferencia de potencial distinta de cero respecto del terreno o de otros conductores próximos, como amortiguadores, grapas de agarre, aisladores o los propios apoyos, pues se omitieron todos estos y solo teníamos el cable en sí. De aquí en adelante asociaremos el campo eléctrico que existe en la línea con la tensión de esta. Otro aspecto a considerar es la cantidad de circuitos que están presentes en las líneas o si los cables que las forman están constituidos por un solo conductor o por más de uno. En las líneas de B.T. sí es posible que encontremos una situación como la que se propuso para el caso de cálculo del campo magnético, en la que se tenían tres cables unipolares. Sin embargo en las líneas de A.T. es muy frecuente encontrar líneas con más de un circuito y cables formados por más de un conductor. En el caso de la línea "Aragón" solo tiene un circuito pero las fases están formadas por dos conductores. Por estas causas, entre otras, no resulta muy cómodo desarrollar expresiones en papel de una manera semejante a las que aquí se han llevado a cabo para obtener valores numéricos de los campos electromagnéticos si el objetivo es evaluar estos en base a unas directrices o normas. Cabe recalcar que sí que es útil obtener expresiones con una serie de aproximaciones como las que se han llevado a cabo de forma que nos faciliten el trabajo para darnos una idea cuáles son los parámetros más importantes y tener de antemano un intervalo de los valores que tomarán las magnitudes (intensidad de campo eléctrico y magnético) a medir. Este último factor es importante ya que condiciona la selección de los instrumentos que se necesitarán para las mediciones, así como una referencia con la que comparar las lecturas, como se verá más adelante. Por estos motivos, entre otros, la solución adoptada para determinar los valores de los campos electromagnéticos ha sido la de la medición *in situ* en la línea, en base a poder compararlos con los valores correspondientes que pueda marcar la normativa vigente en materia de los aspectos que veremos posteriormente. Se trata de un enfoque habitual en las instalaciones eléctricas comprobar con medición directa si determinadas partes de la instalación cumplen por ejemplo con valores establecidos de corriente de fuga, resistencia de tierra, etc. En este caso la metodología es similar, con la diferencia de que las magnitudes a medir no son tan habituales como sí lo son la tensión o corriente.

Como se ha mencionado anteriormente, el objeto del estudio es la línea de alta tensión "Aragón", de 400 kV, de circuito simple y conductores dúplex, que arranca en la subestación de Peñaflo, Zaragoza. Desde hace varios cursos, el personal docente de la asignatura Líneas Eléctricas lleva a cabo visitas a dicha subestación, en



colaboración con *Red Eléctrica Española*, en compañía de los alumnos del grado de Ingeniería Eléctrica. Estas visitas permiten a los estudiantes conocer más de cerca la actividad que se lleva a cabo en estos centros, visualizar de forma directa los conductores de las propias líneas, los apoyos donde estos se sustentan y donde a posteriori realizarán las medidas, y demás aparamenta utilizada en el sistema de transporte y distribución. También contribuye a iniciar al alumnado en el manejo de instrumentos de medida de magnitudes con las que no están tan familiarizados, como sí podría ser la tensión, corriente, potencia activa, entre otras. Además, sirve para que experimenten el trabajo fuera del laboratorio, que es donde se realizan la mayor parte de las actividades prácticas de las asignaturas. En definitiva, pueden constatar la presencia de campos eléctricos y magnéticos, así como las fuentes que los originan, que son conceptos estudiados a lo largo del grado, y conocer diferentes formas prácticas de medir la intensidad de los mismos, distintas a los métodos teóricos desarrollados en las clases magistrales. Todo ello en un ambiente en el que es probable que una parte de los graduados desarrollen su actividad laboral, como es el del sistema de transporte y distribución de la energía eléctrica.

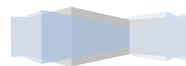


Figura 15. Terreno donde se realiza la actividad. A la izquierda, la subestación de Peñaflor. Señalado, el apoyo donde se harán las medidas. [Imagen obtenida de *GOOGLE MAPS*].

Los alumnos realizarán el trabajo de campo en parejas, donde uno de ellos se responsabilizará de hacer la medida y el otro registrará la lectura. En ciertos momentos se irán turnando para que ambos manejen todos los instrumentos de medida. El objetivo es que registren los valores del módulo del vector de densidad de flujo magnético β y del vector intensidad de campo eléctrico E que pueda haber a lo

largo de la línea de 400 kV. Por motivos evidentes, no se puede cubrir la totalidad de la línea, por lo que a la hora de tomar las medidas nos centraremos en determinados puntos que puedan ser significativos para obtener las conclusiones pertinentes. Se tomará como punto de partida un punto situado debajo de un apoyo de ángulo de la línea, donde se tomará la lectura de la medida que nos proporcionen los diferentes instrumentos que tienen los estudiantes a su disposición. A partir de este punto, se tomarán tres trayectorias diferentes. En primer lugar, se seguirá una trayectoria paralela a la de la propia línea. Conforme nos vayamos alejando del apoyo, se irán registrando las lecturas de las medidas que realicemos del campo eléctrico y magnético. Se tomarán medidas en cuatro puntos a lo largo de esta trayectoria. A los puntos que estén en esta dirección los denominaremos puntos A, lo que nos permitirá situarlos cuando se esté procediendo al análisis de los datos. Cuanto más nos distanciemos del apoyo, más cerca se encuentra el conductor del suelo, y por tanto, de nosotros. De esta forma, podremos observar cómo influye la cercanía o lejanía del conductor en la intensidad del campo que hay en un punto determinado. Una vez acabada esta parte, se procederá de la misma manera pero siguiendo una dirección que forme 45° , partiendo de nuevo desde debajo del apoyo. A los diferentes puntos en los que tomemos las medidas los llamaremos puntos B. Por último, y empezando desde donde lo hicimos en las ocasiones anteriores, nos desplazaremos perpendicularmente a la línea, anotando las lecturas que obtengamos a lo largo de los puntos C. Además de los puntos mencionados, por el interés que presenta debido a su mayor proximidad a los conductores de la línea, se tomarán medidas adicionales en una pequeña colina próxima al apoyo.

Una vez terminado este procedimiento, se procederá a recopilar los distintos valores obtenidos en las medidas a lo largo de la línea. Del conjunto de datos se podrán sacar las conclusiones oportunas y responder a la cuestión objeto de este estudio: ¿cómo de intensos son los campos generados por las líneas de alta tensión?, ¿pueden llegar a ser peligrosos para la salud de los seres vivos?



2019-2020

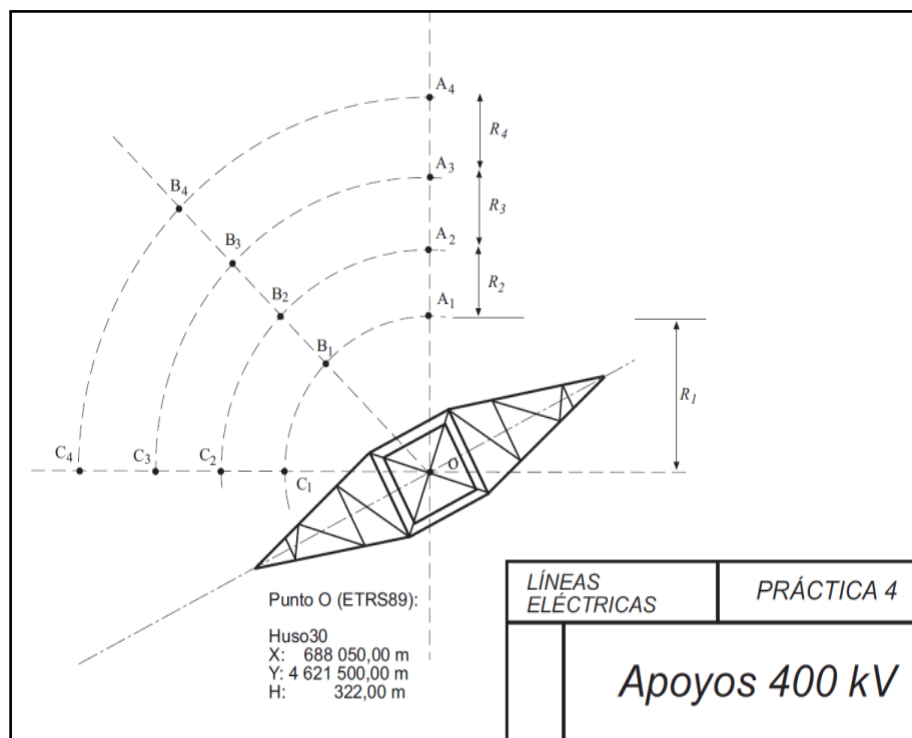


Figura 16. Esquema de los puntos alrededor del apoyo donde se realizan las medidas. [Imagen tomada del guión de la práctica nº4 de la asignatura *Líneas Eléctricas* impartida por Antonio Usón Sardaña y Jesús Letosa Fleta, profesores titulares de la *Universidad de Zaragoza*].

Se ha mencionado que durante el proceso los alumnos tendrán que hacer las medidas con diferentes instrumentos que tendrán a su disposición, y son los siguientes:

- **TM-200:** Se trata de un medidor de intensidad tanto de campo magnético como de campo eléctrico. Está diseñado para un rango de frecuencias desde 10 Hz y hasta 1 kHz. El rango de medición va desde los 0 μT hasta los 1000 μT y desde los 0 V/m hasta los 1999 V/m, de forma que deberemos ir variando la escala para obtener una correcta medición. Su incertidumbre es del 2% para frecuencias entre 16 Hz y 200 Hz, para valores inferiores y superiores a este rango, es del 10%. Para tomar las medidas de los campos, tendremos que orientar el sensor conectado mediante una sonda en los tres ejes espaciales y quedarnos con el valor más alto que encontremos. A la hora de realizar la medida del campo eléctrico, deberemos conectar el aparato mediante un cable a tierra, por ejemplo, a través de una pica. Además, es conveniente alejar en la medida de lo posible el sensor de nuestro cuerpo para evitar que se produzcan efectos de apantallamiento eléctrico. Para indicar qué magnitud queremos medir, contamos con un botón con dos posiciones. De esta forma, el alumno deberá de colocar el botón en la posición que le interese en función de si quiere obtener medidas del campo eléctrico o magnético.





Figura 17. TM-200 con su sensor y el cable de tierra. [Imagen tomada durante la explicación a los alumnos sobre su funcionamiento].



Figura 18. Alumno realizando medidas de campo eléctrico cerca del apoyo. [Fotografía realizada por Carlos Felipe Cabré, compañero de la asignatura *Líneas Eléctricas*].

- **SMP:** Se trata de un instrumento que nos va a permitir medir tanto el campo eléctrico como el campo magnético. Utiliza una sonda a través de la cual vamos a poder registrar los valores de campo, y en función de las características de la misma (son intercambiables) se podrán elegir distintos filtros para eliminar aquella información que por debajo de un determinado nivel de frecuencia no nos interese. La sonda tiene asociado un determinado rango de frecuencia, por lo que dependiendo del nivel que nos vayamos a encontrar elegiremos una u otra. En nuestro caso, la WP400, con un abanico que va desde 1 Hz hasta 400 kHz. Una vez que hemos elegido el campo electromagnético que queremos medir, nos aparece en el *display* el valor total de este, así como un desglose del valor del campo en cada uno de los tres ejes espaciales (X, Y, Z). Podemos establecer el tiempo de medición, de forma que pasado dicho tiempo nos podamos quedar con el valor más alto registrado.



Figura 19. SMP y diferentes sondas. [Imagen sacada del manual del usuario *WAVECONTROL SMP*].

- **Pandereta:** La *pandereta* es un sencillo dispositivo que consiste en un armazón de plástico envuelto en hilos de cobre esmaltado formando espiras, y que nos permitirá determinar la intensidad de campo magnético. Fue construido por el personal del departamento de *Ingeniería Eléctrica* para el equipamiento del

laboratorio de *Líneas Eléctricas*. Al estar bajo la influencia de un campo magnético variable en el tiempo, el causado por la corriente alterna de la línea, se induce una fuerza electromotriz, que registraremos con la ayuda de un polímetro. Mediante la tensión que nos marca el polímetro podremos determinar el valor eficaz de inducción magnética.

$$\beta = \frac{\text{Lectura tensión polímetro}}{N^{\circ}\text{espiras} \cdot \text{Sección} \cdot 2\pi f}$$

Para obtener el valor máximo de campo, deberemos mantener el instrumento prácticamente paralelo con el suelo en los puntos A, mientras que en los puntos B y C tendrá que tener una cierta inclinación, que será aquella que nos dé el mayor valor de voltaje.



Figura 20. Medidas realizadas con la pandereta cerca del apoyo de la línea. [Fotografía recogida durante la actividad].

5.- RECOPIACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS DATOS Y LECTURAS.

Como se ha comentado, se han organizado las visitas a la subestación de Peñafior donde los alumnos de la asignatura Líneas Eléctricas de ingeniería eléctrica visitaban las instalaciones en compañía de los profesores Antonio Usón Sardaña y Jesús Letosa Fleta y posteriormente tomaban las medidas con ayuda de los instrumentos anteriormente descritos. Las lecturas anotadas eran entregadas a los profesores responsables para su posterior evaluación como parte de la actividad de la práctica de la asignatura. He tenido acceso a estas lecturas tomadas en la visita, a partir de las cuales se va a tratar de dar respuesta a la cuestión planteada al inicio del documento, si la intensidad de los campos electromagnéticos presentes pudiera ser perjudicial para la salud.

Tras un estudio de estos datos, se van a exponer aquellos que en la medida de lo posible nos puedan dar una imagen bastante representativa de la magnitud de los

campos presentes en las inmediaciones del apoyo elegido para llevar a cabo las medidas. Así, se han excluido del estudio aquellas bandas de datos que se encontraban incompletas, quizás por falta de tiempo en la visita, y aquellas que no pudieran aportar resultados fiables a la hora de tomarlos como referencia pues o reflejaban alguna incoherencia entre los distintos puntos de medida o se alejaban de forma notable de la tendencia general.

Los datos que se exponen a continuación son resultado de las medidas realizadas durante la visita a la subestación de Peñaflo, el 8/05/2017 entre las 12:00 h y 12:45 h. La pandereta está constituida por 300 espiras de $706,86 \text{ cm}^2$ de sección.

- Medidas realizadas en los puntos "A". Se trata de los puntos que se encuentran por debajo de la línea (Figura 15).

Antes de pasar a exponer los datos correspondientes a las lecturas, nos vamos a servir de las expresiones (37) para dar una idea del orden de magnitud de la inducción magnética en puntos situados en la perpendicular de la línea por debajo de esta, como era el caso del punto P. En este caso práctico consideramos que la distancia que separaba a cada conductor era la misma, desde una vista frontal a los conductores. Sin embargo, dado que el apoyo donde se realizan las mediciones es un apoyo de ángulo, las distancias ya no serían las mismas desde una vista frontal, pero no vamos a considerarlo y así poder trabajar con la expresión que se encontró ya que nos sirve para ver qué valores teóricos podríamos encontrar. Durante el tiempo que duraron las tomas de lecturas la potencia en la línea fue variando debido a los cambios en la demanda y las necesidades del suministro eléctrico, y en base a los datos proporcionados por REE para este caso se va a considerar una potencia de 100 MW y 4,5 MVar, con una tensión de línea de 408 kV. Mediante estos datos de potencia y tensión se pueden obtener los valores eficaces de las corrientes que circulan por los conductores, así:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ (39); } S = \sqrt{100^2 + 4,5^2} = 100,1 \text{ MVA}$$
$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \text{ (40); } I = \frac{100,1 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 408 \cdot 10^3} = 143,06 \text{ A}$$

Como hemos dicho, se trata del valor eficaz de la corriente, que al ser una onda senoidal su valor de pico corresponde a:

$$I_{pico} = \sqrt{2} \cdot I_{eficaz} = \sqrt{2} \cdot 143,06 = 202,32 \text{ A}$$

Tal y como se propuso en el ejemplo práctico del cual se obtuvo la expresión (37), se trataban valores de corriente instantáneos, y se podría pensar en obtener la distribución de los valores de inducción magnética a lo largo de un periodo de 20 ms, correspondiente a una frecuencia de 50 Hz, evaluando cada valor instantáneo que adoptan las corrientes a lo largo de un periodo. Dado que se requiere mucho tiempo y una gran fuerza de voluntad, resulta más conveniente una vez calculado el módulo de inducción magnética a partir de un

valor instantáneo de corriente calcular el valor eficaz de $\vec{\beta}$ mediante la ecuación (38). De esta manera, el valor de corriente que vamos a tomar es el valor pico de esta, con 202,32 A. De la misma manera en la que se propuso en el ejemplo, tomaremos la distribución de corrientes como $I_1 = I_3 = \frac{I_2}{2}$. En lo que respecta a la separación entre conductores, se va a considerar una distancia de $L_1 = 11$ metros, mientras que la separación entre el punto en el que se va a evaluar la inducción magnética respecto de los conductores va a ir variando, con distancias de $H_1 = 5, 10, 15$ y 20 metros. Así:

$$|\vec{\beta}| = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[-\frac{I_1 \cdot H_1}{H_1^2 + L_1^2} + \frac{I_2}{H_1} - \frac{I_3 \cdot H_1}{H_1^2 + L_1^2} \right] \quad (37)$$

$$|\vec{\beta}|_{rms} = 2,534 \cdot |\vec{\beta}| \quad (38)$$

Distancia [m]	5	10	15	20	25
$ \vec{\beta} $ [μ T]	6,7	2,21	0,94	0,47	0,26
$ \vec{\beta} _{rms}$ [μ T]	16,97	5,67	2,38	1,19	0,65

Tabla 1. Valores teóricos de inducción magnética en la dirección "A" para distintas distancias verticales.

TM-200:

	O	A1	A2	A3	A4
Distancia al apoyo [m]	0	10	20	30	40
Intensidad de campo eléctrico E_{rms} [V/m]	106	1860	1980	>2000	>2000
Inducción magnética β_{rms} [μ T]	3	2,10	1	0,60	1,80

Tabla 2. Valores medidos por el TM-200 en la dirección "A".



SMP2:

	O	A1	A2	A3	A4
Distancia al apoyo [m]	0	10	20	30	40
Intensidad de campo eléctrico E_{rms} [V/m]	284	806	1720	2980	3120
Inducción magnética β_{rms} [μ T]	0,62	0,68	0,73	0,80	1,10

Tabla 3. Valores medidos por el SMP2 en la dirección ``A``.

PANDERETA:

	O	A1	A2	A3	A4
Distancia al apoyo [m]	0	10	20	30	40
FEM inducida [mV]	5,40	6,50	6,70	7,20	8,40
Inducción magnética β_{rms} [μ T]	0,81	0,98	1,01	1,08	1,26

Tabla 4. Valores medidos por la Pandereta en la dirección ``A``.

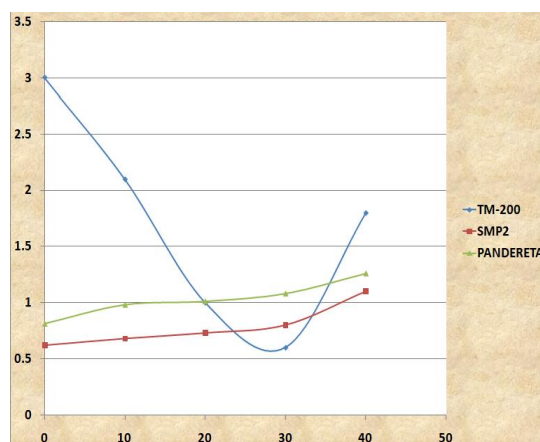


Figura 21. Valores de inducción magnética [μ T] frente a la distancia al apoyo[m]. Puntos ``A``. [Elaboración propia con EXCEL].

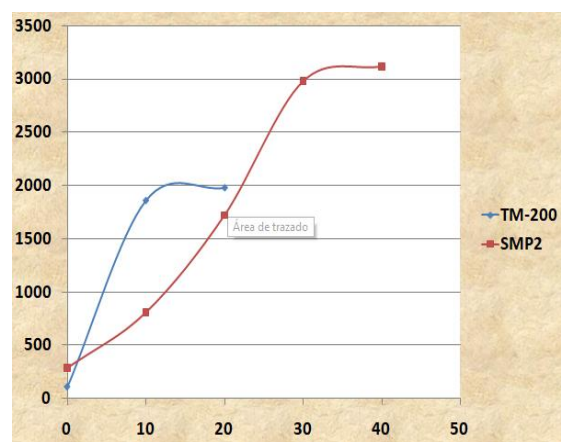


Figura 22. Valores de intensidad de campo eléctrico [V/m] frente a la distancia al apoyo[m]. Puntos ``A``. [Elaboración propia con EXCEL].

- Medidas realizadas en los puntos ``B``: Se trata de los puntos que se encuentran a 45° del trazado de la línea (Figura 15).

TM-200:

	B1	B2	B3	B4
Distancia al apoyo [m]	10	20	30	40
Intensidad de campo eléctrico E_{rms} [V/m]	>2000	>2000	>2000	>2000
Inducción magnética β_{rms} [μ T]	2	2,10	1,70	0,80

Tabla 5. Valores medidos por el TM-200 en la dirección ``B``.

SMP2:

	B1	B2	B3	B4
Distancia al apoyo [m]	10	20	30	40
Intensidad de campo eléctrico E_{rms} [V/m]	2240	3297	3230	2741
Inducción magnética β_{rms} [μ T]	0,68	0,51	0,49	0,45

Tabla 6. Valores medidos por el SMP2 en la dirección ``B``.



PANDERETA:

	B1	B2	B3	B4
Distancia al apoyo [m]	10	20	30	40
FEM inducida [mV]	6,70	4,60	2,40	2,50
Inducción magnética β_{rms} [μ T]	1,01	0,69	0,36	0,38

Tabla 7. Valores medidos por la Pandereta en la dirección "B".

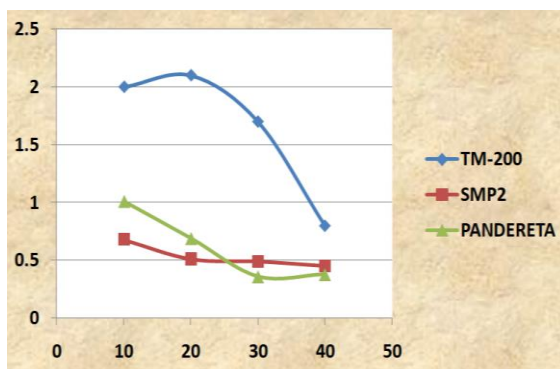


Figura 23. Valores de inducción magnética [μ T] frente a la distancia al apoyo[m]. Puntos "B". [Elaboración propia con EXCEL].

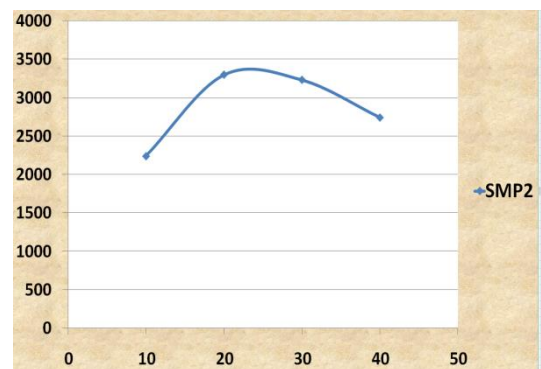


Figura 24. Valores de intensidad de campo eléctrico [V/m] frente a la distancia al apoyo[m]. Puntos "B". [Elaboración propia con EXCEL].

- Medidas realizadas en los puntos "C": Trayectoria transversal a la línea.

TM-200:

	C1	C2	C3	C4
Distancia al apoyo [m]	10	20	30	40
Intensidad de campo eléctrico E_{rms} [V/m]	>2000	>2000	1230	910
Inducción magnética β_{rms} [μ T]	2,30	2,20	1,50	0,80

Tabla 8. Valores medidos por el TM-200 en la dirección "C".



SMP2:

	C1	C2	C3	C4
Distancia al apoyo [m]	10	20	30	40
Intensidad de campo eléctrico E_{rms} [V/m]	2620	1700	957	510
Inducción magnética β_{rms} [μ T]	0,48	0,32	0,25	0,17

Tabla 9. Valores medidos por el SMP2 en la dirección ``C``.

PANDERETA:

	C1	C2	C3	C4
Distancia al apoyo [m]	10	20	30	40
FEM inducida [mV]	6,40	3,30	1,80	0,70
Inducción magnética β_{rms} [μ T]	0,96	0,50	0,27	0,11

Tabla 10. Valores medidos por la Pandereta en la dirección ``C``.

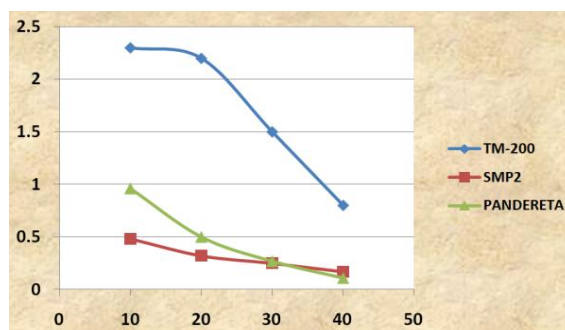


Figura 25. Valores de inducción magnética [μ T] frente a la distancia al apoyo[m]. Puntos ``C``. [Elaboración propia con EXCEL].

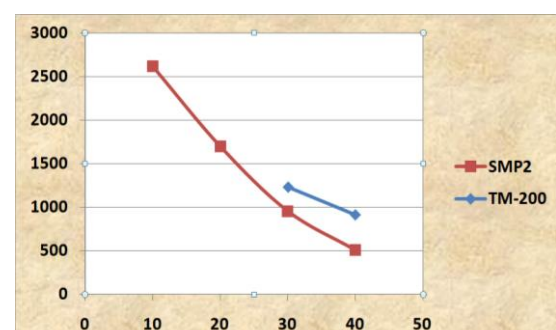


Figura 26. Valores de intensidad de campo eléctrico [V/m] frente a la distancia al apoyo[m]. Puntos ``C``. [Elaboración propia con EXCEL].



Si atendemos a las lecturas obtenidas en la dirección de los puntos "A", en lo que respecta a las medidas realizadas con el instrumento TM-200 estas no parecen ser del todo fiables. Se observa como partiendo desde el punto "O", situado justo en el apoyo, los valores de intensidad de campo eléctrico recogidos van aumentando, con un valor mínimo aproximadamente de 0,11 kV/m, debido a que al ir avanzando en la dirección de los conductores nuestro cuerpo se va acercando a los mismos debido a la curvatura que estos adoptan, en un terreno llano como es en el que se llevaron a cabo las mediciones. Sin embargo, este entra en saturación ya que el campo eléctrico existente supera el rango de registro de este aparato, que va desde los 0 V/m hasta 2000 V/m. En lo que respecta a la inducción magnética en esta misma dirección, las lecturas no concuerdan con lo que *a priori* podríamos esperar ya que conforme nos acercáramos a los conductores la inducción debería aumentar. De esta manera, si queremos obtener un rango de valores para ver como varía la intensidad de los campos conforme nos acerquemos de la línea en la dirección A, tendremos que fijarnos en las lecturas hechas con el SMP2 y con la Pandereta. Por lo registrado con el SMP2 en relación a la intensidad de campo eléctrico podemos observar como se pasa de tener un valor de 0,28 kV/m en el centro del apoyo de la propia línea a los 3,1 kV/m a 40 metros de este en la dirección del tendido de los cables. Ocurre algo similar para la inducción magnética, de la que se obtienen valores de 0,62 μ T con el SMP2 y de 0,81 μ T con la pandereta en el propio apoyo, para ir incrementándose hasta los 1,1 μ T y 1,26 μ T, respectivamente. Si nos fijamos en los resultados obtenidos de manera teórica, vemos como estos valores experimentales se asemejan a lo obtenido mediante las expresiones (37) y (38) para una distancia vertical a los conductores entre 25-20 metros. Los valores mínimos de inducción magnética los encontramos en el propio apoyo, que corresponde al punto "O" donde nos encontramos aproximadamente a unos 25 metros. Conforme la separación al apoyo aumenta, disminuye la distancia vertical con los cables, y se registran los valores máximos a unos 40 metros del apoyo, y que como hemos comentado corresponde a una distancia aproximada de 20 metros a los conductores. Realmente no se conocía la altura del apoyo exacta, ni el acercamiento de los cables al suelo debido a su flecha, pero debido a la correlación entre los datos experimentales y teóricos, y dado que la altura inicial de los cables rondará los 25-30 metros, se puede extraer de estos valores una tendencia coherente dada la situación espacial de los puntos de medida y de los cables.

Fijémonos ahora en los datos obtenidos en las mediciones de la dirección de los puntos "B". En lo referido a la intensidad del campo eléctrico, de lo medido con el TM-200 no se puede sacar nada en claro, simplemente que en toda la trayectoria nos encontramos con valores por encima de los 2 kV/m. En la intensidad de campo eléctrico reflejada por el SMP2, se puede observar como esta ya no sigue la misma tendencia que tenía lugar en los puntos "A". Esto se debe a que la trayectoria seguida a la hora de hacer las lecturas con los instrumentos forma aproximadamente 45° con la dirección "A", de manera que no es el punto más alejado del centro del apoyo el que está más cerca de los conductores. Así, obtenemos el valor mínimo de 2,24 kV/m a 10 metros del punto "O" y el valor máximo de intensidad a unos 20 metros de este, con casi 3,3 kV/m. Si nos fijamos en los resultados proporcionados por



este mismo instrumento respecto a la inducción magnética, sí que se refleja una tendencia decreciente conforme nos alejamos del apoyo, con un valor máximo de $0,68 \mu\text{T}$ a 10 metros y un valor mínimo de $0,45 \mu\text{T}$ a 40 metros. Sin embargo, los valores medidos entre distancias de 20-40 metros no difieren mucho entre sí, y podría darse el caso similar al que ocurre con la intensidad de campo eléctrico y que en un punto más alejado del apoyo resultara una inducción magnética mayor que respecto a otro punto más cercano, ya que estar más cerca del centro del apoyo no tiene porque implicar encontrarse más cerca de los conductores. La realidad es que estar a una determinada distancia conlleva encontrarse más alejado o más cerca de los cables, tanto horizontal como verticalmente, sin embargo dado que es más difícil seguir la trayectoria "B" sin desviarse, es posible que en el proceso de medición los puntos donde se tomaron las lecturas fueran inclinándose a la derecha o a la izquierda y dado que es una trayectoria más "crítica" existan estas diferencias entre las tendencias de las intensidades de los campos respecto a la distancia al apoyo. Además, ya no resulta tan intuitivo a simple vista relacionar la distancia al conductor con la distancia al apoyo, como sí que ocurre en el caso anterior, donde se sigue una trayectoria paralela al tendido de los cables, ya que podemos ir alejándonos de uno de los conductores de manera lateral y acercándonos a otro, haciendo que a determinadas distancias la contribución de uno u otro sea mayor o menor, y en consecuencia resulta más complicado anticipar el comportamiento de las intensidades de los campos. Respecto a las lecturas de inducción magnética que nos proporciona la Pandereta, también se refleja el descenso de la intensidad del campo magnético al aumentar la distancia en la dirección dada, sin embargo el último punto presenta un valor mayor que el inmediatamente anterior, algo similar a lo que ocurre con la intensidad de campo eléctrico medida con el SMP2, como ya se ha comentado. El valor máximo es de $1,01 \mu\text{T}$ correspondiente a una distancia de 10 metros, y un valor mínimo de $0,36 \mu\text{T}$ a los 30 metros. Volviendo al TM-200, los valores que este nos proporciona escapan del rango en el que se mueven los otros dos instrumentos, que para distancias entre los 20 y 40 metros nos proporcionan valores dentro de lo que cabe similares. Por tanto, ya que es más complicado imaginar antes de realizar las medidas cómo se van a comportar los resultados respecto de cada punto de medición a otro, resulta más ilustrativo apreciar como tanto para la intensidad de campo magnético como de campo eléctrico recogidas con el SMP2, que de los instrumentos utilizados es el más preciso, los valores oscilan en un rango menor fruto de la dirección de la trayectoria adoptada.

Por último, quedan por analizar los datos obtenidos de las mediciones en la dirección de los puntos "C". Esta dirección quizá sea la más evidente a la hora de visualizar los resultados que se van a dar, independientemente de si un instrumento u otro proporciona unos valores de intensidad más altos o más bajos. Se trata de una dirección perpendicular a la línea, y por tanto cuanto más nos alejemos del punto de partida, que es de nuevo el apoyo, más nos distanciaremos de la propia línea eléctrica. Si bien conforme avanzamos en esta trayectoria en los primeros metros nos acercamos más a los conductores de la fase "exterior" y la distancia horizontal a estos mengua, nos alejamos de los restantes por lo que la contribución total va a ir disminuyendo, hasta que a una determinada distancia nos distanciamos de todos los conductores. Así, podemos esperar una tendencia decreciente en los valores de



intensidad de campo eléctrico y de inducción magnética, y es efectivamente lo que ocurre. Para la intensidad de campo eléctrico encontramos un máximo registrado con el SMP2 de 2,6 kV/m en el punto más cerca del apoyo, y el mínimo en el más lejano, con 0,5 kV/m. Debido a la saturación que sufre el TM-200, solo se pudo anotar el valor mínimo correspondiente también a la mayor distancia con la línea, que es de 0,9 kV/m. En lo que respecta a la inducción magnética, no se requieren muchos comentarios pues también sigue la misma tendencia. Los valores máximos medidos son de 2,3 μT , 0,48 μT y 0,96 μT para el TM-200, SMP2 y la Pandereta respectivamente. En el mismo orden, los mínimos registrados son de 0,8 μT , 0,17 μT y 0,11 μT .

Como se ha visto, el instrumento TM-200 proporcionaba unas lecturas que se alejaban de la tendencia de las proporcionadas por los otros dos, incluso los valores escapaban de forma reseñable de los rangos en los que se movían los registrados con el SMP2 y la Pandereta. Dentro de lo que cabe, la Pandereta y el SMP2 reflejan unos valores de intensidades de campos electromagnéticos cuyas magnitudes no se distancian mucho excepto en algún punto concreto. Cabe destacar que la Pandereta es un instrumento más rudimentario que el SMP2 dada su construcción "artesanal" y que aunque el éxito en su manipulación depende en parte de la destreza y experiencia de la persona que lo maneja y de su correcta orientación, al igual que lo que ocurre con la orientación del sensor del SMP2, probablemente los resultados proporcionados por este último se ajusten más a la realidad, y por lo tanto nos de una información más fiable. Sin embargo, aunque se trate de un instrumento menos profesional en términos de mediciones de este tipo, proporciona mejores lecturas que el TM-200. Teniendo en cuenta estas consideraciones, y las expuestas en párrafos anteriores en lo que respecta a las posibles desviaciones que se hayan podido deducir del propio trabajo de campo, en líneas generales se ha podido observar como la intensidad de campo eléctrico ha adoptado valores máximos de 3,1 kV/m a 40 metros en la dirección de la propia línea y hasta de 3,3 kV/m a 30 metros de la denominada trayectoria "B", aproximadamente a 45 ° de la anterior. Así, distanciándonos en una dirección transversal, entre los 30 y 40 metros, se desciende hasta 0,51 kV/m. Sin embargo, debido al apantallamiento que existe debajo del apoyo, en el llamado punto "O", encontramos en este los valores de intensidad más bajos, de unos 0,28 kV/m. Para la inducción magnética, los valores máximos corresponden a distancias de unos 40 metros en la dirección "A", con registros entre 1,1 μT - 1,26 μT , y valores mínimos de 0,17 μT también a distancias de 40 metros pero esta vez en la dirección transversal. Se han registrado también intensidades entre 0,75 μT - 0,45 μT a lo largo de la dirección "B". De esta forma, se pone de manifiesto que los lugares donde encontramos los valores más altos de intensidad de campos electromagnéticos están en las direcciones que siguen el curso de los conductores por debajo de estos, si bien las que siguen el eje longitudinal de la línea adoptan valores crecientes (sin llegar al punto más bajo de los cables pues luego estos comienzan a separarse de nuevo del suelo) y en aquellas que forman un cierto ángulo con el propio eje las intensidades adoptan valores más "constantes" con una tendencia a la larga decreciente. Así, la dirección en las que las intensidades van adoptando cada vez menor magnitud y por tanto encontramos los valores más bajos son en aquellas que son transversales,

resultando los valores mínimos en puntos situados debajo del apoyo de línea en lo que respecta al campo eléctrico.

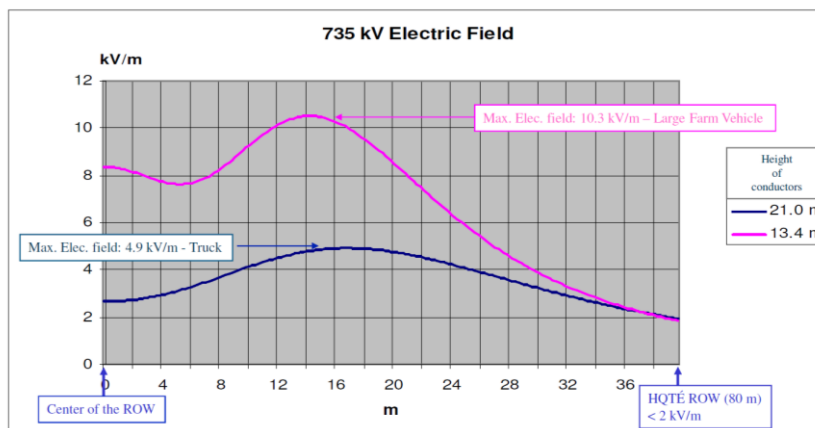


Figura 27. Valores de intensidad de campo eléctrico para una línea de 735 kV respecto a la distancia horizontal a la línea. [Imagen obtenida del estudio *Calculation of electrical induction near power lines*, Canadian Electricity Association; Richard Lehoux].

En la figura 27 se puede observar la distribución de las intensidades de campo eléctrico que se pueden encontrar en una línea de 735 kV. De forma visible resulta evidente que los valores máximos de intensidad de campo eléctrico que se registran son mayores que los que se han obtenido para la línea "Aragón" de 400 kV. Si en vez de centrarnos en esta diferencia de magnitud, que se debe a que la tensión nominal en la línea "Aragón" es menor, prestamos atención a la tendencia de los valores reflejados en la figura 27 se puede ver como se asemeja a la que nos muestran los datos correspondientes a las medidas realizadas en la línea objeto del estudio, que han sido expuestos anteriormente. Cuando la distancia a la línea es mínima, significa que nos encontramos debajo del apoyo. En estas condiciones, nos encontramos con los valores de intensidad más bajos, en contra de lo que quizá en un principio se pudiera pensar debido a la cercanía al apoyo. Sin embargo, el apantallamiento eléctrico que existe en estos puntos hace que no nos encontremos en estos los valores de intensidad máximos. Conforme la distancia aumenta, este efecto va perdiendo influencia y es cuando la intensidad de campo eléctrico va adquiriendo valores cada vez mayores, hasta que a una determinada distancia nos alejamos tanto que esta intensidad no puede sino disminuir. Por otro lado, cuanto menor es la altura de los cables, mayores valores de intensidad de campo eléctrico encontramos. Estos dos aspectos también han sido reflejados en las medidas realizadas en las cercanías de la línea "Aragón".



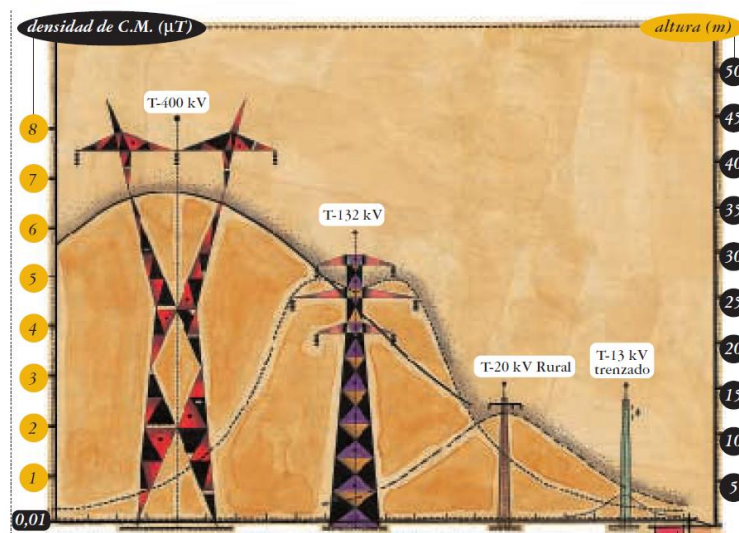


Figura 28. Valores de inducción magnética para líneas de diferentes niveles de tensión respecto a la distancia vertical a los conductores. [Imagen obtenida del documento *Campos eléctricos y magnéticos de 50 Hz*, Red Eléctrica de España, UNESA].

En lo que respecta a los valores de inducción magnética que se representan en la figura 28, se puede extraer la tendencia obtenida en base a los datos de las lecturas expuestas, donde el campo magnético presentaba mayor valor en aquellos puntos donde la cercanía a los conductores de fase era mayor. Así, si se prolonga la curva correspondiente a la línea de 400 kV, los valores correspondientes a las menores distancias respecto al suelo corresponden aproximadamente menores a $1 \mu T$, que son aquellos puntos donde por norma general se puede encontrar una persona. Hay que tener en cuenta que no es lo mismo tomar una medida a casi 2 metros del suelo en el punto donde la flecha sea más acusada, donde el conductor estará más cerca de nosotros, que a dicha distancia del suelo pero en lugares donde los conductores se encuentran más elevados. De ahí que se puedan obtener valores más altos a esa distancia del suelo que los reflejados en la Figura 28, como ocurre en los puntos de medida "A".

Cabe destacar que nos hemos apoyado en la expresión (37) para hacernos una idea de cómo varía la inducción magnética con la distancia vertical a las fases, ya que la referencia en la toma de lecturas no era dicha distancia sino la que separaba al apoyo del punto de la medición. Como se vio en el ejemplo se consideró tres fases con conductores unipolares, sin embargo la línea "Aragón" consta de conductores dúplex, lo que significa que cada fase está constituida por dos conductores, separados en una distancia horizontal de unos 40 cm. Dada la distancia que separa a cada fase, que como se ha comentado es de unos 11 metros, la suposición de que cada una de estas está formada por un solo conductor y por tanto que la corriente de línea circula totalmente por este no parece alejarnos mucho de la realidad de la línea en base a las lecturas tomadas en ella, y por ello nos permite tomarlas como referencia a la hora de establecer las distancias verticales a los conductores. Por otra parte, se ha mencionado como el flujo de potencia es cambiante, y por consiguiente las tensiones y corrientes de línea sufren variaciones. Como veremos en el siguiente apartado, estos

cambios en el nivel de magnitud de estas no presentarán grandes cambios en cuanto a las conclusiones que se quieren obtener con estas medidas respecto a otras que se pudieran obtener con otros niveles de potencia en la línea.

6.- CONCLUSIONES.

Como bien se ha dicho, el flujo de potencia adopta diferentes valores a lo largo de todo el día, siendo las horas del mediodía y del atardecer cuando el sistema de transporte y distribución se encuentra más congestionado debido a que existe una mayor demanda por parte de los usuarios. Por el contrario, es por la noche cuando este se encuentra menos cargado ya que es cuando menor demanda existe, las llamadas horas valle. Las lecturas obtenidas durante la visita corresponden, en base a los datos proporcionados por REE, a una potencia aproximada de 100 MW y 4,5 MVar. Obviamente durante el tiempo que duraron las tomas de las medidas estos valores tuvieron fluctuaciones, pero al comparar los valores teóricos obtenidos en base a estos valores de potencia con los experimentales parece razonable pensar en que se movían alrededor de esos niveles de potencia. Las medidas fueron llevadas a cabo entre las 12:00 h y las 12:45 h, que *a priori* son momentos del día donde la línea va a ir más congestionada junto con las primeras horas de la tarde. Cabe preguntarse entonces cómo podrían variar los valores de intensidades de los campos electromagnéticos en momentos donde hubiese mayor potencia en la línea. En lo que respecta al campo eléctrico no se esperaría gran variación ya que por carácter reglamentario la tensión de línea puede variar como máximo en un 10%, y dada la estrecha relación que existe entre la diferencia de potencial y la intensidad del campo eléctrico, aún con las variaciones en la potencia mencionadas, va a estar alrededor de los valores medidos y expuestos anteriormente: máximos de 3,1 kV/m – 3,3 kV/m en distancias entre los 30-40 metros al apoyo en direcciones paralelas y oblicuas a los conductores de fase. Así, encontramos valores mínimos de 0,51 kV/m a unos 30-40 metros del apoyo en direcciones transversales al tendido de los cables, y de 0,28 kV/m debajo del apoyo. En lo que respecta a la inducción magnética, en el apartado anterior se describen valores máximos entre los 0,75 μT – 1,26 μT a 30-40 metros del apoyo en direcciones oblicuas y paralelas a los cables, y valores mínimos de 0,17 μT a unos 40 metros del apoyo en trayectorias transversales a los conductores. Si por un aumento de potencia las corrientes incrementaran su magnitud por ejemplo al doble de la existente en el momento de las medidas, en base a la expresión (37) se podría intuir un aumento de aproximadamente del doble en el nivel de inducción magnética. De un modo similar, se puede intuir como los valores de esta se verán reducidos en aquellos momentos del día donde el flujo de potencia sea menor, como por ejemplo la noche.

En base a los valores medidos *in situ* en las inmediaciones del apoyo perteneciente a la línea "Aragón", compuesta por circuito simple y conductores dúplex, y los valores que se podrían esperar con otros niveles de potencia, se puede decir que la intensidad de los campos electromagnéticos no presenta peligros para la salud, en referencia a



las consideraciones y los valores de campos electromagnéticos recogidos en la legislación vigente sobre esta materia en España.⁸

BIBLIOGRAFÍA.

- *Física Universitaria*, Sears Zemansky, 12ª edición, Volumen 2; Hugh D. Young, Roger A. Freedman.
- *Física para la ciencia y la tecnología*, 3ª edición, Volumen 2; Paul A. Tipler.
- *Física: electricidad y magnetismo*, 9ª edición; Raymond A. Serway, John W. Jewett, Jr.
- *Segunda Revolución Científica*; Enrico Bellone.
- *La dinamo terrestre, un desafío centenario*; Emmanuel Dormy.
<https://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/por-qu-estamos-solos-792/la-dinamo-terrestre-un-desafio-centenario-18343>. Visitado 20/08/2020.
- *Parámetros eléctricos de las líneas de A.T*, grado de ingeniería eléctrica. Antonio Joaquín Montañés Espinosa.
- Material docente asignatura "Física II" grado de ingeniería eléctrica; Antonio Usón Sardaña, Jesús Letosa Fleta.
- Material docente asignatura "Líneas Eléctricas" grado de ingeniería eléctrica; Antonio Usón Sardaña, Jesús Letosa Fleta.
- *Campos eléctricos y magnéticos de 50 Hz*, Red Eléctrica Española, UNESA, 2001.
- *REAL DECRETO 1066/2001, de 28 de septiembre*.
<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2001-18256>. Visitado 5/09/2020.
- *REAL DECRETO 299/2016, de 22 de julio*.
<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2001-18256>. Visitado 5/09/2020.

⁸ Legislación y normativa. Valores de campo admitidos. ANEXO I.



ANEXOS.

ANEXO I.- LEGISLACIÓN Y NORMATIVA. VALORES DE CAMPO ADMITIDOS.

Todos los reglamentos y normativas vigentes en España tienen como principal objetivo el de salvaguardar la seguridad de las personas y de las instalaciones. Podemos encontrar numerosos ejemplos de reglamentos en diversos ámbitos profesionales cuya principal función es esta, además de dar una serie de pautas y referencias a la hora de la ejecución de la actividad laboral y de las instalaciones, con el fin de lograr una mayor homogeneidad. En el ámbito de la ingeniería eléctrica quizás sean dos los más conocidos y extendidos debido a la importancia que tienen el tipo de explotaciones e instalaciones a las que estos se aplican. Se trata del *Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT)* y el *Reglamento de Líneas Eléctricas de Alta Tensión (RLAT)*. Por las características de la línea objeto de estudio, le sería aplicable el *RLAT*. Sin embargo no se encuentran en este algún tipo de valores máximos para las intensidades de campos electromagnéticos que nos permitan evaluar los obtenidos en las mediciones hechas en la línea. Así, en España existen dos Reales Decretos de los cuales por su ámbito de aplicación y las consideraciones que se tienen en cuenta se han tomado como referencia a la hora de extraer la conclusión del apartado 6.

- *REAL DECRETO 1066/2001, de 28 de septiembre.*
- *REAL DECRETO 299/2016, de 22 de julio.*

El *REAL DECRETO 1066/2001, de 28 de septiembre* está basado en las disposiciones establecidas y referidas en la Recomendación de Consejo de la UE, del 12 de julio de 1999, en materia de exposición del público general a campos electromagnéticos de 0 Hz a 300 GHz. Esta recomendación está basada en la guía elaborada en 1998 por la Comisión Internacional para la Protección contra la Radiación no Ionizante (*ICNIRP*), organismo vinculado a la OMS⁹. Otros países europeos también tomaron esta guía como instrumento a la hora de establecer una serie de límites en las intensidades de los campos electromagnéticos

En el *REAL DECRETO 1066/2001, de 28 de septiembre*, se establecen una serie de valores llamados de referencia, si los valores medidos están por debajo de estos se asegura la prevención de los efectos adversos que puedan tener los campos electromagnéticos de 50 Hz en el sistema nervioso.

⁹ Actualización de la legislación de campos electromagnéticos. REE; UNESA. 2001.

2019-2020

CUADRO 2

Niveles de referencia para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (0 Hz-300 GHz, valores rms imperturbados)

Gama de frecuencia	Intensidad de campo E (V/m)	Intensidad de campo H (A/m)	Campo B (μT)	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	$0,73/f$	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

Figura 29. Niveles de referencia de campos electromagnéticos. [Imagen obtenida del REAL DECRETO 1066/2001, de 28 de septiembre. Ministerio de la presidencia del Gobierno de España].

Como ya conocemos, la frecuencia del sistema eléctrico español es de 50 Hz, por lo que los valores que se han tomado como límite para asegurar la prevención de daños en el sistema nervioso han sido de 5 kV/m y 100 μT.

En el *REAL DECRETO 299/2016, de 22 de julio*, se disponen las condiciones mínimas que aseguran la protección de la salud de los trabajadores contra los riesgos que pudiera conllevar la exposición a los campos electromagnéticos.

Intervalo de frecuencias	NA (E) _{inf} [V/m] (RMS)	NA (E) _{sup} [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	$1,7 \times 10^2$	$6,1 \times 10^2$

Figura 30. Niveles de referencia de intensidad de campo eléctrico. [Imagen obtenida de la guía técnica para la evaluación y prevención de riesgos derivados de la exposición a campos electromagnéticos en los lugares de trabajo. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo].

Dado que la frecuencia de la red es de 50 Hz el nivel inferior que se recoge en la tabla es de 10 kV/m.



Intervalo frecuencias	NA (B) _{inf} [μT] (RMS)	NA (B) _{sup} [μT] (RMS)
$1 \leq f < 8 \text{ Hz}$	$2,0 \times 10^5 / f^2$	$3,0 \times 10^5 / f$
$8 \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2,5 \times 10^4 / f$	$3,0 \times 10^5 / f$
$25 \leq f < 300 \text{ Hz}$	$1,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^5 / f$
$300 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$3,0 \times 10^5 / f$	$3,0 \times 10^5 / f$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$1,0 \times 10^2$	$1,0 \times 10^2$

Figura 31. Niveles de referencia de inducción magnética. [Imagen obtenida de la guía técnica para la evaluación y prevención de riesgos derivados de la exposición a campos electromagnéticos en los lugares de trabajo. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo].

En el nivel inferior que se recoge es de 1000 μT.

El estar por debajo de ambos valores tanto en las medidas obtenidas de campo eléctrico y de campo magnético asegura la prevención de afecciones al sistema nervioso del organismo.¹⁰

ANEXO II.- EFECTOS SOBRE LA SALUD DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS.

Como se ha explicado en apartados anteriores, los campos electromagnéticos tienen la capacidad de modificar de alguna forma el espacio que les rodea, en mayor o menor magnitud dependiendo de la intensidad de estos, y de esta forma influir sobre materiales, cuerpos u objetos que presenten una determinada propiedad física, como es la carga eléctrica. Así, los campos electromagnéticos son capaces de ejercer fuerzas, cuyas características ya han sido descritas, sobre las cargas eléctricas. De esta manera, un campo eléctrico ejerce una fuerza sobre una carga eléctrica, y si esta se encuentra estática, va a implicar el movimiento de esta. Una propiedad de los campos magnéticos variables en el tiempo, como son los que nos encontramos en la línea "Aragón" y en cualquier circuito de corriente alterna es la de inducir en los cuerpos fuerzas electromotrices, en definitiva tensiones. Esta característica es la que se ha utilizado para a través de las lecturas de tensión obtenidas con el voltímetro incorporado a la Pandereta "traducirlas" a valores de inducción magnética. Estas tensiones inducidas, cuando existe un camino o un circuito cerrado, dan lugar a la circulación de corrientes. En pocas palabras, los campos electromagnéticos provocan el movimiento de cargas eléctricas en el interior de nuestro organismo. En nuestro cuerpo existe una gran cantidad de corrientes eléctricas generadas por el movimiento de cargas, sin necesidad de estar este expuesto a campos electromagnéticos externos. Estas corrientes eléctricas que viajan por nuestro cuerpo a través de los nervios y las neuronas tienen un papel primordial en el buen funcionamiento del organismo, ya que multitud de funciones requieren la transmisión de estas señales

¹⁰ El estar por debajo de ambos niveles también implica el evitar episodios de mareos o náuseas y destellos en la visión, que aunque no implican un riesgo para la salud de la persona sí que provocan situaciones bastante desagradables.



eléctricas en forma de impulso nervioso. Por ejemplo, el nervio óptico se encarga de transmitir las imágenes que captan nuestros ojos al cerebro mediante impulsos nerviosos, donde se procesan. El nervio espinal se encarga de hacer llegar a determinados músculos los impulsos necesarios para que estos se muevan. Incluso el bombeo de sangre en el corazón requiere de corrientes eléctricas. En definitiva, se trata de una gran red de nervios y células que se encargan del buen funcionamiento de los órganos, lo que se conoce como sistema nervioso. Dado que los campos electromagnéticos tienen la capacidad de provocar el desplazamiento de cargas eléctricas, estas corrientes originadas por fuentes externas a las del propio cuerpo humano pueden de alguna forma interferir con las que se encargan de transmitir los impulsos nerviosos a distintas partes del organismo y de esta forma provocar anomalías o un mal funcionamiento del sistema nervioso y por lo tanto de los distintos órganos y músculos. Obviamente, la magnitud de estas corrientes inducidas depende de la intensidad de los campos electromagnéticos a los que estemos sometidos, y en virtud de la intensidad de estas corrientes los efectos que se puedan derivar al cuerpo serán unos u otros. Los niveles de campos electromagnéticos expuestos en el ANEXO I que han permitido obtener las conclusiones del Apartado 6 se basan en aquellas intensidades de campo cuyas corrientes generadas en el organismo no suponen un peligro para la salud o sensaciones incómodas para la persona.

Los primeros efectos que se podrían originar en el cuerpo corresponderían a efectos de alguna forma "sensitivos". Estos efectos podrían ser el movimiento y erizamiento del cabello y del vello del cuerpo, así como destellos en la visión. El erizamiento del cabello podría percibirse entre los 5-10 kV, y para que pudiera aparecer algún problema transitorio en la visión, que comúnmente se conoce como "lucecitas", tendríamos que estar bajo campos magnéticos de unos 500 μT .¹¹ Estos valores están referenciados para personas que pudieran estar bajo una línea de Alta Tensión. En el caso de estar bajo campos que indujeran corrientes en el cuerpo cuya intensidad fuera entre 10 y 100 veces mayor de la inducida por los mencionados anteriormente, podrían darse episodios de contracciones y movimientos musculares involuntarios, con el consecuente peligro que esto representa a la salud sobre todo en lo que respecta al sistema cardiovascular. Por encima de estos valores podrían darse paros cardíacos. Para que estos efectos tuvieran lugar tendríamos que tener unas intensidades de campos electromagnéticos enormes, muy lejos de los valores registrados en la línea "Aragón" y de cualquier línea de transporte de energía de Alta Tensión del mundo.

Los problemas que atañen principalmente al sistema nervioso por el hecho de la inducción de corrientes derivada de los campos electromagnéticos son los únicos que han sido comprobados científicamente, y en base a ellos se han establecido valores de referencia de intensidades de campo con los que comparar las mediciones o estimaciones, como los presentados en el ANEXO I. Además, se han estudiado e investigados otros posibles problemas derivados de la exposición de campos electromagnéticos de 50 Hz, como modificaciones en el ADN, aparición de células cancerígenas, problemas de fertilidad o mutaciones, entre otros. En todos los casos se

¹¹ *Campos eléctricos y magnéticos de 50 Hz*. REE; UNESA. 2001.



2019-2020

ha desechado la opción de que los campos electromagnéticos a frecuencia industrial puedan provocar la aparición de dichos cambios en el organismo.

