

UNIVERSIDAD CENTRAL

VICERRECTORÍA ACADÉMICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

**EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A CAMPOS
ELECTROMAGNÉTICOS DE LOS TÉCNICOS QUE
LABORAN CON LÍNEAS ENERGIZADAS UTILIZANDO
LA TÉCNICA DEL CONTACTO CON LA MANO
ENGUANTADA: MEDICIÓN, ANÁLISIS DE RIESGOS Y
RECOMENDACIONES PARA SU SEGURIDAD, SEGÚN LO
ESTABLECIDO EN LAS NORMAS INTERNACIONALES
DE PROTECCIÓN VIGENTES**

**MODALIDAD DE TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

ALUMNO: ROBERTO MONTERO VÍQUEZ

TUTOR: WILFREDO PRADO CUBILLO

SEDE CENTRAL

MAYO, 2025

Contenido

Tablas	9
Figuras.....	10
Dedicatoria.....	11
Agradecimiento.....	12
Epígrafe.....	13
Resumen.....	14
Capítulo I	16
1.1 Planteamiento del problema	16
1.1.1 Pregunta de investigación	17
1.2 Objetivos.....	18
1.2.1 Objetivo general:.....	18
1.2.2 Objetivos específicos:	18
1.3 Justificación	19
1.4 Antecedentes.....	22
1.4.1 Internacionales	22
1.4.1.1 Título: La preocupación por la exposición a campos electromagnéticos (CEM).	22
1.4.1.2 Título: Estudios en países desarrollados han mostrado que la exposición a CEM en el sector eléctrico puede estar relacionada con una variedad de efectos adversos para la salud.	22
1.4.1.3 Título: La administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) ha emitido directrices que abordan la exposición a campos electromagnéticos.....	23
1.4.1.4 Título: En la Unión Europea la directiva 2013/35/EU establece requisitos mínimos de salud y seguridad relacionados con la exposición a campos electromagnéticos.	23
1.4.1.5 Título: La Organización Mundial de la Salud (OMS) reconoce la necesidad de más investigación en el área de los campos electromagnéticos.....	24
1.4.2 Nacionales	24
1.4.2.1 Título: La salud ante los campos electromagnéticos	24
1.4.2.2 Título: La preocupación por la exposición a campos electromagnéticos (CEM) en el entorno laboral.....	24
1.4.2.3 Título: El análisis de los límites de exposición a campos electromagnéticos	25
1.4.2.5 Título: La importancia de abordar la exposición a CEM en el trabajo.....	26
1.5 Proyecciones	27
1.5.1 Alcances	28

Capítulo II: Marco teórico	29
2.1 Servicio Eléctrico Nacional	29
Figura 1. Zonas de concesión por operador eléctrico. Fuente: Intendencia de Energía 2019-10 .	29
2.1.1 Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL).....	30
2.1.2.1 Líneas de distribución eléctrica de media tensión (MT)	31
2.1.2.2 Estructura y componentes de las redes aéreas de media tensión.....	31
2.1.2.3 Ventajas y desafíos de las redes aéreas de MT	32
2.1.2.4 Mantenimiento y seguridad en redes aéreas de MT	33
2.1.2.5 Exposición a campos electromagnéticos en redes aéreas de MT	33
2.1.3 Ubicación geográfica de las mediciones	34
2.1.4 Técnicos de líneas energizadas utilizando la técnica a contacto con mano enguantada	35
2.1.4.1 Preparación previa y protocolo de seguridad	35
2.1.4.2 Evaluación de la zona de trabajo	36
2.1.4.3 Proceso de trabajo directo.....	36
2.1.4.4 Mantenimiento preventivo y reparaciones	36
2.1.4.5 Medidas de mitigación de riesgos	37
2.1.4.6 Importancia y beneficios de la técnica	38
2.1.5 Uniforme y equipo de protección personal.....	38
2.1.6 Cubrimiento utilizado en redes de media tensión.....	40
2.1.6.1 Mantas aislantes.....	40
2.1.6.2 Faldones aislantes	40
2.1.6.3 Cobertores flexibles para conductores (venas).....	40
2.1.6.4 Protecciones rígidas (cubiertas de plástico o aisladores).....	41
2.1.6.5 Barreras de protección y cortinas aislantes.....	41
2.1.6.6 Protectores para herrajes y accesorios	41
2.1.7 Consideraciones de seguridad	41
2.1.8 Equipo de trabajo hidráulico.....	42
2.1.8.1 Definición y propósito	42
2.1.8.2 Características principales	42
2.1.8.2 Tipos de grúas aislantes	43
2.1.8.3 Ventajas de uso	43
2.1.8.4 Normativas y mantenimiento.....	43

2.2 Campo eléctrico.....	44
2.2.1 Definición e importancia del campo eléctrico.....	44
2.2.1.1 Fórmulas del campo eléctrico.....	44
2.2.1.2 Importancia en redes eléctricas.....	45
2.2.1.3 Desventajas y efectos en la salud	45
2.2.2 Campo magnético.....	47
2.2.2.1 Definición del campo magnético.....	47
2.2.2.2 Fórmulas del campo magnético.....	47
2.2.2.3 Importancia del campo magnético en redes eléctricas	48
2.2.2.7 Desventajas y efectos en la salud de los técnicos.....	49
2.2.3 Magnitudes de campos eléctricos y magnéticos.....	51
2.2.3.3 Efectos en la salud de los técnicos en redes eléctricas	52
2.2.4 Espectro electromagnético.....	54
2.2.4.1 Conceptos básicos del espectro electromagnético.....	54
2.2.4.2 Características y fórmulas clave.....	54
2.2.4.3 Importancia del espectro electromagnético	56
Figura 3. Espectro electromagnético.....	57
2.3.1 Radiaciones ionizantes	58
2.3.1.1 ¿Qué son las radiaciones ionizantes?.....	58
2.3.1.3 Fórmulas clave asociadas con las radiaciones ionizantes.....	59
2.3.1.4 Importancia de las radiaciones ionizantes	60
2.3.1.5 Desventajas y riesgos para la salud	61
2.3.1.6 Medidas de seguridad y protección	61
2.3.2 Radiaciones no ionizantes	62
2.3.2.2 Fórmulas clave y características físicas.....	63
2.3.2.3 Importancia de las radiaciones no ionizantes	64
2.3.2.4 Desventajas y riesgos para la salud	65
2.3.2.5 Normativas y medidas de seguridad.....	65
2.3.3 Interacción de campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia con el cuerpo humano	66
2.3.3.1 Conceptos de campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia.....	66
2.3.3.2 Fórmulas relacionadas	67
2.3.3.3 Importancia y aplicaciones	67

2.3.3.4 Interacciones con el cuerpo humano	68
2.3.3.5 Medidas de protección y prevención	69
2.3.4 Dosimetría del campo magnético	70
2.3.4.1 ¿Qué es la dosimetría del campo magnético?.....	70
2.3.4.2 Fórmulas y principios fundamentales.....	70
2.3.4.3 Importancia de la dosimetría del campo magnético	71
2.3.4.4 Desventajas y Potenciales Efectos en la Salud.....	72
2.3.4.5 Métodos de medición y evaluación	72
2.3.5 Métodos de cálculo de campos magnéticos.....	73
2.3.5.1 Fundamentos de los campos magnéticos.....	73
2.3.5.2 Métodos de cálculo de campos magnéticos.....	74
2.3.5.3 Importancia de calcular campos magnéticos	76
2.3.5.4 Desafíos y desventajas en el cálculo.....	77
2.4 Norma ICNIRP.....	77
Historia de la norma ICNIRP	78
Desarrollo de las directrices ICNIRP	78
Revisiones y actualizaciones	79
Importancia de las directrices ICNIRP	79
1. Ámbito de acción y cobertura.....	80
2. Funciones y directrices de la ICNIRP	81
3. Importancia del campo de acción de la ICNIRP	81
1. Magnitudes utilizadas en las directrices de ICNIRP	82
2. Unidades de medición y límites de exposición	83
3. Importancia de las magnitudes y unidades en la seguridad.....	83
1. Mecanismos de acoplamiento de campos eléctricos	84
2. Mecanismos de acoplamiento de campos magnéticos	85
3. Efectos térmicos y no térmicos.....	86
4. Directrices y límites de exposición de ICNIRP	86
1. Fundamentos biológicos de la exposición a campos electromagnéticos de baja frecuencia	87
2. Mecanismos de interacción y efectos biológicos	88
3. Límites de exposición propuestos por la ICNIRP	89
2.5 Norma OMS	90

1. Contexto y necesidad de normas internacionales sobre campos electromagnéticos	91
2. Normas y recomendaciones internacionales.....	91
3. Impacto de las normas de la OMS en el contexto global	92
4. Desafíos y consideraciones para el futuro	93
2.6 Norma IEEE.....	93
Historia	94
Desarrollo y expansión de normas IEEE.....	95
Importancia de las normas IEEE en la sociedad moderna.....	96
Relevancia global y futuro del IEEE	97
Introducción a los campos electromagnéticos en redes eléctricas de MT.....	97
Importancia de las normas IEEE para la exposición a campos electromagnéticos	98
Fundamentos técnicos y fórmulas relacionadas con los CEM	99
Impacto en la salud de técnicos de redes eléctricas.....	100
Medidas de protección y cumplimiento de normas	100
Rangos de exposición de los CEM.....	101
Principales límites de exposición para trabajadores ocupacionales	101
Impacto de la Exposición a campos electromagnéticos en la salud	102
Medidas de protección y cumplimiento	102
Importancia de las normas IEEE en la industria eléctrica	103
Introducción a los CEM en redes de media tensión en Costa Rica	104
Normas IEEE Aplicadas a la exposición ocupacional en Costa Rica.....	104
Relevancia de los CEM en el trabajo de técnicos en redes de MT.....	105
Impacto de la exposición en la salud y medidas de seguridad	105
Implementación y cumplimiento de las normas IEEE en Costa Rica	106
Normativas y prácticas internacionales aplicadas a Costa Rica	106
Proponer recomendaciones de seguridad y medidas preventivas para minimizar los riesgos en la salud derivados de la exposición a campos electromagnéticos de los técnicos, en cumplimiento de las normas.....	107
1. Monitoreo y evaluación periódica de la exposición	107
2. Capacitación y educación continua	108
3. Uso de equipos de protección personal (EPP).....	108
4. Diseño y planeación de la jornada laboral.....	108
5. Distancia segura y medidas de aislamiento	109

6. Uso de tecnología de monitoreo personal.....	109
Importancia de las medidas preventivas.....	109
Campos electromagnéticos generados por las líneas eléctricas de alta tensión. Posibles efectos en la salud.	110
Campos electromagnéticos y su interacción con la materia	110
1. Naturaleza de los campos electromagnéticos generados por líneas de MT	110
2. Mecanismos de interacción con la materia.....	111
3. Importancia de la interacción de los campos electromagnéticos con la materia	112
4. Normas y medidas de seguridad.....	112
Estudios sobre salud.	113
1. Riesgos y efectos potenciales de la exposición a CEM.....	113
2. Normas y directrices de exposición.....	115
3. Conclusiones de los estudios y recomendaciones	115
Estudios epidemiológicos	115
1. Estudios sobre Leucemia Infantil	116
2. Cáncer en adultos.....	116
3. Trastornos neurológicos.....	116
4. Limitaciones de los estudios epidemiológicos	117
Efectos en la salud. Estudios experimentales	117
1. Respuesta biológica a la exposición a campos electromagnéticos	117
2. Impacto en la salud humana: Estudios experimentales en humanos	118
3. Limitaciones y consideraciones.....	119
Capítulo III: Marco metodológico	119
3.1 Enfoque de la investigación	119
3.4 Variables o unidades de análisis	120
3.5 Instrumentos de recolección de datos.....	122
3.6 Proceso para la recolección y el análisis de datos	123
Capítulo IV: Análisis de resultados.....	128
Datos proporcionados	129
Tabla 1. Datos proporcionados para cálculos. Fuente propia	129
Cálculo del campo magnético promedio para cada circuito.....	129
Cálculo del máximo y mínimo de campo magnético por circuito.....	130
Tabla 2. Resumen de los circuitos analizados. Fuente propia.....	130

Cálculo de la diferencia máxima entre fases	130
Figura 4. Análisis de los circuitos. Fuente propia.....	131
Análisis de los resultados	131
4.2 Aplicación de encuesta.....	133
Figura 5. Gráfico 1. Fuente propia.....	133
Figura 6. Gráfico 2. Fuente propia.....	134
Figura 7. Gráfico 3. Fuente propia.....	135
Figura 8. Gráfico 4. Fuente propia.....	135
Figura 9. Gráfico 5. Fuente propia.....	136
Figura 10. Gráfico 6. Fuente propia.....	137
Figura 11. Gráfico 7. Fuente propia.....	138
Figura 12. Gráfico 8. Fuente propia.....	139
Figura 13. Gráfico 9. Fuente ropia.....	140
Figura 14. Gráfico 10. Fuente propia.....	141
Figura 15. Gráfico 11. Fuente propia.....	142
CAPÍTULO V: Conclusiones y recomendaciones	144
5.1 Conclusiones.....	144
Limitaciones.....	145
5.2 Recomendaciones	146

Tablas

Tabla 1. Datos proporcionados para calculos. Fuente propia	129
Tabla 2. Resumen de los circuitos analizados. Fuente propia.....	130

Figuras

Figura 1. Zonas de concesión por operador eléctrico. Fuente: Intendencia de Energia 2019-10.	29
Figura 2. Subestación Sabanilla propiedad del ICE.....	35
Figura 3. Espectro electromagnético.....	57
Figura 4. Analisis de los circuitos. Fuente propia.....	131
Figura 5. Gráfico 1. Fuente propia.....	133
Figura 6. Gráfico 2. Fuente propia.....	134
Figura 7. Gráfico 3. Fuente propia.....	135
Figura 8. Gráfico 4. Fuente propia.....	135
Figura 9. Gráfico 5. Fuente propia.....	136
Figura 10. Gráfico 6. Fuente propia.....	137
Figura 11. Gráfico 7. Fuente propia.....	138
Figura 12. Gráfico 8. Fuente propia.....	139
Figura 13. Gráfico 9. Fuente propia.....	140
Figura 14. Gráfico 10. Fuente propia.....	141
Figura 15. Gráfico 11. Fuente propia.....	142

Dedicatoria

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy. Todo lo que he logrado ha sido gracias a ustedes. Me inculcaron valores que me han llevado a ser un profesional éticamente íntegro.

A mi esposa Andrea, a mis hijas (Ari y Lu) y mis hermanas, que han estado apoyándome moralmente y me motivaron constantemente en este camino de carrera profesional.

A mis compañeros de trabajo en averías, a la cuadrilla de líneas energizadas de mantenimiento, a los jefes y, sobre todo, a Hernán Herrera, quien creyó en mí y fue el que me motivó a iniciar este camino de estudios universitarios.

Agradecimiento

Gracias a Dios porque con su gran amor por la humanidad, dio la vida de su hijo por todos nosotros.

Gracias a las personas que estuvieron apoyándome constantemente.

Gracias a la Universidad Central, al profesor tutor Omar Saborío por apoyarme en este camino y a otros profes porque con su dedicación, conocimiento y esfuerzo marcaron un inicio y un final de mi carrera universitaria.

Epígrafe

"Al final todas las cosas se funden en una sola, y un río discurre a través de ella. El río fue excavado por el gran diluvio universal y fluye sobre rocas de los cimientos del tiempo. Sobre algunas de esas rocas hay gotas de lluvia eternas. Debajo de ellas están las palabras, y algunas de esas palabras son tuyas."

Norman Maclean (libro: El río de la vida).

Resumen

El trabajo en líneas eléctricas energizadas es fundamental para garantizar la continuidad del suministro eléctrico, pero también representa una de las actividades más riesgosas dentro del sector eléctrico. Los técnicos que realizan estas labores están expuestos a diversos riesgos físicos y ambientales, y uno de los más relevantes es la exposición a campos electromagnéticos generados por líneas de media tensión. En este contexto, la investigación se enfoca en analizar el impacto de dicha exposición de la salud de los trabajadores que emplean la técnica de contacto directo con mano enguantada, un método comúnmente utilizado para manipular equipos y componentes sin interrumpir el servicio eléctrico.

A pesar de la existencia de normativas internacionales, como las establecidas por la Comisión Internacional sobre Protección contra Radiación No Ionizante (ICNIRP) y el IEEE, la información específica sobre la exposición en este tipo de trabajos es limitada. Por medio de encuestas aplicadas a técnicos de líneas energizadas se determinó que un porcentaje significativo de los trabajadores experimentan síntomas asociados con la exposición prolongada a campos electromagnéticos, tales como fatiga, dolores de cabeza, trastornos del sueño y alteraciones neurológicas. Además, la investigación revela una brecha en la percepción del riesgo, ya que muchos trabajadores no consideran la exposición como una amenaza grave para su salud, a pesar de los posibles efectos adversos documentados en la literatura científica.

Otro hallazgo relevante es la falta de capacitación específica sobre los riesgos asociados con la exposición a campos electromagnéticos. Un alto porcentaje de los trabajadores encuestados no ha recibido formación detallada en este aspecto, lo que pone en evidencia la necesidad de mejorar la educación en seguridad ocupacional dentro del sector. Asimismo, se detectó una insuficiencia en las medidas de seguridad y en la estandarización del uso del equipo de protección personal, lo que podría incrementar la vulnerabilidad de los técnicos ante posibles efectos perjudiciales en su salud.

Los resultados de esta investigación subrayan la importancia de fortalecer la formación de los técnicos, actualizar y reforzar las medidas de seguridad, y por establecer protocolos más rigurosos que permitan reducir la exposición a los campos electromagnéticos en el trabajo con líneas energizadas. La implementación de controles adicionales, en consonancia con las normativas

internacionales, contribuirá a minimizar los riesgos y a garantizar condiciones laborales más seguras para los técnicos del sector eléctrico.

Palabras clave: Líneas eléctricas energizadas, campos electromagnéticos, contacto directo, mano enguantada, seguridad eléctrica, normativa internacional, exposición laboral, riesgos ocupacionales, salud laboral, protección personal.

Capítulo I

1.1 Planteamiento del problema

El trabajo en líneas eléctricas energizadas es una actividad fundamental para garantizar la continuidad del suministro eléctrico, pero también es una de las más riesgosas dentro del sector eléctrico. Los técnicos que se encargan de realizar estas tareas están expuestos a una serie de riesgos físicos y ambientales, y uno de los más preocupantes es la exposición a campos electromagnéticos generados por las líneas de media tensión. Para realizar estos trabajos, una técnica que se utiliza con frecuencia es del contacto directo con mano enguantada, en que el técnico manipula equipos y componentes en líneas energizadas, confiando en la protección que ofrecen los guantes y otros equipos que utiliza.

Si bien esta técnica permite que las labores se realicen sin interrumpir el servicio eléctrico, también plantea la posibilidad de una mayor exposición a los campos electromagnéticos que emanan de las líneas de media tensión. En este contexto, la pregunta que surge es: ¿Qué tanto afecta dicha exposición de la salud de los técnicos que utilizan la técnica de contacto con mano enguantada? Aunque existen normas internacionales de seguridad, como las establecidas por la Comisión Internacional sobre Protección contra radiación no ionizante (ICNIRP) o las recomendaciones del IEEE, todavía hay poca claridad sobre la exposición específica en este tipo de trabajos, y la magnitud del riesgo que enfrentan estos profesionales.

Actualmente, no hay suficiente información que aborde con detalle cómo esta exposición puede impactar en el largo plazo la salud de los técnicos. Si bien se sabe que una exposición prolongada a campos electromagnéticos puede tener efectos adversos, tales como fatiga, dolores de cabeza o incluso efectos más serios en el sistema nervioso y cardiovascular, faltan estudios enfocados en las condiciones particulares de trabajo que implican el contacto directo con líneas energizadas. El uso de guantes y de otros equipos de protección añade una capa de complejidad, pues es necesario estudiar si estos realmente protegen lo suficiente o si la exposición sigue siendo significativa a pesar de las medidas de seguridad.

Por otro lado, las normas internacionales señalan límites y formulan recomendaciones generales para la exposición a campos electromagnéticos, pero estas suelen basarse en estudios y condiciones que no siempre coinciden con las situaciones reales del trabajo que enfrentan los técnicos de líneas energizadas. Esto genera una brecha importante entre lo que las normativas

sugieren y lo que realmente experimentan los técnicos en el campo, y esto abre la puerta a posibles riesgos no controlados.

La falta de estudios específicos sobre este tema pone en evidencia la necesidad de una investigación que mida de forma precisa los niveles de exposición a campos electromagnéticos por parte de técnicos que utilizan la técnica del contacto con mano enguantada, y que, además, permita analizar los riesgos verdaderos en su salud. Es crucial también que este estudio considere los diferentes factores que influyen en esa exposición, como la duración de los turnos de trabajo, las características del equipo de protección y las condiciones ambientales en las que se realizan estas tareas.

De ese modo, la investigación que se plantea busca llenar ese vacío de conocimiento, y proporciona datos concretos sobre la exposición y los riesgos implícitos. Además, se ofrecerán recomendaciones claras y ajustadas a la realidad de estos técnicos, basadas en las normas internacionales de seguridad eléctrica, pero con un enfoque más práctico y específico para las tareas en cuestión. En última instancia, este estudio tiene el potencial de contribuir a mejorar las condiciones de trabajo de estos profesionales, y de proteger la salud de estos técnicos.

1.1.1 Pregunta de investigación

¿Cómo afecta la exposición a los campos electromagnéticos de las líneas de media tensión la salud de los técnicos que trabajan con la técnica de contacto directo con mano enguantada, y hasta qué punto las normas internacionales realmente los protegen en estas situaciones específicas de trabajo?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la exposición a campos electromagnéticos a los técnicos de líneas energizadas que emplean la técnica del contacto con mano enguantada, mediante la medición, análisis de riesgos, y formulación de recomendaciones para la protección de la salud humana, conforme a las normas.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Medir los niveles de exposición a los campos electromagnéticos en diferentes condiciones y entornos de trabajo de la CNFL (Compañía Nacional de Fuerza y Luz), especialmente en los circuitos en donde se utiliza la técnica de contacto con mano enguantada.
2. Comparar los niveles medidos con los límites establecidos por organismos internacionales como la ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) o la OSHA (Occupational Safety and Health Administration), para determinar si los técnicos están expuestos a niveles altos que podrían ser nocivos.
3. Proponer recomendaciones de seguridad y de medidas preventivas para minimizar los riesgos al deterioro de la salud derivados de la exposición a campos electromagnéticos a los técnicos en cumplimiento de las normas de protección.

1.3 Justificación del proyecto

El crecimiento constante de la demanda energética y la complejidad de los sistemas de distribución eléctrica han convertido el trabajo en líneas energizadas en una actividad fundamental para garantizar la continuidad del suministro eléctrico, para evitar interrupciones que podrían afectar a millones de personas y a sectores estratégicos como hospitales, industrias y centros de comunicación. Para llevar a cabo estas tareas sin comprometer el flujo de electricidad se ha desarrollado una técnica conocida como "contacto con mano enguantada", que les permite a los técnicos intervenir directamente en las líneas energizadas mediante el uso de guantes especiales y de otros equipos de protección. Esta técnica se ha popularizado por su eficacia en la ejecución de trabajos eléctricos en condiciones de media tensión, sin necesidad de desenergizar los circuitos eléctricos.

Sin embargo, la exposición prolongada a campos electromagnéticos (CEM) generada por las líneas energizadas es una preocupación creciente, tanto para los técnicos que realizan estas tareas como para los responsables de garantizar su seguridad y salud. Aunque los efectos en el corto plazo de la exposición a CEM son relativamente conocidos, como fatiga y mareos, y existen indicios de que una exposición prolongada y continua puede tener consecuencias más graves en la salud humana, que van desde alteraciones en el sistema nervioso hasta un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer. La Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) han clasificado la radiación electromagnética como posiblemente cancerígena, lo que refuerza la necesidad de tener mejores controles

A pesar de la existencia de normas internacionales, como las propuestas por la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP) y las guías del IEEE, diseñadas para proteger a los trabajadores de los efectos nocivos de los CEM, hay una notable carencia de estudios específicos que analicen la exposición a estos campos en las condiciones particulares que enfrentan los técnicos de líneas energizadas al utilizar la técnica a contacto con mano enguantada. La falta de datos concretos y contextualizados sobre este tipo de trabajos genera un vacío de conocimiento que dificulta la implementación de medidas de prevención más precisas y efectivas.

Este estudio se justifica por la necesidad de realizar una medición detallada de los niveles de exposición a campos electromagnéticos en el contexto de la técnica del contacto con mano enguantada. Los estudios existentes suelen generalizar los riesgos basados en trabajos eléctricos convencionales, pero no profundizan en los casos en los cuales el contacto directo con la fuente de emisión de los CEM es constante y cercano, como ocurre con los técnicos que utilizan esta técnica. Mediante la medición de la exposición a condiciones reales de trabajo. En esta investigación se proporcionan datos que puedan ser utilizados para ajustar o incluso reformular las normas de seguridad actuales, en función de los riesgos específicos que enfrentan estos trabajadores.

Además, desde una perspectiva práctica, este estudio es importante para la formulación de recomendaciones de seguridad más acertadas y aplicables, que puedan ser implementadas por las empresas del sector eléctrico. En la actualidad, las normativas internacionales y locales pueden ser insuficientes o ambiguas al aplicarlas en los trabajos como el que implica la técnica del contacto con mano enguantada, lo que deja a los técnicos vulnerables a riesgos que no están completamente controlados o entendidos. Las recomendaciones derivadas de este estudio podrían contribuir a minimizar esos riesgos, y le proporcionarían a los trabajadores mejores herramientas para proteger su salud y reducir la incidencia de enfermedades relacionadas con la exposición a CEM.

Desde un enfoque social, este estudio también tiene implicaciones importantes, ya que un número considerable de técnicos y trabajadores del sector eléctrico podrían verse beneficiados por las conclusiones y recomendaciones derivadas de esta investigación. Al mejorar las condiciones de seguridad laboral no solo se protege a los individuos directamente expuestos, sino que también se favorecen la estabilidad y eficiencia de un sector tan importante como el eléctrico. Los resultados podrían, incluso, extenderse a otras áreas en donde los CEM generan preocupación, y eso contribuiría al desarrollo de políticas de salud ocupacional más robustas y basadas en evidencia científica actual.

Este estudio no solo tiene un valor científico al abordar un vacío en la literatura actual sobre la exposición a campos electromagnéticos en un entorno específico de trabajo, sino que también tiene un alto impacto práctico y social. La información obtenida a partir de este análisis será fundamental para mejorar las medidas de seguridad y protección para los técnicos de líneas energizadas, y podría generar cambios significativos en las normativas de seguridad ocupacional en el sector eléctrico. Asimismo, contribuirá a un mayor entendimiento de los riesgos relativos a

la exposición a CEM, y eso permitiría tomar decisiones informadas en beneficio de la salud y el bienestar de los trabajadores.

1.4 Antecedentes

1.4.1 Internacionales

1.4.1.1 Título: La preocupación por la exposición a campos electromagnéticos (CEM).

Autor: Comisión Internacional sobre Protección contra Radiación no Ionizante (ICNIRP). (2010). Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). (“ICNIRP GUIDELINES - International Commission on Non-Ionizing Radiation ...”).

El objetivo de esta guía indica la preocupación por la exposición a campos electromagnéticos (CEM) y ha llevado a diversas organizaciones a establecer normativas y directrices para proteger la salud de los trabajadores.

La Comisión Internacional sobre Protección contra Radiación no Ionizante (ICNIRP) ha sido un referente en la elaboración de límites de exposición basados en la evidencia científica disponible. En sus pautas de 2010, la ICNIRP establece límites específicos para la exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos, de lo que surge que estos deben ser revisados regularmente a medida que surgen nuevos datos científicos (ICNIRP, 2010). Sin embargo, estas directrices no siempre reflejan las condiciones específicas de trabajo en el sector eléctrico, lo que crea la necesidad de estudios adicionales que evalúen la exposición en situaciones reales.

1.4.1.2 Título: Estudios en países desarrollados han mostrado que la exposición a CEM en el sector eléctrico puede estar relacionada con una variedad de efectos adversos para la salud.

Autor: OSHA. (2019). Occupational Exposure to Electric and Magnetic Fields.

En una investigación realizada en Suecia se encontró que los trabajadores expuestos a campos electromagnéticos en la industria eléctrica reportaron tasas más altas de síntomas de fatiga, dolores de cabeza y trastornos del sueño (Wartenberg *et al*, 2016).

Este estudio subraya la importancia de realizar investigaciones específicas en el contexto de las actividades laborales de los técnicos de líneas energizadas, así como la necesidad de desarrollar medidas de protección más efectivas basadas en datos empíricos.

1.4.1.3 Título: La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) ha emitido directrices que abordan la exposición a campos electromagnéticos.

Autor: Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). Electromagnetic fields and public health.

Aunque no existen límites de exposición específicos, OSHA recomienda que se realicen evaluaciones de riesgo para identificar y mitigar los peligros potenciales relacionados con la exposición ocupacional (OSHA, 2019).

Esto incluye la utilización de equipos de protección personal y la implementación de programas de capacitación que informen a los trabajadores sobre los riesgos y las medidas de seguridad adecuadas.

1.4.1.4 Título: La Unión Europea, la Directiva 2013/35/EU establece requisitos mínimos de salud y seguridad relacionados con la exposición a campos electromagnéticos.

Autor: Unión Europea. (2013). Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). Recuperado

Esta normativa destaca la importancia de realizar evaluaciones de riesgo y de aplicar medidas preventivas para proteger la salud de los trabajadores en ambientes en donde puedan estar expuestos a CEM (Unión Europea, 2013).

Aunque se aplica a una amplia gama de sectores, su relevancia en la industria eléctrica es particularmente significativa, dado que esta normativa exige un enfoque basado en el riesgo para la gestión de la exposición.

1.4.1.5 Titulo: La Organización Mundial de la Salud (OMS) reconoce la necesidad de más investigación en el área de los campos electromagnéticos.

Autor: Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). Electromagnetic fields and public health.

En su informe de 2006, la OMS señala que, aunque los estudios han encontrado algunos efectos biológicos asociados con la exposición a CEM, todavía hay un vacío en el conocimiento que necesita ser llenado mediante investigaciones más específicas y bien diseñadas (OMS, 2006).

Este enfoque subraya la importancia de continuar evaluando la exposición en condiciones laborales específicas para establecer conclusiones más firmes sobre sus efectos en la salud.

1.4.2 Nacionales

1.4.2.1 Titulo: La salud en los campos electromagnéticos

Autor: Evelyn Ardón R. (Revista Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, primer trimestre del año 2000).

El artículo tiene como objetivo investigar sobre los problemas de salud que ocasiona pasar líneas de transmisión de la Subestación Caja a Belén (ICE), según queja de vecinos de Bosques de Doña Rosa.

Se analizaron varios estudios de entes internacionales que indican que los riesgos en los campos electromagnéticos de alta tensión son despreciables, aunque en lo epidemiólogos afirman lo contrario.

1.4.2.2 Titulo: La preocupación por la exposición a campos electromagnéticos (CEM) en el entorno laboral.

Autor: Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (2020).

Ley N.^a 7725 regula la seguridad y la salud ocupacional y establece directrices generales para proteger a los trabajadores, pero no aborda la exposición a CEM.

En esta ley falta un marco regulatorio claro respecto a los CEM y puede generar un ambiente laboral inseguro, ya que los técnicos confían en su formación y en los equipos de protección, pero no existe suficiente información que respalde su efectividad en la mitigación de riesgos específicos.

1.4.2.3 Título: El análisis de los límites de exposición a campos electromagnéticos

Autor: González *et al* (Revista Electrónica de Salud Ocupacional, 2020)

El artículo tiene como objetivo analizar los límites de exposición a CEM, como los establecidos por la Comisión Internacional sobre Protección contra Radiación no Ionizante (ICNIRP). Sin embargo, como lo señala, la mayoría de estas normativas se basan en estudios que no consideran las condiciones laborales concretas en las que operan los técnicos de líneas energizadas en Costa Rica.

Esta brecha de conocimiento resalta la necesidad de investigaciones locales que aborden específicamente los riesgos relativos a la exposición prolongada a CEM de estos profesionales. En consecuencia, la falta de datos sobre niveles específicos de exposición a situaciones reales deja a los técnicos en un estado de vulnerabilidad, lo que requiere una atención urgente por parte de las autoridades y de las empresas del sector eléctrico.

1.4.2.4 Título: La técnica de contacto con mano enguantada

Autor: Vargas y Chacón (Revista de Investigación en Salud y Trabajo, 2021).

El estudio tiene como objetivo exponer que la técnica de contacto con mano enguantada es una práctica común en la manipulación de líneas eléctricas energizadas, pero su seguridad en relación con la exposición en campos electromagnéticos aún no ha sido evaluada en profundidad en el contexto costarricense.

Aunque los guantes están diseñados para ofrecer protección, no hay evidencia clara de que sean efectivos en la reducción de la exposición a CEM. Esto plantea la pregunta sobre la efectividad de los equipos de protección personal utilizados por los técnicos de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), y su capacidad para mitigar los riesgos en su exposición diaria a CEM.

1.4.2.5 Título: La importancia de abordar la exposición a CEM en el trabajo.

Autor: (Ministerio de Salud, 2022).

El informe enfatiza la necesidad de estudios específicos en los que se midan los niveles de exposición y sus posibles efectos en la salud de los trabajadores en sectores de alto riesgo como el eléctrico.

Sin embargo, hasta la fecha no se han establecido directrices claras ni protocolos específicos para la evaluación de esta exposición de técnicos de líneas energizadas. La falta de investigación y de una regulación adecuada coloca a estos profesionales en una situación de riesgo potencial que debe ser atendida con urgencias.

1.5 Proyecciones

La tesis se centra en obtener mediciones específicas del campo electromagnético en frecuencia muy baja (60 Hz), que es la frecuencia característica de las líneas de media tensión en la red de distribución eléctrica de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL). Este enfoque permitirá obtener información precisa sobre la exposición real a la que están sujetos los técnicos durante la manipulación de cables o de componentes de la red, lo que proporcionará una base sólida para el análisis de riesgos en este entorno laboral.

Uno de los principales alcances del estudio es la posibilidad de efectuar revisiones comparativas de las mediciones obtenidas y de las normativas internacionales vigentes, como las de la ICNIRP, que establecieron límites y pautas para la exposición ocupacional a campos electromagnéticos.

Eso no solo validará el cumplimiento de la CNFL con dichos estándares sino que también permitirá detectar posibles áreas de mejora en las políticas de seguridad. Además, la investigación incluirá un análisis detallado de los efectos en la salud de los técnicos que están expuestos regularmente a estos campos electromagnéticos.

Con base en estudios previos y en los datos recopilados se realizarán recomendaciones concretas sobre las mejores prácticas para minimizar los riesgos, así como propuestas para optimizar la protección de los trabajadores. Esto podrá tener un impacto directo en la mejora de las condiciones laborales y en la actualización de normativas internas en el sector eléctrico.

A pesar de los importantes alcances de la tesis es fundamental reconocer las limitaciones que podrían influir en la precisión y en la aplicabilidad de los resultados.

La investigación depende de equipos especializados para la medición de campos electromagnéticos a bajas frecuencias que deben ser de alta precisión y sensibilidad. La disponibilidad de este equipo puede ser un desafío, ya que no es ampliamente accesible y su costo podría limitar la cantidad de mediciones o el alcance geográfico de ellas.

1.5.1 Alcances

Se harán mediciones del campo electromagnético en frecuencia muy baja (60 Hz) de las líneas de media tensión, esto cuando los técnicos de líneas energizadas estén manipulando los cables o cuando a algún elemento de la red de distribución de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz se le deban hacer revisiones de normativas internacionales vigentes en cuanto a los efectos en la salud de los técnicos.

Capítulo II: Marco teórico

2.1 Servicio Eléctrico Nacional

El servicio eléctrico en Costa Rica cubre el 99,5% del territorio nacional. La principal fuente de generación eléctrica es la hídrica, con la cual se produce 74% de la energía. De esta manera, el país tiene una matriz que se basa en fuentes renovables.

El servicio eléctrico lo ofrecen ocho empresas autorizadas por ley, según su cobertura geográfica: el ICE (Limón, Alajuela, Puntarenas y zonas rurales en todo el país), la CNFL (San José y partes de las provincias de Heredia, Alajuela y Cartago); la ESPH (Heredia), la JASEC (Cartago), la Coopeguanacaste (Guanacaste), la Coopealfaroruz (Alfaro Ruiz), la Coopesantos (la zona de Los Santos y parte de Aserrí), y la Coopelesca (San Carlos y Sarapiquí).

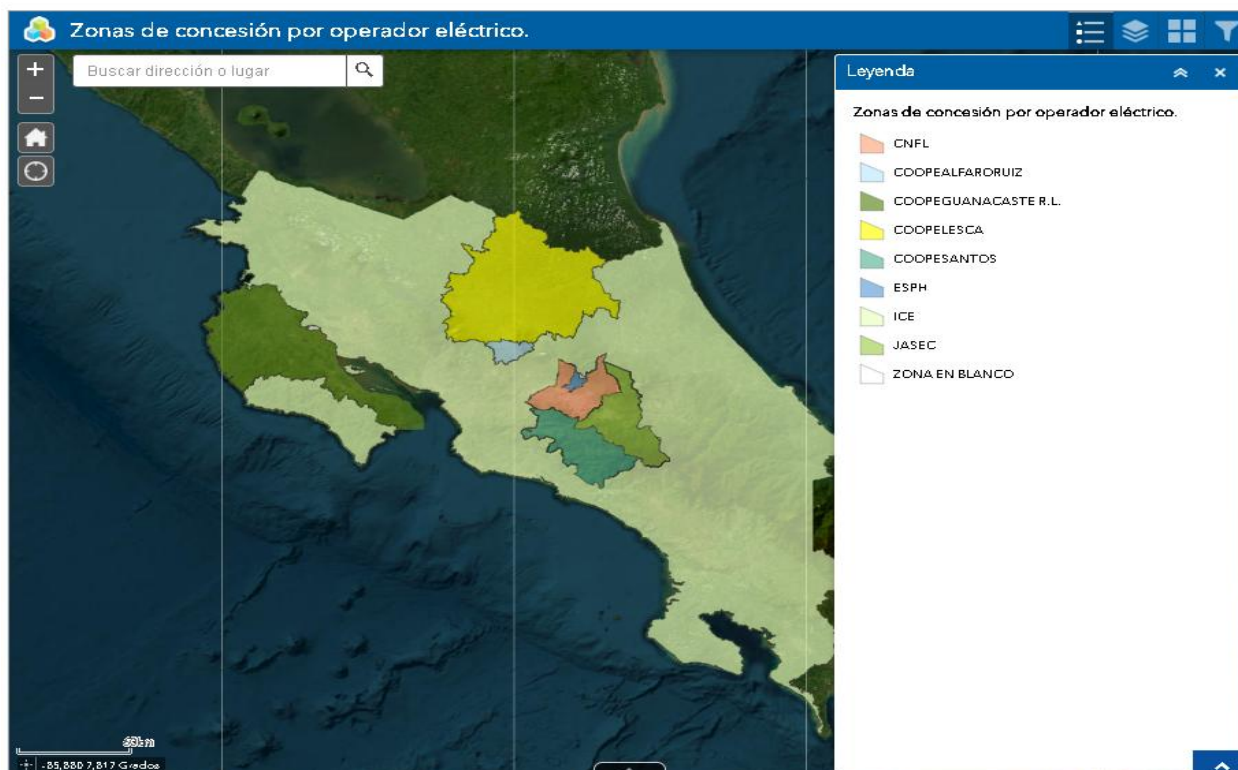


Figura 1. Zonas de concesión por operador eléctrico. Fuente: Intendencia de Energía 2019-10

2.1.1 La Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL)

“Somo la empresa pública que distribuye y comercializa la energía eléctrica en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica, fundada mediante el Contrato Ley N° 2 denominado “Contrato Eléctrico” del 8 de abril de 1941 (modificado por medio de la Ley N° 4197 del 20 de setiembre de 1968 y de la Ley N° 4977 del 19 de mayo de 1972).

De igual forma, nos regimos por lo establecido en la Ley de Fortalecimiento y Modernización de las Entidades Públicas del Sector de Telecomunicaciones”, N° 8660 del 13 de agosto de 2008 y por el resto del ordenamiento jurídico aplicable.

Nuestra área de cobertura corresponde a 932,49 km², en la que se registra un total de electrificación de 100%, para un total de 605.407 servicios facturados (clientes), a inicios de 2023.

Además, su sistema de distribución comprende 6.887 km de líneas en operación, de las cuales 3.404 son primarias (MT) y 3.483 son líneas secundarias (BT), y de ese total (6.887 km), 6.138 km son líneas aéreas y 749 km son subterráneas. Cuenta con 2.363 MVA de capacidad instalada en transformadores de distribución.

Para su sistema de generación cuenta con diez (10) subestaciones elevadoras.

- Para su sistema de distribución de electricidad dispone de veintiuna (21) subestaciones reductoras para su sistema de distribución aérea

- Tres (3) subestaciones para su sistema de distribución subterránea

- Tres (3) patios de interruptores

- Dos (2) subestaciones móviles como respaldo.

(Fuente: Dirección Generación de la Energía – CNFL).

La CNFL es una empresa de distribución eléctrica que concentra a 2 % de todo el territorio de Costa Rica, aproximadamente 40% de la demanda nacional, lo cual representa una fortaleza operativa por la flexibilidad de respaldos desde diferentes subestaciones del Sistema Eléctrico

Nacional, para potenciar de este modo los respaldos del servicio eléctrico en casos de contingencias de alto impacto en una subestación.

Además, cuenta con dos medios principales para transportar la energía eléctrica desde cualquiera de sus 30 subestaciones hasta cada uno de sus clientes, en circuitos de media tensión en niveles de 13,8 kV o 34,5 kV. Una forma es por medio de circuitos que utilizan canalizaciones subterráneas y que abarcan 20% (24 circuitos) de la totalidad de los circuitos de media tensión y la otra forma es por medio de una red aérea que utiliza postes para soportar los conductores eléctricos de los circuitos de distribución y que representan el 80% restante (97 circuitos). Por su naturaleza, el sistema de distribución aéreo es mucho más vulnerable y está expuesto a una serie de eventos que la CNFL no puede controlar, como por ejemplo, descargas atmosféricas, caída de árboles sobre líneas energizadas, choque de vehículos contra postes de la red eléctrica, entre otros eventos que ocasionan salidas o variaciones en la tensión de alimentación que reciben los clientes de la empresa. (Tomado del Boletín Informativo de la CNFL. Dirección Estrategia y Desarrollo de Negocios, Unidad Sostenibilidad - Área Eficiencia Energética)

2.1.2.1 Líneas de distribución eléctrica de media tensión (MT)

Las **líneas de distribución aérea de media tensión (MT)** son una parte fundamental de la infraestructura eléctrica, especialmente en áreas urbanas y rurales, en donde la energía debe ser distribuida eficientemente a grandes distancias. Estas redes aéreas operan en el rango de tensiones de entre 1 kV y 36 kV y están diseñadas para transportar electricidad desde subestaciones hasta los puntos de consumo, como fábricas, comunidades y pequeñas industrias. A diferencia de las redes subterráneas, las redes aéreas de MT son más comunes debido a su menor costo de instalación y mantenimiento.

2.1.2.2 Estructura y componentes de las redes aéreas de media tensión

Las redes aéreas de MT están compuestas por conductores eléctricos, generalmente de aluminio o de cobre, que están suspendidos en postes de concreto, metal o madera. Los postes son fundamentales para mantener los cables a una altura segura del suelo, y la elección del material depende de las condiciones climáticas y geográficas de la zona. En Costa Rica, debido a su clima

tropical y a su topografía diversa, se utilizan comúnmente postes de concreto y de madera tratados, que son resistentes a la humedad y a las plagas.

Los conductores de las líneas aéreas de MT suelen estar desnudos, es decir, no llevan aislamiento externo, ya que el aire circundante actúa como medio aislante. Sin embargo, se instalan separadores para garantizar que las fases de la línea mantengan la distancia adecuada entre sí, y evitar cortocircuitos o fallas. A lo largo de la red se colocan dispositivos de protección como fusibles y pararrayos, diseñados para proteger el sistema de sobrecargas y descargas atmosféricas, respectivamente.

2.1.2.3 Ventajas y desafíos de las redes aéreas de MT

Una de las principales ventajas de las redes aéreas de media tensión es su accesibilidad, lo que facilita su inspección y mantenimiento. Los técnicos pueden identificar visualmente los problemas, como cables dañados o árboles que interfieren con la línea, y actuar de manera rápida para solucionar las fallas. Además, la instalación aérea es más rápida y económica que las redes subterráneas, especialmente en áreas en donde el terreno es irregular o donde las condiciones del suelo no permiten excavar fácilmente.

No obstante, las redes aéreas también presentan varios desafíos. Están expuestas a los elementos naturales, lo que las hace vulnerables a tormentas, vientos fuertes, caída de árboles, y, en países tropicales como Costa Rica, a lluvias intensas que pueden afectar su estabilidad. Además, el impacto visual y ambiental de estas infraestructuras puede ser significativo, ya que atraviesan paisajes naturales y áreas urbanas, lo que genera preocupaciones en las comunidades.

Otro reto es la interferencia de la vegetación. En áreas rurales o selváticas la proximidad de los árboles puede causar fallas si las ramas entran en contacto con los cables de media tensión. Por esta razón, las empresas distribuidoras, como la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), realizan labores periódicas de poda y limpieza de los corredores de servicio para minimizar estos riesgos.

2.1.2.4 Mantenimiento y seguridad en redes aéreas de MT

El mantenimiento de las redes aéreas de media tensión es un aspecto clave para garantizar la continuidad del suministro eléctrico y la seguridad de los trabajadores. Las inspecciones regulares incluyen la revisión del estado de los postes, cables y accesorios, así como la detección de corrosión o desgaste en los componentes metálicos. En Costa Rica las empresas distribuidoras realizan estos mantenimientos de manera programada para evitar interrupciones inesperadas del servicio.

Una técnica, comúnmente utilizada en el mantenimiento de líneas aéreas energizadas, es el trabajo que se hace con mano enguantada. Esta técnica les permite a los técnicos trabajar directamente en las líneas sin interrumpir el servicio eléctrico. Los guantes dieléctricos, junto con otros equipos de protección personal, ofrecen una barrera contra la electricidad, y permiten que los operarios realicen tareas como el reemplazo de componentes o la limpieza de las líneas. No obstante, esta técnica también requiere de una capacitación rigurosa y del cumplimiento de estrictas normas de seguridad para evitar accidentes.

En Costa Rica, la normativa que regula el trabajo en redes aéreas de media tensión es rigurosa y sigue los lineamientos internacionales establecidos por organismos como el IEEE y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). Estas normativas no solo buscan proteger a los trabajadores, sino también asegurar que la infraestructura cumpla con los más altos estándares de eficiencia y seguridad. En particular, se ha hecho un enfoque creciente en la evaluación de la exposición a campos electromagnéticos (CEM) generados por las líneas de media tensión, debido a la preocupación ante los efectos de largo plazo que estos pueden tener en la salud de los trabajadores que realizan mantenimiento en contacto directo con las líneas energizadas.

2.1.2.5 Exposición a campos electromagnéticos en redes aéreas de MT

Las líneas aéreas de media tensión generan campos electromagnéticos (CEM) debido a las corrientes que fluyen por los conductores. Aunque los niveles de exposición a CEM en redes de media tensión suelen ser inferiores a los de alta tensión, siguen representando un riesgo potencial para los técnicos que trabajan en proximidad a las líneas energizadas, especialmente en labores de mantenimiento cuando es necesario realizar contacto directo con los conductores.

La exposición prolongada a CEM ha sido asociada con diversos efectos en la salud, como dolores de cabeza, fatiga y, en casos más graves, problemas neurológicos y cardiovasculares. A pesar de que en Costa Rica se siguen las recomendaciones internacionales de organismos como la Comisión Internacional sobre Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP), aún existen lagunas en la investigación sobre los efectos de largo plazo de esta exposición a las condiciones de trabajo específicas de las redes aéreas de media tensión.

Empresas como la CNFL han implementado programas de medición y monitoreo de los niveles de exposición a CEM para asegurar que los trabajadores se mantengan dentro de los límites de seguridad establecidos. Sin embargo, se reconoce la necesidad de estudios más específicos que analicen los riesgos relacionados con la técnica de trabajo de mano enguantada en líneas de media tensión, en que los técnicos están en contacto directo con los componentes eléctricos.

2.1.3 Ubicación geográfica de las mediciones

Las mediciones de los campos electromagnéticos se harán en tres circuitos de la CNFL de la Subestación Reductora Sabanilla. Esta propiedad del ICE reduce la tensión de 138kV a 34.5kV y 13.8 kV. El punto geográfico de esta subestación es Sabanilla, Mercedes y Montes de Oca.

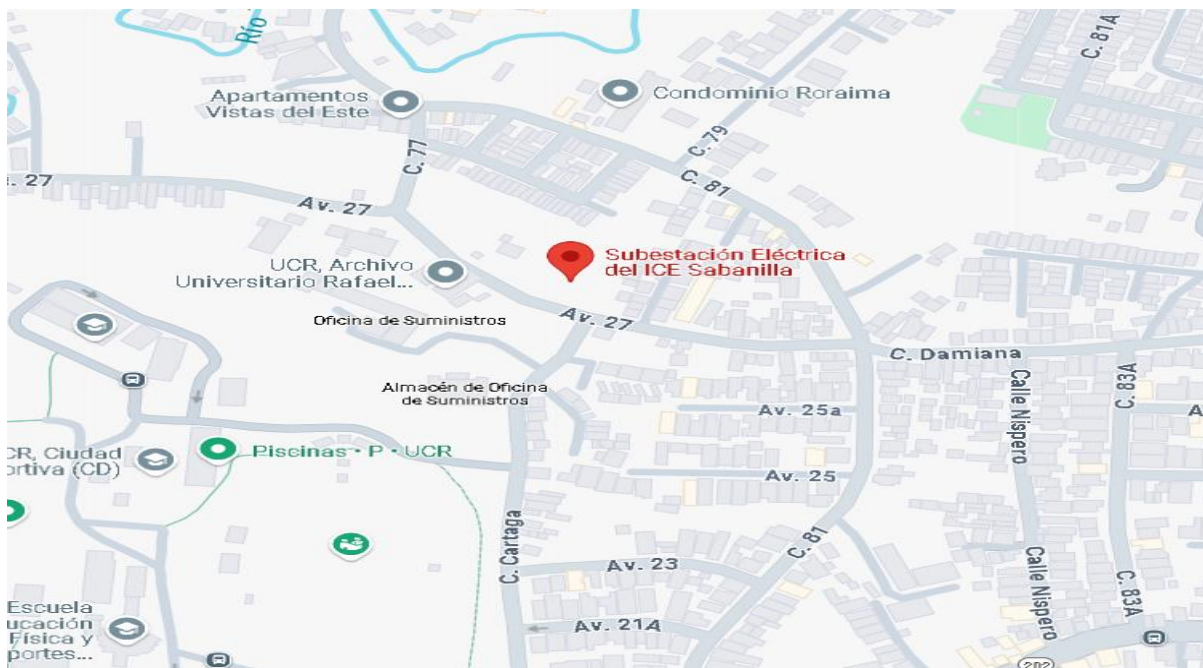


Figura 2. Subestación Sabanilla, propiedad del ICE,
 (https://www.google.com/maps/place/Subestaci%C3%B3n+El%C3%A9ctrica+del+ICE+Sabanilla/@9.9468634,-84.0455644,17z/data=!4m6!3m5!1s0x8fa0e47227452605:0x9d2f35efc3262ad8!8m2!3d9.9473918!4d-84.0425818!16s%2Fg%2F11c0vz2643?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI0MTIxMS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D)

2.1.4 Técnicos de líneas energizadas utilizan la técnica en contacto con mano enguantada

Los técnicos de líneas energizadas que utilizan la técnica en contacto con la mano enguantada desempeñan una labor esencial y compleja en el mantenimiento y la reparación de infraestructuras eléctricas. Esta técnica, que permite trabajar directamente con líneas y componentes energizados, es un ejemplo avanzado de cómo la innovación y la seguridad se combinan para mantener la continuidad del servicio eléctrico sin comprometer la integridad de los trabajadores.

2.1.4.1 Preparación previa y protocolo de seguridad

Antes de comenzar cualquier intervención los técnicos siguen un protocolo de preparación rigurosa para garantizar la máxima seguridad:

- Inspección de guantes y equipo de protección: Los guantes aislantes, la pieza central de esta técnica, deben ser revisados minuciosamente en busca de grietas, agujeros o cualquier tipo de daño que pueda comprometer su capacidad de aislamiento. Además, el resto del EPP, como los cascos con visera, la ropa ignífuga y las botas dieléctricas, debe estar en perfectas condiciones.
- Pruebas de integridad. Los guantes aislantes suelen ser probados bajo presión de aire para asegurar que no tengan fugas invisibles al ojo humano. Cualquier fallo detectado implica el reemplazo inmediato del equipo.
- Coordinación y comunicación. Los técnicos revisan los protocolos de seguridad y establecen un plan de trabajo con el resto del equipo. La comunicación clara y constante es esencial, ya que cualquier malentendido podría resultar en un accidente.

2.1.4.2 Evaluación de la zona de trabajo

Los técnicos inspeccionan la zona y miden la intensidad de los campos electromagnéticos para asegurarse de que estén dentro de los límites de seguridad. Esta evaluación es necesaria para determinar el tiempo que pueden estar expuestos y qué medidas adicionales podrían ser necesarias, como la rotación de personal o el uso de barreras protectoras.

2.1.4.3 Proceso de trabajo directo

Cuando el área ha sido aprobada para el trabajo los técnicos inician la tarea siguiendo un conjunto de pasos detallados:

- Acceso a las líneas energizadas- Utilizando equipos de elevación como grúas o plataformas, los técnicos se posicionan de manera segura en las alturas necesarias. La estabilidad en estas plataformas es fundamental para mantener la precisión de los movimientos.
- Manipulación de componentes.: Una vez en posición los técnicos utilizan los guantes aislantes para tocar y manipular conductores y equipos activos. Pueden realizar una variedad de tareas, como ajustes en conexiones, instalación de nuevos aisladores o reparación de herrajes.
- Movimientos controlados. La técnica a contacto con mano enguantada requiere movimientos lentos y deliberados para minimizar el riesgo de arcos eléctricos. Los técnicos deben mantener una postura segura y evitar movimientos bruscos que podrían desestabilizar los conductores o provocar un cortocircuito.
- Uso de herramientas aislantes. A veces, los técnicos utilizan herramientas especialmente diseñadas con mangos de material aislante que proporcionan una capa adicional de protección y permiten realizar maniobras precisas sin necesidad de tocar directamente ciertos componentes.

2.1.4.4 Mantenimiento preventivo y reparaciones

La técnica de contacto con la mano enguantada es utilizada tanto para mantenimiento preventivo como para reparaciones inmediatas:

- Mantenimiento de rutina. Los técnicos realizan inspecciones periódicas de las líneas y equipos energizados, para detectar puntos de desgaste o deterioro antes de que se conviertan en problemas mayores. Esto incluye la limpieza de aisladores y la revisión de conexiones para asegurar su integridad.

- Reparación de fallas. Cuando se identifican componentes dañados los técnicos pueden reemplazarlos o repararlos sin interrumpir el suministro eléctrico. Esto es esencial para mantener la continuidad del servicio, especialmente en redes claves.

2.1.4.5 Medidas de mitigación de riesgos

El trabajo en líneas energizadas conlleva riesgos significativos, y la técnica del contacto con mano enguantada está diseñada para minimizarlos:

- Monitoreo de la exposición. Durante el trabajo, los técnicos llevan dispositivos de monitoreo que registran los niveles de exposición a campos electromagnéticos. Estos datos se analizan para asegurar que los límites de seguridad no se superen.

- Técnicas de protección adicionales. Se utilizan barreras aislantes y escudos térmicos cuando es necesario para proteger al técnico de posibles arcos eléctricos o temperaturas elevadas.

- Plan de contingencia. En caso de un imprevisto los técnicos siguen un plan de contingencia que incluye el descenso inmediato y el uso de métodos de primeros auxilios, en caso de contacto accidental con la corriente.

Cada año se fortalece el conocimiento de los técnicos de líneas energizadas con el fin de garantizar un servicio continuo y de calidad a los clientes. En el último año 50 técnicos recibieron herramientas para identificar problemas de manera oportuna, atenderlos bajo las mejores prácticas y para ofrecer soluciones innovadoras y efectivas en materia de mantenimiento y construcción de redes eléctricas.

La importancia de refrescar, actualizar y mejorar conocimientos beneficia a todos nuestros clientes. Contar con personal calificado permite minimizar el impacto, y mejorar la calidad y

la continuidad de la electricidad sin afectar el servicio a los clientes. Además de asegurar que todos los trabajos cumplen con los estándares legales y de seguridad vigentes.

2.1.4.6 Importancia y beneficios de la técnica

La técnica de contacto con la mano enguantada les permite a los técnicos realizar su trabajo de manera eficiente y segura, sin interrumpir el suministro eléctrico. Esta capacidad de trabajar con sistemas activos es especialmente valiosa en sectores industriales y de servicios, en los que la interrupción del servicio puede tener consecuencias significativas.

La seguridad es siempre la prioridad y la ejecución correcta de esta técnica demuestra la alta capacitación y especialización de los técnicos en líneas energizadas. La combinación de equipo avanzado, protocolos estrictos y habilidades técnicas convierte a estos profesionales en un componente esencial para el funcionamiento continuo y seguro de la red eléctrica.

2.1.5 Uniforme y equipo de protección personal

Uniforme de trabajo

El uniforme es una parte esencial del EPP y está diseñado para proteger al técnico de riesgos eléctricos y térmicos. Este uniforme incluye:

- Ropa ignífuga: La vestimenta está fabricada con materiales resistentes al fuego, como el Nomex o el algodón tratado, que protege al trabajador en caso de arcos eléctricos.
- Camiseta y pantalón de manga larga: Las prendas deben cubrir completamente la piel para reducir el riesgo de quemaduras.
- Color de alta visibilidad: Por seguridad, el uniforme suele tener un color brillante o franjas reflectantes para una fácil visibilidad en entornos oscuros o poco iluminados.

2.1.5.1 Casco de seguridad

- Casco dieléctrico: Hecho de materiales aislantes, el casco protege contra impactos y contactos eléctricos. Generalmente, incluye una visera o pantalla facial que protege de arcos eléctricos y salpicaduras.

- Colores distintivos: A menudo, los colores del casco indican el nivel de especialización o el rol del técnico en el equipo.

2.1.5.2 Guantes aislantes

- Guantes de goma aislante: Los guantes están clasificados por niveles de voltaje, y son la pieza clave en la técnica de contacto con mano enguantada. Se utilizan junto con guantes de cuero externos para protegerlos de daños mecánicos.

- Inspección diaria: Es obligatorio que los guantes se revisen antes de cada uso para detectar posibles perforaciones o desgaste.

2.1.5.3 Calzado de seguridad

- Botas dieléctricas: Estas botas están hechas de materiales aislantes y cuentan con suelas antideslizantes para proteger contra descargas eléctricas y mejorar la estabilidad.

- Punteras de acero o composite para proteger los pies de impactos y compresiones.

2.1.5.4 Protección ocular y facial

- Gafas de seguridad: Hechas de policarbonato resistente a impactos, protegen contra chispas y escombros.

- Pantalla facial: Complementa el casco para ofrecer protección adicional contra arcos eléctricos.

2.1.5.5 Arnés de seguridad y líneas de vida

- Arnese anticaídas: Utilizado para trabajos en altura, el arnés está diseñado para distribuir la fuerza de un impacto de manera uniforme y para proteger al trabajador de caídas.

- Líneas de vida retráctiles: Permiten movilidad sin comprometer la seguridad en trabajos elevados.

2.1.6 Cubrimiento utilizado en redes de media tensión

En las redes de media tensión, los técnicos de líneas energizadas utilizan diversos tipos de cubrimiento y protección para realizar trabajos de forma segura, especialmente al emplear la técnica de contacto con la mano enguantada. Estos cubrimientos están diseñados para aislar partes de la línea y prevenir el contacto accidental con elementos energizados. A continuación se detallan los principales tipos de cubrimiento utilizados:

2.1.6.1 Mantas aislantes

- Material: Hechas de goma o materiales sintéticos de alta resistencia.
- Función: Se utilizan para cubrir partes de los conductores y equipos energizados que están cerca del área de trabajo, para proteger al técnico de un contacto accidental.
- Clasificación: Las mantas están clasificadas de acuerdo con el nivel de voltaje para el que están diseñadas, y su uso varía según las especificaciones de seguridad.

2.1.6.2 Faldones aislantes

- Aplicación: Se colocan alrededor de equipos y conexiones para proporcionar una barrera de aislamiento adicional durante las reparaciones o el mantenimiento.
- Ventajas: Suelen ser flexibles, lo que permite adaptarse a diferentes formas y tamaños de los componentes eléctricos.
- Usos comunes: Se utilizan especialmente en interruptores, seccionadores y otros equipos de conexión.

2.1.6.3 Cobertores flexibles para conductores (venas)

- Descripción: Estas fundas, también conocidas como “line hoses”, son tubos flexibles que se colocan sobre los conductores para proporcionar una capa de protección.
- Material: Generalmente están fabricadas de goma o un polímero de alta resistencia y pueden venir en secciones que se conectan entre sí para cubrir tramos más largos.

- **Uso específico:** Son particularmente útiles cuando se trabaja en áreas en donde el espacio es limitado y se necesita proteger el conductor durante las maniobras.

2.1.6.4 Protecciones rígidas (cubiertas de plástico o aisladores)

- **Función:** Cubren puntos específicos como empalmes y conectores para asegurar que estos no queden expuestos durante el trabajo.

- **Durabilidad:** Están hechas de plásticos de alta resistencia con propiedades dieléctricas que aseguran una protección adecuada durante el tiempo que duren los trabajos de mantenimiento o reparación.

- **Características adicionales:** Estas protecciones a menudo tienen cierres de presión o sistemas de bloqueo que aseguran su estabilidad sobre el conductor.

2.1.6.5 Barreras de protección y cortinas aislantes

- **Uso en entornos complejos:** Cuando el trabajo se realiza en un área en donde hay múltiples fuentes de energía cercanas, se utilizan barreras de protección que actúan como un escudo entre el técnico y otras partes de la red.

- **Propiedades:** Estas cortinas y barreras son móviles y pueden ser instaladas y retiradas según sea necesario, lo que facilita su uso en distintos trabajos.

2.1.6.6 Protectores para herrajes y accesorios

- **Propósito:** Cubrir partes metálicas expuestas que puedan ser conductivas, como herrajes y tornillos, durante el trabajo en líneas energizadas.

- **Construcción:** Estos protectores son generalmente modulares y pueden ser adaptados para cubrir diferentes tipos de herrajes utilizados en las redes.

2.1.7 Consideraciones de seguridad

Los cubrimientos y protecciones deben cumplir con las normativas internacionales, como las especificadas por la ASTM (American Society for Testing and Materials) o I IEC (International Electrotechnical Commission). Los técnicos deben inspeccionar estos elementos antes de su uso para detectar cualquier signo de desgaste o daño que pudiera comprometer su efectividad. Además,

su uso debe estar complementado con otras medidas de seguridad, como el uso de guantes aislantes y herramientas de material dieléctrico.

2.1.8 Equipo de trabajo hidráulico

Las grúas aislantes son equipos esenciales para los técnicos que trabajan en líneas energizadas, porque les permiten el acceso de manera segura a zonas de trabajo en alturas mientras mantienen la protección contra descargas eléctricas. Seguidamente se detallan la importancia, las características y el uso de estas grúas en el trabajo con la técnica del contacto con la mano enguantada:

2.1.8.1 Definición y propósito

Las grúas aislantes son plataformas elevadoras o camiones con plumas extensibles diseñadas específicamente para trabajos en líneas eléctricas energizadas. Su estructura y componentes están hechos de materiales aislantes que protegen a los técnicos de posibles contactos eléctricos mientras trabajan en líneas de media y alta tensión.

2.1.8.2 Características principales

- **Materiales aislantes:** La sección de la pluma, especialmente las partes cercanas a la canastilla o plataforma, está hecha de materiales no conductivos, como fibra de vidrio o compuestos avanzados que impiden la transmisión de corriente eléctrica.
- **Plataforma de trabajo:** La canastilla es el espacio en donde los técnicos se sitúan para realizar los trabajos. Está equipada con barandillas aislantes y espacio suficiente para herramientas y equipo.
- **Estabilizadores y seguridad:** Las grúas están equipadas con estabilizadores hidráulicos que garantizan la estabilidad durante las maniobras, e incluso en terrenos irregulares.
- **Sistema de control:** Las grúas cuentan con controles en la base y en la plataforma, lo que les permite a los operadores ajustar la posición y la altura de manera precisa y segura.

2.1.8.2 Tipos de grúas aislantes

- Grúas de brazo articulado. Estas grúas tienen un diseño que permite un movimiento flexible y un mejor alcance alrededor de obstáculos, lo que es útil en entornos complejos en los que la línea de visión directa es limitada.
- Grúas de brazo telescópico. Ofrecen un mayor alcance vertical y son ideales para trabajos en líneas más altas. Su mecanismo permite una extensión y retracción rápida, pues facilitan el trabajo en distintas posiciones.
- Camiones canasta. Integran una plataforma elevadora sobre un chasis de camión, lo que permite una fácil movilización entre diferentes lugares de trabajo.

2.1.8.3 Ventajas de uso

- Seguridad mejorada. El principal beneficio de las grúas aislantes es la protección que brindan frente a descargas eléctricas. Los materiales dieléctricos de la pluma minimizan el riesgo de que una corriente viaje desde la línea hasta la base de la grúa.
- Acceso a zonas elevadas. Facilitan el trabajo en líneas energizadas al elevar al técnico hasta la altura deseada sin necesidad de escalar postes o estructuras.
- Eficiencia en el trabajo. Permiten realizar tareas como la reparación de conexiones, cambio de aisladores, mantenimiento de equipos y limpieza de componentes de manera más rápida y segura.

2.1.8.4 Normativas y mantenimiento

Las grúas aislantes deben cumplir con normas de seguridad internacionales, como las establecidas por la ANSI (American National Standards Institute) y la IEC. Es fundamental que se realice un mantenimiento regular para asegurar que las propiedades aislantes de los materiales se mantengan en óptimas condiciones. Esto incluye inspecciones visuales, pruebas dieléctricas periódicas y el reemplazo de componentes desgastados.

Aunque las grúas aislantes ofrecen una protección significativa, los técnicos deben seguir usando equipo de protección personal (EPP), como guantes aislantes, ropa ignífuga y cascos dieléctricos, para maximizar la seguridad durante el trabajo en líneas energizadas.

2.2 Campo eléctrico

2.2.1 Definición e importancia del campo eléctrico

El campo eléctrico es una región del espacio en donde una carga eléctrica experimenta una fuerza debido a la presencia de otras cargas eléctricas. Este campo es una manifestación de la influencia que una carga ejerce sobre otra sin necesidad de contacto directo, lo que permite la interacción eléctrica a distancia.

El campo eléctrico es fundamental en el estudio de la electricidad y en el diseño y funcionamiento de sistemas eléctricos, incluidas redes de distribución y transmisión. Comprender el comportamiento de los campos eléctricos permite el desarrollo de tecnologías seguras y eficientes, así como el mantenimiento adecuado de la infraestructura eléctrica.

2.2.1.1 Fórmulas del campo eléctrico

El campo eléctrico (E) se define matemáticamente como la fuerza eléctrica (F) experimentada por una carga de prueba (q):

$$E = \frac{F}{q}$$

Dado que la fuerza eléctrica entre dos cargas (q_1 y q_2) se describe por la ley de Coulomb, tenemos:

$$F = k \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2}$$

donde:

- k es la constante de Coulomb ($8.99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$),
- r es la distancia entre las cargas.

Sustituyendo esto en la fórmula del campo eléctrico, obtenemos:

$$E = k \frac{|q|}{r^2}$$

El campo eléctrico es un vector, lo que significa que tiene tanto magnitud como dirección. La dirección del campo eléctrico es la misma que la dirección de la fuerza que actuaría sobre una carga positiva colocada en el campo.

2.2.1.2 Importancia en redes eléctricas

En las redes eléctricas de media y alta tensión el estudio del campo eléctrico es esencial para asegurar un funcionamiento seguro. Los técnicos deben entender cómo el campo eléctrico se comporta alrededor de líneas de transmisión, transformadores y equipos asociados. Esta comprensión ayuda a:

- Diseñar aisladores y equipos de protección adecuados.
- Planificar distancias de seguridad y proteger al personal y al público.
- Minimizar las pérdidas de energía y optimizar la distribución.

2.2.1.3 Desventajas y efectos en la salud

La exposición a campos eléctricos y magnéticos (EMF, por sus siglas en inglés) es un asunto de preocupación para los técnicos que trabajan en redes energizadas. Aunque los campos eléctricos por sí mismos no penetran profundamente en el cuerpo humano debido a la capacidad aislante de la piel, los campos magnéticos asociados con las corrientes eléctricas sí pueden inducir efectos biológicos.

2.2.1.4 Efectos potenciales en la salud:

- Fatiga y estrés. La exposición continua a campos eléctricos intensos puede causar síntomas como fatiga, estrés y dolores de cabeza.
- Problemas cardiovasculares: Algunos estudios han señalado una posible relación entre la exposición prolongada a campos magnéticos y a cambios en la frecuencia cardíaca.
- Impacto en el sistema nervioso. Campos magnéticos intensos pueden interferir con la función normal de las células nerviosas, lo que en algunos casos puede resultar en sensaciones de hormigueo o malestar.

2.2.1.5 Medidas de protección y normativas

Los técnicos deben seguir medidas de seguridad estrictas para minimizar la exposición a campos eléctricos y magnéticos. Algunas de estas medidas incluyen:

- Uso de equipo de protección personal (EPP), como guantes y ropa dieléctrica.
- Monitoreo de la exposición: Utilizar dispositivos de medición que detecten y registren la intensidad del campo eléctrico y magnético en tiempo real.
- Rotación de personal: Limitar el tiempo de exposición para evitar la acumulación de dosis.
- Normativas de seguridad. Las regulaciones internacionales, como las establecidas por la ICNIRP (Comisión Internacional de Protección contra Radiación No ionizante), proporcionan límites de exposición seguros.

La comprensión y el manejo del campo eléctrico en redes energizadas son cruciales para la seguridad y el bienestar de los técnicos. Si bien los campos eléctricos por sí mismos tienen usos importantes en la tecnología y la industria, la exposición descontrolada puede tener consecuencias negativas. Por ello, la combinación de conocimiento técnico, equipo de protección y cumplimiento de normas de seguridad es esencial para proteger la salud de los profesionales que trabajan con redes eléctricas.

2.2.2 Campo magnético

2.2.2.1 Definición de campo magnético

El campo magnético es una región del espacio en donde una carga eléctrica en movimiento, como una corriente eléctrica, experimenta una fuerza. Este fenómeno es fundamental en el estudio de la electricidad y en el electromagnetismo, ya que los campos magnéticos son generados por cargas en movimiento y son responsables de muchos efectos electromagnéticos, incluida la generación de energía en generadores y transformadores.

Los campos magnéticos son omnipresentes en las redes eléctricas, especialmente en líneas de transmisión, transformadores y otros equipos. A diferencia de los campos eléctricos, los campos magnéticos no dependen de la presencia de una carga aislada, sino que están asociados con corrientes eléctricas.

2.2.2.2 Fórmulas del campo magnético

El campo magnético (B), creado por una corriente eléctrica, se puede calcular utilizando la ley de Ampère o la ley de Biot-Savart. Las principales fórmulas son:

Ley de Biot-Savart

La ley de Biot-Savart describe cómo una corriente eléctrica produce un campo magnético en un punto específico en el espacio. La fórmula es:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Donde:

- B es el campo magnético,
- μ_0 es la permeabilidad del vacío ($4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$),
- I es la corriente que produce el campo,

- r es la distancia desde la corriente hasta el punto de medición.

Ley de Ampère (con la forma integral)

La ley de Ampère, que describe cómo las corrientes eléctricas y los campos magnéticos se relacionan, se expresa como:

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I$$

Donde:

- B es el campo magnético,
- $d\mathbf{l}$ es un diferencial de longitud a lo largo de la curva cerrada C ,
- I es la corriente encerrada por la curva C .

El campo magnético también es generado por un dipolo magnético, y su intensidad se calcula usando la fórmula:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{2m \cos(\theta)}{r^3} \right)$$

Donde:

- m es el momento magnético del dipolo,
- r es la distancia desde el dipolo,
- θ es el ángulo entre el eje del dipolo y la línea que conecta el dipolo con el punto de observación.

2.2.2.3 Importancia del campo magnético en redes eléctricas

En las redes eléctricas el campo magnético es crucial para varios procesos tecnológicos. Algunos de los aspectos más importantes son:

2.2.2.4 Generación de electricidad

Los generadores eléctricos, como los utilizados en plantas de energía, dependen de la interacción entre los campos magnéticos y las corrientes eléctricas para generar electricidad. Este proceso está basado en la ley de Faraday de la inducción electromagnética, que establece que un cambio en el flujo magnético a través de un conductor genera una corriente eléctrica en dicho conductor.

2.2.2.5 Transformadores y motores eléctricos

Los transformadores, que modifican el voltaje en las redes de transmisión de energía operan gracias a campos magnéticos. En los motores eléctricos el campo magnético es esencial para el movimiento de las piezas rotatorias que generan energía mecánica a partir de la energía eléctrica.

2.2.2.6 Interferencia electromagnética

El campo magnético también puede generar interferencias en otros dispositivos electrónicos. En las redes de transmisión de energía los campos magnéticos alrededor de las líneas de alta tensión pueden afectar a equipos sensibles, como computadoras o sistemas de comunicación.

2.2.2.7 Desventajas y efectos en la salud de los técnicos

Los campos magnéticos generados por corrientes eléctricas, especialmente en líneas de transmisión de media y alta tensión, pueden tener impactos en la salud de los técnicos que pasan tiempo trabajando cerca de ellos. Aunque la investigación sobre los efectos de los campos magnéticos en la salud humana está en curso, algunos estudios han señalado posibles efectos adversos, especialmente ante exposiciones prolongadas.

2.2.2.8 Efectos potenciales en la salud

- **Fatiga y estrés.** La exposición constante a campos magnéticos intensos puede estar relacionada con un aumento en los niveles de fatiga y estrés en los trabajadores, aunque estos efectos son a menudo difíciles de asociar directamente con la exposición a los campos magnéticos.

- Problemas en el sistema nervioso. Algunos estudios sugieren que la exposición prolongada a campos magnéticos puede afectar el sistema nervioso, aunque los resultados no son concluyentes. Los efectos incluyen alteraciones en la actividad cerebral y la interferencia en las señales nerviosas.

- Riesgos de cáncer. Aunque la relación entre campos magnéticos y cáncer sigue siendo un tema de debate, algunos estudios han sugerido que la exposición a campos magnéticos podría estar asociada con un mayor riesgo de ciertos tipos de cáncer, como leucemias o tumores cerebrales, especialmente en trabajadores expuestos a niveles altos durante largos períodos.

- Alteraciones en el sueño. Se ha demostrado que la exposición a campos magnéticos puede interferir con los patrones de sueño, y provocar insomnio o alteraciones en el ritmo circadiano.

2.2.2.9 Normativas de seguridad y prevención

Las organizaciones internacionales, como la ICNIRP (Comisión Internacional de Protección contra Radiación No Ionizante), han establecido límites de exposición a campos magnéticos para minimizar los riesgos para la salud. Estas normas se basan en investigaciones científicas y están diseñadas para proteger a los trabajadores de efectos nocivos derivados de la exposición prolongada.

Algunas medidas de protección para los técnicos incluyen:

- Monitoreo de la exposición. Uso de equipos para medir los niveles de campos magnéticos y asegurar que se mantengan dentro de los límites seguros.

- Rotación de turnos. Limitar la exposición prolongada mediante la rotación de los trabajadores para reducir la cantidad de tiempo que pasan en áreas con campos magnéticos elevados.

- Uso de EPP adecuado. Equipos de protección personal que minimicen la exposición directa a los campos magnéticos y eléctricos, como guantes y ropa dieléctrica.

El campo magnético es un componente esencial en el funcionamiento de las redes eléctricas modernas. Su importancia es fundamental en la generación y transmisión de energía, pero su

presencia en ambientes laborales también implica riesgos para la salud de los técnicos. A pesar de que la investigación sobre los efectos de la exposición a campos magnéticos aún está en desarrollo, es necesario que los técnicos sigan prácticas seguras y utilicen equipo de protección adecuado para minimizar estos riesgos. La implementación de medidas de seguridad y el cumplimiento de normativas internacionales ayudan a proteger la salud de los trabajadores y a garantizar un entorno laboral seguro.

2.2.3 Magnitudes de campos eléctricos y magnéticos

Los campos eléctricos y magnéticos son dos conceptos fundamentales en el estudio del electromagnetismo y tienen un impacto directo en las redes eléctricas y en la seguridad de los técnicos que trabajan con ellos. De seguido se describen las magnitudes que definen estos campos, sus fórmulas relevantes, su importancia en redes eléctricas y las posibles desventajas para la salud de los trabajadores expuestos.

2.2.3.1 Importancia del campo eléctrico en redes eléctricas

En las redes eléctricas los campos eléctricos están relacionados con el voltaje que circula por las líneas de transmisión. Estos campos pueden tener efectos importantes en el diseño de equipos de protección, aislamiento y seguridad, ya que la intensidad del campo eléctrico depende del voltaje de las líneas. Un campo eléctrico fuerte puede inducir arcos eléctricos o descargas indeseadas, lo que hace que sea importante controlar y minimizar estos campos en áreas de trabajo de alta tensión.

2.2.3.2 Importancia del campo magnético en redes eléctricas

En las redes eléctricas, los campos magnéticos son generados por las corrientes que circulan por las líneas de transmisión, transformadores, y otros dispositivos eléctricos. Estos campos son fundamentales para el funcionamiento de motores y generadores eléctricos, ya que interactúan con las corrientes para producir movimiento o electricidad. Sin embargo, los campos magnéticos

también pueden inducir corrientes parásitas en materiales cercanos, lo que puede afectar el rendimiento de los equipos y generar pérdidas de energía.

2.2.3.3 Efectos en la Salud de los técnicos en redes eléctricas

La exposición a campos eléctricos intensos en el ambiente de trabajo puede tener varios efectos adversos en la salud de los técnicos de redes eléctricas, especialmente si están trabajando cerca de líneas de alta tensión. Los posibles efectos incluyen:

- **Fatiga y estrés.** La exposición prolongada a campos eléctricos puede generar síntomas de fatiga y estrés, y afectar la concentración y el bienestar de los trabajadores.
- **Interferencia en el sistema nervioso.** Algunos estudios sugieren que la exposición a campos eléctricos fuertes puede interferir con la actividad eléctrica normal del sistema nervioso. Aunque los efectos en el corto plazo no suelen ser graves, la exposición prolongada podría tener implicaciones más serias.
- **Desórdenes del sueño.** Se ha encontrado que la exposición a campos eléctricos, particularmente en áreas de alta tensión, puede afectar los ritmos circadianos y alterar los patrones de sueño.

Los efectos de los campos magnéticos en la salud humana han sido objeto de investigaciones extensivas, ya que los trabajadores en las redes eléctricas están frecuentemente expuestos a estos campos debido a las corrientes de alta potencia. Los posibles efectos incluyen:

- **Fatiga crónica.** La exposición a campos magnéticos intensos puede contribuir a un aumento en la sensación de fatiga, lo que puede afectar el rendimiento de los técnicos.
- **Riesgos de cáncer.** Algunos estudios han sugerido una posible relación entre la exposición prolongada a campos magnéticos y un mayor riesgo de ciertos tipos de cáncer, como leucemias y tumores cerebrales. Sin embargo, los resultados siguen siendo objeto de debate, y no existe una conclusión definitiva sobre esta asociación.

- Interferencia con el sistema nervioso. Similar a los campos eléctricos, los campos magnéticos fuertes pueden alterar la función normal de las células nerviosas. Estos efectos pueden manifestarse como dolor de cabeza, mareos y malestar general.

2.2.3.4 Medidas de protección para técnicos

Los técnicos que trabajan con redes eléctricas deben tomar medidas preventivas para minimizar la exposición a estos campos. Algunas de las mejores prácticas incluyen:

- Uso de EPP adecuado. El uso de guantes aislantes, ropa dieléctrica y cascos con protección contra campos eléctricos y magnéticos es fundamental.
- Monitoreo de la exposición: Implementar sistemas para medir y registrar la exposición a campos eléctricos y magnéticos, y asegurar que se mantengan dentro de los límites establecidos por las normativas internacionales.
- Rotación de turnos: Reducir el tiempo que cada trabajador pasa en áreas con campos magnéticos y eléctricos intensos para evitar la acumulación de efectos de largo plazo. Concienciación.
- Impartir formación continua sobre los riesgos asociados con los campos electromagnéticos y las medidas de seguridad adecuadas.

Los campos eléctricos y magnéticos son componentes clave de las redes eléctricas modernas, pero su presencia también plantea riesgos para la salud de los técnicos que operan cerca de líneas energizadas. Si bien los efectos en el corto plazo pueden ser leves, la exposición prolongada y continua a estos campos puede tener consecuencias significativas, que van desde problemas de fatiga hasta potenciales riesgos de cáncer. Es esencial que los técnicos empleen medidas de seguridad rigurosas, incluido el uso de equipo de protección personal y el monitoreo constante de los niveles de exposición, para minimizar los riesgos en su salud.

2.2.4 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es una representación de todas las posibles longitudes de onda y frecuencias de la radiación electromagnética. Desde las ondas de radio de baja frecuencia hasta los rayos gamma de alta energía, el espectro cubre un rango impresionante de tipos de radiación que son esenciales para la vida, la tecnología y la ciencia. Comprender el espectro electromagnético es fundamental en numerosos campos, incluidas la ingeniería eléctrica, la física, las comunicaciones y la medicina.

2.2.4.1 Conceptos básicos del espectro electromagnético

El espectro electromagnético abarca diferentes tipos de radiación, cada una con sus propias características y aplicaciones. Estos tipos incluyen:

- Ondas de radio: Son utilizadas principalmente en comunicaciones, como radio, televisión y telefonía móvil.
- Microondas: Empleadas en tecnología de radar y en hornos de microondas.
- Infrarrojo (IR): Asociadas con el calor y usadas en dispositivos de visión nocturna y controles remotos.
- Luz visible: La única parte del espectro que puede ser percibida por el ojo humano, que es esencial para la visión.
- Ultravioleta (UV): Tiene aplicaciones en desinfección y en la síntesis de vitamina D, pero también puede ser perjudicial para la piel.
- Rayos X: Utilizados en diagnóstico médico y en aplicaciones de seguridad.
- Rayos gamma: Generados por fuentes de alta energía como explosiones nucleares y ciertos procesos astrofísicos. Tienen usos en tratamientos de radioterapia.

2.2.4.2 Características y fórmulas clave

Longitud de onda y frecuencia

La longitud de onda (λ) y la frecuencia (f) son dos propiedades fundamentales de las ondas electromagnéticas. Están relacionadas por la velocidad de la luz (c), que es una constante en el vacío:

$$c = \lambda \cdot f$$

Donde:

- c es la velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s³),
- λ es la longitud de onda (en metros, m),
- f es la frecuencia (Hz).

Energía de un fotón

La energía de un fotón, que es la partícula elemental de la radiación electromagnética, se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$E = h \cdot f$$

Donde:

- E es la energía del fotón (en julios, J),
- h es la constante de Planck (6.626×10^{-34} J·s),
- f es la frecuencia de la onda.

Esta fórmula muestra que la energía de una onda electromagnética es directamente proporcional a su frecuencia: a mayor frecuencia, mayor es la energía del fotón. Por ejemplo, los rayos gamma, que tienen frecuencias extremadamente altas, también poseen la mayor energía dentro del espectro electromagnético.

2.2.4.3 Importancia del espectro electromagnético

El espectro electromagnético es fundamental para muchas áreas de la ciencia y la tecnología. Algunas de las razones de su importancia incluyen:

2.2.4.4 Comunicaciones y tecnología

Las ondas de radio y las microondas permiten la transmisión de información a grandes distancias. Sin estas partes del espectro no se tendría acceso a tecnologías como la radio, la televisión, el Wi-Fi y las señales de los teléfonos móviles. Las microondas también se utilizan en radares para navegación y monitoreo meteorológico.

2.2.4.6 Medicina y diagnóstico

La radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma tienen aplicaciones significativas en la medicina. Por ejemplo, los rayos X son esenciales en la imagenología médica para diagnosticar fracturas y enfermedades internas, mientras que los rayos gamma se utilizan en tratamientos de radioterapia para combatir el cáncer.

2.2.4.7 Ciencia e investigación

El estudio del espectro electromagnético les permite a los científicos observar el universo de formas que van más allá de lo visible. La astronomía, por ejemplo, se beneficia enormemente de la observación en múltiples longitudes de onda, desde el infrarrojo para estudiar la formación de estrellas, hasta los rayos X para analizar agujeros negros y otros fenómenos de alta energía.

2.2.4.8 Seguridad y control de calidad

Los rayos ultravioletas se usan en lámparas germicidas para desinfectar equipos médicos y el agua, mientras que los rayos X se utilizan en los sistemas de seguridad de los aeropuertos y en la inspección de cargas para detectar objetos peligrosos.

2.2.4.9 Desventajas y riesgos para la salud

El espectro electromagnético no solo tiene aplicaciones beneficiosas; también puede representar riesgos para la salud, especialmente en sus rangos de alta energía.

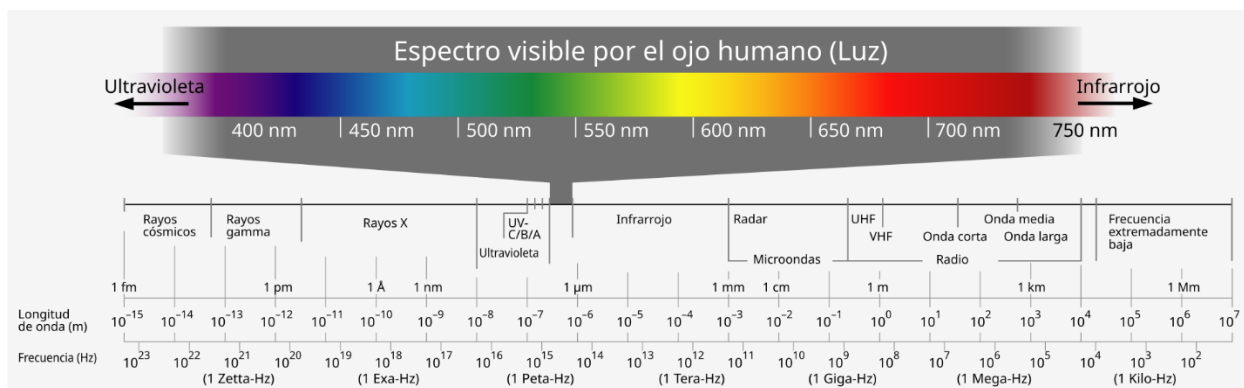


Figura 3. Espectro electromagnético

Frenzel, Louis L. (mayo de 2003). *Sistemas electrónicos de comunicaciones* (Tercera reimpresión edición). México, D. F.: Alfaomega. pp. 21 a 23.

2.2.4.10 Efectos en trabajadores en redes eléctricas

Los técnicos que trabajan cerca de líneas de transmisión eléctrica o en entornos con equipos electromagnéticos están expuestos a campos electromagnéticos de baja frecuencia (no ionizantes). Aunque estos no son tan peligrosos como los rayos X o como los rayos gamma, la exposición prolongada y en niveles elevados de estos campos puede tener efectos en la salud, como:

- Estrés y fatiga. Estudios sugieren que la exposición a campos electromagnéticos puede alterar los ritmos biológicos y contribuir a la fatiga crónica.
- Alteraciones en el sistema nervioso. Aunque la investigación está en curso, algunos informes asocian la exposición prolongada a campos electromagnéticos de baja frecuencia con trastornos neurológicos y dificultades cognitivas.
- Posibles efectos cancerígenos. Aunque la evidencia no es concluyente, la Organización Mundial de la Salud (OMS) clasifica los campos electromagnéticos de baja

frecuencia como "posiblemente cancerígenos" para los seres humanos, y destaca la necesidad de más estudios y medidas preventivas.

El espectro electromagnético es un componente esencial en nuestras vidas, con aplicaciones que van desde la comunicación hasta la medicina y la investigación científica. Sin embargo, es importante reconocer y mitigar los riesgos asociados con la exposición a la radiación, especialmente en sus formas de alta energía. La comprensión de las magnitudes, fórmulas y propiedades del espectro electromagnético permite aprovechar sus beneficios al tiempo que se adoptan medidas de protección adecuadas para evitar efectos adversos en la salud.

2.3.1 Radiaciones ionizantes

Las radiaciones ionizantes son un tipo de radiación con suficiente energía para ionizar átomos y moléculas, es decir, para arrancar electrones de los átomos con los que interactúan. Este tipo de radiación se encuentra en ciertos tipos de luz y en partículas subatómicas, y es de gran relevancia tanto en aplicaciones industriales y médicas como en contextos de salud y seguridad.

2.3.1.1 ¿Qué son las radiaciones ionizantes?

Las radiaciones ionizantes se diferencian de las no ionizantes por su capacidad de alterar la estructura atómica de los materiales con los que interactúan. Este proceso de ionización puede provocar cambios significativos en la materia, lo que hace que estas radiaciones tengan tanto usos benéficos como riesgos potenciales para la salud.

2.3.1.2 Tipos de radiaciones ionizantes

Las radiaciones ionizantes se dividen en varios tipos, incluidas:

- Radiación Alfa (α): Consiste en núcleos de helio y es relativamente pesada. Su capacidad de penetración es baja y puede ser detenida en una hoja de papel o en la piel humana, pero es peligrosa si se inhala o ingiere.

- Radiación Beta (β). Compuesta por electrones o positrones, tiene una mayor capacidad de penetración que la radiación alfa, y puede atravesar hasta algunos milímetros de piel.

- Radiación Gamma (γ). Es una forma de radiación electromagnética de alta frecuencia, extremadamente penetrante y capaz de atravesar varios centímetros de plomo.

- Rayos X: Similares a los rayos gamma pero de origen diferente (generalmente generados por la aceleración de electrones).

- Neutrones: Partículas subatómicas sin carga que pueden penetrar profundamente en los materiales y son capaces de inducir radiactividad en ciertos elementos.

2.3.1.3 Fórmulas clave asociadas con las radiaciones ionizantes

Para expresar la energía en electronvoltios (eV), una unidad más común en el campo de la radiación:

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Dosis de radiación

La dosis absorbida por un material, incluida la biológica, se mide en grays (Gy):

$$D = \frac{E}{m}$$

Donde:

- D es la dosis absorbida (en grays, Gy),
- E es la energía total absorbida (en julios, J),
- m es la masa del material absorbente (en kilogramos, kg).

Para evaluar el riesgo biológico se utiliza la dosis equivalente (H), medida en sieverts (Sv), que incluye un factor de ponderación para el tipo de radiación:

$$H = D \cdot w_R$$

Donde:

- w_R es el factor de ponderación de la radiación, que varía dependiendo del tipo de radiación.

2.3.1.4 Importancia de las radiaciones ionizantes

Aplicaciones médicas

Las radiaciones ionizantes tienen un papel crucial en la medicina, especialmente en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades:

- Rayos X. Usados ampliamente en imágenes médicas para detectar fracturas, infecciones y otras condiciones internas.
- Radioterapia. La radiación gamma y los rayos X de alta energía se utilizan en la destrucción de células cancerosas, lo que permite tratar tumores de manera localizada.
- Medicina nuclear. La administración de isótopos radiactivos permite realizar estudios de imagen avanzados, como la tomografía por emisión de positrones (PET).

Aplicaciones industriales

- Control de calidad. Las radiaciones ionizantes se utilizan en pruebas no destructivas para verificar la integridad de materiales y estructuras, como soldaduras y tuberías.
- Energía nuclear. La fisión nuclear genera grandes cantidades de energía y es una fuente de electricidad para muchas regiones del mundo.

Investigación científica

Las radiaciones ionizantes son esenciales en experimentos que buscan comprender la estructura de la materia, desde partículas subatómicas hasta estudios en física cuántica.

2.3.1.5 Desventajas y riesgos para la salud

Aunque las radiaciones ionizantes son muy útiles también tienen un impacto potencialmente negativo en la salud, especialmente cuando se manejan sin las medidas adecuadas de protección.

Daños de nivel celular

La exposición a la radiación ionizante puede causar daños directos al ADN, lo que lleva a mutaciones y, en algunos casos, al desarrollo de cáncer. La ionización puede afectar la capacidad de las células para dividirse y repararse, y puede causar la muerte celular si la dosis es suficientemente alta.

Síndrome de radiación aguda (SRA)

La exposición a altas dosis en cortos períodos puede provocar el SRA, cuyos síntomas van desde náuseas y vómitos hasta daño orgánico grave y la muerte en casos extremos.

Efectos de largo plazo

La exposición crónica a niveles más bajos de radiación ionizante puede incrementar el riesgo de cáncer y otros trastornos, como enfermedades cardiovasculares y efectos degenerativos en tejidos.

2.3.1.6 Medidas de seguridad y protección

Para minimizar los riesgos de la exposición a radiaciones ionizantes es vital adoptar medidas de seguridad, como:

- Uso de barreras de protección: plomo y otros materiales densos para minimizar la exposición.
- Equipos de protección personal (EPP): uso de delantales de plomo y dosímetros para monitorear la exposición.
- Protocolos de tiempo, distancia y blindaje: reducir el tiempo de exposición, aumentar la distancia de la fuente de radiación y usar blindaje adecuado.

Las radiaciones ionizantes son un recurso poderoso y esencial en muchos aspectos de la ciencia, la medicina y la industria. Sin embargo, debido a su capacidad para alterar la estructura de los átomos y tejidos, es necesario comprender y respetar las medidas de seguridad necesarias para proteger la salud humana y el ambiente. La balanza entre sus beneficios y riesgos depende del manejo cuidadoso y de la adherencia a normativas internacionales que aseguren el uso seguro y efectivo de este tipo de radiación.

2.3.2 Radiaciones no ionizantes

Las radiaciones no ionizantes forman parte del espectro electromagnético y abarcan desde las ondas de radio de muy baja frecuencia hasta el espectro visible y la parte más baja del ultravioleta. Al no tener suficiente energía para provocar la ionización estas radiaciones interactúan principalmente generando calor o provocando excitación de los átomos y moléculas.

2.3.2.1 Tipos de radiaciones no ionizantes

- Ondas de radio. Son usadas en la comunicación por radio, televisión y teléfonos móviles.
- Microondas. Son utilizadas en los hornos de microondas y en sistemas de comunicación por satélite y radar.
- Infrarrojo (IR). Se asocia con el calor y es empleado en controles remotos, terapia térmica y visión nocturna.
- Luz visible. Es la única parte del espectro que el ojo humano puede percibir directamente.

- Ultravioleta cercano (UVA). Aunque se considera no ionizante está cerca del umbral de energía de la ionización y es responsable del bronceado y de algunos efectos dañinos en la piel.

2.3.2.2 Fórmulas clave y características físicas

Las radiaciones no ionizantes, como otras formas de radiación electromagnética, se caracterizan por su longitud de onda (λ) y frecuencia (f). Estas dos propiedades están relacionadas por la fórmula de la velocidad de la luz:

$$c = \lambda \cdot f$$

Donde:

- c es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s),
- λ es la longitud de onda (en metros, m),
- f es la frecuencia (en hertz, Hz).

Energía de una onda electromagnética

La energía de los fotones en radiaciones no ionizantes es mucho menor que la de las radiaciones ionizantes y se puede calcular con la fórmula:

$$E = h \cdot f$$

Donde:

- E es la energía del fotón (en julios, J),
- h es la constante de Planck (6.626×10^{-34} J·s),

- f es la frecuencia de la radiación.

La energía de un fotón en radiaciones no ionizantes es insuficiente para romper enlaces químicos, pero es suficiente para generar calor o excitación molecular.

2.3.2.3 Importancia de las radiaciones no ionizantes

Aplicaciones prácticas y beneficios

Las radiaciones no ionizantes tienen numerosas aplicaciones que benefician la vida cotidiana y el avance tecnológico:

- Telecomunicaciones. Las ondas de radio y microondas son esenciales para la transmisión de datos en redes de telefonía móvil, televisión y sistemas de comunicación inalámbrica.
- Medicina. Las radiaciones infrarrojas se utilizan en terapias de calor para aliviar el dolor muscular y en dispositivos de diagnóstico. La luz ultravioleta es empleada para esterilizar equipos médicos.
- Industria y hogar. Las microondas se usan en la cocción de alimentos y en procesos industriales de secado y calentamiento.
- Seguridad y control. La luz infrarroja se usa en sistemas de monitoreo y en cámaras de visión nocturna.

Investigación y desarrollo

La investigación sobre los efectos biológicos de las radiaciones no ionizantes sigue siendo un campo en desarrollo, especialmente en cuanto al uso prolongado de dispositivos electrónicos y su posible impacto en la salud.

2.3.2.4 Desventajas y riesgos para la salud

Aunque las radiaciones no ionizantes son generalmente más seguras que las ionizantes, una exposición excesiva puede tener consecuencias negativas:

Efectos térmicos

La exposición prolongada a campos electromagnéticos de radiofrecuencia o microondas puede generar un aumento de la temperatura en los tejidos. Este efecto es aprovechado en aplicaciones médicas como la diatermia, pero en niveles descontrolados puede llevar a daños en los tejidos.

Riesgos de la luz ultravioleta

La exposición a la radiación ultravioleta, aunque no es ionizante, puede causar daño en la piel, como envejecimiento prematuro y un mayor riesgo de cáncer de piel. Los ojos también pueden ser afectados con un aumento en la probabilidad de desarrollar cataratas.

Interacción con dispositivos médicos

Los campos electromagnéticos pueden interferir con el funcionamiento de marcapasos y otros dispositivos médicos electrónicos.

2.3.2.5 Normativas y medidas de seguridad

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y otras agencias reguladoras han establecido límites de exposición y recomendaciones para minimizar el riesgo. Las medidas de seguridad incluyen:

- Uso de protecciones: dispositivos que bloquean la radiación UV o pantallas que limitan la exposición a la luz azul.
- Monitoreo y mantenimiento de equipos para garantizar que las emisiones estén dentro de los límites seguros.

- Educación y concienciación: Informar a los usuarios sobre los riesgos y las prácticas seguras para minimizar la exposición.

Las radiaciones no ionizantes juegan un papel esencial en la tecnología moderna, la medicina y la industria. Aunque tienen una reputación más segura que las radiaciones ionizantes es importante utilizarlas de manera responsable para evitar riesgos asociados con la exposición prolongada o intensa. La investigación continúa avanza para comprender completamente sus efectos de largo plazo y para garantizar que sus beneficios superen sus potenciales desventajas.

2.3.3 Interacción de campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia con el cuerpo humano

La interacción de los campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia con el cuerpo humano es un tema relevante en estudios de salud y seguridad ocupacional, especialmente para personas que trabajan en ambientes con exposición constante, como técnicos en redes eléctricas. Entender cómo estos campos afectan el cuerpo es importante para establecer límites seguros de exposición y para proteger la salud en el largo plazo.

2.3.3.1 Conceptos de campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia

Los campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia son componentes del espectro electromagnético. Estos campos se encuentran generalmente en frecuencias de 0 a 300 Hz, y es la frecuencia de la red eléctrica de 50 ó 60 Hz la más común.

- Campo eléctrico (E). Se mide en voltios por metro (V/m) y se genera por cargas eléctricas. La intensidad del campo depende de la fuente y disminuye con la distancia.
- Campo magnético (B). Se mide en teslas (T) o, más comúnmente, en microteslas (μT). Este campo se crea por el flujo de corriente eléctrica y también disminuye con la distancia.

2.3.3.2 Fórmulas relacionadas

Ley de Faraday

La relación entre un campo magnético variable y el campo eléctrico inducido se describe con base en la ley de Faraday:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Donde:

- \mathcal{E} es la fuerza electromotriz inducida (en voltios),
- Φ_B es el flujo magnético (en weber, Wb),
- $\frac{d\Phi_B}{dt}$ representa la variación del flujo magnético respecto al tiempo.

Densidad de corriente

Cuando un campo eléctrico penetra en el cuerpo humano induce una corriente eléctrica. La densidad de corriente (J) en un tejido se calcula como:

$$J = \sigma \cdot E$$

Donde:

- J es la densidad de corriente (en amperios por metro cuadrado, A/m²),
- σ es la conductividad eléctrica del tejido (en siemens por metro, S/m),
- E es la intensidad del campo eléctrico (en V/m).

2.3.3.3 Importancia y aplicaciones

Evaluación de la salud y seguridad.

La exposición a campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia es común en ciertos entornos laborales, como estaciones de alta tensión y fábricas con grandes sistemas eléctricos. La importancia de entender su interacción con el cuerpo humano radica en la posibilidad de que la exposición prolongada pueda generar efectos biológicos, como cambios en la función celular o el sistema nervioso.

Regulaciones y estándares

Organizaciones como la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) han establecido límites de exposición para proteger a los trabajadores y al público. Estos límites se basan en la densidad de corriente y en otros parámetros que aseguran que la exposición se mantenga en niveles seguros.

2.3.3.4 Interacciones con el cuerpo humano

Absorción y conducción

El cuerpo humano es un buen conductor de electricidad, y cuando está expuesto a campos eléctricos de baja frecuencia estos inducen corrientes internas que pueden interactuar con los sistemas biológicos. Las partes más sensibles incluyen el sistema nervioso y el corazón, debido a su dependencia de señales eléctricas.

Efectos biológicos

- Estimulación de tejidos. Los campos de baja frecuencia pueden inducir corrientes que estimulan tejidos, lo cual puede causar sensaciones leves o contracciones musculares si los niveles de exposición son altos.
- Potenciales efectos de largo plazo. Aunque aún se investiga, algunos estudios han sugerido una posible correlación entre la exposición prolongada a campos de baja frecuencia y los efectos en la salud, como un mayor riesgo de ciertos tipos de cáncer, como leucemias en niños y problemas neurológicos.

Impacto en la salud

La exposición a campos magnéticos fuertes puede inducir corrientes en el cuerpo que interfieran con los procesos eléctricos naturales, como los impulsos nerviosos y la contracción del músculo cardíaco. Aunque la evidencia de efectos adversos a niveles moderados de exposición es limitada, se han establecido precauciones y límites basados en estudios epidemiológicos y experimentales.

2.3.3.5 Medidas de protección y prevención

Distancia y tiempo

Reducir la exposición implica mantener una distancia segura de las fuentes de campos eléctricos y magnéticos y limitar el tiempo de exposición. Estos son principios fundamentales de protección.

Equipos de protección personal (EPP)

El uso de materiales que aíslen o desvíen campos eléctricos, como guantes y ropa protectora, es esencial para trabajadores expuestos a campos intensos.

Monitoreo y control

El monitoreo regular de los niveles de campos eléctricos y magnéticos en entornos laborales ayuda a asegurar que se mantengan dentro de los límites seguros establecidos por las normativas. Esto incluye el uso de medidores de campo y la implementación de barreras físicas si es necesario.

Los campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia son parte de la vida moderna y tienen múltiples aplicaciones, desde la transmisión de energía eléctrica hasta su uso en equipos de diagnóstico médico. Sin embargo, su interacción con el cuerpo humano, especialmente en exposiciones prolongadas y de alta intensidad, requiere atención para proteger la salud. La implementación de medidas de seguridad, la educación y la adherencia a los estándares internacionales son esenciales para minimizar los riesgos y garantizar que los beneficios de la tecnología eléctrica se utilicen de manera segura y efectiva.

2.3.4 Dosimetría del campo magnético

La dosimetría del campo magnético se refiere a la medición y evaluación de la cantidad de exposición a campos magnéticos en un entorno específico, con el objetivo de cuantificar la dosis que recibe un individuo y evaluar posibles riesgos para la salud. Esta práctica es especialmente relevante para los trabajadores que se encuentran expuestos de manera rutinaria a campos magnéticos, como los técnicos de líneas eléctricas y los operarios de equipos industriales. La dosimetría no solo mide la intensidad del campo, sino que también considera el tiempo de exposición y las propiedades de los tejidos afectados.

2.3.4.1 ¿Qué es la dosimetría del campo magnético?

La dosimetría de campos magnéticos implica la medición de la intensidad de los campos magnéticos y su interacción con el cuerpo humano. Se evalúan diferentes parámetros, como la densidad de flujo magnético (medida en teslas, T, o en microteslas, μT) y la densidad de corriente inducida en los tejidos.

Objetivo de la dosimetría

El propósito principal es asegurar que las personas no estén expuestas a niveles que puedan resultar nocivos. Esto se hace para proteger a trabajadores que enfrentan campos magnéticos generados por sistemas de potencia, líneas de transmisión de energía, transformadores y otros equipos eléctricos.

2.3.4.2 Fórmulas y principios fundamentales

Densidad de flujo magnético

La magnitud del campo magnético, o densidad de flujo magnético (B), se mide en teslas (T). Para evaluar la dosimetría es importante conocer la densidad de corriente inducida (J), la cual depende del campo eléctrico interno (E) generado por el campo magnético alterno.

$$J = \sigma \cdot E$$

Donde:

- J es la densidad de corriente (en A/m²),
- σ es la conductividad del tejido (en S/m),
- E es la intensidad del campo eléctrico inducido (en V/m).

El campo eléctrico inducido en el cuerpo por un campo magnético alterno se puede estimar usando:

$$E = v \cdot B$$

Donde:

- v es la velocidad relativa del cuerpo respecto al campo magnético (en m/s),
- B es la densidad de flujo magnético.

2.3.4.3 Importancia de la dosimetría del campo magnético

Salud y Seguridad Laboral

La dosimetría es crucial para evaluar y gestionar los riesgos asociados con la exposición ocupacional a campos magnéticos. Aunque los campos magnéticos de baja frecuencia no tienen suficiente energía para ionizar átomos, pueden inducir corrientes eléctricas en el cuerpo humano que pueden afectar funciones biológicas sensibles, como la actividad del sistema nervioso y cardiovascular.

Normativas y estándares

Las organizaciones internacionales, como la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP), han establecido límites de exposición basados en la evidencia

científica disponible. Estos límites se basan en la densidad de corriente y en la frecuencia de los campos magnéticos.

Aplicaciones prácticas

La dosimetría se aplica en:

- Monitoreo de trabajadores: Asegurar que los técnicos y operarios no excedan los límites de exposición seguros.
- Diseño de equipos de protección: Evaluar la efectividad de materiales que puedan atenuar la intensidad de los campos magnéticos.
- Investigación científica: Estudiar los efectos de largo plazo de la exposición a campos magnéticos y cómo pueden influir en la salud humana.

2.3.4.4 Desventajas y potenciales efectos en la salud

Aunque los campos magnéticos de baja frecuencia se consideran más seguros que los de alta frecuencia, la exposición prolongada a altos niveles puede inducir corrientes en el cuerpo que interfieran con los procesos biológicos naturales. Algunos de los efectos reportados incluyen:

- Estimulación de tejidos nerviosos y musculares. Corrientes inducidas en los tejidos pueden provocar una activación no deseada de los nervios y los músculos.
- Posibles efectos en el sistema cardiovascular. Las investigaciones han evaluado cómo las corrientes inducidas afectan el ritmo cardíaco y la presión arterial.
- Riesgos de enfermedades crónicas. Aunque la evidencia aún es objeto de estudio, algunos estudios han sugerido una asociación entre la exposición a campos magnéticos y un aumento en el riesgo de ciertas enfermedades, como algunos tipos de cáncer.

2.3.4.5 Métodos de medición y evaluación

Instrumentos de medición

- Medidores de campo magnético. Dispositivos que miden la densidad de flujo magnético en una ubicación específica.
- Dosímetros personales. Dispositivos portátiles que registran la exposición total que un trabajador recibe durante su jornada laboral.

Evaluación y modelado

La dosimetría no solo implica la medición directa, sino que también incluye la modelación numérica para estimar cómo los campos magnéticos interactúan con el cuerpo humano. Este enfoque ayuda a prever la distribución de las corrientes inducidas en diferentes órganos y tejidos.

La dosimetría del campo magnético es una práctica esencial para mantener la seguridad y el bienestar de los trabajadores expuestos a campos de baja frecuencia. Por medio del uso de fórmulas y técnicas de medición se pueden evaluar los riesgos y tomar medidas preventivas para minimizar posibles efectos adversos en la salud. La comprensión y gestión de estos riesgos contribuyen a crear ambientes de trabajo más seguros y a proteger a los trabajadores de posibles consecuencias en el largo plazo.

2.3.5 Métodos de cálculo de campos magnéticos

El cálculo de campos magnéticos es un proceso fundamental en la ingeniería eléctrica y en el análisis de sistemas que involucran corrientes eléctricas y dispositivos magnéticos. Comprender cómo se calculan los campos magnéticos es esencial para diseñar y mantener sistemas eléctricos seguros, eficientes y conforme a las normativas de seguridad, especialmente en contextos de trabajo con líneas energizadas y sistemas de potencia.

2.3.5.1 Fundamentos de los campos magnéticos

Los campos magnéticos son creados por corrientes eléctricas y materiales magnéticos. Se representan mediante líneas de fuerza y se caracterizan por su intensidad, dirección y sentido. El

análisis de estos campos permite evaluar la influencia que tienen en el entorno, así como la interacción con dispositivos eléctricos y seres vivos.

Unidad de medida

- La densidad de flujo magnético (B) se mide en teslas (T), mientras que la intensidad del campo magnético (H) se mide en amperios por metro (A/m).

La relación entre B y H en un medio es:

$$B = \mu H$$

donde μ es la permeabilidad magnética del medio (en henrios por metro, H/m).

2.3.5.2 Métodos de cálculo de campos magnéticos

Ley de Biot-Savart

La ley de Biot-Savart es uno de los métodos más fundamentales para calcular el campo magnético generado por una corriente eléctrica en un punto específico. La fórmula es:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\ell \times \hat{r}}{r^2}$$

Donde:

- dB es el campo magnético infinitesimal,
- μ_0 es la permeabilidad del vacío ($4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$),
- I es la corriente que circula (en amperios, A),
- $d\ell$ es el elemento infinitesimal de la corriente,

- \hat{r} es el vector unitario desde el elemento de corriente al punto en donde se calcula el campo,
- r es la distancia entre el elemento de corriente y el punto de cálculo.

Aplicación. Este método se utiliza comúnmente en el análisis de campos generados por corrientes en conductores rectos, circulares y solenoides.

Ley de Ampère

La ley de Ampère es útil para calcular el campo magnético en configuraciones con alta simetría, como bobinas y solenoides. Su forma integral es:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I_{\text{enc}}$$

Donde:

- \oint_C es la integral de línea alrededor de un camino cerrado,
- \vec{H} es el campo magnético,
- $d\vec{\ell}$ es un elemento diferencial del contorno,
- I_{enc} es la corriente encerrada por el contorno.

Para un solenoide largo con n vueltas por unidad de longitud y corriente I , el campo magnético dentro se calcula como:

$$H = nI \quad \text{y} \quad B = \mu nI$$

Aplicación. Esta ley es particularmente eficaz en la evaluación de sistemas en donde el campo magnético tiene simetría circular o lineal.

Método numérico: Método de los Elementos Finitos (FEM)

El método de los elementos finitos es una técnica numérica que se utiliza para calcular campos magnéticos en geometrías complejas en donde los métodos analíticos no son aplicables. Este método divide el dominio en pequeños elementos finitos y resuelve ecuaciones diferenciales de Maxwell de forma aproximada.

Ventajas:

- Permite modelar materiales con diferentes propiedades magnéticas.
- Puede manejar condiciones de borde y geometrías complejas.

Aplicación: Utilizado en la ingeniería eléctrica para diseñar transformadores, motores eléctricos y otros equipos en lo que el análisis preciso del campo magnético es necesario.

2.3.5.3 Importancia de calcular campos magnéticos

Seguridad Ocupacional y Salud

El cálculo preciso de campos magnéticos es necesario para proteger a los trabajadores expuestos, como los técnicos de redes eléctricas. Los campos magnéticos de alta intensidad pueden inducir corrientes eléctricas en el cuerpo humano y afecta potencialmente la salud, especialmente en el largo plazo.

Diseño y mantenimiento de equipos eléctricos

Un cálculo adecuado garantiza el diseño de sistemas eléctricos que operen de manera eficiente y segura, para evitar pérdidas energéticas y fallos mecánicos. También permite identificar puntos críticos en equipos eléctricos en los que se puedan producir sobrecalentamientos o mal funcionamiento debido a campos magnéticos intensos.

Cumplimiento normativo

Las normativas internacionales, como las establecidas por la ICNIRP y otras entidades reguladoras, exigen que los campos magnéticos se mantengan dentro de niveles seguros. Calcular

estos campos ayuda a cumplir con dichas regulaciones y a implementar medidas de mitigación cuando sea necesario.

2.3.5.4 Desafíos y desventajas en el cálculo

Complejidad de los modelos

El cálculo preciso de campos magnéticos en configuraciones tridimensionales y con materiales no homogéneos puede ser un desafío. Se requieren herramientas computacionales avanzadas y modelado detallado para obtener resultados precisos.

Limitaciones de modelos analíticos

Las fórmulas analíticas como las derivadas de las leyes de Biot-Savart y Ampere tienen aplicaciones limitadas a casos de alta simetría. Para geometrías más complicadas se deben usar métodos numéricos como el FEM.

El cálculo de campos magnéticos es una práctica esencial en múltiples campos de la ingeniería y la física aplicada. Desde proteger la salud de los trabajadores hasta diseñar equipos y cumplir con normativas, el análisis y el cálculo preciso de campos magnéticos permiten comprender mejor los efectos de las corrientes eléctricas en el entorno y en los sistemas biológicos. La combinación de métodos analíticos y numéricos asegura que este proceso sea eficiente y adaptado a las necesidades de cada aplicación.

2.4 Norma ICNIRP

Los límites de exposición a campos electromagnéticos en las líneas de media tensión están definidos por organizaciones como la ICNIRP (Comisión Internacional de Protección contra Radiación no Ionizante), y son importantes para proteger la salud de las personas que viven cerca de estas líneas o trabajan en su mantenimiento.

Las líneas de media tensión suelen operar a frecuencias de 50/60 Hz (la misma frecuencia que la corriente eléctrica de uso doméstico), y, en general, los límites de exposición están establecidos para dos grupos: el público en general y los trabajadores que están más expuestos.

1. Para el público en general:

- El límite de exposición a los campos eléctricos es de 5 kV/m. Esto significa que el campo eléctrico de las líneas de media tensión no debe superar este valor en áreas accesibles al público.
- En cuanto a los campos magnéticos, el límite es de 100 microteslas (μT) a 50/60 Hz. Este es el valor máximo al que una persona puede estar expuesta sin que se presenten riesgos para la salud en el corto o el largo plazo.

2. **Para los trabajadores** (personas que trabajan cerca de las líneas o en su mantenimiento):

- El límite de exposición a los campos eléctricos para ellos es mayor, de 10 kV/m.
- En cuanto a los campos magnéticos, los trabajadores pueden estar expuestos a un límite mucho más alto, de hasta 1,000 μT .

Estos límites están diseñados para prevenir efectos negativos en la salud, como el calentamiento de los tejidos o posibles impactos en el largo plazo. Sin embargo, en la mayoría de los casos, los niveles de exposición a las líneas de media tensión estas están muy por debajo de estos límites, lo que asegura que no hay riesgos significativos para la salud.

2.4.1 Historia

Historia de la Norma ICNIRP

La Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP, por sus siglas en inglés) es una organización independiente que se ha convertido en un referente mundial en la evaluación y la creación de directrices para proteger a las personas de los efectos perjudiciales de la exposición a la radiación no ionizante. Desde su fundación en 1992, la ICNIRP ha trabajado para desarrollar guías basadas en la evidencia científica más actualizada, y ha abarcado todo el espectro de la radiación no ionizante, que incluye campos electromagnéticos de baja frecuencia y ondas de radiofrecuencia.

Desarrollo de las Directrices ICNIRP

La ICNIRP surgió como una evolución del Comité Internacional de Radiación no Ionizante de la Asociación Internacional de Protección Radiológica (IRPA). A medida que crecía la preocupación por los posibles riesgos de la exposición a campos electromagnéticos, la necesidad de un

organismo especializado que pudiera proporcionar directrices precisas y basadas en la ciencia se hizo evidente. La ICNIRP fue fundada para llenar este vacío y garantizar que las regulaciones estuvieran fundamentadas en la investigación científica revisada por pares.

Las primeras directrices publicadas por la ICNIRP en 1998 se enfocaron en la protección contra la exposición a campos electromagnéticos de hasta 300 GHz. Estas normas establecieron límites de exposición para proteger tanto a trabajadores como a la población general. Las recomendaciones de la CNIRP se basan en estudios epidemiológicos y experimentales y modelos teóricos, en los que se analizan la interacción de la radiación con el cuerpo humano y sus posibles efectos.

Revisiones y actualizaciones

Con el tiempo, la ICNIRP ha actualizado sus directrices en respuesta a nuevos hallazgos científicos y avances en la tecnología. En el 2020, la ICNIRP publicó una revisión significativa de sus directrices de 1998 para las frecuencias de radio, e incorporó más de 20 años de nuevos estudios y evidencias. Las revisiones incluyeron evaluaciones más detalladas de la exposición a campos electromagnéticos y consideraron los posibles efectos de corto y largo plazo en la salud, y aseguró que los límites de exposición seguirán siendo seguros para la población.

Importancia de las directrices de la ICNIRP

Las directrices de la ICNIRP son utilizadas por gobiernos y organizaciones de salud en el nivel global como la base para establecer normas nacionales e internacionales de seguridad. Estas normas ayudan a mitigar los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos, especialmente para trabajadores en sectores como el de la energía eléctrica y las telecomunicaciones, en donde la exposición es mayor.

El enfoque de la ICNIRP se caracteriza por ser un análisis exhaustivo de la literatura científica para asegurar que las recomendaciones reflejen la mejor evidencia disponible. Esto incluye evaluar

tanto los efectos térmicos como los no térmicos de la exposición y considerar diferentes niveles de sensibilidad en la población, como niños y personas con condiciones preexistentes.

La historia de la ICNIRP muestra una evolución constante impulsada por el compromiso de proteger la salud pública por medio de un enfoque científico sólido. Sus directrices continúan siendo esenciales para garantizar la seguridad en ambientes de trabajo y en la vida diaria, a fin de establecer un estándar mundial que se adopta y adapta en todo el mundo.

2.4.2 Campo de acción

La Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP) se centra en la protección de la salud humana frente a los posibles efectos adversos de la radiación no ionizante (RNI). La ICNIRP abarca una gama de campos electromagnéticos que incluyen desde frecuencias extremadamente bajas (ELF) hasta radiofrecuencias (RF) y radiación ultravioleta (UV). Su campo de acción implica la revisión de estudios científicos y la emisión de directrices de exposición que informan sobre políticas y prácticas de seguridad en el nivel global.

1. Ámbito de acción y cobertura

El trabajo de la ICNIRP abarca diferentes tipos de radiación no ionizante, incluyendo:

- Campos electromagnéticos de baja frecuencia. Estos campos se encuentran en infraestructuras como líneas eléctricas y aparatos eléctricos. La ICNIRP investiga y emite guías sobre los niveles seguros de exposición para evitar efectos como la estimulación nerviosa y muscular.
- Radiofrecuencias. La expansión de tecnologías como el Wi-Fi, la telefonía móvil y el 5G ha incrementado la importancia de evaluar los efectos de la exposición a estas frecuencias.

La ICNIRP proporciona límites basados en datos experimentales para prevenir el sobrecalentamiento de tejidos y otros impactos adversos.

- Radiación ultravioleta. Aunque no forma parte de las ondas electromagnéticas de frecuencia baja o media, la ICNIRP también aborda las directrices sobre la exposición a la radiación ultravioleta debido a su relación con problemas como el cáncer de piel y otros daños cutáneos y oculares.

2. Funciones y directrices de la ICNIRP

La principal función de la ICNIRP es evaluar investigaciones científicas para elaborar directrices que protejan a las personas de los efectos nocivos de la RNI. Estas directrices tienen en cuenta tanto los efectos agudos como la estimulación nerviosa y térmica, como los posibles efectos crónicos que puedan surgir de exposiciones en el largo plazo.

La metodología de la ICNIRP implica la revisión sistemática de estudios epidemiológicos y experimentales. Por ejemplo, las directrices de 1998 y las revisiones posteriores de 2020 han establecido límites precisos para la exposición a campos de radiofrecuencia, lo que refleja los avances en la comprensión científica de los efectos térmicos y no térmicos de la radiación electromagnética (ICNIRP, 2020).

3. Importancia del campo de acción de la ICNIRP

La relevancia del trabajo de la ICNIRP es fundamental para garantizar la seguridad en la exposición a campos electromagnéticos. Las guías emitidas por esta comisión son adoptadas por gobiernos y agencias de salud pública en todo el mundo, y sirven como base para la legislación y las normas de seguridad en la instalación de infraestructuras eléctricas y de telecomunicaciones.

Además, el trabajo de la ICNIRP contribuye a la uniformidad de los estándares de seguridad y a la confianza del público en el que la exposición a CEM, como los generados por antenas de telecomunicaciones o líneas de transmisión eléctrica, se mantiene dentro de límites considerados seguros.

El campo de acción de la ICNIRP es amplio y vital para la protección de la salud pública frente a los efectos de la radiación no ionizante. Al establecer directrices basadas en la evidencia científica más reciente, la ICNIRP desempeña un papel clave en la reducción de riesgos y en la formulación de políticas de seguridad de nivel mundial.

2.4.3 Cantidades y unidades

La Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP) establece directrices precisas sobre la exposición a campos electromagnéticos, que especificando las cantidades y unidades que se deben emplear para medir y controlar dicha exposición. Estas cantidades permiten estandarizar la evaluación de los efectos de los campos electromagnéticos en la salud humana, y garantizan la comparación y aplicación coherente de los límites de seguridad.

1. Magnitudes utilizadas en las directrices del ICNIRP

Las cantidades que la ICNIRP utiliza para evaluar la exposición a campos electromagnéticos varían según el rango de frecuencia y el tipo de exposición. Las principales magnitudes y unidades incluyen:

- Densidad de potencia (W/m^2): Esta magnitud se utiliza principalmente para campos de radiofrecuencia (RF), especialmente en frecuencias superiores a 10 MHz, en que los efectos térmicos son significativos. La densidad de potencia mide la cantidad de potencia por unidad de área y se expresa en vatios por metro cuadrado (W/m^2).
- Campo eléctrico (V/m): En frecuencias más bajas, como las generadas por líneas eléctricas y dispositivos electrónicos, se emplea el campo eléctrico para medir la intensidad del campo en voltios por metro (V/m). Esta magnitud es relevante para evaluar la exposición en ambientes de trabajo y áreas residenciales cercanas a fuentes de alta tensión.
- Campo magnético (A/m o μT). En el caso de campos de baja frecuencia, como los que provienen de líneas eléctricas de 50/60 Hz, la intensidad del campo magnético se mide en amperios por metro (A/m) o en microteslas (μT). Los efectos biológicos de estos campos,

como la inducción de corrientes en el cuerpo humano, se cuantifican utilizando estas unidades.

- Tasa de absorción específica (SAR). Para frecuencias de RF, la ICNIRP también especifica la SAR, que mide la cantidad de energía absorbida por el tejido corporal por unidad de masa y se expresa en vatios por kilogramo (W/kg). Este parámetro es esencial para evaluar la exposición en dispositivos móviles y otras fuentes cercanas al cuerpo humano.

2. Unidades de medición y límites de exposición

La ICNIRP establece límites de exposición basados en estas magnitudes para proteger a las personas de los efectos adversos de los campos electromagnéticos. Por ejemplo:

- Para frecuencias de 0-1 Hz se establecen límites de densidad de flujo magnético que no deben superar ciertos valores en microteslas (μT) para evitar la estimulación de nervios y músculos.
- En el caso de frecuencias de 100 kHz a 300 GHz, los límites de densidad de potencia se establecen para evitar el sobrecalentamiento de los tejidos, con valores que no deben superar los 10 W/m^2 en exposiciones ocupacionales y de 2 W/m^2 para la población general (ICNIRP, 2020).

3. Importancia de las magnitudes y unidades en la seguridad

El uso de estas magnitudes y unidades permite un control efectivo de la exposición a campos electromagnéticos y la implementación de medidas preventivas adecuadas. Las directrices de la ICNIRP han sido adoptadas por numerosos países y organizaciones internacionales para garantizar la seguridad de los trabajadores y de la población en general, lo que proporciona un marco estandarizado y científicamente validado.

Las cantidades y unidades utilizadas ayudan a los profesionales de la salud y la seguridad laboral, así como a los ingenieros y científicos, a evaluar correctamente los niveles de exposición, y a

aplicar límites que protejan la integridad física de las personas expuestas a campos electromagnéticos en diversos contextos.

Las cantidades y unidades empleadas en las directrices de la ICNIRP son esenciales para la evaluación precisa de la exposición a campos electromagnéticos y para garantizar la seguridad de las personas. La estandarización en la medición y la aplicación de estos parámetros facilitan la adopción de prácticas seguras en la industria y en la vida cotidiana.

2.4.4 Mecanismos de acoplamiento entre campos y el cuerpo

Los campos electromagnéticos (CEM) interactúan con el cuerpo humano de diferentes maneras, dependiendo de la frecuencia y la intensidad del campo, así como de las características del cuerpo humano. La Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP) ha desarrollado directrices que abordan estos mecanismos de acoplamiento, con el fin de identificar los efectos potenciales en la salud y de establecer límites seguros de exposición. Estos mecanismos son fundamentales para entender cómo los CEM pueden afectar el cuerpo humano y cómo proteger a las personas de posibles daños.

1. Mecanismos de acoplamiento de campos eléctricos

El cuerpo humano es conductor, lo que significa que los campos eléctricos pueden inducir corrientes en los tejidos biológicos. Según las directrices de la ICNIRP, el acoplamiento de un campo eléctrico con el cuerpo humano puede ocurrir de dos formas principales:

- Inducción de corrientes de conducción. Los campos eléctricos de alta frecuencia pueden inducir corrientes de conducción en los tejidos del cuerpo. Estas corrientes pueden afectar los sistemas nervioso y muscular, y causar estímulos eléctricos. Los efectos son especialmente notables en las frecuencias de 10 MHz a 100 GHz, en que las corrientes inducidas pueden provocar calentamiento o interferir con la actividad nerviosa. La ICNIRP

establece límites específicos de exposición para evitar estos efectos, basados en la tasa de absorción específica (SAR).

- Desplazamiento de cargas. Los campos eléctricos pueden desplazar las cargas dentro de las células del cuerpo humano, lo que puede alterar las funciones celulares y generar efectos biológicos en el nivel celular. Este mecanismo es especialmente relevante en exposiciones de baja frecuencia (por ejemplo, campos eléctricos de 50/60 Hz generados por redes eléctricas). La ICNIRP también establece límites para minimizar la exposición a estos campos y evitar efectos como la estimulación nerviosa o muscular.

2. Mecanismos de acoplamiento de campos magnéticos

Los campos magnéticos interactúan con el cuerpo humano de una manera diferente a la de los campos eléctricos. El cuerpo no es directamente conductor de los campos magnéticos, pero estos pueden inducir corrientes eléctricas dentro de los tejidos por medio del fenómeno de inducción electromagnética. Este proceso es más evidente a frecuencias de 50 Hz a 100 kHz (por ejemplo, en redes eléctricas de media tensión). Los mecanismos clave de acoplamiento de campos magnéticos son:

- Inducción de corrientes eléctricas en el cuerpo. Cuando el cuerpo humano está expuesto a un campo magnético variable, este puede inducir corrientes en los tejidos conductores. Según las directrices de la ICNIRP, estas corrientes inducidas pueden interferir con el sistema nervioso, inducir efectos térmicos o afectar los sistemas celulares. El nivel de riesgo depende de la intensidad del campo magnético y de la duración de la exposición.
- Efectos en el sistema nervioso. Los campos magnéticos de baja frecuencia pueden inducir efectos sobre el sistema nervioso, como la estimulación de nervios y músculos. En exposiciones de alta intensidad esto podría resultar en movimientos involuntarios, que en entornos industriales como redes eléctricas pueden representar un riesgo para la seguridad de los trabajadores. Para evitar estos efectos la ICNIRP establece límites claros de exposición a campos magnéticos, especialmente en entornos ocupacionales.

3. Efectos térmicos y no térmicos

Los efectos de los campos electromagnéticos en el cuerpo humano se dividen generalmente en dos categorías: efectos térmicos y efectos no térmicos.

- Efectos térmicos. Los campos de alta frecuencia (especialmente los de radiofrecuencia) tienen el potencial de calentar los tejidos del cuerpo humano, lo que puede causar quemaduras o daños a los órganos internos si la exposición es excesiva. La ICNIRP se enfoca en la tasa de absorción específica (SAR) para establecer límites de exposición a estas frecuencias, a fin de garantizar que el calentamiento de los tejidos no supere umbrales peligrosos.
- Efectos no térmicos. Los efectos no térmicos son más difíciles de identificar, pero incluyen la alteración de las funciones biológicas de las células, como el sistema nervioso y los procesos metabólicos. En este ámbito la ICNIRP establece límites de exposición para prevenir alteraciones genéticas, carcinogenicidad y otros efectos de largo plazo, basándose en la investigación científica disponible.

4. Directrices y límites de exposición de la ICNIRP

La ICNIRP ha publicado límites de exposición detallados basados en estos mecanismos de acoplamiento. Estos límites se dividen en dos categorías principales:

- Límites de exposición ocupacional. Se aplican a los trabajadores que están expuestos a campos electromagnéticos en su entorno de trabajo, como los técnicos de líneas eléctricas. Estos límites permiten niveles más altos de exposición, ya que los trabajadores están capacitados y protegidos con equipos de seguridad.
- Límites de exposición para el público en general. Estos límites son más restrictivos, ya que están destinados a proteger a la población en general, que no está necesariamente equipada o capacitada para exponerse a campos electromagnéticos.

Los límites establecidos por la ICNIRP se basan en un enfoque preventivo que garantizan que los campos electromagnéticos no causen efectos adversos de corto o de largo plazo.

El estudio de los mecanismos de acoplamiento entre los campos electromagnéticos y el cuerpo humano es esencial para entender cómo los CEM pueden afectar la salud. Las directrices de la ICNIRP proporcionan un marco clave para la protección de los trabajadores y de la población en general. Al establecer límites específicos de exposición basados en la ciencia, la ICNIRP ayuda a reducir los riesgos relativos a los campos electromagnéticos y promueve la seguridad en entornos industriales y cotidianos.

2.4.5 Base biológica para limitar la exposición (hasta 100 kHz)

La Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP) establece directrices que se fundamentan en una sólida base biológica para garantizar la protección de la salud humana frente a los posibles efectos adversos de la exposición a campos electromagnéticos (CEM), en especial aquellos de baja frecuencia, de hasta 100 kHz. Las exposiciones a estos campos son particularmente relevantes en contextos como el de las redes eléctricas de media tensión, en que los trabajadores, como los técnicos de líneas energizadas, están potencialmente expuestos a estos campos.

1. Fundamentos biológicos de la exposición a campos electromagnéticos de baja frecuencia

Los campos electromagnéticos de baja frecuencia (de hasta 100 kHz) incluyen a aquellos generados por infraestructuras eléctricas y equipos que operan en rangos de frecuencias como 50/60 Hz, típicos de la energía eléctrica. La base biológica que justifica la necesidad de establecer límites de exposición para estos campos se centra principalmente en dos aspectos:

- Inducción de corrientes eléctricas en los tejidos humanos: A frecuencias bajas, como las generadas por redes eléctricas de media tensión (50/60 Hz), los campos electromagnéticos inducen corrientes en el cuerpo humano. Estas corrientes pueden generar efectos biológicos, como la estimulación de los nervios y músculos, lo que puede ser peligroso en ciertas condiciones. La ICNIRP considera la posibilidad de que estas corrientes puedan provocar sensaciones de hormigueo, contracciones musculares involuntarias, y, en

exposiciones más intensas, efectos más graves como la interferencia con el sistema nervioso y la función muscular.

- Efectos térmicos. Aunque los campos de baja frecuencia (hasta 100 kHz) no tienen el mismo potencial térmico que los de alta frecuencia (como los de radiofrecuencia), las corrientes inducidas en el cuerpo pueden generar un pequeño aumento de temperatura en los tejidos. Este aumento es generalmente mínimo a las frecuencias más bajas, pero la ICNIRP evalúa los efectos térmicos por medio de la tasa de absorción específica (SAR), y establece límites para evitar que el calentamiento de los tejidos alcance niveles peligrosos.

2. Mecanismos de interacción y efectos biológicos

El principal mecanismo de interacción entre los campos electromagnéticos y el cuerpo humano en el rango de hasta 100 kHz es la inducción de corrientes eléctricas. A frecuencias bajas, las corrientes inducidas por los campos pueden interferir con las funciones biológicas, ya que las células y los tejidos conductores del cuerpo responden a estos campos y generan sus propias corrientes internas.

- Corrientes de baja frecuencia. A frecuencias de 50/60 Hz las corrientes inducidas en el cuerpo humano pueden afectar el sistema nervioso y muscular. La ICNIRP se centra en los efectos potenciales de estas corrientes para garantizar que las exposiciones ocupacionales no superen niveles que puedan causar efectos adversos inmediatos, como contracciones musculares involuntarias o alteraciones en la transmisión nerviosa.
- Estimulación nerviosa. La ICNIRP reconoce que a frecuencias de 50 Hz y 60 Hz los campos eléctricos y magnéticos pueden inducir corrientes en el cuerpo humano que afectan el sistema nervioso. Esto puede manifestarse en formas como el "efecto de corriente de paso", que puede ser incómodo o incluso peligroso para los trabajadores que estén expuestos a estos campos de manera prolongada.
- Efectos en la salud en el largo plazo. Aunque los efectos inmediatos de la exposición a campos de baja frecuencia (como la estimulación nerviosa) son bien conocidos, la ICNIRP también considera los posibles efectos de largo plazo, como el riesgo de enfermedades relacionadas con el cáncer. Sin embargo, hasta la fecha la evidencia científica en cuanto a

la relación causal entre la exposición a campos electromagnéticos de baja frecuencia y ciertos tipos de cáncer es incierta. Por ello, la ICNIRP opta por un enfoque preventivo, y recomienda límites estrictos de exposición basados en la evidencia disponible.

3. Límites de exposición propuestos por la ICNIRP

Para proteger a los trabajadores y a la población general, la ICNIRP establece límites de exposición en función de la intensidad del campo electromagnético. Estos límites se basan en los efectos biológicos identificados por medio de estudios experimentales y epidemiológicos que están diseñados para evitar los efectos adversos, tanto térmicos como no térmicos.

- Límites ocupacionales. La ICNIRP establece límites más altos para los trabajadores, ya que se asume que están expuestos a campos electromagnéticos de manera controlada y laboran con equipos de protección adecuada. En este sentido, los límites ocupacionales para campos magnéticos de 50/60 Hz son más altos que de la población general, ya que los trabajadores suelen estar mejor capacitados y protegidos.
- Límites para la población general. Para la población en general, la ICNIRP establece límites más bajos para minimizar el riesgo de exposición prolongada, ya que muchas personas no están familiarizadas con los riesgos de la exposición y no utilizan medidas preventivas o de protección.

En el caso de campos eléctricos de hasta 100 kHz, la ICNIRP propone límites de exposición basados en la corriente inducida en los tejidos, con el objetivo de evitar efectos adversos de corto y largo plazos, como la estimulación nerviosa, la alteración de las funciones musculares o los efectos térmicos.

La base biológica para limitar la exposición a campos electromagnéticos de baja frecuencia (de hasta 100 kHz), como los generados por las redes eléctricas de media tensión, es esencial para proteger la salud de los trabajadores y de la población en general. La ICNIRP juega un papel crucial al establecer directrices basadas en la mejor evidencia científica disponible, lo que permite

una regulación adecuada de la exposición y garantiza la seguridad frente a los efectos adversos de los CEM.

2.5 Norma OMS

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), los límites establecidos para la exposición a campos electromagnéticos en líneas de media tensión están basados en la recomendación de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICNIRP, por sus siglas en inglés), que toma en cuenta investigaciones científicas sobre los posibles efectos de estos campos en la salud humana.

Para líneas de media tensión, que generalmente operan a voltajes de entre 1 kV y 36 kV, la exposición a campos eléctricos y magnéticos se mide de acuerdo con los límites de referencia para los diferentes tipos de frecuencia.

Límites para exposición a campos eléctricos:

- En frecuencias de 50/60 Hz (frecuencia estándar de las redes eléctricas), el límite de exposición para campos eléctricos es de 10 kV/m para la población general, mientras que para trabajadores expuestos el límite es de 30 kV/m.

Límites para exposición a campos magnéticos:

- En cuanto a los campos magnéticos, el límite de exposición para la población general es de 200 μ T (microteslas) para frecuencias de 50/60 Hz, y para los trabajadores expuestos el límite es de 1,000 μ T.

Estos límites están establecidos para garantizar que la exposición a los campos electromagnéticos no cause efectos adversos a la salud, tales como efectos térmicos (calor) o no térmicos (como posibles alteraciones biológicas). Es importante tener en cuenta que estas normas son aplicables a la exposición directa y prolongada a campos eléctricos y magnéticos generados por las líneas de media tensión, especialmente en áreas cercanas a los cables de distribución.

La OMS y la ICNIRP continúan monitoreando la investigación científica para ajustar estas recomendaciones en función de nuevos hallazgos, con el fin de proteger la salud pública.

2.5.1 Normas y recomendaciones internacionales.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) desempeña un papel crucial en la promoción de la salud pública a nivel global, y establece directrices y recomendaciones internacionales en diversas áreas, incluida la exposición a campos electromagnéticos (CEM). Estos campos, generados por

diversas fuentes como líneas eléctricas, teléfonos móviles y dispositivos electrónicos, tienen un impacto directo en la salud humana, especialmente en un mundo cada vez más dependiente de la tecnología. La OMS ha adoptado un enfoque precautorio para la exposición a los CEM, alineándose con otras organizaciones internacionales como la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP), para proteger a la población de efectos adversos potenciales.

1. Contexto y necesidad de normas internacionales sobre campos electromagnéticos

Con el aumento de la exposición a los CEM debido al crecimiento de las tecnologías de comunicación, la electrificación y el uso de dispositivos inalámbricos, la preocupación por sus posibles efectos en la salud ha aumentado. Diversos estudios científicos han planteado inquietudes sobre los efectos de los CEM en el cuerpo humano, que podrían ir desde efectos térmicos hasta posibles efectos no térmicos, como alteraciones en las funciones celulares. En este contexto, la OMS establece directrices internacionales para proporcionar un marco de seguridad que minimice los riesgos asociados con la exposición a los CEM.

La OMS, por medio de su Programa de Mediciones y Evaluaciones de Campos Electromagnéticos, ha colaborado con expertos y organismos internacionales para desarrollar normas de exposición que ayuden a prevenir los efectos adversos, como la inducción de corrientes en los tejidos, el calentamiento de ellos y la estimulación nerviosa.

2. Normas y recomendaciones internacionales

La OMS se basa en las directrices establecidas por la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP) para establecer límites de exposición a los CEM. Estas directrices están fundamentadas en una extensa revisión de la literatura científica y en la evaluación de los efectos biológicos de los campos electromagnéticos en el cuerpo humano. Entre las principales recomendaciones de la OMS sobre la exposición a campos electromagnéticos se encuentran las siguientes:

- Límites de exposición. La OMS adopta los límites de exposición establecidos por la ICNIRP, que incluyen recomendaciones específicas para los diferentes tipos de CEM (de baja frecuencia, radiofrecuencia, etc.). Estos límites están diseñados para prevenir los efectos adversos en la salud, como el calentamiento de los tejidos y la estimulación nerviosa, para asegurar que las exposiciones no excedan los niveles que podrían causar efectos biológicos peligrosos.
- Enfoque precautorio. En áreas en donde no se dispone de evidencia científica suficiente sobre los efectos de los CEM. La OMS promueve un enfoque precautorio. Esto implica tomar medidas para reducir la exposición, incluso cuando los efectos no estén completamente confirmados, como una forma de proteger a la población mientras se realizan más estudios.
- Evaluación de riesgos y monitoreo continuo. La OMS recomienda la implementación de sistemas de monitoreo para evaluar los niveles de CEM a los que las personas están expuestas, especialmente en áreas de alta exposición, como en zonas cercanas a líneas eléctricas de alta tensión o en ambientes urbanos densamente poblados. Este monitoreo debe ir acompañado de investigaciones continuas sobre los posibles efectos de largo plazo, como el cáncer, los trastornos neurológicos y otros problemas de salud.
- Investigación y educación pública. Además de las recomendaciones técnicas, la OMS subraya la importancia de la educación pública sobre los riesgos potenciales de los CEM, la promoción de investigaciones científicas adicionales y la evaluación de los efectos a largo plazo de la exposición a estos campos. Este enfoque integral busca reducir los temores infundados y al mismo tiempo garantizar que la población esté informada sobre cómo minimizar su exposición.

3. Impacto de las normas de la OMS en el contexto global

Las recomendaciones de la OMS tienen un impacto significativo en las políticas públicas y en normativas locales. Muchos países se alinean con las directrices internacionales para proteger a su población de los riesgos asociados con los CEM, particularmente en áreas relacionadas con la tecnología inalámbrica, la infraestructura eléctrica y los dispositivos electrónicos.

Por ejemplo, en muchos países de Europa, América y Asia los límites de exposición a los CEM están establecidos de acuerdo con las recomendaciones de la ICNIRP, como una forma de garantizar que las personas, especialmente los trabajadores de sectores como las redes eléctricas, no estén expuestos a niveles peligrosos de campos electromagnéticos. Además, la OMS enfatiza la importancia de una evaluación de riesgos ocupacionales en sectores como la industria eléctrica, en que los trabajadores, como los técnicos de líneas energizadas, pueden estar expuestos a campos electromagnéticos de baja frecuencia.

4. Desafíos y consideraciones para el futuro

A pesar de las directrices y de las normas establecidas por la OMS y otras organizaciones, siguen existiendo desafíos en la implementación efectiva de límites de exposición, principalmente debido a la rápida expansión de nuevas tecnologías que generan CEM. En este contexto, la actualización continua de las directrices es fundamental para adaptarse a los avances tecnológicos y a los resultados de las investigaciones científicas.

La OMS también reconoce la importancia de colaborar con gobiernos, científicos y expertos para asegurar que las políticas de salud pública se mantengan alineadas con las últimas evidencias científicas y que las medidas preventivas sean lo suficientemente eficaces como para proteger la salud de la población.

Las normas y recomendaciones internacionales establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en relación con los campos electromagnéticos son fundamentales para la protección de la salud pública. Por medio de directrices claras y de un enfoque precautorio la OMS trabaja para minimizar los riesgos asociados con la exposición a estos campos, especialmente en un contexto del creciente uso de tecnologías que emiten CEM. La colaboración internacional, la investigación continua y la educación pública son esenciales para asegurar que se mantenga un equilibrio entre el progreso tecnológico y la protección de la salud humana.

2.6 Norma IEEE

Según el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), las normas para los límites de exposición a campos electromagnéticos generados por las líneas de media tensión (generalmente

en el rango de 1 kV a 36 kV) se basan en la recomendación de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICNIRP) y en la revisión de la investigación científica sobre los posibles efectos de la exposición a campos eléctricos y magnéticos.

En general, el IEEE sigue los parámetros establecidos por la ICNIRP para campos de frecuencias de 50/60 Hz, que son los utilizados en las redes de distribución eléctrica. A continuación se describen los límites de exposición recomendados en la norma IEEE para las líneas de media tensión:

Límites para campos eléctricos:

- Exposición pública (población general). Los límites de exposición a campos eléctricos para la población general son de 5 kV/m para frecuencias de 50/60 Hz.
- Exposición ocupacional (trabajadores). Para trabajadores expuestos el límite es de 10 kV/m para frecuencias de 50/60 Hz.

Límites para campos magnéticos:

- Exposición pública (población general). El límite de exposición a campos magnéticos para la población general es de 100 μ T (microteslas), a una frecuencia de 50/60 Hz.
- Exposición ocupacional (trabajadores). El límite para los trabajadores es de 1,000 μ T a 50/60 Hz.

Consideraciones adicionales:

1. **Zonas de seguridad.** El IEEE también establece directrices sobre las zonas de seguridad alrededor de las líneas de transmisión de media tensión, dependiendo de la intensidad de los campos electromagnéticos. Estas zonas están diseñadas para minimizar la exposición, especialmente en áreas de acceso público.
2. **Medición de la exposición.** Para cumplir con estos límites es importante medir la exposición a los campos electromagnéticos en áreas cercanas a las líneas de media tensión, ya que los valores pueden variar dependiendo de la proximidad a los conductores y de las características del terreno.

Estos límites y directrices buscan proteger la salud de las personas al reducir los riesgos asociados con la exposición prolongada a campos electromagnéticos de baja frecuencia y generados por las redes eléctricas. El IEEE continúa recomendando un enfoque basado en la precaución y la evaluación de riesgos cuando se trata de la exposición a estos campos.

Historia

El AIEE: Innovación en la electricidad

El Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos (AIEE) fue fundado en 1884, en una época en la que la electricidad comenzaba a integrarse en las ciudades y fábricas, en la transformación de la vida cotidiana y de los métodos de producción. Algunos de los miembros más ilustres del AIEE fueron figuras históricas como Thomas Edison, conocido por inventar la bombilla eléctrica, y Alexander Graham Bell, pionero en las telecomunicaciones con su trabajo en el teléfono. Este instituto se centró en estandarizar prácticas y compartir conocimientos en un sector que estaba en plena expansión.

El IRE: la revolución de las comunicaciones

En 1912, cuando la tecnología de la radio se convirtió en un área de investigación importante, se fundó el Instituto de Ingenieros de Radio (IRE). Esta organización atrajo a profesionales y académicos interesados en el desarrollo y la aplicación de tecnologías de comunicación inalámbrica. Los avances en la radio no solo impulsaron nuevas formas de comunicación, sino que también sentaron las bases para la futura revolución electrónica y de las telecomunicaciones.

La fusión y el nacimiento del IEEE

El IEEE, como lo conocemos hoy, fue creado en 1963, cuando el AIEE y el IRE se fusionaron para formar una sola entidad que representara tanto los campos tradicionales de la ingeniería eléctrica, como las áreas emergentes de la electrónica y la comunicación. Esta fusión fue un paso lógico debido a la creciente convergencia entre la electricidad y la tecnología de las comunicaciones.

Desarrollo y expansión de normas IEEE

Desde su formación, el IEEE ha desarrollado y promovido estándares que han moldeado la manera en que las tecnologías se aplican y operan en la vida diaria y en la industria. Estas normas cubren una amplia gama de áreas, desde la generación y distribución de energía eléctrica hasta las telecomunicaciones y la informática.

Proceso de desarrollo de normas

El desarrollo de normas en el IEEE es un proceso colaborativo que involucra a expertos de la industria, académicos y profesionales que trabajan juntos para definir y estandarizar prácticas que aseguren la compatibilidad, la seguridad y la eficiencia. El proceso incluye:

- Formación de grupos de trabajo. Se reúne a expertos para abordar una necesidad o problema específico.
- Revisión y consenso. Se elaboran borradores y se realizan revisiones para asegurar que la norma propuesta refleje un consenso general.
- Aprobación y publicación. Una vez completado el proceso de revisión la norma es aprobada y publicada, y en ella se establece un nuevo estándar por seguir.

Ejemplos destacados de normas

- IEEE 802.3 (Ethernet). Establece los parámetros para redes de área local (LAN) que utilizan tecnología de cableado Ethernet. Es fundamental para la comunicación de datos en redes empresariales y domésticas.
- IEEE 1547. Es una norma crucial para la integración de fuentes de energía distribuida, como sistemas solares y eólicos, con la red eléctrica principal. Esta norma facilita la transición hacia sistemas de energía más sostenibles y resilientes.
- IEEE 802.11 (Wi-Fi). Define los protocolos para la transmisión de datos inalámbricos y permite la conectividad que se usa en hogares, oficinas y espacios públicos.

Importancia de las normas IEEE en la sociedad moderna

Interoperabilidad y compatibilidad

Uno de los mayores aportes de las normas IEEE es la garantía de interoperabilidad entre diferentes dispositivos y sistemas. Esto es crucial en un mundo globalizado, en donde las tecnologías de distintos fabricantes deben funcionar juntas y sin problemas. Las normas IEEE establecen directrices claras que aseguran que los productos cumplan con ciertos criterios de calidad y seguridad.

Seguridad y salud ocupacional

En sectores como la energía y las telecomunicaciones las normas IEEE ayudan a minimizar riesgos laborales y protegen la salud de los trabajadores. Los estándares de diseño y operación garantizan que los sistemas eléctricos se construyan y mantengan de manera que reduzcan la exposición a peligros como las sobrecargas y los fallos mecánicos.

Innovación y progreso tecnológico

El IEEE no solo sigue las tendencias tecnológicas, sino que a menudo las lidera. Los estándares proporcionan una base sólida sobre la cual las empresas y las instituciones pueden innovar. Por ejemplo, en áreas emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) y la inteligencia artificial (IA), las normas IEEE permiten un desarrollo coherente que beneficia tanto a los desarrolladores como a los usuarios.

Relevancia global y futuro del IEEE

El IEEE sigue siendo una de las fuerzas más influyentes en el ámbito de la ingeniería y la tecnología. Sus normas se aplican en todo el mundo y son fundamentales para el comercio internacional y el desarrollo tecnológico. A medida que la tecnología evoluciona, el IEEE continúa adaptándose y desarrollando nuevas normas que aborden las necesidades cambiantes de la sociedad, desde la inteligencia artificial y la ciberseguridad hasta la sostenibilidad ambiental y las energías renovables.

Introducción a los campos electromagnéticos en redes eléctricas de MT

Las redes eléctricas de media tensión, que típicamente operan en rangos de 1 kV a 36 kV, son componentes clave en la distribución de electricidad, desde las subestaciones de alta tensión hasta los consumidores finales o subestaciones de baja tensión. En estas redes la generación de campos eléctricos y magnéticos es inherente a la corriente alterna que circula a través de los

conductores. Estos campos varían en magnitud dependiendo de la intensidad de la corriente y del diseño de las instalaciones.

Los campos eléctricos en redes de MT se generan por la presencia de voltaje y pueden alcanzar magnitudes de varios kilovoltios por metro (kV/m). Por su parte, los campos magnéticos son resultado del flujo de corriente y se miden en unidades de tesla (T) o microtesla (μ T).

Importancia de las normas IEEE para la exposición a campos electromagnéticos

Las normas de IEEE, como la IEEE C95.1, establecen límites de exposición seguros para proteger a los trabajadores y al público en general. Estas normas son el resultado de décadas de investigación y evaluación científica de los efectos de los CEM en la salud humana.

Protección de trabajadores

Los técnicos de líneas de media tensión que realizan trabajos de mantenimiento y operación están expuestos a niveles variables de CEM, especialmente al trabajar en líneas energizadas o cerca de transformadores y subestaciones. La IEEE C95.1 establece límites que consideran:

- Exposición ocupacional. Define niveles máximos permisibles para personas que trabajan regularmente en ambientes con alta exposición a CEM.
- Exposición general. Se aplica a individuos que no trabajan en contacto directo con equipos eléctricos, con límites más restrictivos para garantizar su protección.

Límites de exposición a campos magnéticos de baja frecuencia (50/60 Hz):

- La norma IEEE C95.1 establece un límite de exposición ocupacional de 1 mT (militesla) para trabajadores, mientras que el límite para el público general es de 0.2 mT. Estos valores aseguran que la exposición esté por debajo de los niveles asociados con efectos biológicos adversos.

Fundamentos Técnicos y fórmulas relacionadas con los CEM

El comportamiento y la medición de los campos eléctricos y magnéticos en redes de MT se rigen por principios de la física electromagnética.

Campo eléctrico

El campo eléctrico (EEE) generado por un conductor de media tensión se puede expresar como:

$$E = \frac{V}{d}$$

Donde:

- V es el voltaje en los conductores (en voltios),
- d es la distancia desde el conductor al punto de medición (en metros).

Campo magnético

El campo magnético (B) depende de la corriente (I) que fluye por el conductor y se calcula mediante la ley de Biot-Savart, o usando una aproximación más sencilla para líneas rectas:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

Donde:

- μ_0 es la permeabilidad del vacío ($4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A),
- d es la distancia al punto de medición (en metros).

Estas fórmulas son esenciales para evaluar el nivel de exposición y diseñar medidas de protección adecuadas.

Impacto en la salud de Técnicos de redes eléctricas

El trabajo en proximidad a equipos que generan CEM de media tensión puede tener implicaciones para la salud, aunque la evidencia científica de los efectos en el largo plazo sigue siendo objeto de investigación. Algunos de los riesgos asociados con la exposición prolongada incluyen:

- Efectos térmicos. A niveles altos de exposición los CEM pueden generar un aumento en la temperatura de los tejidos. Sin embargo, en redes de MT este efecto es poco probable, a menos que los niveles de exposición superen los límites establecidos por la IEEE C95.1.
- Efectos no térmicos. Aunque más controvertidos, algunos estudios han sugerido posibles efectos neurológicos y hormonales asociados con la exposición a campos magnéticos de baja frecuencia.

Medidas de protección y cumplimiento de normas

La implementación de medidas de protección es fundamental para reducir la exposición a CEM en entornos de trabajo. Algunas prácticas recomendadas incluyen:

- Diseño y ubicación de líneas y equipos. Mantener una distancia adecuada entre los conductores y las áreas de trabajo para reducir la intensidad del campo.
- Uso de equipos de protección personal (EPP). Aunque el EPP no es efectivo para bloquear los CEM puede proteger de otros riesgos asociados con el trabajo en redes eléctricas.
- Entrenamiento y capacitación. Garantizar que los trabajadores estén informados sobre las mejores prácticas para minimizar la exposición y cumplan con las normas de seguridad.

Rangos de exposición de los CEM

La exposición a CEM en entornos de trabajo, como es el caso de los técnicos que operan en redes de MT, se mide y evalúa con base en parámetros de intensidad de campo eléctrico y magnético. Las normas IEEE, en particular la IEEE C95.1, proporcionan los límites de exposición basados en la frecuencia del campo, ya que el impacto biológico varía significativamente según este factor.

Límites de exposición establecidos

La norma IEEE C95.1 cubre un rango amplio de frecuencias, desde 0 Hz (campos estáticos) hasta 300 GHz (frecuencias de microondas y más allá). Para los técnicos de redes eléctricas de MT las frecuencias de interés suelen estar en el rango de 50/60 Hz, que corresponden a la frecuencia de la corriente alterna utilizada en la mayoría de los sistemas eléctricos de distribución.

Principales Límites de exposición para trabajadores ocupacionales

Los límites de exposición a CEM para trabajadores, según la IEEE C95.1, son más permisivos que los establecidos para el público general, ya que se asume que los trabajadores están capacitados y entrenados para manejar situaciones de riesgo de manera adecuada. Sin embargo, estos límites están diseñados para prevenir efectos adversos en la salud, tanto en el corto plazo (efectos agudos) como en el largo plazo (efectos crónicos).

Límites de campo eléctrico

- Campo eléctrico en frecuencia de 50/60 Hz. Para trabajadores ocupacionales el límite máximo permisible es de aproximadamente 10 kV/m. Este límite está basado en la necesidad de evitar efectos adversos como la percepción de corrientes inducidas y el estrés de carga.

Límites de campo magnético

- Campo magnético en frecuencia de 50/60 Hz. La norma establece un límite ocupacional de 1 mT (militesla). Este valor se considera seguro para evitar efectos agudos y se ajusta con base en los estudios sobre efectos biológicos, como el impacto en la función nerviosa y muscular.

Impacto de la exposición a campos electromagnéticos en la salud

El cuerpo humano interactúa con los CEM de distintas maneras, dependiendo de la frecuencia y de la intensidad del campo. Los estudios revisados por la IEEE han establecido que la exposición a campos de baja frecuencia, como los presentes en las redes de MT, puede inducir corrientes eléctricas dentro del cuerpo, y que en niveles altos pueden afectar la función celular y los sistemas nervioso y muscular.

Efectos potenciales en técnicos de redes de MT

- Efectos agudos. Incluyen sensaciones de hormigueo o pequeños choques eléctricos en la piel debidos a las corrientes inducidas.
- Efectos crónicos. Aunque la evidencia es menos concluyente, estudios han explorado la posibilidad de que la exposición prolongada a campos magnéticos de baja frecuencia esté asociada con un riesgo mayor de ciertas condiciones de salud, como problemas cardiovasculares y algunos tipos de cáncer. Sin embargo, los límites de la IEEE C95.1 están diseñados para estar muy por debajo de los niveles en los que estos riesgos podrían materializarse.

Medidas de protección y cumplimiento

La adherencia a los límites de la IEEE C95.1 y otras normas relacionadas es fundamental para proteger a los técnicos que trabajan en entornos de alta exposición, como las subestaciones y líneas de media tensión. Algunas de las estrategias de protección incluyen:

- Monitoreo y evaluación periódica de la exposición: Uso de dispositivos de medición de campo eléctrico y magnético para verificar que las condiciones de trabajo cumplan con los límites de la norma.
- Capacitación y uso de prácticas seguras: Instruir a los trabajadores sobre cómo minimizar su tiempo de exposición y mantener una distancia segura de las fuentes de CEM.
- Diseño de instalaciones: Planificación y construcción de líneas y subestaciones que consideren la distribución y la intensidad de los CEM para evitar sobreexposiciones.

Importancia de las normas IEEE en la industria eléctrica

Las normas como la IEEE C95.1 son esenciales no solo para proteger la salud de los trabajadores, sino también para establecer un estándar internacional que permita la uniformidad en la seguridad laboral. Cumplir con estas normas asegura que las empresas de energía y los gobiernos puedan operar con un marco regulador sólido y actualizado, respaldado por la comunidad científica y técnica.

El cumplimiento de la IEEE C95.1 y otras normas de exposición a CEM es esencial para proteger la salud de los técnicos en redes eléctricas de media tensión. Estas normas ofrecen un marco basado en evidencia científica que les permite a las empresas garantizar condiciones de trabajo seguras, al tiempo que mantienen la operatividad y la eficiencia de sus sistemas de distribución eléctrica.

Las normas IEEE C95.1 y otras relacionadas son esenciales para la gestión de la exposición a campos electromagnéticos en redes eléctricas de media tensión. Estas directrices no solo protegen a los trabajadores sino que también contribuyen a un entorno de trabajo seguro y eficiente. La comprensión y la aplicación de estas normas aseguran que las operaciones en las redes de MT se realicen de forma responsable y segura.

Introducción a los CEM en redes de media tensión en Costa Rica

El sistema eléctrico de Costa Rica incluye una red de distribución que abarca líneas de media tensión, generalmente en operación en el rango de 13.8 kV a 34.5 kV. Estos sistemas son fundamentales para la transmisión de electricidad a través de regiones urbanas y rurales, y generan campos electromagnéticos debido al flujo de corriente alterna (AC) a 50/60 Hz. Esta frecuencia, común en la mayoría de las redes de distribución, es la principal fuente de exposición a CEM para los técnicos que trabajan en estas líneas.

Normas IEEE Aplicadas a la exposición ocupacional en Costa Rica

Aunque Costa Rica cuenta con regulaciones locales en materia de seguridad laboral, el país se apoya en las normas internacionales de IEEE para establecer criterios de exposición. La IEEE C95.1, titulada "*Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz*" es una de las normas más utilizadas para regular la exposición ocupacional y pública.

Límites de exposición en la Norma IEEE C95.1

La norma IEEE C95.1 define límites de exposición basados en la frecuencia del campo. Para el caso de los técnicos en redes de media tensión en Costa Rica la frecuencia de 50/60 Hz se considera de baja frecuencia, y los límites de exposición son los siguientes:

- Campo eléctrico. El límite de exposición ocupacional es de 10 kV/m, un nivel seguro que ayuda a prevenir la percepción de corrientes inducidas y la carga superficial.
- Campo magnético. Para los trabajadores el límite máximo es de 1 mT (militesla). Esta medida está pensada para evitar efectos biológicos inmediatos y garantizar que las condiciones de trabajo se mantengan dentro de un rango seguro.

Estos límites se basan en investigaciones sobre los efectos térmicos y no térmicos de la exposición a CEM, que asegura que no se alcancen umbrales en los que pueda haber consecuencias adversas para la salud, como alteraciones neurológicas o de la función celular.

Relevancia de los CEM en el trabajo de técnicos en redes de MT

Los técnicos de líneas energizadas en Costa Rica deben llevar a cabo tareas como mantenimiento, instalación y reparación de equipos, que los colocan en proximidad directa a fuentes de CEM. La exposición constante, aunque se mantenga dentro de los límites establecidos por la IEEE C95.1, puede acumularse a lo largo del tiempo y requerir monitoreo y gestión adecuada.

Impacto de la Exposición de la Salud y Medidas de Seguridad

El cuerpo humano puede reaccionar de distintas formas a la exposición prolongada a CEM de baja frecuencia. Los estudios han demostrado que los efectos más comunes incluyen la inducción de corrientes eléctricas en los tejidos, que pueden ser percibidas como ligeros choques u hormigueos, pero también existe preocupación por posibles efectos en el largo plazo.

Desventajas y riesgos potenciales

- Efectos agudos. La exposición a niveles altos de CEM puede causar efectos como corrientes inducidas en la piel y sensaciones de descarga.
- Efectos de largo plazo. Aunque la evidencia científica sobre la asociación entre la exposición a campos de 50/60 Hz y enfermedades crónicas sigue siendo objeto de estudio, se ha considerado que la exposición controlada es una medida prudente para prevenir posibles riesgos.

Las medidas de protección adoptadas en Costa Rica incluyen:

- Monitoreo continuo de los niveles de CEM en áreas de trabajo.
- Capacitación y entrenamiento de los trabajadores para la identificación de riesgos y la aplicación de medidas de minimización de exposición.
- Equipos de protección y protocolos operativos que incluyen la distancia segura y el uso de equipos de monitoreo personal de exposición.

Implementación y cumplimiento de las normas IEEE en Costa Rica

El uso de la norma IEEE C95.1 y otras relacionadas con ella en Costa Rica asegura que las empresas eléctricas y los técnicos operen bajo un marco de seguridad internacionalmente reconocido. La adopción de estas normas implica no solo la protección de los trabajadores sino también el fortalecimiento de la cultura de seguridad y salud ocupacional en el sector eléctrico del país.

La Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), entre otros, aplican prácticas basadas en las directrices de IEEE, complementadas con inspecciones y estudios locales que ayudan a adaptar estas normas a las condiciones específicas del entorno costarricense.

Las normas IEEE C95.1 y sus actualizaciones son esenciales para regular la exposición de los técnicos a campos electromagnéticos en redes eléctricas de media tensión. En Costa Rica, la aplicación de estos estándares no solo garantiza la protección de los trabajadores, sino que también alinea al país con las mejores prácticas internacionales en seguridad eléctrica.

Normativas y prácticas internacionales aplicadas a Costa Rica

Las regulaciones internacionales establecen límites claros sobre la exposición a campos electromagnéticos y las prácticas seguras para el trabajo en líneas aéreas de media tensión. En Costa Rica, estas normativas han sido adoptadas e implementadas en gran medida por la CNFL y otras empresas distribuidoras, que siguen los lineamientos de seguridad de la IEC y el IEEE. Las regulaciones incluyen requisitos para el uso de equipos de protección personal, la capacitación de los técnicos en técnicas seguras de trabajo y la evaluación constante de los riesgos asociados con la exposición a CEM.

Además, en el contexto de las redes aéreas de media tensión las normativas también hacen hincapié en la planificación adecuada de los corredores de servicio, la instalación de dispositivos de protección contra sobrecargas y descargas atmosféricas, y la implementación de programas de mantenimiento preventivo para asegurar la estabilidad y fiabilidad de las líneas.

Las mejores prácticas internacionales también promueven el uso de tecnologías inteligentes en la gestión de las redes de media tensión, como la automatización de la detección de fallas y la implementación de sistemas de monitoreo remoto, lo que permite una respuesta más rápida a las interrupciones del servicio y una mejora en la eficiencia operativa.

Proponer recomendaciones de seguridad y medidas preventivas para minimizar los riesgos en la salud derivados de la exposición a campos electromagnéticos en los técnicos, en cumplimiento de las normas.

Los técnicos que trabajan en redes eléctricas de media tensión (MT) enfrentan una exposición constante a campos electromagnéticos (CEM), lo que plantea la necesidad de adoptar medidas preventivas y prácticas de seguridad rigurosas para minimizar los riesgos de la salud. Estas recomendaciones se basan en la normativa internacional de la IEEE C95.1 y en otras guías de seguridad laboral, y buscan garantizar que los límites de exposición se mantengan dentro de rangos seguros.

1. Monitoreo y evaluación periódica de la exposición

Es fundamental implementar programas de monitoreo regular para medir los niveles de CEM en los entornos de trabajo y garantizar que se cumpla con los límites establecidos en las normas IEEE. El uso de dispositivos de medición calibrados permite una evaluación precisa de los niveles de campo eléctrico y magnético.

Recomendación: Realizar evaluaciones trimestrales en las áreas de trabajo de mayor exposición y registrar los resultados para seguimiento y ajustes en los protocolos de seguridad.

2. Capacitación y educación continua

La formación constante de los técnicos es clave para minimizar los riesgos relacionados con la exposición a CEM. Los programas de capacitación deben incluir información sobre los riesgos potenciales de la exposición prolongada y las técnicas para reducirla.

Recomendación: Organizar e impartir talleres y cursos de actualización que aborden los efectos de los CEM en la salud, las prácticas seguras y la correcta utilización de equipos de protección personal (EPP).

3. Uso de equipos de protección personal (EPP)

El uso adecuado de equipos de protección personal es una medida efectiva para limitar la exposición a campos electromagnéticos. Los EPP incluyen guantes y ropa conductiva, que pueden ayudar a reducir la cantidad de corriente inducida en el cuerpo.

Recomendación: Proveer y exigir el uso de EPP especialmente diseñado para trabajos en ambientes con alta exposición a CEM, para asegurar que se cumpla con las especificaciones de la IEEE C95.1.

4. Diseño y planeación de la jornada laboral

Reducir el tiempo de exposición es una estrategia fundamental para proteger la salud de los técnicos. Planificar tareas que requieran contacto cercano a fuentes de CEM, de manera que se intercalen con periodos de menor exposición.

Recomendación: Implementar un sistema de rotación de tareas y limitar la duración de las actividades en áreas de alta exposición para mantener los niveles de dosis dentro de los límites seguros.

5. Distancia segura y medidas de aislamiento

Aumentar la distancia entre el trabajador y la fuente de emisión de CEM es una de las formas más efectivas de reducir la exposición. Además, utilizar barreras de protección y equipos de trabajo con aislamiento adecuado contribuye a proteger a los técnicos.

Recomendación: Emplear dispositivos de extensión y herramientas que permitan operar a una distancia mayor de las fuentes de CEM.

Instalar barreras de aislamiento en las áreas de mayor emisión.

6. Uso de tecnología de monitoreo personal

Los dispositivos de monitoreo personal permiten que los técnicos estén conscientes de los niveles de exposición en tiempo real y tomen decisiones inmediatas para reducir los riesgos.

Recomendación: Invertir en tecnología portátil que permita medir la exposición a CEM proporciona alertas si los niveles superan los límites seguros definidos por la IEEE C95.1.

Importancia de las medidas preventivas

Implementar estas recomendaciones no solo asegura el cumplimiento de las normas internacionales, sino que protege la salud en el largo plazo de los técnicos y promueve un entorno de trabajo seguro. Reducir la exposición a CEM ayuda a prevenir efectos adversos como la inducción de corrientes eléctricas en el cuerpo, que pueden causar molestias inmediatas y potenciales efectos crónicos, cuya relación con enfermedades específicas todavía es objeto de estudio.

La protección de los técnicos que trabajan en redes de media tensión debe ser una prioridad. Las normas IEEE C95.1 proporcionan una guía esencial para establecer límites de exposición seguros e implantar prácticas preventivas. Seguir estas directrices y adoptar medidas adicionales de

seguridad contribuye a un entorno de trabajo más seguro y a la preservación de la salud de los trabajadores.

Campos electromagnéticos generados por las líneas eléctricas de alta tensión. Posibles efectos en la salud.

Campos electromagnéticos y su interacción con la materia

Las líneas de media tensión (MT), que transportan energía en rangos que van desde 1 kV hasta aproximadamente 69 kV, son una parte vital de la infraestructura de distribución eléctrica. Estas líneas no solo generan la energía necesaria para abastecer diversas regiones sino que también producen campos electromagnéticos (CEM) de baja frecuencia, que interactúan con la materia de diversas maneras. El estudio de estas interacciones es crucial para entender los efectos potenciales en la salud humana, los materiales y el ambiente.

1. Naturaleza de los campos electromagnéticos generados por líneas de MT

Los campos electromagnéticos producidos por las líneas de MT pueden clasificarse en:

- Campo eléctrico (E). Surge debido al voltaje en los conductores y se mide en voltios por metro (V/m). Los campos eléctricos de las líneas de MT se extienden al entorno inmediato, pero son más fáciles de atenuar o bloquear mediante barreras físicas, como muros y materiales dieléctricos.
- Campo magnético (B). Este campo se genera a partir del flujo de corriente eléctrica en los cables y se mide en teslas (T) o microteslas (μT). A diferencia del campo eléctrico, el campo magnético penetra fácilmente la mayoría de los materiales y disminuye de intensidad con la distancia de la fuente.

Ambos campos tienen una frecuencia de 50 o 60 Hz, dependiendo de la región, lo que los clasifica como campos de frecuencia extremadamente baja (ELF).

2. Mecanismos de interacción con la materia

La forma en que los CEM interactúan con la materia varía según el tipo de material y la naturaleza del campo:

Interacción con materiales conductores

Los materiales conductores, como los metales, son sensibles tanto a los campos eléctricos como a los magnéticos:

- Inducción de corrientes. Los campos magnéticos variables inducen corrientes eléctricas en los materiales conductores. Este fenómeno es la base de operaciones en dispositivos como transformadores y motores eléctricos. Sin embargo, en el entorno de las líneas de MT la inducción puede generar corrientes no deseadas, que requieren medidas de mitigación para proteger los equipos y asegurar la estabilidad de las operaciones.
- Efecto Joule. Las corrientes inducidas producen calor mediante el efecto Joule, lo que puede causar un aumento de la temperatura en los materiales conductores y afectar su rendimiento si la exposición es prolongada.

Interacción con materiales dieléctricos

Los materiales dieléctricos, que no conducen la electricidad, tienen una respuesta distinta:

- Polarización eléctrica. En presencia de un campo eléctrico los materiales dieléctricos experimentan un desplazamiento de las cargas eléctricas que genera una polarización interna. Este fenómeno es relevante para el aislamiento de los equipos eléctricos, ya que influye en su capacidad de mantener la seguridad y la eficiencia operativa.
- Absorción de energía. Aunque los campos eléctricos de baja frecuencia no tienen la energía suficiente para ionizar átomos, pueden inducir efectos de acumulación de carga en la superficie de los materiales.

Interacción con el cuerpo humano

Los campos electromagnéticos interactúan con el cuerpo humano de varias formas:

- Corrientes inducidas. El cuerpo humano, al ser un conductor de baja resistencia, puede experimentar corrientes inducidas cuando se encuentra en un campo magnético de baja frecuencia. Estas corrientes, aunque generalmente son de baja magnitud, pueden interferir con los sistemas nervioso y muscular si los niveles de exposición superan ciertos umbrales.
- Efectos térmicos y no térmicos. Aunque los CEM de baja frecuencia no producen efectos térmicos significativos, algunos estudios sugieren que pueden afectar los procesos biológicos en el nivel celular, como la permeabilidad de las membranas y la actividad enzimática.

3. Importancia de la interacción de los campos electromagnéticos con la materia

El estudio de la interacción de los CEM generados por las líneas de MT con la materia (cuerpo humano) es esencial en varios aspectos:

- Seguridad de los trabajadores. Para los técnicos que operan cerca de las líneas de MT es necesario conocer los posibles efectos de la exposición prolongada a campos electromagnéticos. Las normativas de seguridad, como la IEEE C95.1, proporcionan directrices para limitar la exposición y proteger la salud de los trabajadores.
- Diseño de infraestructuras. Comprender cómo los CEM afectan a diferentes materiales permite a los ingenieros diseñar líneas y equipos eléctricos que minimicen las pérdidas de energía y mejoren la eficiencia.
- Impacto ambiental. Los CEM pueden tener implicaciones en el ambiente y en la fauna, particularmente en especies que dependen de la percepción de campos eléctricos y magnéticos para orientarse y sobrevivir.

4. Normas y medidas de seguridad

Las normativas internacionales, como las de la IEEE y la ICNIRP, establecen límites de exposición para garantizar la seguridad en el entorno de trabajo:

- Exposición ocupacional. Los límites para los trabajadores en entornos de MT generalmente permiten una mayor exposición que los límites para la población en general, pero están diseñados para evitar corrientes inducidas que puedan ser peligrosas para la salud.
- Medidas de mitigación. Las estrategias incluyen el uso de barreras de protección, el aumento de la distancia entre las líneas y los trabajadores, y la implementación de prácticas seguras, como la rotación de tareas para minimizar la exposición acumulada.

La interacción de los CEM generados por las líneas de media tensión con la materia es un fenómeno que tiene implicaciones tanto prácticas como de seguridad. La comprensión de cómo estos campos afectan los materiales y a los seres vivos es esencial para garantizar un entorno de trabajo seguro y eficiente, así como para el diseño de infraestructuras que minimicen los riesgos. Las normativas internacionales actúan como una guía fundamental para la implementación de medidas de protección adecuadas.

Estudios sobre la salud.

La exposición a campos electromagnéticos (CEM), particularmente los generados por líneas eléctricas de media y de alta tensión, ha sido objeto de numerosos estudios debido a las preocupaciones sobre sus posibles efectos en la salud humana. Estos estudios se centran en evaluar los riesgos potenciales, tanto para la población en general como para los trabajadores que operan en entornos con alta exposición.

1. Riesgos y efectos potenciales de la exposición a CEM

Efectos a corto plazo

Los efectos agudos de la exposición a campos electromagnéticos de baja frecuencia son generalmente bien comprendidos y se asocian principalmente con la inducción de corrientes eléctricas en el cuerpo humano. Estos efectos pueden incluir:

- Estimulación muscular y nerviosa. La exposición a altos niveles de campos magnéticos puede inducir corrientes en los tejidos biológicos, lo que provoca la contracción involuntaria de músculos y la estimulación de nervios (ICNIRP, 2020).
- Sensaciones de cosquilleo. En exposiciones por encima de ciertos umbrales los campos eléctricos pueden generar sensaciones menores en la piel debido a la carga superficial.

Efectos en el largo plazo

Los posibles efectos de largo plazo de la exposición a campos electromagnéticos de baja frecuencia han sido más difíciles de establecer. En los estudios se ha analizado la relación entre la exposición prolongada y condiciones como:

- Leucemia infantil. Algunas investigaciones han sugerido una posible asociación entre la exposición a campos magnéticos de baja frecuencia y un aumento en el riesgo de leucemia en niños. Sin embargo, esta relación aún es objeto de debate y no se ha confirmado un mecanismo biológico claro (World Health Organization [WHO], 2007).
- Cáncer en adultos. La evidencia de la relación entre la exposición a campos electromagnéticos y otros tipos de cáncer en adultos es menos concluyente, y se considera insuficiente para establecer una causalidad (Kheifets *et al*, 2010).

Otros efectos potenciales

Algunos estudios han explorado la posibilidad de que la exposición crónica a campos electromagnéticos pueda influir en:

- Problemas neurológicos. Se ha propuesto que la exposición prolongada podría afectar funciones cognitivas o contribuir a trastornos neurológicos, aunque los resultados no han sido consistentes (Huss *et al.*, 2009).
- Efectos cardiovasculares. La exposición a altos niveles de campos electromagnéticos podría influir en la frecuencia cardíaca y en la presión arterial, pero la evidencia no es concluyente (Parazzini *et al*, 2014).

2. Normas y directrices de exposición

Las normativas internacionales, como las establecidas por la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) y la IEEE, fijan límites de exposición que buscan proteger contra los efectos conocidos de los CEM. Estas regulaciones se basan en estudios que examinan umbrales de exposición seguros para evitar corrientes inducidas peligrosas en el cuerpo humano y otros efectos adversos (IEEE, 2023; ICNIRP, 2020).

3. Conclusiones de los estudios y recomendaciones

Los estudios sobre la exposición a campos electromagnéticos han generado recomendaciones específicas para la protección de los trabajadores, como:

- Monitoreo regular. Implementar controles y monitoreos de los niveles de exposición en lugares de trabajo para asegurar el cumplimiento de los límites establecidos.
- Uso de equipos de protección. La utilización de ropa aislante y dispositivos de protección ayuda a reducir la exposición directa.
- Rotación de tareas. Reducir el tiempo de exposición de los trabajadores mediante la rotación de tareas para minimizar el impacto acumulativo.

Estudios epidemiológicos

La investigación epidemiológica sobre la exposición a campos electromagnéticos (CEM) ha generado un debate considerable en la comunidad científica, especialmente en lo que respecta a los posibles efectos en la salud derivados de la exposición a campos generados por infraestructuras eléctricas. Estos estudios han abordado principalmente la asociación entre la exposición prolongada a campos de baja frecuencia y el desarrollo de enfermedades crónicas como el cáncer y los trastornos neurológicos.

1. Estudios sobre leucemia infantil

Uno de los focos más destacados en la literatura epidemiológica ha sido la posible relación entre la exposición a campos magnéticos y la incidencia de leucemia en niños. Un meta-análisis realizado por Ahlbom *et al* (2000) encontró que los niños expuestos a campos magnéticos superiores a 0.4 μ T tenían un riesgo dos veces mayor de desarrollar leucemia, comparado con aquellos expuestos a niveles más bajos. Aunque los resultados sugieren una asociación, la falta de un mecanismo biológico claro ha dificultado establecer una causalidad.

2. Cáncer en adultos

En cuanto a la incidencia de cáncer en adultos los estudios han presentado resultados mixtos. Un estudio de cohortes realizado por Kheifets *et al* (2010) actualizó dos meta-análisis previos y llegó a la conclusión de que, aunque se han observado algunas asociaciones entre la exposición ocupacional a CEM y ciertos tipos de cáncer, la evidencia aún es insuficiente para confirmar una relación causal. En este trabajo se destacó la necesidad de seguir investigando con diseños más robustos y controles adecuados.

3. Trastornos neurológicos

Los estudios epidemiológicos también han explorado la posible relación entre la exposición a CEM y el desarrollo de trastornos neurológicos. Huss *et al* (2009) llevaron a cabo un estudio longitudinal en Suiza en el que se examinó la relación entre la proximidad a líneas eléctricas de alta tensión y la mortalidad por enfermedades neurodegenerativas. Los resultados indicaron una asociación potencial con el desarrollo de enfermedades como el Alzheimer, aunque se enfatizó que los hallazgos necesitaban más investigaciones para confirmarse.

4. Limitaciones de los estudios epidemiológicos

Aunque muchos estudios han encontrado asociaciones, la interpretación de estos resultados debe ser cuidadosa debido a limitaciones comunes en la investigación epidemiológica:

- Sesgos de selección y confusión: Pueden influir en los resultados y dificultar la identificación de una relación causal clara.
- Variabilidad en la medición de la exposición: La metodología utilizada para medir los niveles de exposición a CEM a menudo varía, lo que complica la comparación de los resultados entre estudios.

La evidencia epidemiológica ha sugerido posibles asociaciones entre la exposición a campos electromagnéticos y algunos efectos en la salud, especialmente en lo que respecta a la leucemia infantil y a ciertas enfermedades neurodegenerativas. Sin embargo, la falta de un mecanismo biológico claro y las limitaciones metodológicas de los estudios han hecho que los expertos sean cautelosos al sacar conclusiones definitivas. La necesidad de investigaciones adicionales, con mejores diseños y metodologías estandarizadas, es necesaria para obtener una comprensión más precisa de los riesgos potenciales.

Efectos en la salud. Estudios experimentales

Los estudios experimentales en los que se investigan los efectos de la exposición a campos electromagnéticos (CEM) en la salud humana han permitido evaluar de forma controlada cómo estos campos interactúan con los sistemas biológicos. Estas investigaciones son esenciales para determinar los mecanismos subyacentes de los posibles efectos adversos y establecer directrices de seguridad.

1. Respuesta biológica a la exposición a campos electromagnéticos

Estudios en modelos animales

Los experimentos en animales han proporcionado información valiosa sobre la exposición a CEM y sus posibles efectos en sistemas biológicos complejos. En un estudio realizado por Luukkonen *et al* (2014) se analizó la exposición de ratones a campos electromagnéticos de 50 Hz y se observaron un aumento en el daño oxidativo y cambios en la expresión de genes relacionados con el estrés celular. Estos hallazgos sugieren que la exposición crónica a CEM puede tener un impacto en la integridad celular y en el equilibrio oxidativo.

Estudios en cultivos celulares

Los estudios en cultivos celulares permiten evaluar los efectos de la exposición a CEM en el nivel molecular. Por ejemplo, el trabajo de Lai y Singh (2004) demostró que la exposición de células a campos magnéticos de baja frecuencia puede inducir roturas en el ADN, lo que sugiere un potencial genotóxico. Sin embargo, la reproducibilidad de estos resultados ha sido un desafío, y otros estudios no han encontrado los mismos efectos.

2. Impacto en la salud humana: Estudios experimentales en humanos

Aunque los estudios experimentales en humanos son más limitados debido a restricciones éticas, algunos ensayos controlados han evaluado el impacto de la exposición a campos electromagnéticos en parámetros fisiológicos, como la función cerebral, la actividad cardíaca y la percepción de bienestar.

Efectos en el sistema nervioso

En el estudio experimental de Regel *et al* (2007) se investigó cómo la exposición a CEM de radiofrecuencia afectaba la actividad cerebral durante el sueño, esto en voluntarios sanos. Los resultados mostraron cambios en la estructura del sueño y en la actividad de las ondas cerebrales, lo que sugiere que la exposición podría influir en procesos neurofisiológicos.

3. Limitaciones y consideraciones

Los estudios experimentales tienen limitaciones, como la dificultad de extrapolar los resultados obtenidos en modelos animales a seres humanos y la variabilidad en los parámetros de exposición (frecuencia, intensidad y duración). Además, es fundamental considerar que los estudios de laboratorio no siempre reflejan condiciones de exposición realista a las que las personas están sometidas en entornos ocupacionales o residenciales.

La evidencia experimental sugiere que la exposición a CEM puede tener efectos biológicos, como el estrés oxidativo y las alteraciones en la función celular. No obstante, la consistencia de estos efectos y su relevancia para la salud humana continúan siendo objeto de investigación y debate. Es crucial continuar con estudios experimentales bien diseñados y con metodologías estandarizadas para comprender mejor los mecanismos subyacentes y su impacto en la salud.

Capítulo III: Marco metodológico

3.1 Enfoque de la investigación

Según Iglesias (2004), la metodología de investigación cuantitativa se centra principalmente en la medición numérica. Este enfoque se basa en la recopilación y el análisis de datos con el fin de responder a preguntas de investigación específicas.

El proceso involucra la recolección de información, la medición de ciertos parámetros y la obtención de frecuencias, todo con el objetivo de probar hipótesis previamente formuladas.

El uso de herramientas estadísticas es fundamental en este enfoque, ya que permite contrastar las hipótesis por medio de cálculos precisos.

El enfoque cuantitativo resulta particularmente útil cuando se estudian fenómenos que pueden medirse o cuantificarse de manera objetiva. Para seguir esta metodología es necesario

partir de una idea clara de investigación, plantear las preguntas adecuadas, definir los objetivos, formular hipótesis y seleccionar las variables del proceso, y mediante un proceso de cálculo se constatan las hipótesis.

3.2 Método de la investigación

El tipo de investigación será de carácter cuantitativo para determinar la magnitud y el análisis de los campos eléctricos y magnéticos en circuitos de distribución de media tensión de la CNFL cuando los técnicos están trabajando en línea energizada "utilizando la técnica de contacto con la mano enguantada", con el fin de verificar el cumplimiento con la normativa de los valores límites de CEM de la ICNIRP y la OMS.

3.3 Fuentes de la información

Fuentes primarias: "Constituyen el objetivo de la investigación bibliográfica o revisión en la web y proporcionan datos de primera mano".

La información proporcionada se compara mediante pruebas realizadas por fuente propia en el campo.

Fuentes secundarias: Constituyen todas aquellas compilaciones, resúmenes y listados de referencias publicados en el área del conocimiento en particular.

Fuentes terciarias: Consultas y reuniones con profesionales en el campo de seguridad y la salud ocupacional de CNFL.

3.4 Variables o unidades de análisis

1. Variable independiente:

Niveles de exposición a campos electromagnéticos (CEM): medidos en microteslas (μT) o miligauss (mG), dependiendo de la unidad que se utilice para cuantificar la exposición.

2. Variable dependiente:

Salud de los técnicos. Esto puede incluir varios indicadores, como:

Síntomas de salud: frecuencia de dolores de cabeza, fatiga, problemas de concentración, etc. (medidos por medio de encuestas o cuestionarios).

Incidencia de enfermedades. Registro de enfermedades relacionadas con la exposición a CEM (medidas en número de casos reportados).

Evaluaciones médicas. Resultados de exámenes médicos específicos que puedan relacionarse con la exposición a CEM.

3. Variables de control

Tiempo de exposición. Duración de la exposición a CEM durante el trabajo (medido en horas).
Distancia a las líneas de media tensión, medida en metros, que puede influir en los niveles de exposición.

Uso de equipo de protección personal (EPP). Evaluar si los técnicos utilizan guantes y otros equipos de protección (medido como porcentaje de uso).

Condiciones ambientales. Factores como la temperatura, la humedad y otros que puedan influir en la exposición y la salud (medidos en grados celsius, porcentaje de humedad, etc.).

Unidades de análisis

1. Técnicos de la CNFL. El grupo de estudio estará compuesto por los técnicos que trabajan en líneas energizadas utilizando la técnica del contacto directo con mano enguantada.

2. Entornos de trabajo. Diferentes circuitos y condiciones laborales dentro de la CNFL donde se realiza el trabajo con líneas de media tensión.

3. Normas internacionales. Análisis de las directrices y límites establecidos por la ICNIRP y OSHA, que servirán como referencia para evaluar la protección que les ofrecen a los técnicos.

Consideraciones adicionales

- Encuestas y entrevistas. Podría incluir una variable cualitativa que evalúe la percepción de los técnicos sobre su salud y la seguridad en relación con la exposición a CEM

3.5 Instrumentos de recolección de datos

El Latnex MG-300 es un dispositivo diseñado para medir la intensidad de los campos magnéticos de baja frecuencia (ELF), que van desde los 30 hasta los 300 Hz. Estos campos son generados por una variedad de fuentes, como líneas de transmisión de alta tensión, electrodomésticos (refrigeradores, aires acondicionados, etc.) y cables eléctricos.

Características principales:

- Precisión: Ofrece lecturas precisas de la intensidad del campo magnético en unidades de miligauss (mG) o microtesla (μT).
- Rango de frecuencia: Se especializa en medir campos de extremadamente baja frecuencia, que son los más difíciles de detectar con otros medidores.
- Facilidad de uso. Su diseño es intuitivo y cuenta con una pantalla fácil de leer.
- Durabilidad: Está construido con materiales resistentes y cuenta con una funda protectora para garantizar una larga vida útil.
- Versatilidad: Es ideal para uso doméstico, industrial y en entornos laborales.

¿Para qué sirve?

- Detectar fuentes de radiación electromagnética: Permite identificar los dispositivos o áreas de tu hogar o lugar de trabajo que emiten mayor cantidad de radiación.
- Evaluar el riesgo para la salud: Aunque los estudios sobre los efectos de largo plazo de la exposición a campos electromagnéticos aún no son concluyentes, algunos expertos sugieren que niveles elevados podrían estar asociados con ciertos problemas de salud.

- Tomar medidas correctivas: Una vez identificadas las fuentes de radiación puedes tomar medidas para reducir tu exposición, como cambiar la ubicación de ciertos dispositivos o utilizar cables blindados.

¿Cómo funciona?

El Latnex MG-300 funciona mediante sensores que detectan las variaciones en el campo magnético y las convierten en una señal eléctrica, que luego es procesada y mostrada en la pantalla del dispositivo.

¿Es necesario tener un medidor de campo electromagnético?

La necesidad de un medidor de campo electromagnético depende de tu nivel de preocupación respecto a la exposición a la radiación electromagnética. Si vives cerca de líneas de alta tensión, trabajas en un entorno con muchos equipos eléctricos o simplemente quieres tener mayor tranquilidad, este tipo de dispositivo puede ser una buena inversión.

Consideraciones importantes:

- Límites de detección: El Latnex MG-300 está diseñado para medir campos de baja frecuencia. No es adecuado para medir radiación de alta frecuencia, como la emitida por teléfonos móviles o redes Wi-Fi.
- Interpretación de los resultados: Los valores obtenidos con un medidor de campo electromagnético deben interpretarse con cautela. Es recomendable consultar con un experto en la materia para obtener una evaluación completa de tu situación.

3.6 Proceso para la recolección y el análisis de datos

Para llevar a cabo la investigación sobre la exposición a campos electromagnéticos en técnicos de líneas energizadas se diseñó un enfoque que combina mediciones precisas con la opinión experta de los profesionales del sector.

En primer lugar, se utilizará el medidor de campo electromagnético Latnex MG-300. Este equipo especializado permitirá cuantificar de manera exacta la intensidad de los campos magnéticos a los que están expuestos los técnicos cuando realizan trabajos en líneas energizadas, especialmente durante las maniobras de contacto con la mano enguantada.

Además de las mediciones directas, también se aplicarán encuestas a los técnicos. Estas encuestas proporcionarán información valiosa sobre sus experiencias, percepciones y condiciones de trabajo a las que se enfrentan. Por medio de estas encuestas se podrán conocer de primera mano los riesgos que perciben, las medidas de seguridad que consideran más efectivas y las áreas en las que creen que se necesitan mejoras.

Al combinar los datos obtenidos de las mediciones con la información proporcionada por los técnicos se podrá realizar un análisis detallado de la situación. Este análisis permitirá identificar los factores de riesgo más relevantes, evaluar la eficacia de las medidas de protección existentes y formular recomendaciones específicas para mejorar la seguridad de los trabajadores.

Toda esta investigación se llevará a cabo siguiendo las normas internacionales pertinentes. Esto garantizará que los resultados sean comparables con otros estudios y que las recomendaciones que se deriven sean aplicables en el nivel local.

En este texto se destacan los siguientes aspectos claves de tu metodología:

- Uso del Latnex MG-300. Se enfatiza la precisión de las mediciones que se obtendrán con este equipo.
- Encuestas a los técnicos. Se resalta la importancia de conocer la perspectiva de los trabajadores y sus experiencias.
- Análisis combinado. Se explica cómo se integrarán los datos de las mediciones y las encuestas para obtener una visión completa de la situación.
- Conformidad con normas internacionales. Se garantizan la rigurosidad y la relevancia de la investigación.

- Objetivos específicos: ¿Cuáles aspectos de la exposición a campos electromagnéticos se quieren evaluar en profundidad? (por ejemplo, duración de la exposición, frecuencia de las tareas de alto riesgo, percepción del riesgo, etc.)
- Normas internacionales de referencia: ¿Cuáles son las normas específicas que se utilizará como marco de referencia para tu investigación? (por ejemplo, ICNIRP, IEEE, etc.)
- Población de estudio: ¿A qué tipo de técnicos se dirigirán las encuestas? (por ejemplo, electricistas de línea, técnicos de mantenimiento, etc.)

ENCUESTA

El presente cuestionario forma parte del estudio titulado Evaluación de la exposición a campos electromagnéticos de técnicos de líneas energizadas utilizando la técnica de contacto con la mano enguantada: medición, análisis de riesgos y recomendaciones para la seguridad humana, según lo establecido en las normas internacionales de protección vigentes.

El objetivo de esta encuesta es recopilar información sobre las condiciones de trabajo, la percepción de los riesgos asociados con la exposición a campos electromagnéticos y las medidas de seguridad aplicadas por los técnicos de líneas energizadas. Los datos obtenidos contribuirán a identificar posibles riesgos, evaluar su impacto y proponer estrategias para mejorar la seguridad en el entorno laboral, de acuerdo con las normativas internacionales de protección vigentes.

Nombre y apellido: _____

1. Datos demográficos

1.1 ¿Cuál es su edad?

- De 20 a 35 años
- De 36 a 45 años
- De 46 a 55 años
- Más de 56 años

1.2 ¿Cuántos años tiene de trabajar en la CNFL?

- De 0 a 10 años
- De 11 a 20 años
- De 21 a 30 años
- Más de 31 años

1.3 ¿Cuál es su cargo real?

- Técnico de líneas de distribución energizadas
- Encargado de líneas de distribución o líneas
- Profesional de salud ocupacional

2. Exposición a campos electromagnéticos

2.1 ¿Con qué frecuencia realiza tareas que implican contacto directo con líneas energizadas?

- Ninguna
- Poco
- Intermedio
- Mucho

2.2 ¿Cuánto tiempo, en promedio, está expuesto a campos electromagnéticos durante su jornada laboral?

- De 0 a 4 horas diarias
- De 5 a 8 horas diarias

2.3 ¿Qué equipos de protección personal utiliza en su trabajo? (Seleccione todos los que aplica)

- Casco
- Camisa y pantalón retardante del fuego, botas dieléctricas
- Lentes y pasamontañas
- Arnés, guantes y mangas

3. Percepción del riesgo y capacitación

3.1 ¿Considera que el trabajo que realiza implica un riesgo para su salud debido a la exposición a campos electromagnéticos? Justifique su respuesta.

- Sí
- No

Explicación:

3.2 ¿Ha recibido alguna capacitación sobre los riesgos asociados con la exposición a campos electromagnéticos?

- Sí
- No

3.3 ¿Cree que las medidas de seguridad actuales son suficientes para su protección frente a estos riesgos?

- Sí
- No

4. Efectos en la salud y recomendaciones

4.1 ¿Ha experimentado alguna molestia o síntomas como dolor de cabeza, cansancio, estrés u otros que puedan estar relacionados con la exposición a campos electromagnéticos?

- Sí
- No

4.2 ¿Qué medidas adicionales cree que se podrían implementar para mejorar su seguridad y salud?

4.3 ¿Conoce o sabe de alguna persona que haya sufrido alguna enfermedad o malestar a causa de la exposición a campos electromagnéticos? En caso afirmativo indique qué tipo de enfermedad.

- Sí
- No

Explicación:

Capítulo IV: Análisis de resultados

La CNFL tiene 106 circuitos eléctricos en la Gran Área Metropolitana y todos los circuitos tienen diferente intensidad eléctrica; por lo tanto, los campos electromagnéticos también varían dependiendo del circuito. Los técnicos de líneas energizadas son los que están más expuestos a los campos electromagnéticos, ya que la técnica es de contacto con la mano enguantada en las líneas eléctricas con tensión.

La exposición a campos electromagnéticos en técnicos que trabajan en líneas energizadas es un tema de gran relevancia en el ámbito de la seguridad ocupacional. Con el fin de evaluar dicha exposición y conocer su posible impacto en la salud se llevaron a cabo mediciones utilizando el dispositivo Latnex MG-300, especializado en la detección de campos electromagnéticos de baja frecuencia (ELF) y en un rango de 30 a 300 Hz.

El presente estudio se centra en la medición, el análisis y la evaluación de los campos magnéticos generados en diferentes circuitos eléctricos durante maniobras realizadas con la técnica de contacto con la mano enguantada. Para ello se recopilaron datos sobre el voltaje, el amperaje y la intensidad del campo magnético en distintas fases de los circuitos Sabanilla - Ipis (13.8 kV), Sabanilla - San Marino (34.5 kV) y Sabanilla - San Rafael (34.5 kV) .

El procedimiento de cálculo incluyó la determinación de:

- La intensidad del campo magnético en microteslas (μT) y gauss (G) en cada fase de los circuitos evaluados.
- Los valores promedio, máximo y mínimo del campo magnético en cada circuito.
- La diferencia máxima entre las fases de cada circuito para identificar posibles variaciones en la distribución de la carga eléctrica.

A partir de estos cálculos se hizo una representación gráfica de los datos para visualizar tendencias y diferencias entre los circuitos evaluados. Los resultados obtenidos permitirán no solo comprender los niveles de exposición de los técnicos, sino también proponer recomendaciones alineadas con normas internacionales para mitigar posibles riesgos y mejorar las condiciones de seguridad en el trabajo con líneas energizadas.

Datos proporcionados

Tabla 1. Datos proporcionados para cálculos. Fuente propia

Circuito / Voltaje	Fase	Amperaje	Campo magnético (μT)	Campo Magnético (G)
Sabanilla-Ipís (13,8 kV)	A	133	9.34	0,09
	B	133	9.34	0,09
	C	147	10,95	0,11
Sabanilla - San Marino (34,5 kV)	A	172	19.45	0,19
	B	162	12,95	0,13
	C	163	13.04	0,13
Sabanilla - San Rafael (34,5 kV)	A	146	10.8	0,11
	B	125	9.05	0,09
	C	137	9.64	0,10

Cálculo del campo magnético promedio para cada circuito

El promedio se calcula como:

$$\text{Promedio} = \frac{\text{Campo fase A} + \text{Campo fase B} + \text{Campo fase C}}{3}$$

- *Sabanilla-Ipís (13,8 kV)*

$$\text{Promedio en } \mu T = \frac{9.34 + 9.34 + 10.95}{3} = \frac{29.63}{3} = 9.88 \mu T \text{ Promedio}$$

$$\text{Promedio en G} = \frac{0.09 + 0.09 + 0.11}{3} = \frac{0.29}{3} = 0.0967 G$$

- *Sabanilla - San Marino (34,5 kV)*

$$\text{Promedio en } \mu T = \frac{19.45 + 12.95 + 13.04}{3} = \frac{45.44}{3} = 15.15 \mu T \text{ Promedio}$$

$$\text{Promedio en G} = \frac{0.19 + 0.13 + 0.13}{3} = \frac{0.45}{3} = 0.15 G$$

- *Sabanilla - San Rafael (34,5 kV)*

$$\text{Promedio en } \mu T = \frac{10.8 + 9.05 + 9.64}{3} = \frac{29.49}{3} = 9.83 \mu T \text{ Promedio}$$

$$\text{Promedio en G} = \frac{0.11 + 0.09 + 0.10}{3} = \frac{0.30}{3} = 0.10 G$$

Cálculo del máximo y el mínimo de campo magnético por circuito

Se identifican el valor más alto y el más bajo de cada conjunto.

Tabla 2. Resumen de los circuitos analizados. Fuente propia

Circuito	Máximo (μT)	Mínimo (μT)	Máximo (G)	Mínimo (G)
Sabanilla-Ipís	10,95	9,34	0,11	0,09
Sabanilla-San Marino	19,45	12,95	0,19	0,13
Sabanilla-San Rafael	10,8	9,05	0,11	0,09

Cálculo de la diferencia máxima entre fases

La diferencia máxima se obtiene restando el campo magnético mayor menos el menor:

$$\text{Diferencia} = \text{Máximo} - \text{Mínimo}$$

- Sabanilla-Ipís

$$10,95 - 9,34 = 1,61 \mu T$$

$$0,11 - 0,09 = 0,02 G$$

- Sabanilla-San Marino

$$19,45 - 12,95 = 6,50 \mu T$$

$$0,19 - 0,13 = 0,06 G$$

- Sabanilla-San Rafael

$$10,8 - 9,05 = 1,75 \mu T$$

$$0,11 - 0,09 = 0,02$$

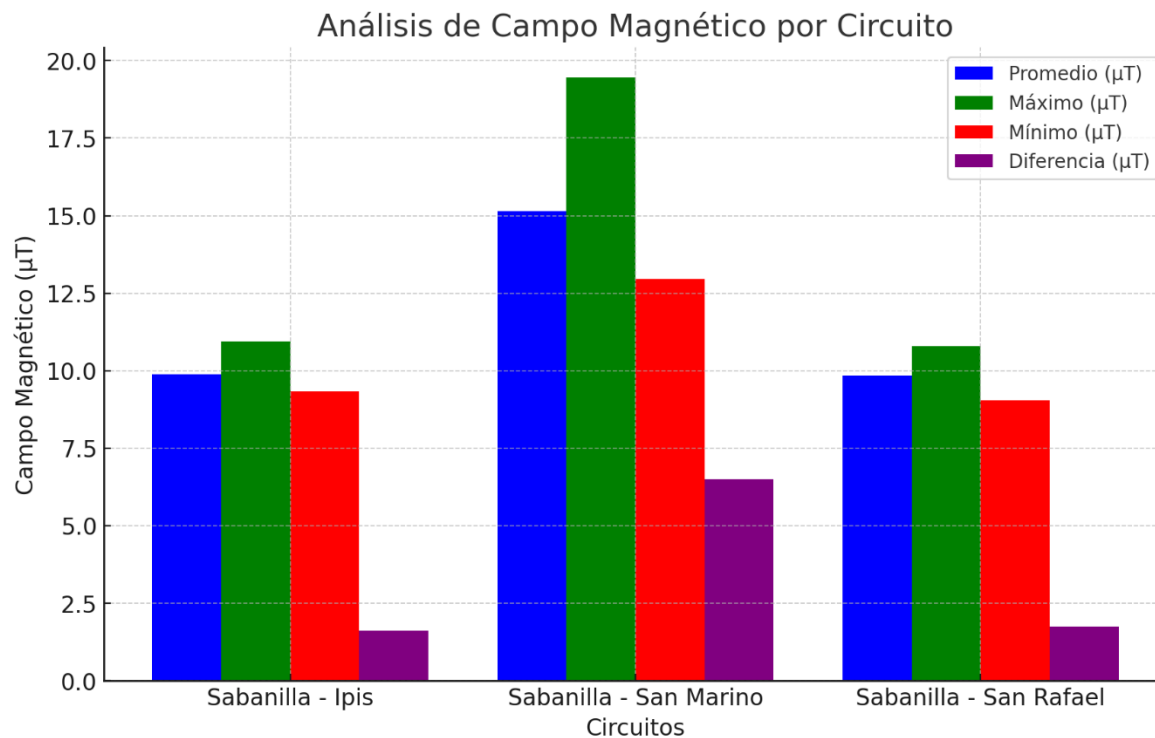


Figura 4. Análisis de los circuitos. Fuente propia

Análisis de los resultados

1. Promedio de campo magnético:

- El circuito Sabanilla-San Marino presenta el campo magnético promedio más alto, con $15.15 \mu\text{T}$.
- Los circuitos Sabanilla - Ipis y Sabanilla - San Rafael tienen valores similares de alrededor de $9.88 \mu\text{T}$ y $9.83 \mu\text{T}$, respectivamente.

2. Máximo y mínimo:

- El circuito Sabanilla - San Marino tiene el valor más alto registrado ($19.45 \mu\text{T}$) y el mínimo más alto ($12.95 \mu\text{T}$), lo que indica mayor intensidad general del campo magnético en comparación con los otros circuitos.
- Sabanilla - Ipis y Sabanilla - San Rafael presentan valores máximos y mínimos relativamente cercanos.

3. Diferencia máxima entre fases:

- Sabanilla - San Marino muestra la mayor diferencia de campo magnético entre sus fases ($6.50 \mu\text{T}$), lo que podría indicar una mayor variabilidad en la distribución de carga o en la disposición geométrica de las fases.
- Sabanilla - Ipís y Sabanilla - San Rafael tienen diferencias menores, de alrededor de $1.61 \mu\text{T}$ y $1.75 \mu\text{T}$, respectivamente, lo que indica un equilibrio más estable entre las fases.

El circuito Sabanilla - San Marino presenta los valores más altos de campo magnético, lo que podría estar relacionado con un mayor nivel de carga o diferencias en la configuración del tendido eléctrico. Los circuitos Sabanilla - Ipís y Sabanilla - San Rafael tienen valores más homogéneos y diferencias menores entre fases, lo que sugiere un mejor equilibrio en la distribución de corriente.

La siguiente tabla proporciona los niveles máximos para la exposición de campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo según las normas internacionales.

Tabla 3. Niveles máximos de campos electromagnéticos según normas internacionales. Fuente propia

Niveles máximos de exposición a campos electromagnéticos según las normas internacionales				
	Trabajadores		Público	
Norma	Campo eléctrico (kV/m)	Campo magnético (μT)	Campo eléctrico (kV/m)	Campo magnético (μT)
ICNIRP	10	1000	5	100
OSHA	5	1000	5	200
OMS	30	1000	10	200
IEEE	10	1000	5	100

4.2 Aplicación de la encuesta

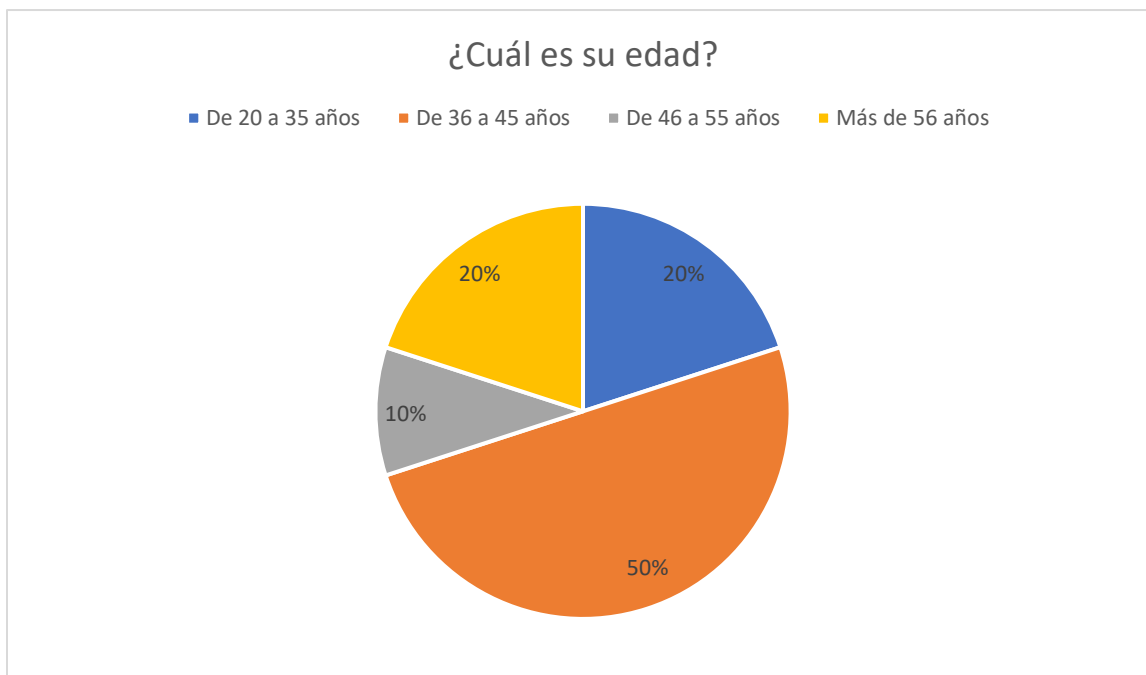


Figura 5. Gráfico 1. Fuente: Propia

De los encuestados 50% tienen de 36 a 45 años, mientras que 20% tienen de 20 a 35 años, 20% más de 56 años y 10% de 46 a 55 años.

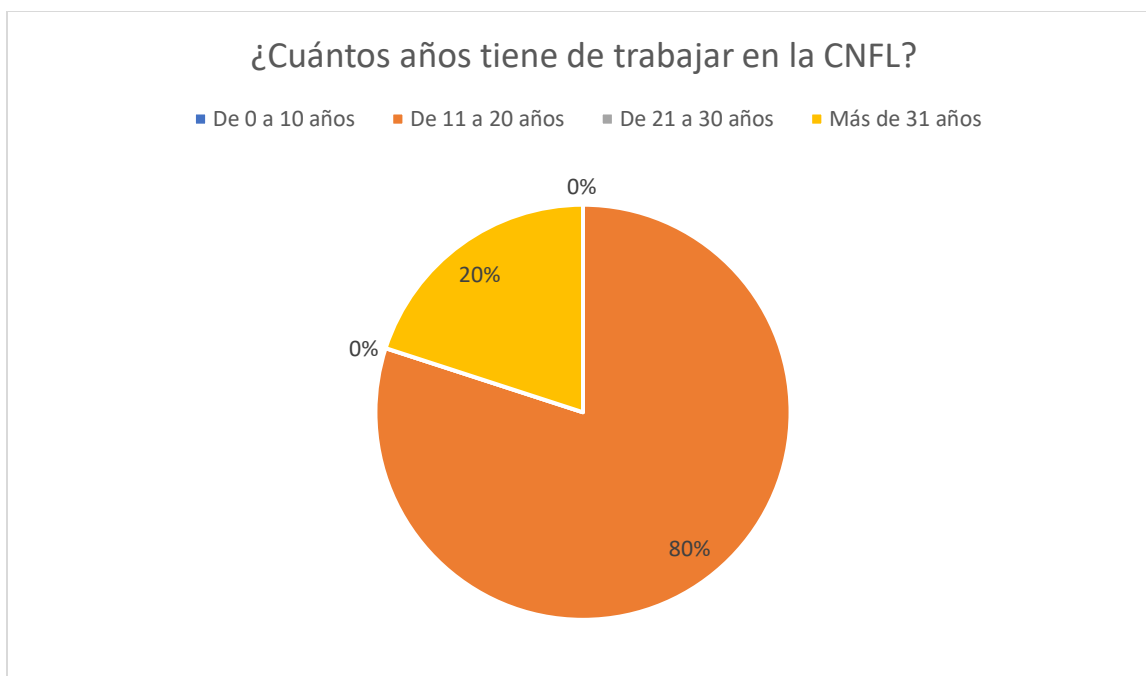


Figura 6. Gráfico 2. Fuente propia

En el presente gráfico se evidencia 80% de 11 a 20 años que trabajan en la CNFL, mientras que 20% tienen más de 31 años de servicio.

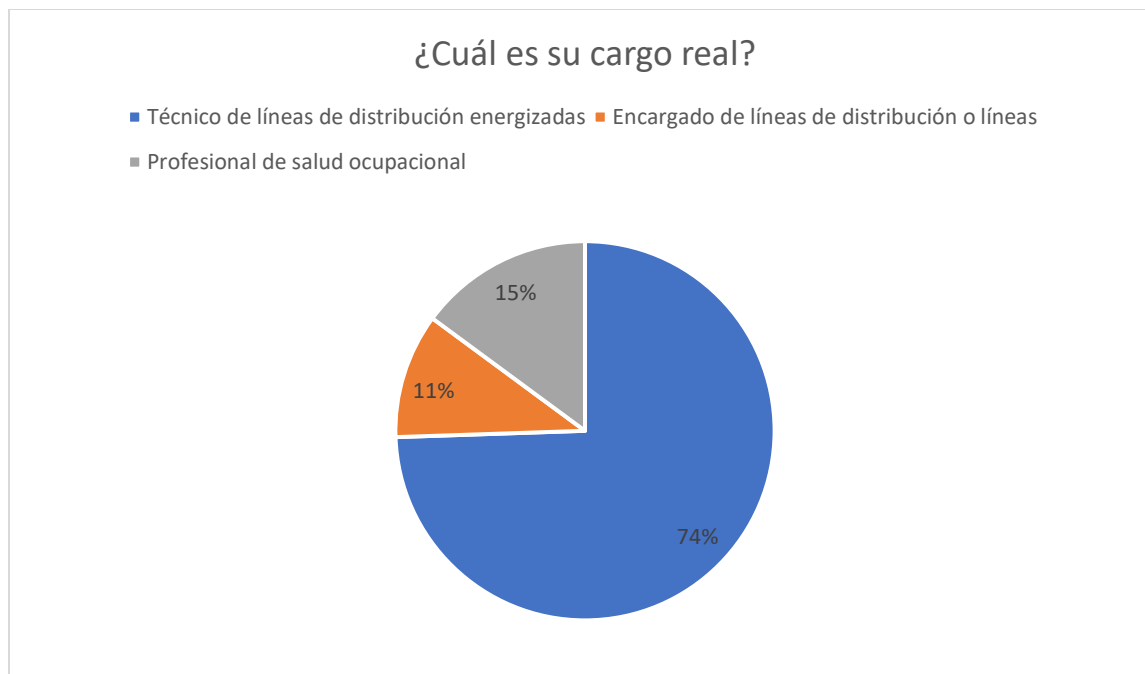


Figura 7. Gráfico 3. Fuente: Propia

De los técnicos 74% representan a los técnicos de líneas de distribución energizadas, 15% son profesionales de salud ocupacional y 11% son encargados de líneas de distribución

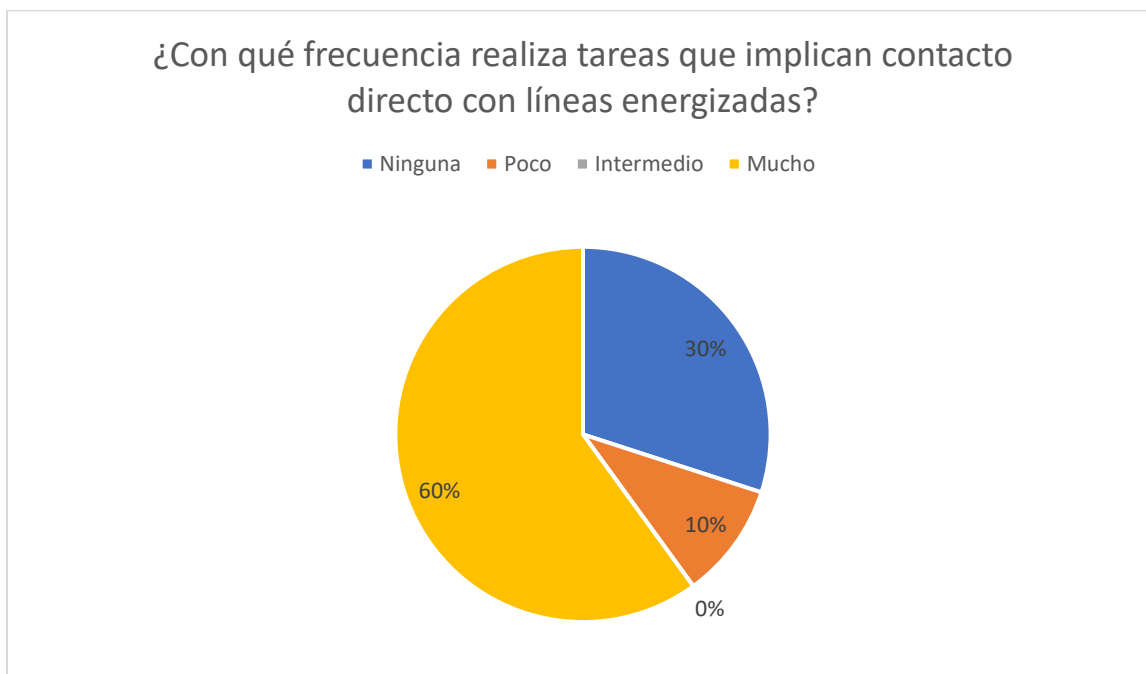


Figura 8. Gráfico 4. Fuente propia

De los encuestados 60% hacen muchas tareas que implican contacto directo con líneas energizadas, 30% ninguna tarea y 10% hacen pocas durante sus actividades diarias

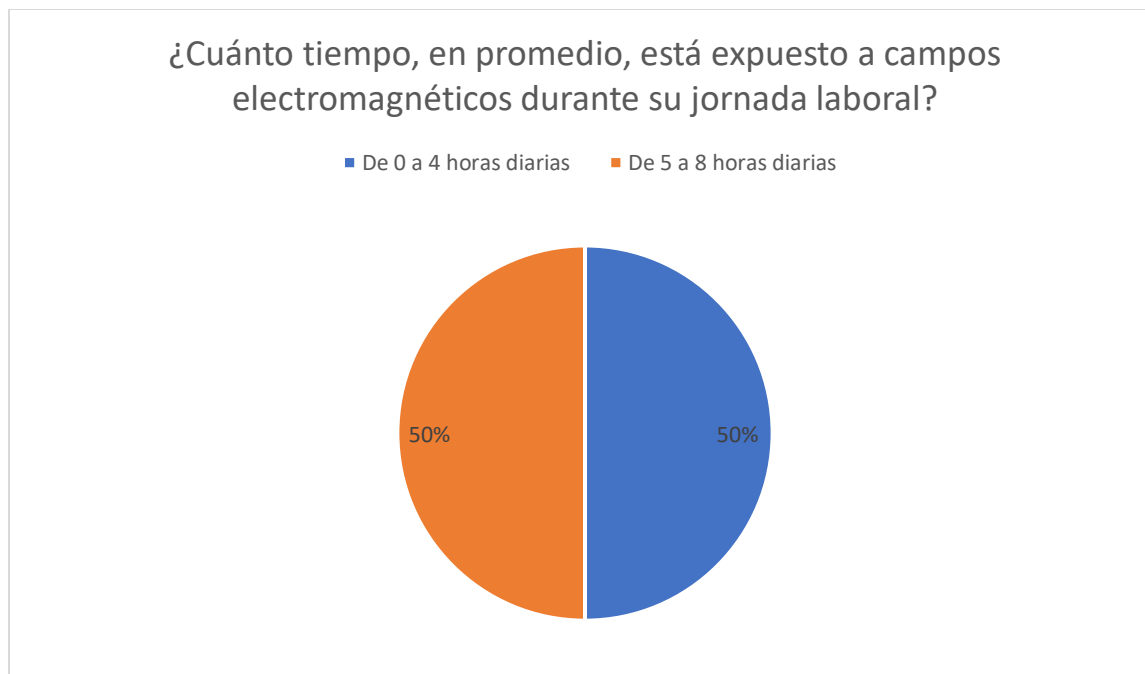


Figura 9. Gráfico 5. Fuente: Propia

De los encuestados 50% están expuestos a campos electromagnéticos de 0 a 4 horas durante su jornada laboral, mientras que el otro 50% de los encuestados están expuestos de 5 a 8 horas.

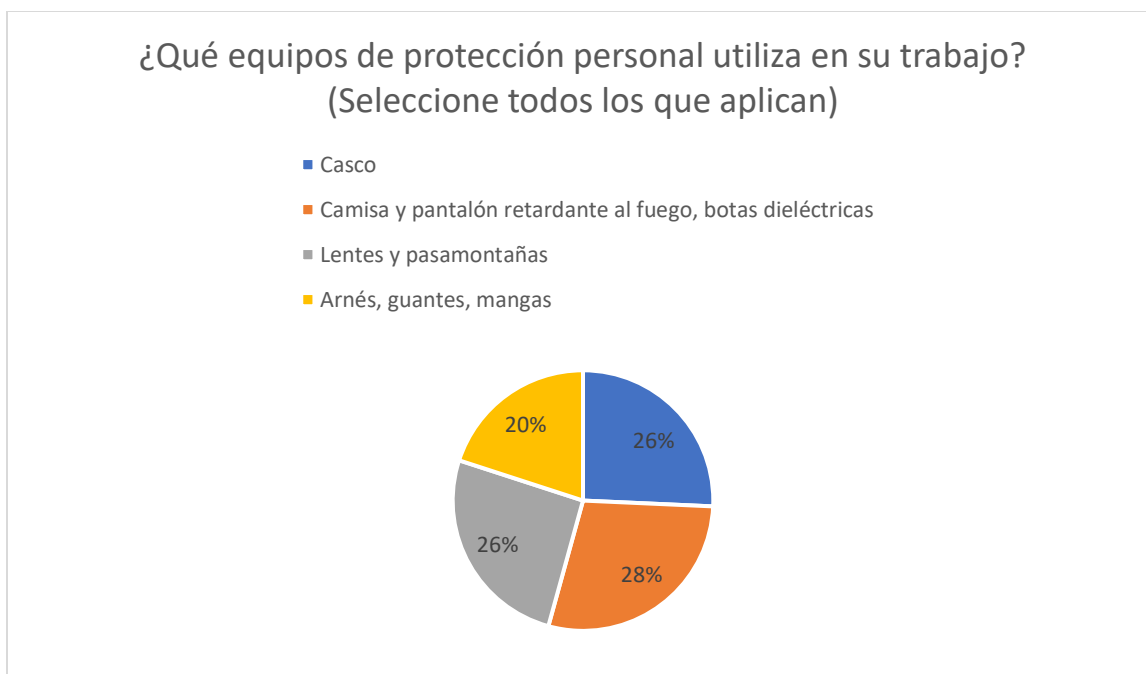


Figura 10. Gráfico 6. Fuente: Propia

De los encuestados 28% usan camisa y pantalón retardante del fuego y botas dieléctricas como equipo de protección personal durante la realización del trabajo, 26% usan lentes y pasamontañas y 26% utilizan casco, mientras que 20% usan arnés, guantes y mangas.

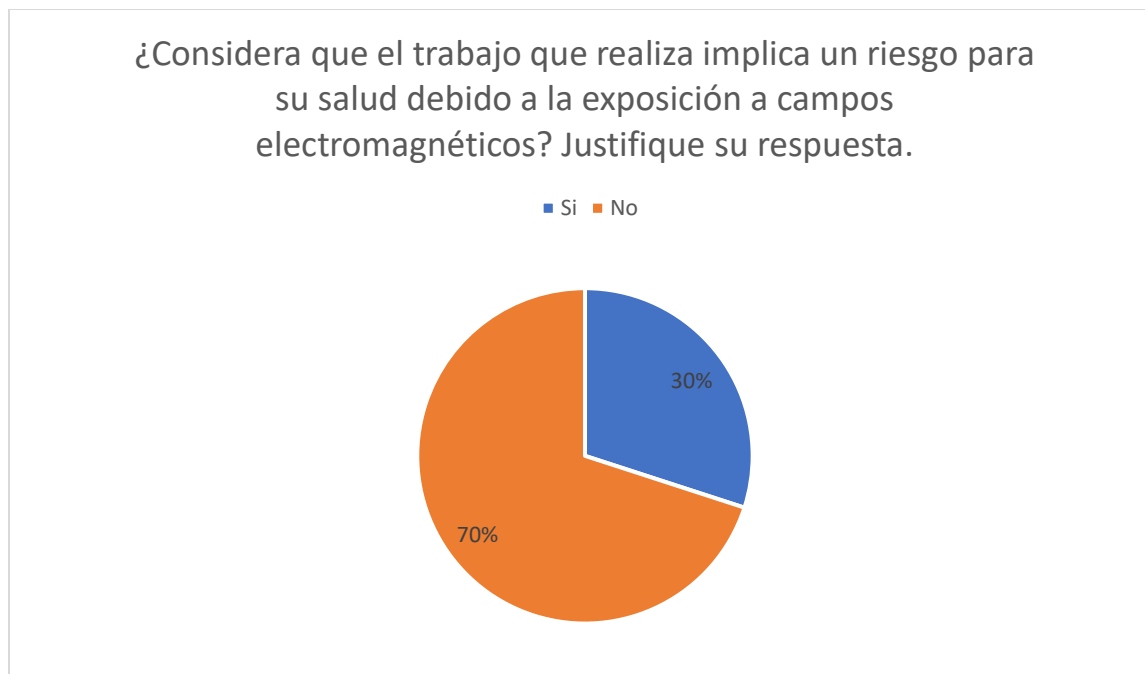


Figura 11. Gráfico 7. Fuente propia

De los encuestados 70% consideran que el trabajo que realizan no implica un riesgo para su salud debido a la exposición a campos electromagnéticos, mientras que 30% sí lo creen.

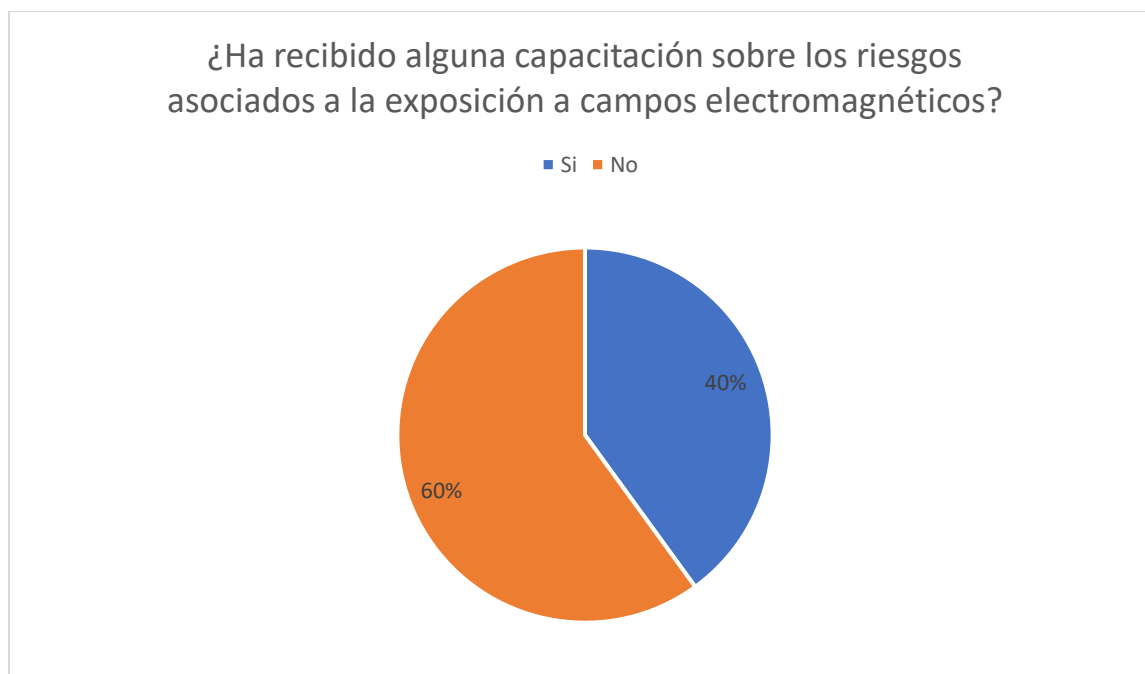


Figura 12. Gráfico 8. Fuente propia

De los encuestados 60% indican que no han recibido ninguna capacitación sobre los riesgos asociados con la exposición a campos electromagnéticos, y 40% no han recibido capacitación para la realización de este trabajo

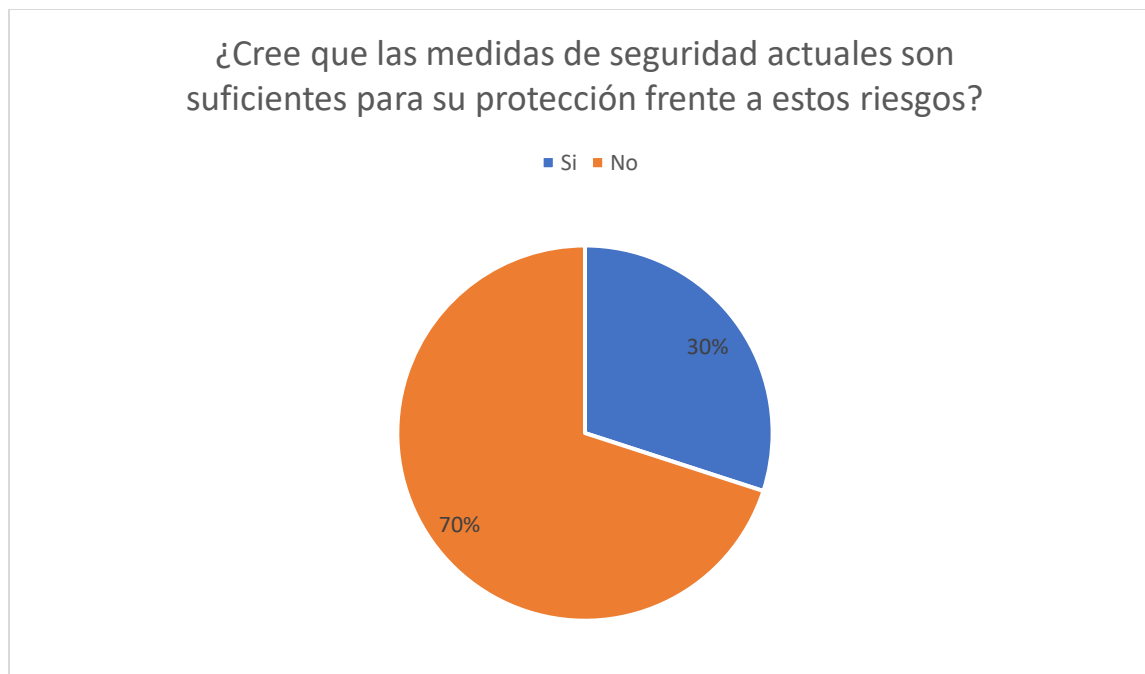


Figura 13. Gráfico 9. Fuente: Propia

De los encuestados 70% no creen que las medidas de seguridad actuales sean suficientes para la protección de estos riesgos, y 30% sí creen que sean suficientes.

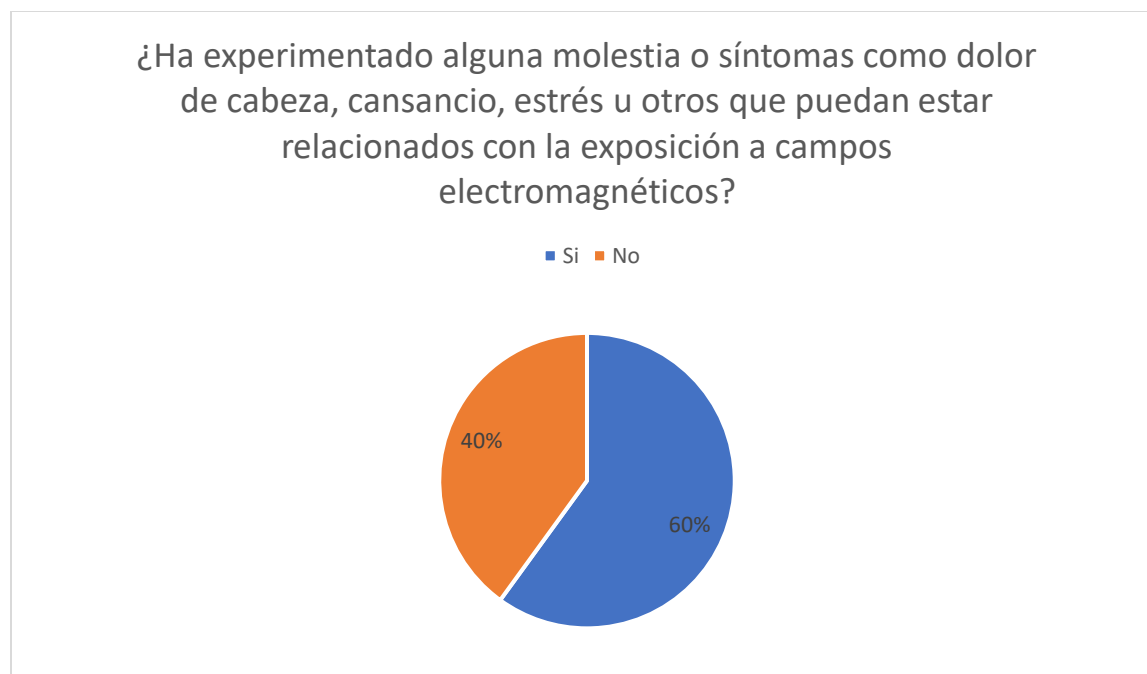


Figura 14. Gráfico 10. Fuente: Propia

De los consultados 60% sí han experimentado alguna molestia o síntomas como los mencionados ante la exposición a campos electromagnéticos, mientras que 40% no los han presentado.

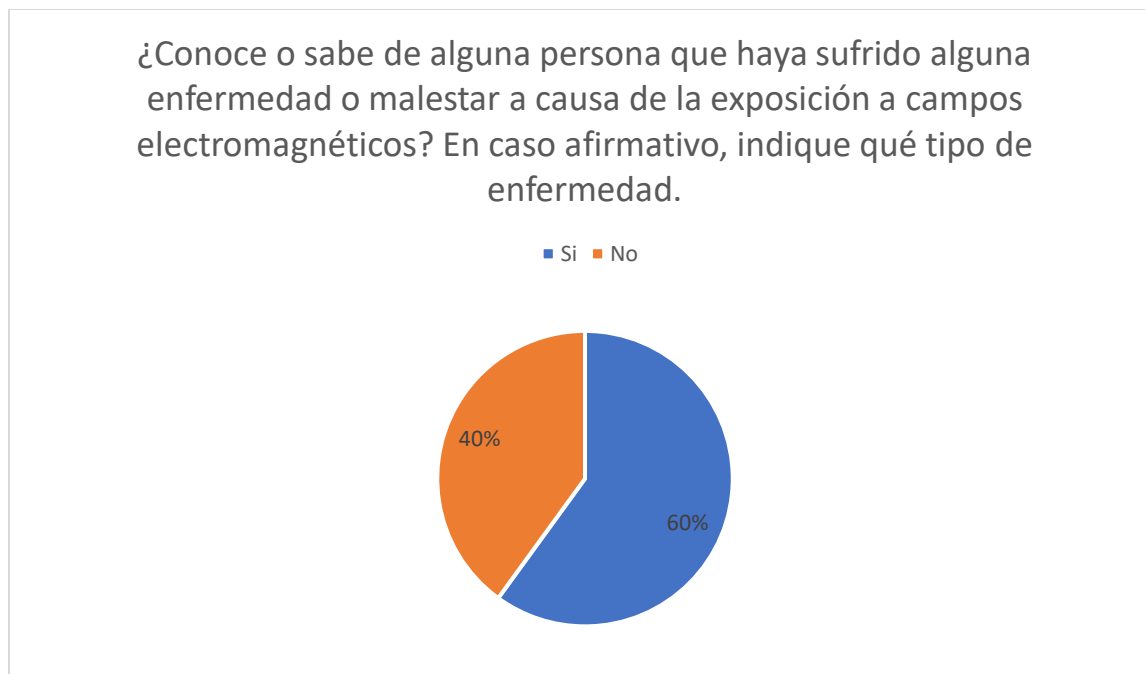


Figura 15. Gráfico 11. Fuente propia

De los consultados 60% sí conocen de alguna persona que haya sufrido algún malestar a causa de la exposición a campos electromagnéticos, mientras que 40% no conocen a ninguna persona con estas características.

El análisis de la exposición a campos electromagnéticos en los técnicos de líneas energizadas de la CNFL evidencia aspectos relevantes de la percepción del riesgo, las condiciones de trabajo y el cumplimiento de medidas de seguridad. La mayoría de los encuestados son técnicos de líneas de distribución energizadas, y un porcentaje significativo realiza tareas con contacto directo con líneas energizadas, por lo que están expuestos a campos electromagnéticos entre 5 y 8 horas diarias.

Si bien 70% de los encuestados consideran que su labor no implica un riesgo para su salud, 60% han experimentado molestias o síntomas relacionados con la exposición a estos campos, y el mismo porcentaje conoce a alguien que ha sufrido efectos adversos. Esta situación podría estar relacionada con enfermedades documentadas en estudios científicos, tales como estrés oxidativo, trastornos neurológicos, alteraciones cardiovasculares, fatiga crónica, dolores de cabeza, trastornos del sueño y posibles efectos en la fertilidad. La falta de conciencia de estos riesgos puede llevar a la subestimación del impacto en la salud de los trabajadores.

Adicionalmente, 60% de los trabajadores no han recibido capacitación específica sobre los riesgos de la exposición a campos electromagnéticos, lo que evidencia una brecha en la formación en materia de seguridad. Asimismo, 70% de los encuestados consideran insuficientes las medidas de seguridad actuales, lo que resalta la necesidad de fortalecer la normativa interna y la implementación de controles adicionales en línea con estándares internacionales. En cuanto al equipo de protección personal, se observa una variabilidad en su uso, lo que podría comprometer la seguridad de los trabajadores.

En conclusión, los hallazgos de este capítulo reflejan la necesidad de mejorar la capacitación, fortalecer la percepción del riesgo, estandarizar el uso de equipo de protección adecuado y evaluar medidas adicionales para mitigar la exposición a campos electromagnéticos. Esto permitirá prevenir posibles enfermedades y garantizar la seguridad y la salud de los trabajadores, para asegurar el cumplimiento de las normativas internacionales en seguridad eléctrica.

CAPITULO V: Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El presente estudio ha permitido identificar y analizar la exposición a campos electromagnéticos en técnicos de líneas energizadas que utilizan la técnica de contacto directo con la mano enguantada. A partir de los hallazgos analizados se emite la siguiente conclusión:

1. Exposición a campos electromagnéticos. Se ha evidenciado que los técnicos de líneas energizadas están expuestos a campos electromagnéticos durante largos períodos, con jornadas de trabajo que oscilan entre 5 y 8 horas diarias. A pesar de que una parte de los trabajadores no percibe esta exposición como un riesgo significativo, un alto porcentaje han experimentado síntomas relacionados con el caso, lo que sugiere una relación entre la exposición y los posibles efectos adversos para la salud.

2. Impacto en la salud de los técnicos: un porcentaje considerable de los trabajadores encuestados han reportado molestias como fatiga, dolores de cabeza, trastornos del sueño y otros síntomas potencialmente vinculados con la exposición prolongada a campos electromagnéticos. Esto se alinea con estudios previos que sugieren la existencia de efectos negativos en el sistema nervioso y en el cardiovascular en personas expuestas a este tipo de radiación.

3. Deficiencia en la capacitación y concienciación. Se ha identificado una brecha en la formación de los técnicos respecto a los riesgos de la exposición a campos electromagnéticos. Un alto porcentaje de los trabajadores no han recibido capacitación específica en esta materia, lo que impacta directamente en la percepción del riesgo y en la implementación de medidas de prevención efectivas.

4. Insuficiencia de las medidas de seguridad actuales. A pesar de la existencia de normativas internacionales que establecen límites de exposición y formulan recomendaciones generales, los trabajadores consideran que las medidas de seguridad implementadas son insuficientes. La variabilidad en el uso del equipo de protección personal también representa un factor de riesgo, pues se evidencia la necesidad de estandarizar su aplicación y reforzar los controles preventivos.

5. Necesidad de actualización normativa y estrategias de mitigación. La brecha existente entre las recomendaciones internacionales y las condiciones reales de trabajo sugiere la necesidad de actualizar y fortalecer las normativas internas en materia de seguridad eléctrica. Se recomienda la realización de monitoreos periódicos de exposición, el desarrollo de protocolos de seguridad específicos para esta técnica y la adopción de tecnologías que minimicen el impacto de los campos electromagnéticos en los trabajadores.

En conclusión, este estudio pone de manifiesto la importancia de mejorar la capacitación en seguridad eléctrica, aumentar la percepción del riesgo entre los técnicos, optimizar el uso de equipo de protección y evaluar estrategias adicionales para reducir la exposición a campos electromagnéticos. Todo ello contribuirá a la protección de la salud de los trabajadores y a garantizar condiciones de trabajo más seguras, en concordancia con las normativas internacionales vigentes.

Limitaciones

- a) Equipo requerido para la medición. Uno de los principales retos que se enfrentan es la disponibilidad del equipo necesario para realizar las mediciones de campos electromagnéticos.

Estos dispositivos, como los medidores de campo de alta precisión, son esenciales para obtener datos confiables y precisos, pero no siempre están disponibles para uso inmediato. La falta de acceso a este tipo de equipo puede retrasar el proceso de recolección de datos y, en algunos casos, afectar la calidad de los resultados.

A veces se han considerado otras opciones, como el uso de equipos de menor capacidad, lo que no garantiza la misma precisión. En la próxima tesis de este autor se discutirá cómo esta limitación influye en los resultados obtenidos y cuáles alternativas evalúa él, como la posibilidad de alquilar equipos especializados o acordar colaboraciones con otras instituciones que posean el equipo necesario.

- b) Acceder al equipo debidamente calibrado. Además de la disponibilidad del equipo, otro desafío importante ha sido asegurar que esté debidamente calibrado. Un equipo de medición sin calibración adecuada puede generar datos erróneos, lo que compromete la

validez de todo el estudio. La calibración es un proceso delicado que no siempre es fácil de realizar debido a que requiere tanto tiempo como acceso a laboratorios especializados.

- c) Condiciones climatológicas adversas. Por último, un factor externo pero no menos importante ha sido la influencia de las condiciones climatológicas. Al realizar mediciones en exteriores, especialmente en líneas de media tensión, el clima puede ser un obstáculo considerable. Las lluvias, vientos fuertes o incluso el calor extremo no solo dificultan la toma de mediciones, sino que también pueden alterar los resultados debido a fluctuaciones en las condiciones ambientales que afectan el comportamiento electromagnético de los equipos eléctricos. En Costa Rica, por ejemplo, las lluvias son frecuentes y ha habido que adaptarme a esos cambios, planificando cuidadosamente los días de recolección de datos. Este tipo de limitaciones ha llevado a considerar no solo la logística del trabajo en campo, sino también a investigar cómo el clima influye en los campos electromagnéticos, lo que añade una capa adicional de complejidad al análisis.

5.2 Recomendaciones

- Capacitación y sensibilización en el desarrollar de programas de formación específicos sobre los riesgos de la exposición a campos electromagnéticos y su impacto en la salud. Estos cursos deben incluir información sobre medidas de prevención, normativas aplicables y buenas prácticas en el uso del equipo de protección personal.
- Monitoreo de la exposición: Implementar sistemas de medición periódica de la exposición a campos electromagnéticos en los lugares de trabajo, con el fin de evaluar y mitigar los riesgos implícitos. Se recomienda utilizar sensores y herramientas de monitoreo en tiempo real para obtener datos precisos.
- Mejora del equipo de protección personal: Estandarizar el uso de guantes, ropa y otros elementos de protección diseñados para minimizar la exposición. Evaluar nuevas tecnologías y materiales que puedan proporcionar una mejor barrera contra los efectos de los campos electromagnéticos.

- Revisión y actualización de normativas internas: Adecuar las normativas de seguridad de la empresa a las recomendaciones internacionales, considerando las condiciones específicas del trabajo de los técnicos de líneas energizadas. Esto debe incluir la actualización de protocolos y la implementación de controles más rigurosos.
- Reducción de la jornada de exposición: Evaluar la posibilidad de establecer turnos de trabajo que reduzcan el tiempo de exposición continua a los campos electromagnéticos, esto para minimizar así los efectos adversos en la salud de los trabajadores.
- Investigación y desarrollo: Fomentar estudios adicionales sobre la exposición a campos electromagnéticos en el sector eléctrico, con el objetivo de generar evidencia científica que respalde nuevas medidas de prevención y protección para los trabajadores.
- Supervisión y control del cumplimiento de medidas de seguridad: Establecer auditorías y controles regulares para verificar la correcta aplicación de las medidas de seguridad y garantizar el cumplimiento de los protocolos establecidos.

Referencias bibliográficas

1. IEEE Std 80-2013. "Guide for Safety in AC Substation Grounding."
2. Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). "Standard 60038 – IEC Standard Voltages."
3. E. Gómez. "Diseño y construcción de líneas de distribución eléctrica." Editorial Técnica, 2015.
4. ICNIRP Guidelines. "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz)." 2010.
5. CNFL. "Manual de Operaciones de Redes Eléctricas." Edición 2018.
6. Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). "Informe sobre la infraestructura eléctrica en Costa Rica." 2020.
7. Comisión Internacional sobre Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP). "Exposure to Electromagnetic Fields." 2003.
8. M. Araya y G. Blanco. "Evaluación de la infraestructura de distribución eléctrica en Costa Rica." Universidad de Costa Rica, 2019.
9. CNFL. "Reporte anual de mantenimiento preventivo en redes eléctricas de media tensión." 2021.
10. IEEE Std C95.1-2019. "Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric and Magnetic Fields."
11. Organización Mundial de la Salud (OMS). "Campos electromagnéticos y salud pública." 2014.
12. IEEE. "Safety in Power System Maintenance: A Review." *Journal of Electrical Safety*, 2016.
13. CNFL. "Programa de monitoreo y medición de campos electromagnéticos en líneas de media tensión." Edición 2019.
14. Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2023). *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz* (IEEE Std C95.1-2023). IEEE. <https://www.ieee.org>.
15. Ahlbom, A., Green, A., Kheifets, L., Savitz, D. y Swerdlow, A. (2004). Epidemiología de los efectos de la exposición a radiofrecuencias en la salud. *Environmental Health Perspectives*, 112 (17), 1741-1754. <https://doi.org/10.1289/ehp.7306>

16. Bernhardt, JH (2005). Exposición a campos electromagnéticos y salud pública. *Física en Medicina y Biología*, 50 (19), R39-R57. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/50/19/R01>
17. Bortkiewicz, A., Gadzicka, E., y Szymczak, W. (2017). Variabilidad de la frecuencia cardíaca en trabajadores expuestos a campos electromagnéticos de frecuencia media. *Journal of Occupational Health*, 59 (3), 224-230. <https://doi.org/10.1539/joh.16-0213-OA>
18. CENELEC. (2020). *EN 50527-1:2020: Procedimientos para la evaluación de la exposición a campos electromagnéticos de los trabajadores que llevan dispositivos médicos implantables activos*. Comité Europeo de Normalización Electrotécnica.
19. De Vocht, F., van Tongeren, M. y Burstyn, I. (2011). Impacto de la exposición a campos electromagnéticos en la salud reproductiva masculina: una revisión sistemática. *Revista Internacional de Andrología*, 34 (4), 369-380. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2605.2011.01185.x>
20. Durney, CH, Massoudi, H., & Iskander, MF (2014). Manual de dosimetría de radiación por radiofrecuencia. *Informe del Laboratorio de Investigación de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos*, 7 (5), 1-200.
21. Comisión Europea. (2013). *Directiva 2013/35/UE sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (campos electromagnéticos)*. Diario Oficial de la Unión Europea.
22. Feychting, M., Forssén, U. y Floderus, B. (2003). Exposición ocupacional a campos electromagnéticos y riesgos para la salud. *Revista escandinava de trabajo, medio ambiente y salud*, 29 (3), 132-142. <https://doi.org/10.5271/sjweh.719>
23. Floderus, B., Stenlund, C. y Persson, T. (2009). Exposición ocupacional a campos electromagnéticos y enfermedades cardiovasculares. *American Journal of Epidemiology*, 169 (11), 1323-1329. <https://doi.org/10.1093/aje/kwn413>
24. Genuis, SJ y Lipp, CT (2011). Hipersensibilidad electromagnética: ¿realidad o ficción? *Science of the Total Environment*, 408 (17), 3503-3508. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.036>
25. Havas, M. (2017). Cuando la teoría y la observación chocan: ¿puede la radiación no ionizante causar efectos biológicos? *Environmental Pollution*, 241 (1), 367-383. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.135>

26. ICNIRP. (2020). *Directrices para limitar la exposición a campos electromagnéticos (100 kHz a 300 GHz)*. Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes.
27. IEEE. (2019). *Norma para los niveles de seguridad con respecto a la exposición humana a campos electromagnéticos, de 3 kHz a 300 GHz (IEEE Std C95.1-2019)*. Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
28. Jalilian, H., Teshnizi, SH y Rössli, M. (2019). Exposición ocupacional a campos magnéticos de frecuencia extremadamente baja y riesgo de enfermedad de Alzheimer: una revisión sistemática y un metanálisis. *Environmental Research*, 173, 399-408. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.007>
29. Juutilainen, J., y Lagroye, I. (2011). Efectos celulares de los campos electromagnéticos: revisión de estudios recientes. *Bioelectromagnetics*, 32 (8), 588-609. <https://doi.org/10.1002/bem.20648>
30. Kundi, M., y Hutter, HP (2009). Estaciones base de telefonía móvil: efectos sobre el bienestar y la salud. *Pathophysiology*, 16 (2-3), 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.pathophys.2009.01.008>
31. Markov, M., y Grigoriev, Y. (2015). Tecnología Wi-Fi: un experimento global no controlado sobre la salud de la humanidad. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 34 (3), 157-161. <https://doi.org/10.3109/15368378.2014.923889>
32. NIOSH. (2021). *Exposición ocupacional a campos electromagnéticos: consideraciones de salud y seguridad*. Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional.
33. Roosli, M., Frei, P. y Mohler, E. (2010). Revisión sistemática de los efectos sobre la salud de la exposición a campos electromagnéticos de radiofrecuencia de estaciones base de telefonía móvil. *Revista internacional de investigación medioambiental y salud pública*, 7 (4), 1813-1846. <https://doi.org/10.3390/ijerph7041813>
34. OMS. (2021). *Campos electromagnéticos y salud pública: exposición a campos de frecuencia extremadamente baja*. Organización Mundial de la Salud.