

ESTUDIO DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DE FRECUENCIA EXTREMADAMENTE BAJA EN LAS ÁREAS DE TRABAJO ADYACENTES A GENERADORES ELÉCTRICOS

STUDY OF ELECTROMAGNETIC FIELDS OF EXTREMELY LOW FREQUENCY IN WORK AREAS ADJACENT TO ELECTRIC GENERATORS

Raúl Baqués Merino ¹
Ibis Ávila Roque ²
Meylín Panol Quintana ³

RESUMEN

Introducción: Investigaciones fisiológicas han establecido en varios países reglamentos y normas para reducir la exposición a campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas. **Objetivo:** Estimar el comportamiento espacial y temporal de los campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas alrededor de las fuentes de alta potencia y su correspondencia con las predicciones teóricas. **Material y método:** Se utilizó un magnetómetro (CEM-FEB), marca Chauvin-Armoux, con rango de 0 – 100 mT. **Resultados:** Se identificaron las áreas de mayor intensidad magnética (B) alrededor de los generadores eléctricos en la frecuencia de 60 Hz. Se caracterizaron las fuentes y las áreas de mayores valores de intensidad magnética (B) mediante un diseño de medición de simetría bilateral y un método de evaluación del CEM-FEB, considerando las fuentes puntuales. **Conclusiones:** Son necesarios los estudios de campo cuantitativos y los mapeos del comportamiento del vector B en las industrias de generación de electricidad.

Palabras clave: campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja, evaluación, fuentes, áreas de trabajo

ABSTRACT

Values of magnetic intensity (B) were identified around electric generators in extremely low frequency (60 Hz) of electromagnetic field (ELF-EMF). A symmetrical design bilateral allowed characterize the source and areas in maximum magnetic intensity (B) and a new design to measure was created. Several different measure methods were set accord to distribution of magnetic field (B) for each kind of source of ELF-EMF and work's place that has been exposed to ELF-EMF. It advice make systematic studies of B in this kind of industries.

Keywords: electromagnetic field of extremely low frequency, evaluation, source, work areas

INTRODUCCIÓN

Los campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja (CEM-FEB) influyen en la salud humana; sus implicaciones fundamentales se relacionan con perturbaciones a nivel de la membrana celular, cambios en el ácido desoxirribonucleico (ADN), cambios en el equilibrio de los iones de calcio intracelular, secreción anómala de la hormona melatonina y otras modificaciones potencialmente nocivas del sistema inmunológico. Además, los estudios epidemiológicos recientes en trabajadores de la industria eléctrica y en la población urbana expuesta, relacionan la aparición de carcinomas ante la exposición a campos electromagnéticos (CEM) intensos. Los países desarrollados, basados en investigaciones fisiológicas y clínicas, establecen reglamentos y normas para reducir la exposición a los mismos.⁽¹⁾

Tomando en cuenta que no hemos encontrado evidencias que demuestren que en el país se haya realizado un levantamiento de los CEM-FEB (60 Hz), es que realizamos una investigación de los mismos en fuentes de generación de mediana y alta potencia. En el presente artículo reportamos parte de los resultados obtenidos durante la investigación en el terreno. Debido a que en Cuba no existe reglamentación, norma o legislación propia que garantice la prevención de los daños potenciales a las personas expuestas a los CEM, es que se motiva la realización del presente estudio, estableciendo, *a priori*, dos objetivos fundamentales: 1) describir el comportamiento cuantitativo espacial y temporal de los CEM en un grupo de generadores eléctricos

¹ Licenciado en Física, Investigador Agregado, Profesor Asistente. Servicio de Riesgos Físicos, Instituto Nacional de Salud de los Trabajadores, La Habana, Cuba. ORCID ID: 0000-0002-3336-0251

² Médico especialista de I grado en Medicina General Integral y de II grado en Higiene y Epidemiología, Máster en Salud Ambiental, Doctora en Ciencias de la Salud, Investigadora y Profesora Auxiliar. Servicio de Riesgos Físicos, Instituto Nacional de Salud de los Trabajadores, La Habana, Cuba. ORCID ID: 0000-0001-3342-2645

³ Licenciada en Tecnología de la Salud, Departamento de Tecnología de la Salud, Facultad de Ciencias Médicas 'Julio Trigo López', La Habana, Cuba. ORCID ID: 0000-0002-0312-7301

Correspondencia:

Raúl Baqués Merino
Instituto Nacional de Salud de los Trabajadores
Calzada de Bejucal km 7½ n° 3035 entre Heredia y 1ª, La Esperanza, Arroyo Naranjo, La Habana, Cuba, CP10900
E-mail: baques@insat.sld.cu

de mediana potencia de 1,7 MW, en un grupo de 2,4 MW y en un grupo de alta potencia de 100 MW, situados en las provincias de La Habana y Mayabeque; y 2) comparar los valores medidos con un valor máximo de referencia de 0,42 μT , valor que fue recomendado por el Comité Internacional para las Radiaciones No Ionizantes (INIRC) en 1994 para prevenir las exposiciones laborales a los CEM-FEB de hasta 40 horas por semana.⁽²⁾

MATERIAL Y MÉTODO

Las mediciones se realizaron con un magnetómetro (CEM-FEB) de nacionalidad francesa, marca Chauvin-Arnoux, con rango de medición de 0 – 100 mT, con menor valor de división de la escala de 0,001 μT . Y las distancias entre los puntos de medición se realizaron con ayuda de una cinta métrica de 0-30 m con error absoluto de $\pm 0,001$ m.

Se comenzó por identificar las áreas de mayores valores de intensidad magnética (B) alrededor de los generadores eléctricos en el espectro de CEM-FEB (60 Hz), y luego se caracterizaron las fuentes más importantes presentes en estas áreas, tomando en cuenta que se debía esperar la mayor intensidad (B) en las áreas que circundaban los lugares de mayor potencia de generación, colocando los puntos de medición y respetando la simetría del emisor. La metodología de medición se elaboró mediante un diseño de medición de simetría bilateral respecto al eje longitudinal de las fuentes, colocando los puntos de medición según la simetría de cada tipo de emisor. Se consideró este como método de evaluación del CEM-FEB, por analogía con los métodos de medición existentes en otros campos de emisión simétrica, como los campos acústicos. Se asume la existencia de diferencias horarias tomando en cuenta las

diferencias de generación en los horarios diurnos respecto a la que se realiza en los horarios nocturnos, por lo que se diseñaron series de mediciones en ambos horarios de manera diferenciada.

Para un ajuste de las distancias entre los puntos de medición en el terreno, se realizó el mapeo de cada área medida.

Las mediciones permitieron obtener en cada área diferentes gradientes horizontales en las diferentes direcciones y sentidos; estas se normalizaron siempre con una altura constante del transductor respecto al piso de $h = (1,3 \pm 0,1)$ m, y con el equipo de medición orientado siempre en el sentido de la máxima intensidad, suponiendo que coincidía con la dirección y sentido de las mayores fuentes potenciales de CEM.

RESULTADOS

El comportamiento espacial del campo magnético B esperado de un generador eléctrico según la Ley de Ampere⁽³⁾ (figura 1), se corresponde con el de una onda con una fuente puntual:

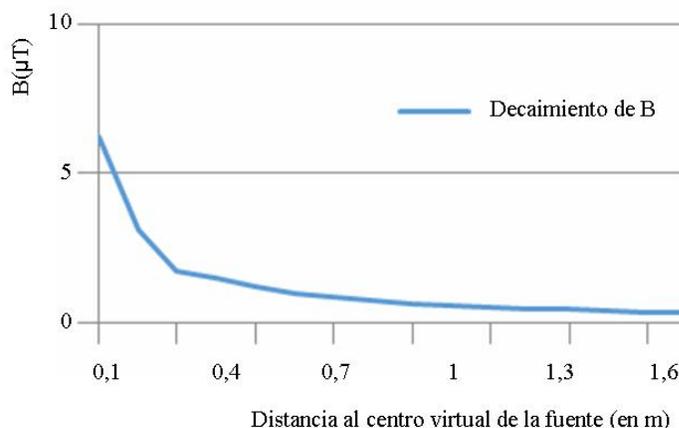
$$B(\rho) = \mu I / 2 \pi \rho$$

donde la permitividad magnética es la unitaria ($\mu = 1$) para la propagación de la onda en el aire. Si asumimos que la intensidad de la corriente (I) no varía en los generadores con igual potencia, entonces:

$$B \sim 1 / \rho$$

donde ρ es la distancia a un centro virtual de la fuente generadora.

Figura 1
Ley de Ampere



Nota: Se asumió la intensidad de corriente normalizada en 1 A

Debemos esperar que el comportamiento del campo B, cuando nos alejamos de la fuente, establezca una disminución monótona de los valores medidos que se corresponda con una curva simétrica a la de la figura 1.⁽³⁾

Las curvas de decaimiento B en diferentes direcciones partiendo de las fuentes se alejarán de la Ley de Ampere cuando no se correspondan con una transformación lineal de la función de la curva antes representada, o sea, esto debe ocurrir cuando existan fuentes secundarias y sumideros. Los aterramientos y los cables soterrados son las distorsiones propias de las fuentes puntuales de los campos magnéticos en condiciones de terreno (esto es, fuera de las idealizaciones del laboratorio).

Al comparar el comportamiento de B alrededor de una fuente generadora de 1,7 MW con la de otras similares instaladas en diferentes minicentrales, se hace evidente que existen variaciones del decaimiento del campo con la distancia que difieran de la Ley de Ampere. El mismo resultado se obtiene al comparar los resultados con las mediciones análogas realizadas en una minicentral de 2,4 MW y en una central de 300 MW.

A. Comportamiento del campo magnético B en los generadores de mediana potencia (1,7 MW y 2,4 MW)

Variación espacial de B en generadores eléctricos de 1,7 MW de la minicentral N° 1. Descripción

1. La minicentral N° 1 contiene 4 baterías de 4 generadores, y cada generador tiene una potencia de 1,7 MW.

Tabla 1
Mediciones tomadas en el generador 10 de la minicentral N° 1

| Posiciones radiales | Valores de B (µT) | | | | | | |
|---------------------|------------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Distancia a la fuente (en m) | | | | | | |
| | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 |
| A | 1,77 | 2,09 | 2,530 | 4,07 | 4,66 | 4,52 | 4,84 |
| B | 1,64 | 1,64 | 1,84 | 1,78 | 1,31 | 1,04 | 0,83 |
| C | 0,60 | 0,67 | 0,71 | 0,76 | 0,83 | 0,90 | |
| D | 0,16 | 0,16 | 0,18 | 0,21 | 0,33 | 0,44 | |
| E | 0,12 | 0,12 | 0,11 | | | | |
| F | 0,11 | 0,11 | 0,11 | | | | |
| G | 0,11 | 0,12 | 0,12 | | | | |
| H | 0,18 | 0,18 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,19 | |
| I | 4,02 | 1,93* | 1,02 | 0,52 | 0,35 | 0,33 | |
| J | 0,90 | 0,97 | 1,00 | 1,04 | 1,11 | 1,15 | |
| K | 0,65 | | | | | | |
| L | 0,37 | | | | | | |
| M | 0,42 | | | | | | |

Nota: Los valores en negritas se encuentran por encima de 0,42 µT, que es el valor máximo admisible (VMA) recomendado por el INIRC para exposiciones laborales de 40 horas por semana.

2. Las mediciones fueron realizadas en los generadores G-10 (tabla 1) y G-12 (tabla 2) mientras estaban funcionando (figura 2).
3. Los valores de la posición de medición A en el generador G-10 aumentaban a medida que el instrumento se alejaba de este (ver mediciones de las posiciones A, B y J). No pudimos identificar la verdadera causa de este comportamiento anómalo, pero suponemos que se debe a la existencia de una línea soterrada de salida y entrada de corriente a la Sala de Control. Se comprobó que la línea existe y que pasa justo debajo de la posición de la medición A.

Figura 2
Esquema de los generadores 10 y 12 de la minicentral N° 1 y posiciones de medición

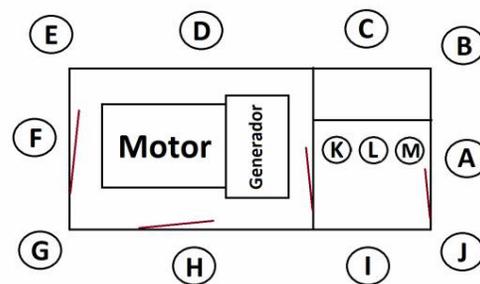


Tabla 2
Mediciones tomadas en el generador 12 de la minicentral N° 1

| Posiciones radiales | Valores de B (μT) | | | | | | |
|---------------------|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|------|
| | Distancia a la fuente (en m) | | | | | | |
| | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 |
| A | 1,46 | 1,15 | 0,90 | 0,54 | 0,33 | 0,26 | 0,24 |
| B | 0,52 | 0,45 | 0,35 | 0,29 | 0,24 | 0,28 | 0,28 |
| C | 0,35 | 0,31 | 0,25 | 0,24 | 0,22 | | |
| D | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,13 | 0,13 | | |
| E | 0,16 | 0,16 | 0,15 | 0,14 | | | |
| F | 0,14 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | | | |
| G | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,12 | | | |
| H | 0,15 | 0,15 | 0,16 | 0,16 | | | |
| I | 2,97 | 0,97 | 0,58 | 0,33 | | | |
| J | 0,74 | 0,62 | 0,54 | 0,55 | 0,54 | | |
| K | 0,85 | | | | | | |
| L | 0,54 | | | | | | |
| M | 0,55 | | | | | | |

Nota: Los valores en negritas se encuentran por encima de $0,42 \mu\text{T}$, que es el valor máximo admisible (VMA) recomendado por el INIRC para exposiciones laborales de 40 horas por semana.

Si se comparan los valores de las tablas 1 y 2 que fueron tomados en diferentes generadores, se observa una zona de exposición que depende de la tecnología y que cubre el frente y el lateral izquierdo del generador eléctrico. En cambio, se observa que las distancias y las intensidades difieren significativamente.

Mientras el generador 12 se comporta con un gradiente muy semejante al previsto por la Ley de Ampere, el generador 10 introduce evidentes anomalías que suponemos provenientes de un cable soterrado que atraviesa perpendicularmente el área. Son estos cables que atraviesan por debajo del suelo lo que impide establecer sin una medición previa de los valores de CEM, e impiden establecer un área de seguridad en un perímetro que circunde el generador. La tabla 1 muestra que el valor de máxima intensidad ($4,66 \mu\text{T}$) se encontró a la distancia de 2,5 m del generador, y es un valor 11 veces superior al VMA de $0,42 \mu\text{T}$. Una anomalía similar se puede notar en la esquina opuesta (tabla 1, posiciones I y J), aunque

los máximos solo llegan a $1,15 \mu\text{T}$ a 3,5 metros de la fuente, el gradiente está totalmente invertido, haciendo aumentar los valores con la distancia, siendo los cables soterrados los posibles generadores de estas anomalías.

Variación espacial de B en generadores eléctricos de 1,7 MW de la minicentral N° 2. Descripción

1. La minicentral N° 2 contiene 4 baterías de 4 generadores, y cada generador tiene una potencia de 1,7 MW.
2. Las mediciones fueron realizadas en los generadores G-1 (tabla 3) y G-10 (tabla 4) mientras estaban funcionando (figuras 4 y 5).
3. Las mediciones permitieron identificar directamente las fuentes generadoras de los campos magnéticos, aceptando que en ellos se cumple la Ley de Ampere⁽³⁾; entonces los valores disminuyen al alejarse de las fuentes.

Figura 3
Decaimiento del campo magnético (B) con la distancia (midiendo en la dirección A de la figura 2)

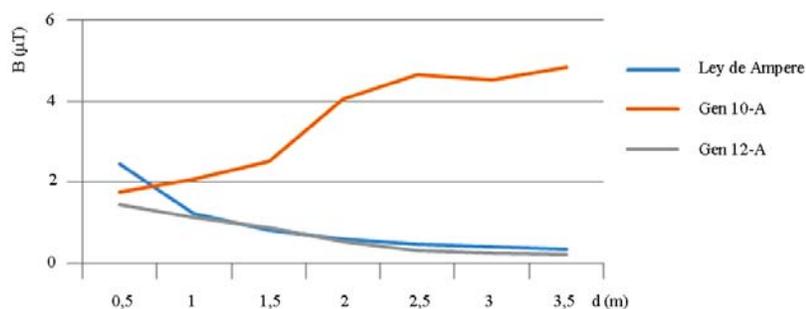


Figura 4
Esquema de los generadores 1 y 10 de la minicentral N° 2 y posiciones de medición

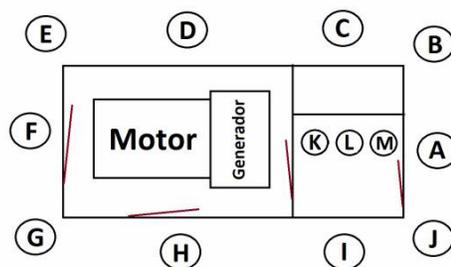


Figura 5
Generadores 1 y 10 de la minicentral N° 2



Tabla 3
Mediciones tomadas en el generador 1 de la minicentral N° 2 mientras estaba funcionando

| Posiciones radiales | Valores de B (μ T) | | | | |
|---------------------|------------------------------|-------------|-------------|------|------|
| | Distancia a la fuente (en m) | | | | |
| | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 |
| A | 0,30 | 0,24 | 0,17 | 0,17 | 0,18 |
| B | 0,45 | 0,44 | 0,35 | 0,23 | 0,23 |
| C | 0,34 | 0,36 | 0,32 | | |
| D | 0,26 | 0,25 | 0,24 | | |
| E | 0,282 | 0,23 | 0,17 | 0,13 | |
| F | 0,15 | 0,15 | 0,14 | | |
| G | 0,14 | 0,13 | 0,13 | | |
| H | 0,17 | 0,17 | 0,18 | | |
| I | 2,53 | 0,54 | 0,29 | | |
| J | 0,23 | 0,16 | 0,15 | | |
| K | 0,62 | | | | |
| L | 0,32 | | | | |
| M | 0,26 | | | | |

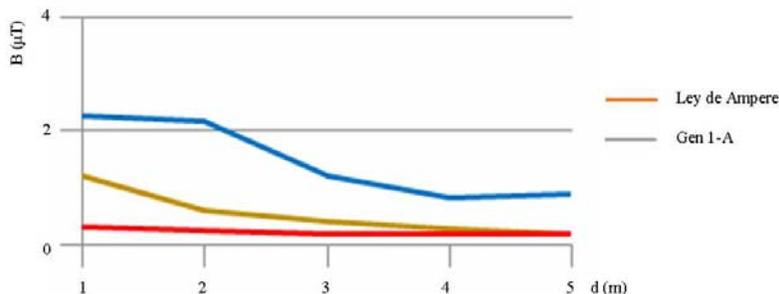
Nota: Los valores en negritas se encuentran por encima de $0,42 \mu$ T, que es el valor máximo recomendado por el INIRC para exposiciones laborales de 40 horas por semana.

Tabla 4
Mediciones tomadas en el generador 10 de la minicentral N° 2 mientras estaba funcionando

| Posiciones radiales | Valores de B (μ T) | | | | |
|---------------------|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Distancia a la fuente (en m) | | | | |
| | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 |
| A | 2,26 | 2,17 | 1,20 | 0,81 | 0,89 |
| B | 0,70 | 0,47 | 0,36 | 0,27 | 0,22 |
| C | 0,28 | 0,18 | 0,15 | | |
| D | 0,14 | 0,14 | 0,12 | | |
| E | 0,144 | 0,13 | 0,13 | | |
| F | 0,141 | 0,13 | 0,12 | | |
| G | 0,16 | 0,14 | 0,13 | | |
| H | 0,25 | 0,21 | 0,16 | | |
| I | 1,21 | 0,38 | 0,44 | | |
| J | 2,07 | 2,03 | 1,51 | 0,89 | 0,51 |
| K | - | | | | |
| L | - | | | | |
| M | - | | | | |

Nota: Los valores en negritas se encuentran por encima de $0,42 \mu$ T, que es el valor máximo recomendado por INIRC para exposiciones laborales de 40 horas por semana.

Figura 6
Decaimiento del campo magnético (B) con la distancia en los generadores N° 1 y 10 de igual potencia (midiendo en la dirección A de la figura 2)



Si se comparan los valores de las tablas 3 y 4 que fueron tomados en diferentes generadores, se observa, al igual que en la minicentral anterior (que es de la misma potencia y de una tecnología similar), que existe una zona de exposición que depende de la tecnología. Esta zona abarca el frente y el lateral izquierdo del generador eléctrico. En cambio, se observa, al igual que en la minicentral N° 1, que los valores de intensidad y las distancias donde se mueven los valores máximos tampoco coinciden entre los generadores de la misma minicentral. Mientras, en el generador N° 1 se encontraron valores por debajo de $0,42 \mu$ T desde distancias menores a un metro de la fuente; en el generador 10 este valor solo se alcanza por encima de los 5 metros de la fuente. En el generador 10 esta puntiformidad solo se alcanza a los 2 metros de la frontera del generador. Estas diferencias se pudieran deber a la puntiformidad aparente de la fuente.

En investigaciones futuras debemos encontrar una relación entre la puntiformidad virtual y el decaimiento esperado según la Ley de Ampere.

Para no tener dudas en cuanto a semejanzas y diferencias en los campos que rodean un generador de baja potencia (inferior a 10 MW), se realizó un tercer estudio en la minicentral 3.

Variación espacial de B en generadores eléctricos de 1,7 MW de la minicentral N° 3. Descripción

1. La central contiene 4 baterías de 4 generadores, y cada generador tiene una potencia de 1,7 MW.
2. Las mediciones fueron realizadas en el generador G-10 (tabla 5) mientras estaba funcionando (figura 7).
3. Se comprueba que, como en el caso anterior, las mediciones permitieron identificar directamente las

fuentes generadoras de los campos magnéticos aceptando que en ellos se cumple la Ley de Ampere⁽³⁾, pues como se observa en los valores disminuyen al

alejarse el medidor de las fuentes, y cuando existen múltiples fuentes aparecen fluctuaciones explicables como la superposición de los mismos.

Figura 7
Esquema del generador 10 de la minicentral N° 3 y posiciones de medición

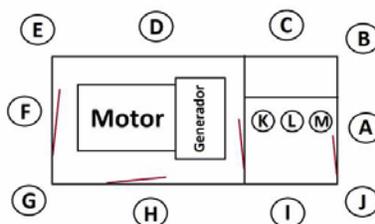


Tabla 5
Mediciones tomadas en el generador 10 de la minicentral N° 3

| Posiciones radiales | Valores de B (μT) | | | |
|---------------------|------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | Distancia a la fuente (en m) | | | |
| | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 |
| A | 4,16 | 2,41 | 0,96 | 0,54 |
| B | 1,59 | 0,82 | 1,01 | 1,04 |
| C | 1,54 | 1,68 | | |
| D | 0,4 | 0,43 | | |
| E | 0,20 | 0,17 | | |
| F | 0,15 | 0,12 | 0,11 | |
| G | 0,14 | 0,13 | 0,11 | |
| H | 0,22 | 0,18 | | |
| I | 0,79 | 0,49 | | |
| J | 1,75 | 0,75 | 0,36 | |
| K | 3,17 | | | |
| L | 2,61 | | | |
| M | 2,08 | | | |

Nota: Los valores en negritas se encuentran por encima de 0,42 μT, que es el valor máximo recomendado por el INIRC para exposiciones laborales de 40 horas por semana

Las centrales de 1,7 MW (tablas 1 a 5) crearon un área de exposición riesgosa para los trabajadores expuestos hasta 4 o 5 metros del frente del generador, y hasta una distancia similar en el costado izquierdo del mismo, superando en más de 10 veces el valor máximo admisible propuesto por INIRC hasta distancias de 2 metros del mismo, lo cual permite recomendar una zona de seguridad para estos generadores de hasta 4 metros alrededor de los mismos, siempre que no existan aterramientos o cables soterrados en el área circundante.

Variación espacial de B en generadores eléctricos de 2,4, MW de la minicentral N° 4. Descripción

1. La central contiene 4 baterías de 4 generadores y cada generador tiene una potencia de 2,4 MW.

2. Las mediciones se realizaron apuntando hacia la fuente de CEM y rodeándola en polígonos separados entre sí con intervalos de distancia $l = (0,5 \pm 0,1)$ m.
3. Las mediciones permitieron identificar a los campos magnéticos directamente con sus fuentes generadoras; estos disminuyen al alejarse de las fuentes y cuando existen múltiples fuentes estos se superponen.

En una comparación con los valores de las tablas de generadores de 1,7 MW, se observa que, al cambiar la tecnología, cambia la posición de los máximos de intensidad del campo electromagnético de los mismos respecto a los generadores de 2,4 MW (figura 4). En el generador N° 19 de 2,4 MW se observa una distribución más uniforme del campo alrededor del generador; los valores en el lateral izquierdo del generador (dirección I del

esquema) a un metro de la fuente registraron un valor de 11,25 μT (tabla 6), que es 5 veces superior al máximo registrado en similar posición de un generador de 1,7 MW, que fue de 1,93 μT (tabla 1) y que es un valor casi 27 veces superior al máximo admisible recomendado por INIRC de 0,42 μT para exposiciones de 8 horas.

La tabla 6 muestra los valores medios de seis mediciones de B tomadas en la dirección de los ejes de la figura 4. Además, se puede observar en la tabla 6 que los valores sobrepasan el máximo admisible hasta una distancia de 3 metros en toda el área del frente del mismo (direcciones A,

B y J). Esto lleva a recomendar, por precaución, que los generadores de hasta 2,4 MW requieren siempre una evaluación cuantitativa del CEM B antes de emprender medidas de control, y en particular antes de señalar el área de seguridad alrededor de los mismos.

En la tabla 6 se observa que toda el área comprendida hasta 4 metros de distancia constituye un área de exposición que los laterales hasta esa distancia son extremadamente peligrosos. Para una exposición de 11,25 μT , el tiempo máximo admisible de exposición sin protección sería de 18 minutos por jornada de 8 horas.

Figura 8
Esquema del generador 19 de la minicentral N° 4

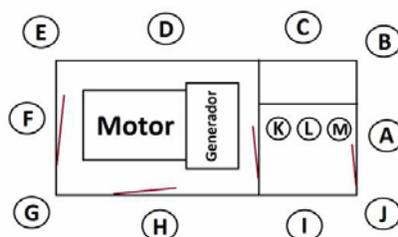


Tabla 6
Mediciones tomadas en el generador 19 de la minicentral N° 4

| Posiciones radiales | Valores de B (μT) | | | | | |
|---------------------|--------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | Distancia a la fuente (en m) | | | | | |
| | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| A | 1,842 | 0,741 | 0,835 | 0,932 | 0,914 | 0,931 |
| B | 1,833 | 0,581 | 0,375 | 0,562 | 0,738 | 0,700 |
| C | 3,370 | 1,665 | 1,665 | 2,245 | 5,880 | - |
| D | 0,246 | 0,222 | 0,235 | 0,256 | 0,278 | - |
| E | 0,160 | 0,158 | 0,165 | 0,168 | 0,177 | 0,199 |
| F | 0,146 | 0,152 | 0,167 | 0,163 | 0,174 | 0,244 |
| G | 0,156 | 0,162 | 0,177 | 0,187 | 0,270 | 0,518 |
| H | 0,217 | 0,228 | 0,220 | 0,219 | 0,222 | - |
| I | 136,15 | 11,25* | 2,408 | 1,256 | 1,618 | - |
| J | 2,167 | 0,845 | 0,770 | 0,803 | 0,621 | 0,470 |

Nota: Los valores en negritas se encuentran por encima de 0,42 μT , que es el valor máximo recomendado por el INIRC para exposiciones laborales de 40 horas por semana.

También se observa que alrededor del generador de 2,4 MW los máximos de las intensidades decaen con una velocidad más cercana a la Ley de Ampere⁽³⁾ que los generadores de 1,7 MW.

B. Comportamiento del campo magnético B en generadores de alta potencia (100 MW)

Variación espacial de B en el generador eléctrico N° 1 de 100 MW de una central termoeléctrica

1. Las mediciones fueron realizadas en el generador mientras estaba funcionando.
2. Las mediciones permitieron asociar los campos magnéticos directamente con su fuente generadora fundamental.
3. Los valores de B disminuyen al alejarse de las fuentes, comportándose cercana a como predice la Ley de Ampere.⁽³⁾

Figura 9
Generadores 1, 2 y 3 con turbinas de 100 MW en una termoeléctrica y posición de las mediciones

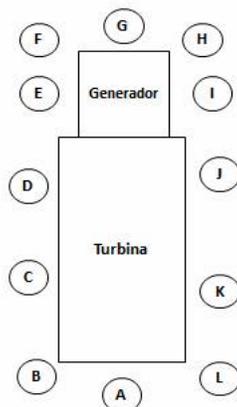


Tabla 7
Mediciones tomadas en el generador - turbina N° 1 (110 V y 100 MW)

| Posiciones | 0,5 m | 1,0 m | 2,0 m | 3,0 m | 4,0 m | 5,0 m |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------|
| A* | | | | 0,140 | | |
| B** | | 0,186 | 0,180 | | | |
| C* | | 0,546 | 0,679 | 0,641 | | 0,622 |
| D* | | 2,266 | | 2,000 | | 1,660 |
| E* | 28,010 | 20,620 | 16,660 | 7,000 | 3,750 | |
| F** | | 29,220 | 18,000 | | | |
| G* | 25,000 | 22,000 | 15,000 | 14,500 | 13,000 | |
| H** | | 27,000 | 16,000 | | | |
| I* | 23,000 | 20,000 | | | | |
| J* | 3,000 | 2,750 | | | | |
| K* | | 0,430 | 0,460 | 0,530 | | |
| L** | | 0,123 | 0,161 | | | |

Nota: Los valores en negritas se encuentran por encima de $0,42 \mu\text{T}$, que es el valor máximo recomendado por el INIRC para exposiciones laborales de 40 horas por semana.

Variación espacial de B en el generador eléctrico N° 2 de 100 MW de una central termoeléctrica

Tabla 8
Mediciones tomadas en el generador-turbina N° 2 (110 V y 100 MW)

| Posiciones | 0,5 m | 1,0 m | 2,0 m | 3,0 m | 4,0 m | 5,0 m |
|------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-------|-------|
| A* | | | | 0,163 | | |
| B** | | 0,200 | 0,200 | | | |
| C* | | 0,720 | 0,980 | 0,970 | | |
| D* | | 2,760 | 2,510 | 1,830 | | |
| E* | 34,000 | 18,570 | 14,000 | 6,500 | | |
| F** | | 36,000 | 12,500 | | | |
| G* | 18,000 | 15,000 | 11,000 | | | |
| H** | 24,000 | | 13,000 | | | |
| I* | 22,000 | 16,000 | | | | |
| J* | 1,970 | 1,900 | | | | |
| K* | | 0,350 | 0,370 | 0,420 | | |
| L** | | 0,173 | 0,170 | | | |

Nota: Los valores en negritas se encuentran por encima de $0,42 \mu\text{T}$, que es el valor máximo recomendado por el INIRC para exposiciones laborales de 40 horas por semana.

Variación espacial de B en el generador eléctrico N° 3 de 65 MW de una central termoeléctrica

Tabla 9
Mediciones tomadas en el generador-turbina 3

| Posiciones | 0,5 m | 1,0 m | 2,0 m | 3,0 m | 4,0 m | 5,0 m |
|------------|---------------|---------------|--------------|--------------|-------|-------|
| A* | | | 0,118 | | | |
| B** | | 0,126 | 0,126 | | | |
| C* | | 0,320 | 0,430 | 0,503 | | |
| D* | | 1,260 | 1,260 | 1,860 | | |
| E* | 11,580 | | | | | |
| F** | | 6,600 | 5,800 | | | |
| G* | 7,760 | 6,800 | 5,500 | | | |
| H** | | 11,500 | 7,600 | | | |
| I* | 12,220 | 9,500 | | | | |
| J* | 1,100 | 1,000 | | | | |
| K* | | 0,210 | 0,230 | 0,270 | | |
| L** | | 0,120 | 0,128 | | | |
| | | | | | | |

Nota: Los valores en negrita se encuentran por encima de $0,42 \mu\text{T}$, que es el valor máximo recomendado por el INIRC para exposiciones laborales de 40 horas por semana.

Los generadores y las turbinas constituyen áreas de trabajo en las cuales permanecen trabajadores encargados de hacer recorridos sistemáticamente alrededor de ellos.

En todos los generadores de electricidad evaluados se observó que existe un área alrededor de los mismos donde se crea un campo electromagnético con valores muy superiores al valor de $0,42 \mu\text{T}$ (valor recomendado como valor máximo de referencia por el Comité Internacional para las Radiaciones No Ionizantes (INIRC)).

Se observa que el área frente al generador y las áreas situadas en sus costados son áreas de alto riesgo de exposición, porque los valores medidos hasta tres metros del equipo alcanzan en los equipos de mediana potencia (1,7 y 2,4 MW) hasta cinco veces el valor recomendado. No obstante, la peligrosidad magnética en los generadores-turbinas de alta potencia (100 MW) es de golpe eléctrico o descarga, y constituye un riesgo de accidente debido a que los niveles medidos fueron 10 000 veces superiores al valor de exposición recomendado por el INIRC.

Las comparaciones entre las tablas permiten sacar conclusiones que no eran fáciles de inferir de los modelos teóricos, como por ejemplo, el punto I de la tabla 1 en un generador de 2,4 MW cae el valor de B: **4,017; 1,928; 1,023; 0,521**; 0,345 y 0,328, desde $4 \mu\text{T}$ a $0,33 \mu\text{T}$ en 2,5 m de distancia, diez veces en una distancia de 0,5 a 3,0 m de la fuente; si comparamos esta amortiguación del campo con la de la tabla 8 en la posición E, cuando el generador era de 100 MW, o sea, 50 veces mayor al anterior, el valor de B cae: **34,000; 18,570; 14,000 y 6,500**, desde $34\ 000 \mu\text{T}$ a $6\ 500 \mu\text{T}$ en los mismos 2,5 m de distancia, solo cinco veces para la misma distancia

y posición que en el otro generador. Una explicación probable a la variabilidad de los gradientes magnéticos que se forman alrededor de los generadores eléctricos podría estar en la fuerte dependencia que manifiesta la Ley de Ampere –Maxwell de la configuración geométrica de la fuente ⁽²⁾ y la poca importancia que han recibido los campos magnéticos como fuente de riesgo a la salud de las personas expuestas, explica la variabilidad en puestos de trabajos semejantes, donde los fabricantes pudieran haberse preocupado porque los ambientes magnéticos fueran al menos cuantitativamente semejantes.

Obsérvese en la tabla 7, en la columna G, que la extensión de los campos con la distancia puede ser significativa: **25,000; 22,000; 15,000; 14,500 y 13,000**. En este caso, el gradiente es muy débil y a una distancia de 5 m de la fuente todavía se pueden medir $13\ 000 \mu\text{T}$, valor que supera 16 000 veces el valor recomendado como máximo admisibles por la INIRC.

Se encontraron otros puntos en el entorno de los generadores donde se superan los valores de referencia, pero se supuso que estos puntos magnéticamente ‘calientes’ aparecen por la influencia de sistemas de cableado soterrado de alta tensión que generan un campo magnético y que no son debidamente blindados.

En síntesis apretada, podemos decir lo siguiente:

1. La configuración espacial de los campos magnéticos no depende directamente alrededor de los generadores de la distancia a la fuente y no conserva la distribución elíptica de los campos de fuerzas centrales.

2. Se obtuvieron series de medición donde el decaimiento del vector B con la distancia no se ajustaba a la predicción teórica de la ley de Ampere-Maxwell.
3. La amplificación de los campos por las características estructurales del montaje de los generadores en zonas relativamente alejadas de la fuente, implica que el estudio de sus intensidades mediante un mapeo del vector B en las áreas de trabajo debe ser sistemático y obligatorio.
4. Se debe extremar el trabajo educativo con los trabajadores expuestos en este tipo de instalaciones industriales, a fin de evitar las exposiciones innecesarias y crear en ellos la percepción del riesgo, percepción que en este momento no existe.

Finalmente, se recomienda lo que exponemos a continuación:

1. A las autoridades de salud y seguridad, que se tomen medidas para crear una zona de protección alrededor de los generadores eléctricos de fuel oil que prohíba a todo personal no autorizado permanecer en la zona de riesgo magnético del generador.
2. Tomar medidas organizativas para que los operadores y mecánicos no permanezcan expuestos en las zonas magnéticamente peligrosas de manera prolongada o innecesariamente durante la jornada normal de trabajo.
3. Continuar las investigaciones de los campos magnéticos estacionarios alrededor de las fuentes de alta potencia, con vista a elaborar una norma técnica na-

- cional que regule la labor de protección de los trabajadores expuestos a estos campos de alto riesgo.
4. Soterrar las líneas que van del generador eléctrico a las salas de control y de estas a las estaciones de transformación, y mejorar el blindaje de los soterrados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Revueltas M, Ávila I, Baqués R, Beltrán C. Los campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja y su impacto sobre la salud de los seres humanos. La Habana, Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología; 2015.
2. International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection e.V. Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (hasta 300 GHz). 1994 [Internet]. Disponible en: http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRP_emfgdlesp.pdf.
3. Fitzpatrick R. Ley de Ampère. 2007 [Internet]. Disponible en: <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/316/lectures/node75.html>.
4. Griffiths DJ. Introduction to Electrodynamics, 3rd ed. Prentice Hall; 1998. ISBN 0-13-805326-X.
5. Tipler P. Physics for scientists and engineers: Electricity, Magnetism, Light, and Elementary Modern Physics, 5th ed. W. H. Freeman; 2004. ISBN 0-7167-0810-8.
6. Tipler P. Física para la ciencia y la tecnología, 5^a ed. Editorial Reverte; 2005.

Recibido: 23 de septiembre de 2019

Aprobado: 5 de abril de 2020

CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

COPYRIGHT © 2020: Raúl Baqués Merino, Ibis Ávila Roque y Meylín Panol Quintana

LICENCIA CREATIVE COMMONS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | Este artículo de la Revista Cubana de Salud y Trabajo está bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) . Esta licencia permite el uso, distribución y reproducción del artículo en cualquier medio o formato, siempre y cuando se otorgue el crédito correspondiente al autor del artículo y al medio en que se publica, en este caso Revista Cubana de Salud y Trabajo . |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|