

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**APANTALLAMIENTO DE CAMPOS COMPUESTOS EN  
BARRAS DE BAJA TENSIÓN CON ELEVADAS  
CORRIENTES**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**EDUARDO JAVIER SANES CALDAS**

**PROMOCIÓN  
1999 - I**

**LIMA – PERÚ  
2003**

*Este informe se lo dedico a Dios y a mis  
padres Martha y Alejandro que con su  
dedicación y esmero lograron plasmar en mí  
un hombre de bien.*

*Mención especial a mis hijos Melody y  
Abraham y a mi esposa María que son la  
fuerza que me impulsa a luchar cada día.*

**APANTALLAMIENTO DE CAMPOS COMPUESTOS EN  
BARRAS DE BAJA TENSIÓN CON ELEVADAS  
CORRIENTES**

## **SUMARIO**

El presente volumen es un aporte que permitirá describir los efectos secundarios de los campos electromagnéticos generados por los sistemas de baja tensión en subestaciones convencionales, a la vez que se presenta un método práctico de apantallamiento de los mismos usando la teoría del “Blindaje de Faraday”.

En el capítulo I se detalla en forma genérica el origen de los campos así como una revisión rápida de la teoría en que se fundamenta este volumen.

En el capítulo II se muestra detalles de estudios realizados sobre los efectos de la exposición de personas a los campos electromagnéticos.

En el capítulo III se describe la disposición de una subestación del tipo convencional típica de los sistemas de distribución de Lima.

En el capítulo IV y V se calcula el campo eléctrico y magnético respectivamente, generado por las barras de baja tensión de una subestación convencional de media tensión.

En el capítulo VI se evalúa las expresiones determinadas para los campos eléctricos y magnéticos encontrados en los capítulos anteriores para datos reales de una subestación donde se aplica el método de apantallamiento.

En el capítulo VII se describe la técnica usada para apantallar los efectos de los campos.

# INDICE

<b>PRÓLOGO</b>	<b>1</b>
----------------	----------

## **CAPÍTULO I**

<b>GENERALIDADES EN CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNETICOS</b>	<b>3</b>
1.1 Introducción	3
1.2 Carga eléctrica	3
1.3 Corriente eléctrica	4
1.4 Voltaje	4
1.5 Circuito eléctrico	5
1.6 Circuito magnético y dieléctrico	5
1.7 Campo eléctrico	6
1.8 Campo magnético	6
1.9 El campo electromagnético según ecuaciones de MAXWELL	9

## **CAPÍTULO II**

<b>CONSECUENCIAS DE LA EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS E IMPORTANCIA DEL APANTALLAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO</b>	<b>13</b>
---	-----------

2.1 Efectos en el cuerpo humano expuesto a un campo Electromagnético	13
---	----

2.2	El riesgo de los campos eléctricos y magnéticos en la salud de las personas	16
a)	Estudios In Vitro	17
b)	Estudios In Vivo	22
2.3	Limites y recomendaciones para la exposición a campos eléctricos y magnéticos	31
2.4	Algunos efectos no biológicos de los campos electromagnéticos	33
2.5	Importancia del apantallamiento electromagnético	36

### **CAPÍTULO III**

<b>DESCRIPCION DE SUBESTACIONES TIPO CASETA O CONVENCIONALES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN</b>	<b>42</b>
3.1 Sistema de media tensión	44
3.2 Sistema de baja tensión	47
3.3 Puesta a tierra en baja tensión y media tensión	48

### **CAPÍTULO IV**

<b>CALCULO DEL CAMPO ELECTRICO EN UN SISTEMA DE BARRAS DE BAJA TENSION</b>	<b>51</b>
4.1 Consideraciones generales	52
4.2 Desarrollo del calculo	

**CAPÍTULO V****CALCULO DEL CAMPO MAGNETICO EN UN SISTEMA DE BARRAS 55****DE BAJA TENSION****5.1 Consideraciones generales 55****5.2 Desarrollo del calculo 56****CAPÍTULO VI****EVALUACION E INTERPRETACIÓN DE LOS CAMPOS ELECTRICOS 59****Y MAGNETICOS****CAPÍTULO VII****DESCRIPCION DE LA TÉCNICA DE APANTALLAMIENTO 63****CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 70****ANEXOS 72****BIBLIOGRAFIA 74**

## PRÓLOGO

La electricidad es un elemento esencial de la sociedad actual. Casi todas las actividades laborales, y muchas de las domésticas, dependen de ella. Resultaría muy difícil, por no decir imposible, llevar a cabo algunas de las tareas más comunes de la vida cotidiana sin electricidad. Es conocida por sus aplicaciones (trabajo, calor, frío, luz, etc.) y frecuentemente temida por sus posibles efectos fisiológicos directos (calambres, electrocución, etc.). Hasta hace relativamente poco tiempo, solo los científicos y técnicos analizaban fenómenos secundarios como los campos eléctricos y magnéticos asociados a la corriente eléctrica.

En los años 60, con motivo de algunos estudios sobre trabajadores del sector eléctrico realizados en la entonces Unión Soviética se comenzó a hallar los posibles efectos, sobre todo cansancio y dolores de cabeza sobre la salud de los trabajadores expuestos a diferentes campos electromagnéticos (CEM) que se generan en las instalaciones eléctricas.

A estos primeros estudios siguieron, ya en los años 70, otros sobre trabajadores de distintos sectores industriales, sobre modelos animales y sobre voluntarios expuestos a diferentes intensidades de CEM. Todos ellos tuvieron muy poca repercusión. Sin embargo, en 1979, unos autores americanos sugirieron que niños que padecían determinados tipos de cáncer tenían una mayor probabilidad de residir cerca de instalaciones eléctricas, supuestamente generadoras de altas intensidades de CEM.

A raíz de la publicación de este estudio, los posibles efectos biológicos de los CEM pasaron a ser un tema interesante investigado, a través de una gran variedad de análisis que abordan desde el supuesto efecto cancerígeno ya mencionado, hasta alteraciones del comportamiento psiquiátricas (depresiones), aborto en mujeres que trabajan con terminales de ordenador, alteraciones en determinados componentes de la sangre, incidencia de malformaciones en la descendencia de animales, efectos sobre la fertilidad y reproducción de animales expuestos (una cuestión que es de especial interés para granjeros cuyos animales viven cerca de líneas de alta tensión), etc.

En un principio, se estudiaron los campos eléctricos y magnéticos de manera conjunta, e incluso se les daba más importancia a los primeros.

En la actualidad por razones que se señalarán más adelante, los estudios se centran principalmente sobre los campos magnéticos.

# **CAPÍTULO I**

## **GENERALIDADES EN CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNETICOS**

### **1.1 Introducción**

En la zona sur de Lima existen cerca de 1200 subestaciones convencionales, los cuales generalmente están ubicados en estructuras de material noble, lo que no permite tener apantallamiento para los campos electromagnéticos generado por las barras de baja tensión, que generalmente se encuentran alojados sobre la pared del lado derecho del recinto, siendo la fuente de generación de fuertes ondas electromagnéticas que no logran atenuarse con la distancia, sus efectos son de pérdidas de información en computadoras, falla en equipos de comunicación y hasta inducción de cargas estáticas sobre equipo electrónicos.

### **1.2 Carga eléctrica**

En teoría de los circuitos, postulamos la existencia de una unidad de carga indivisible. Hay dos clases de carga, llamadas carga negativa y positiva. La partícula cargada negativamente se denomina electrón. Las cargas positivas pueden ser átomos que hayan perdido electrones, llamados iones; en

estructuras cristalinas, las deficiencias electrónicas, denominados huecos, actúan como partículas cargadas positivamente. En el Sistema Internacional de Unidades (SI), la unidad de carga es el coulomb (C). La carga del electrón es  $1.60219 \times 10^{-19}$  C.

### **1.3 Corriente eléctrica**

El flujo o movimiento de partículas cargadas se denomina corriente eléctrica. En el Sistema Internacional de Unidades (SI), una de las unidades fundamentales es el ampere (A).

La definición es tal que una rapidez de circulación de carga es 1 A es equivalente a 1 C/s. Por convención, hablamos de una corriente como el flujo de cargas positivas. Cuando sea necesario considerar el flujo o circulación de cargas negativas, usaremos los modificadores apropiados. En un circuito eléctrico, es necesario controlar la trayectoria del flujo de corriente para que el dispositivo opere como se pretende.

### **1.4 Voltaje**

El movimiento de las partículas cargadas requiere de gasto de energía o está acompañado de liberación de energía. El voltaje, en un punto en el espacio, esta definida como el trabajo por unidad de carga (joules/coulomb) requerido para mover una carga desde un punto de voltaje cero hasta el punto en cuestión.

## **1.5 Circuito eléctrico**

Un circuito eléctrico es un conjunto de equipos y componentes eléctricos conectados entre sí para procesar información o energía por medio de la electricidad. Un circuito eléctrico puede describirse matemáticamente por medio de ecuaciones diferenciales ordinarias, que pueden ser lineales o no lineales y que varían o no varían en el tiempo. El efecto práctico de esta restricción es que las dimensiones físicas son pequeñas si se les compara con la longitud de onda de cualquier señal eléctrica. Muchos aparatos y sistemas usan circuitos en sus diseños.

## **1.6 Circuitos magnéticos y dieléctricos**

Los campos magnéticos y eléctricos pueden ser controlados mediante arreglos adecuados de materiales apropiados. Los campos magnéticos incluyen los campos magnéticos de los motores, generadores y grabadoras de cinta; los dieléctricos incluyen ciertos tipos de micrófonos. Los campos en sí se denominan campos de flujos o flujos. Los campos magnéticos son creados por fuerzas magnetomotrices; los eléctricos, por voltajes (también llamadas fuerzas electromotrices). Al igual que en los circuitos eléctricos, las dimensiones para circuitos dieléctricos y magnéticos son pequeños comparadas con la longitud de onda. En la práctica, los circuitos son muchas veces no lineales y también se desea confinar el flujo magnético o eléctrico a una trayectoria prescrita.

## 1.7 Campo eléctrico

El concepto de campo eléctrico fue introducido en la teoría de electromagnética para describir las fuerzas existentes entre cargas. Un campo eléctrico en un punto del espacio se produce por una o varias cargas eléctricas y se define en términos de fuerza que experimenta una unidad de carga estacionaria situada en dicho punto. El campo eléctrico se expresa en voltios por metro (V/m).

El valor del campo eléctrico es función del nivel de tensión del sistema eléctrico; es decir, cuanto mayor sea la tensión del sistema eléctrico; es decir cuanto mayor sea la tensión del dispositivo mas intenso será el campo eléctrico.

En el medio ambiente existe un campo eléctrico natural, creado por cargas eléctricas presentes en la ionosfera, que varía desde 100-400 V/m en condiciones de buen tiempo, hasta 20000 V/m en condiciones de fuerte tormenta.

En la Gráfico N° 1.1 se muestra la interacción de las líneas de campo eléctrico entre dos cargas iguales y de signo opuesto y del mismo signo.

## 1.8 Campo magnético

El concepto de campo eléctrico fue introducido en la teoría del electromagnetismo para explicar las fuerzas que aparecen entre las corriente eléctricas.

Los campos magnéticos son producidos por cargas en movimiento, es decir, por corrientes eléctricas (también se pueden producir campo magnéticos con

imanes permanentes). El campo magnético en un punto dado del espacio puede ser definido como la fuerza que se ejerce sobre un elemento de corriente situado en dicho punto. Esta magnitud, conocida como campo magnético  $H$  se expresa en amperios por metro (A/m).

En el Gráfico N° 1.2 apreciamos la disminución del campo magnético con la distancia de separación respecto a la fuente.

### Gráfico N° 1.1: Líneas de campo eléctrico

**1-A) Líneas de Campo Eléctrico entre dos cargas iguales de signo opuesto**

**1-B) Líneas de Campo Eléctrico entre dos cargas iguales del mismo signo**

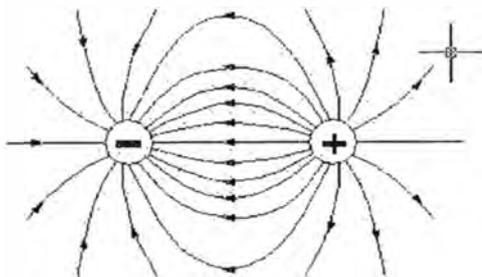


Gráfico  
1-A

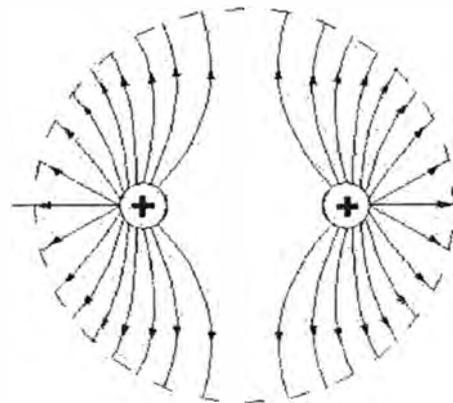
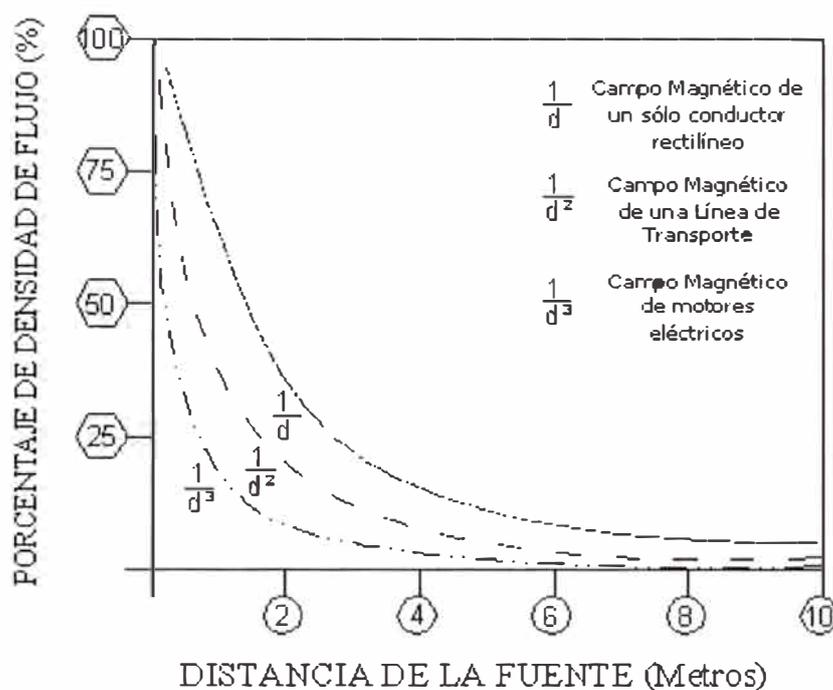


Gráfico  
1-B

**Gráfico N° 1.2: Disminución de la Intensidad de Campo Magnético según el N° de conductores y distancia de las mismas.**



Normalmente, la intensidad del campo magnético  $\vec{H}$  se relaciona con la densidad de flujo magnético  $\vec{B}$  por medio de la permeabilidad magnética  $\mu$ . Según la relación:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

El campo magnético  $H$  se mide en el SI en Tesla (T) también se utiliza el Gauss (G). La equivalencia es:

$$1T = 10000G$$

toda corriente eléctrica produce un campo magnético. Cuanto mayor sea la intensidad de corriente que recorre un conductor, más elevado será el campo magnético creado.

Existe un campo magnético natural estático supuestamente debido las corrientes que circulan en el núcleo de la tierra. La intensidad del campo magnético terrestre varía con la altitud: desde 25  $\mu\text{T}$  en el ecuador magnético (30  $\mu\text{T}$  en el Geográfico) hasta aproximadamente 67  $\mu\text{T}$  en los polos; tal como se detalla en la Figura N° 1.1.

### 1.9 El campo electromagnético según las ecuaciones de Maxwell

La relación de los campos eléctricos y magnéticos con las fuentes de carga y de corriente que los crean viene determinada por las relaciones conocidas como las ecuaciones de Maxwell y que sintetizan diversas leyes experimentales descubiertas por otros científicos. Estas ecuaciones fueron expuestas por James Clerk Maxwell en su obra *Electricity and Magnetism* en 1873 y son válidos para todo tipo de medios y frecuencias.

Las ecuaciones de Maxwell son las siguientes:

$$\text{- Ley de Gauss:} \quad \mathbf{div} \vec{D} = \rho V \quad (1.1)$$

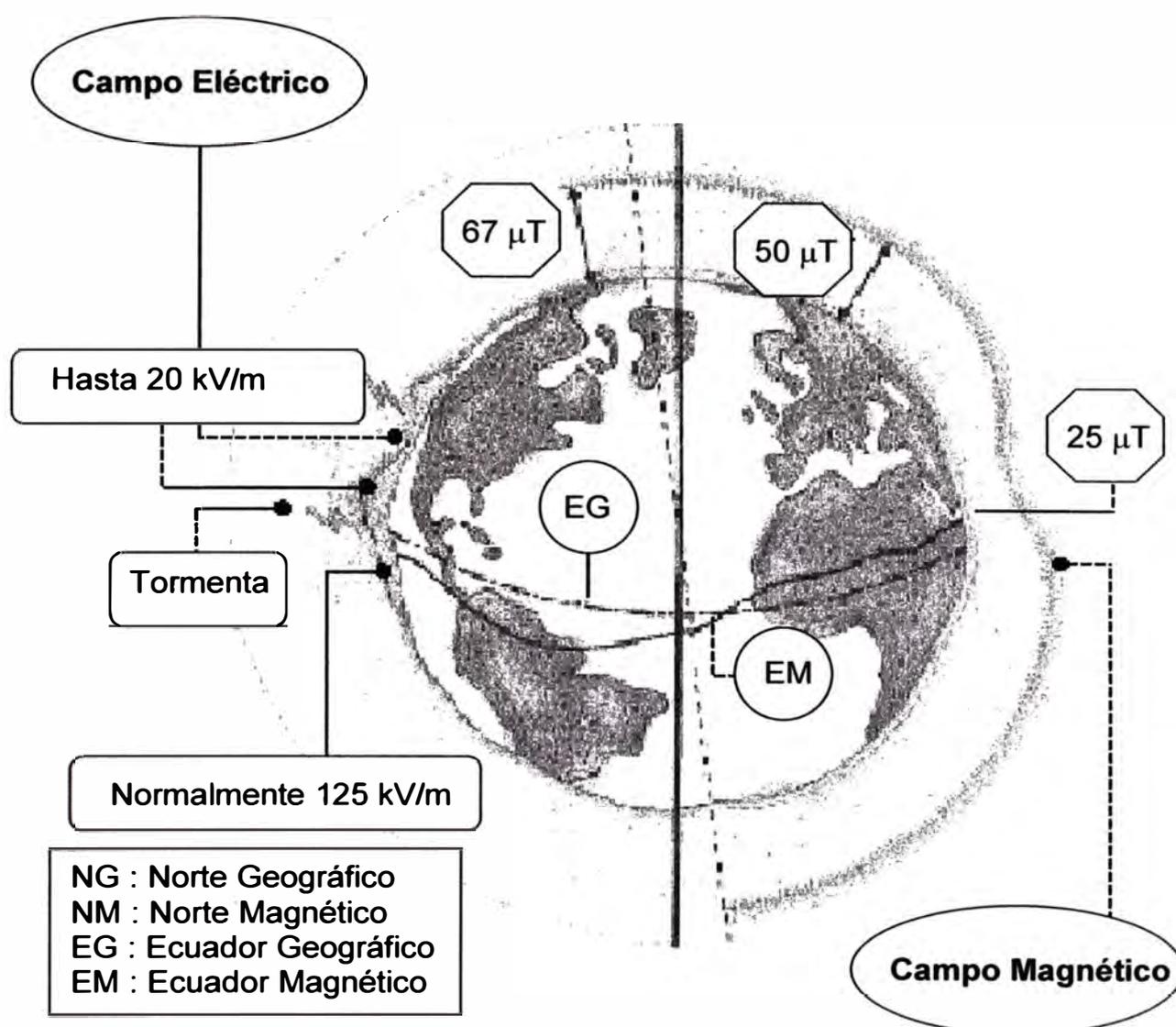
$$\text{- Ley de Faraday:} \quad \mathbf{rot} \vec{E} = \frac{\delta \vec{B}}{\delta t} \quad (1.2)$$

$$\text{- Carácter solenoidal del:} \quad \mathbf{div} \vec{B} = 0 \quad (1.3)$$

campo magnético

- Ley de Ampere – Maxwell:  $\mathbf{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\delta D}{\delta t}$  (1.4)

Figura N° 1.1

**Campos naturales en la tierra**

La energía eléctrica se utiliza normalmente en forma de corriente eléctrica a 50 ó 60 Hz. La fuente de los campos electromagnéticos a 60 Hz son las cargas eléctricas que circulan por los conductores y que se mueven alternativamente a dicha frecuencia industrial 120 veces por segundo. Esta pequeña variación permite considerar a ambos campos como cuasiestáticos e independientes. Es decir, a estas frecuencias, el campo eléctrico (CE) y el magnético (CM) pueden considerarse, con una buena aproximación, como separados, no acoplándose ni propagándose como onda. Estos campos están muy próximos a los campos estáticos, como pueden ser los eléctricos y magnéticos naturales, y se distancian enormemente de los de alta energía, como los rayos X, lo que es importante a la hora de estudiar sus posibles efectos biológicos.

## **CAPÍTULO II**

### **CONSECUENCIAS DE LA EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS E IMPORTANCIA DEL APANTALLAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO**

#### **2.1 Efectos en el cuerpo humano expuesto a un campo electromagnético**

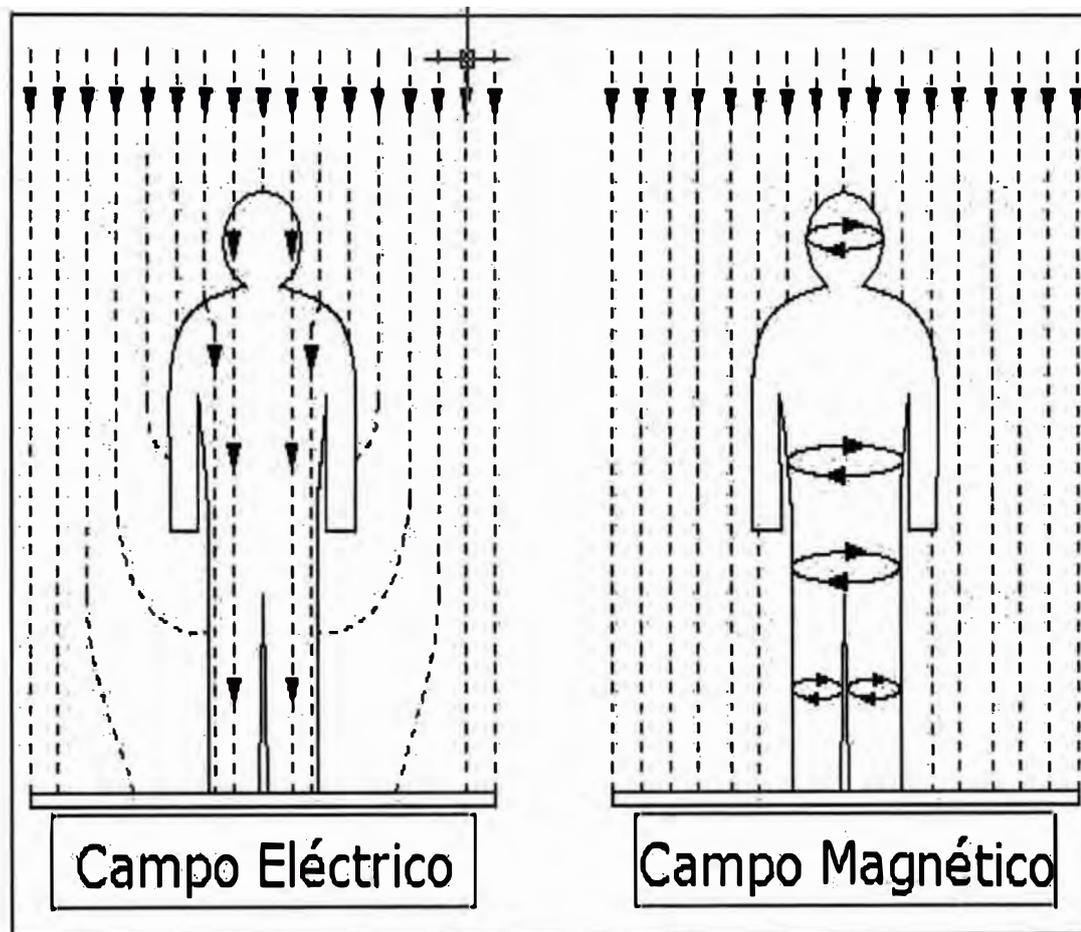
El cuerpo humano contiene cargas eléctricas libres (sobre todo en fluidos ricos en iones, tal como es la sangre), la exposición a un campo eléctrico hace que éstas se muevan. De esta forma, se crean o inducen campos y corrientes eléctricas en el interior del organismo.

Estas corriente inducidas son diferentes según sean generadas por un campo eléctrico o magnético, tal como se muestra en la Figura Nº 2.1

Como se ha comentado en el capítulo anterior existe un campo magnético terrestre natural, estático, de aproximadamente  $40 \mu\text{T}$  de intensidad. Este campo, incluso siendo estático, puede inducir corrientes en una persona cuando esta se mueve dentro del mismo. Por ejemplo, girar la cabeza hacia un lado lentamente induce corrientes equivalentes a las que se inducirían si se estuviera expuesto a un campo magnético de  $0.2 \mu\text{T}$ . Si se mueve la cabeza hacia abajo rápidamente, en un gesto de asentamiento, se generan corrientes equivalentes a una exposición de  $2 \mu\text{T}$ .

Figura N° 2.1

***Corrientes inducidas en el cuerpo humano por los campos eléctricos y los campos magnéticos***



La magnitud de las corrientes inducidas por un campo magnético variable depende de muchos factores, tales como la intensidad de la corriente aplicada externamente, la distancia del cuerpo al origen de la corriente, la presencia de objetos que puedan apantallar o concentrar el campo, la forma y postura que tenga el cuerpo, etc. Así, la corriente que se induce en una persona bajo una línea no es la misma si está de pie o si está sentada.

Se puede calcular la magnitud de estas corrientes inducidas. Y se sabe que, incluso debajo justo de una línea de alta tensión, los niveles son tan bajos, que las corrientes no pueden penetrar en las células y se quedan fuera de las mismas.

Por otra parte, en el funcionamiento normal de los seres vivos, se generan corrientes (por ejemplo, por el latido del corazón o por la transmisión de señales nerviosas) que son muy superiores a las que se pueden incurrir como consecuencia de la exposición a cualquier electrodoméstico o línea eléctrica. Esta es una de las razones por la que algunos científicos mantienen que los CEM no pueden tener efectos Biológicos.

A modo de ilustración, cabe señalar que, cuando se está expuesto a un campo magnético variable de  $0.2 - 20 \mu\text{T}$ , se generan en el cuerpo campos eléctricos de entre  $0.004 - 0.4 \text{ mV/m}$ . Este valor es muy inferior a los aproximadamente  $20 \text{ mV/m}$  naturales del cuerpo humano que genera el movimiento normal de iones en su interior, un fenómeno llamado "ruido térmico".

Estudios sobre voluntarios han determinado que algunas personas pueden percibir campos eléctricos de entre  $2$  y  $10 \text{ kV/m}$ . Estas personas describen una sensación de "cosquilleo" que se produce porque el campo eléctrico hace vibrar el pelo de la cabeza y del cuerpo. En el caso del campo magnético, únicamente bajo altísimas intensidades (del orden de  $10000 \mu\text{T}$ ) pueden percibirse unos destellos de luz (llamado magnetofosfenos) análogos a los que se producen cuando nos frotamos los ojos. En cualquier caso, el hecho de percibir los campos no implica ningún efecto nocivo.

Se han realizado multitud de exámenes médicos sobre voluntarios expuestos a una gran variedad de intensidades de campo eléctrico y magnético, sin que se hayan detectado variaciones significativas en ningún parámetro biológico.

En pacientes sometidos a diagnósticos mediante Resonancia Nuclear Magnética a intensidades de hasta 2000000  $\mu\text{T}$ , no se han registrados tampoco efectos negativos. Por último, cabe recordar que existen equipos de uso médico que utilizan campos magnéticos de alta intensidad para, por ejemplo, consolidar fracturas óseas.

## **2.2 El riesgo de los campos eléctricos y magnéticos en la salud de las personas**

En la actualidad no se puede afirmar que los campos electromagnéticos de 60 Hz existentes en nuestro entorno supongan un riesgo para las personas.

Se sabe que los CEM, en algunos experimentos y bajo determinadas condiciones, manifiestan ciertos efectos biológicos (movimiento de iones a través de la membrana celular, estimulación ósea, etc.). Lo que no se ha podido comprobar es que estos efectos observados impliquen o signifiquen un riesgo para la salud.

Para investigar los efectos biológicos de cualquier agente, físico o químico, en el laboratorio, se utilizan dos tipos de estudios. Los llamados "in vitro", es decir, estudios sobre células aisladas en tubos de ensayo; y los estudios "in vivo", que se realizan sobre animales o personas expuestos.

a) **Estudios “in vitro”:** Los estudios “in vitro” han analizado, básicamente, dos aspectos. Por una parte, y por analogía con la radiación ionizante (rayos X), se ha intentado comprobar si los CEM pueden modificar o alterar la estructura del material hereditario (el ADN). Esto es importante, puesto que, si pueden hacerlo, cabría esperar de ellos múltiples efectos biológicos, como un potencial para producir malformaciones y transformaciones cancerígenas.

En la Tabla N° 2.1 se muestra la energía de distintas ondas electromagnéticas en electrón voltios.

En estos momentos, y éste quizás uno de los pocos aspectos en el que los científicos están de acuerdo, se puede decir que los CEM no son capaces de alterar estructura del material hereditario; tampoco aumentan los efectos que otros agentes puedan tener sobre el mismo, ni interfieren con la reparación de los daños al material hereditario provocados por agentes físicos o químicos. Por ello, se puede concluir que los CEM no actuarán como “iniciadores” del proceso cancerígeno.

**Tabla N° 2.1*****Energía de ondas electromagnéticas en electrón voltios***

<b>ONDA ELECTROMAGNÉTICA</b>	<b>ENERGIA DE LA ONDA ELECTROMAGNETICA (electrón voltio)</b>
50/60 Hz	$2.5 \times 10^{-13}$ Ev
Radio frecuencias	$0.41 - 1240 \times 10^{-9}$ eV
Microondas	$1.24 - 1240 \times 10^{-6}$ eV
Luz visible	$1.59 - 3.1$ eV
Radiación ionizantes	$> 12.4$ eV

Por otra parte, se investiga también que otros mecanismos podrían usar los CEM para producir algún efecto biológico sobre las células. Las células de las que todos los seres vivos están compuestos se encuentran cubiertas por una membrana en la que se insertan ciertas moléculas, que actúan como canales para permitir el paso de sustancia hacia dentro y fuera de la célula, y como receptores que comunican al interior lo que pasa en el exterior. La información que transmiten producen cambios en los niveles de algunos compuestos químicos, los cuales, a su vez, pueden modificar el funcionamiento de la célula y enviar información a otras células. Las hipótesis que se barajan en la actualidad tratan de investigar si los

CEM podrían actuar sobre la membrana celular o sobre algunos de sus componentes.

Así se han estudiado los efectos sobre el movimiento de iones (calcio, sodio, etc.), el ritmo de fabricación de algunas proteínas y otros compuestos químicos, la respuesta celular normal a ciertas hormonas, la respuesta inmunológica y el ritmo de crecimiento y división celular.

Los resultados de estos no siempre han sido iguales. Por ejemplo, en el caso del movimiento iónico, algunos autores observan aumentos de calcio; otros observan disminuciones; otros sólo observan cambios en situaciones especiales (por ejemplo, en presencia de un campo magnético estático definido), otros sólo a unas frecuencias e intensidades y no a otras (efectos “ventana”); y, por último, el observar o no efectos puede depender del tipo de célula que se investigue.

Lo riguroso que se sea a la hora de analizar las células expuestas y las no expuestas es de vital importancia. En el caso de algunos experimentos que parecían demostrar una relación entre la exposición a CEM de 60 Hz y la expresión de algunos genes ligados al cáncer, los resultados han sido recientemente rechazados cuando se han usados controles más rigurosos y métodos de comparación exhaustivos.

Por todo ello, es imposible afirmar en estos momentos que los efectos observados sean debidos a los CEM y no a factores propios de cada laboratorio.

Algunos de los ejemplos de estas experimentaciones se exponen en la Tabla N° 2.2.

Todos estos estudios se han realizado bajo condiciones de laboratorio muy específicas y muchos de ellos se basan en la aplicación de un campo magnético estático (como el terrestre) conjuntamente con el campo alterno.

Por tanto hay que tener en cuenta que los resultados de estas investigaciones se basan en condiciones de exposición a CEM que son muy diferentes a las que se puede experimentar en personas en su vida cotidiana.

En cuanto a otros posibles efectos, estos sólo se han observado bajo condiciones de laboratorio muy especiales difícilmente extrapolables a ambientes normales, dependen de muchos factores no siempre controlables y no han sido observados sistemáticamente en todos los laboratorios que han intentado replicar los resultados.

El que un efecto observado en laboratorio pueda ser reproducido en otro puede ser imprescindible para dar valor científico a dicho resultado y para decidir si el efecto biológico es realmente debido al agente que se investiga, y no a aspectos derivados en el laboratorio o de la de la metodología empleada.

**Tabla N° 2.2*****Efectos de los CEM observados en laboratorio***

<b>MECANISMO INVESTIGADO</b>	<b>RESULTADOS</b>
❖ Alteración en la estructura del material genético y/o alteraciones en su reparación	Ningún efecto
❖ Alteración en el ADN	Ningún efecto
❖ Alteración en la expresión de algunos genes relacionados con el cáncer (oncogenes)	En general ningún efecto. Resultados positivos solamente en un grupo de investigación
❖ Efectos sobre células pre-leucémicas	Ningún efecto
❖ Transformación tumoral	En general ningún efecto. Un sólo experimento positivo
❖ Alteración del movimiento iónico	Resultados contradictorios
❖ Alteración en la respuesta a la melatonina en células de cáncer de mama	Bloqueo de la acción de la melatonina
❖ Alteración en interleukinas (sistema inmune)	Ningún efecto
❖ Alteración en la ODC (compuesto relacionado con la proliferación celular)	Resultados contradictorios

b) **Estudios “in vivo”**: Los estudios “in vivo”, es decir realizado sobre personas y animales para comprobar efectos biológicos, han abarcado desde análisis del comportamiento hasta el posible efecto cancerígeno de los CEM, pasando por posibles efectos sobre fertilidad, reproducción y síntesis (producción) de la hormona melatonina. En la actualidad, la evidencia apunta a una ausencia de efectos sobre la mayoría de estos parámetros.

En particular, la posibilidad de que la exposición a CEM tuviese efectos negativos sobre la fertilidad y reproducción (abortos espontáneos, malformaciones congénitas, etc.) ha sido investigada de forma exhaustiva y los resultados de los estudios sobre los animales (sobre todo en mamíferos) y personas expuestas a CEM indican que no existen efectos adversos sobre la reproducción animal o humana.

En la actualidad se siguen investigando los dos temas de forma especial el cáncer y el papel que la producción de la melatonina pueda tener su aparición o desarrollo.

- **Melatonina** Es una hormona que se produce principalmente por la noche en la glándula del cerebro, llamado pineal, y que, en animales, regula la actividad sexual, algunos parámetros de conducta y ciertas funciones fisiológicas, como la liberación de otras hormonas. Algunas de esas funciones (en especial, la regulación de otras hormonas sexuales) parecen darse también en

los hombres. El interés por la melatonina surge, sobre todo, de unos experimentos en los que las ratas a las que se le quitaba la glándula pineal y a las que se le administraba un producto cancerígeno, desarrollaban tumores de mama con mayor frecuencia que aquellos a los que no se le quitaba dicha glándula. Además, las ratas operadas a las que se le administraba la melatonina tenían una menor incidencia de tumores de mama que aquellas que, estando operadas, no recibían melatonina.

Se sabe que la luz visible; que es una zona del espectro electromagnético, modula la síntesis de esta hormona; la exposición a la luz por la noche impide el normal aumento nocturno de esta hormona. Por ello, los científicos se han preguntado si otras zonas del espectro electromagnético, como la de 60 Hz. podrían modificar también su producción.

Algunos estudios sobre animales (ratas y hamsters) apuntan a la posibilidad de que, efectivamente, la exposición a CEM a 60 Hz. impida el normal aumento nocturno de la secreción de la melatonina; vea Tabla N° 2.3.

Sin embargo, estudios posteriores con mamíferos por ejemplo, ovejas que vivían bajo una línea eléctrica de 500 kV y primates (mandriles), expuestos a CEM de 50 o 100  $\mu$ T, no han demostrado que se modifique la secreción de la melatonina ni ningún efecto biológico ligado a ella.

Esta discrepancia puede deberse bien al modelo animal utilizado, bien a que las condiciones de exposición en el laboratorio, sean sustancialmente diferentes de las reales usadas en los experimentos sobre ovejas.

En la actualidad se está realizando estudios para comprobar si, en voluntarios y bajo condiciones de laboratorio, se puede modificar la producción de melatonina. Los primeros resultados en voluntario expuestos a distantes intensidades de campo magnético (1 y 20  $\mu\text{T}$ ) durante una noche no han mostrado variación alguna de los niveles de melatonina, lo cual apoyaría lo dicho anteriormente, es decir, que el modelo animal que se use puede ser muy importante al a hora de detectar efectos.

Como apoyo a esta conclusión, existe un estudio preliminar, sobre trabajadores del sector eléctrico que trabajan de noche junto a equipos que generan CEM intensos, que no han detectado en ellos variaciones de los niveles de melatonina.

Por otra parte, y como veremos más adelante, estudios epidemiológicos sobre mujeres que duermen con mantas eléctricas y que, por tanto, están expuestas a un CEM fuerte, no han demostrado que tengan una mayor incidencia de cáncer mama, que es uno de los que supuestamente estaría ligado a una producción alterada de melatonina.

En papel de la melatonina en relación con el sistema inmune está en estudio actualmente. La exposición de ratones, primates no

humanos y voluntarios humanos a campos magnéticos de intensidad y duración variación no afectó de forma significativa a distintas funciones inmunes, por, lo que tanto la actividad inmunomoduladora de la melatonina, como la acción inmunosupresora de los campos magnéticos, son cuestionadas en la actualidad.

**Tabla N° 2.3**

***Efectos de los CEM en diversos mamíferos***

<b>MODELO EXPERIMENTAL</b>	<b>RESULTADOS</b>
<b>In Vitro</b>	Disminución de los niveles de melatonina de la inhibición ejercida por la melatonina sobre la proliferación de células de cáncer de mama
<b>In Vivo</b>	
Ratas, ratones y hamsters	En general disminución de los niveles de melatonina, aunque en algunos experimento no se detectan alteraciones
Mamíferos superiores	Ninguna alteración
Voluntarios	Ninguna alteración
Trabajadores de turno noche expuestos a CEM	Ninguna alteración (resultados preliminares)

- **Cáncer** Las investigaciones actuales muestran que la carcinogénesis es un proceso causado por una serie de alteraciones en el material genético de las células (el ADN) y que se desarrolla en varias fases. Según el modelo propuesto estas fases son:

**Iniciación**, como consecuencia de una serie de daños en el material genético de las células normales en células cancerosas.

**Promoción**, que convierte las células precancerosas en cancerosas, al impedir por ejemplo, la reparación de daño genético o al hacer a la célula más vulnerable a otros agentes genotóxicos, o al estimular la división de una célula dañada.

**Progresión**, que se refiere al desarrollo del tumor propiamente y de su potencial de provocar metástasis a distancia. En la iniciación intervendrán los llamados agentes “genotóxicos”, mientras que en la promoción y progresión intervendrán los llamados agentes “epigenéticos”.

Los estudios sobre personas y animales a CEM confirmen los experimentos “in Vitro”, en el sentido que los CEM no alteran la

estructura del material genético ni producen mutaciones. No son por tanto iniciadores o genotóxicos.

Extensos estudios sobre animales expuestos a lo largo de toda su vida a CEM (en los que se trata de averiguar si los CEM por sí solos pueden ser cancerígenos), a dosis como las que se pueden encontrar en una gran variedad de situaciones domésticas o laborales, no han mostrado que se produzcan más cánceres en los animales expuestos. Solo un experimento ha mostrado una mayor incidencia de linfomas en animales expuestos a 25000  $\mu\text{T}$ , una intensidad a la que una persona difícilmente puede estar expuesta.

En la Figura Nº 2.2 se muestra las tres fases descritas para la formación de una célula cancerígena.

Los estudios encaminados a demostrar un efecto cancerígeno a través de otros mecanismos (promoción, co-promoción) en animales de laboratorio expuestos a estos campos, han sido hasta el momento de una utilidad un tanto limitada. Las razones principales son dos, por una parte porque para estudiar si existe un efecto promotor se administra primeramente a los animales un producto cancerígeno y luego se intenta detectar si el crecimiento del cáncer se acelera con la exposición de los campos. Usando este tipo de experimentación es difícil diferenciar el efecto de uno u otro agente. Por otra parte, en los experimentos en los que se han detectado algunos efectos, las

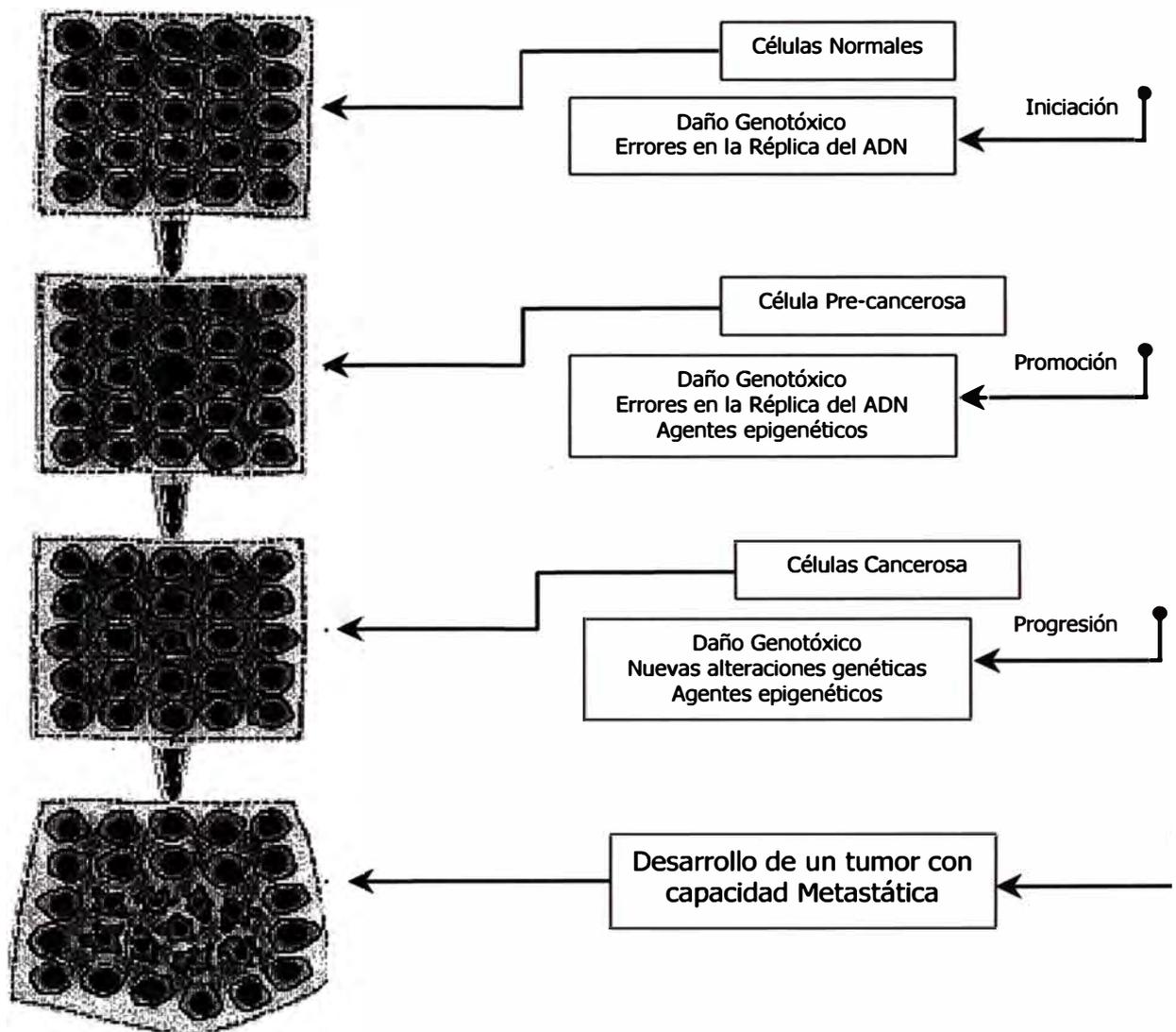
dosis y su ritmo de administración han sido poco útiles para su extrapolación a personas, bien porque eran muy altas (100  $\mu$ T o superiores), bien porque se administraban de forma intermitente. Por último es muy importante que las condiciones de vida de los animales en el laboratorio sean las mismas de los animales expuestos y los no expuestos.

Puede decirse como conclusión, que en general, los estudios de promoción del cáncer a las intensidades encontradas en la vida real no han demostrado que los CEM sean agentes promotores del proceso cancerígeno. En la Tabla N° 2.4 se muestra a modo de resumen, algunos experimentos realizados, así como los resultados obtenidos.

En resumen, los estudios de laboratorio apuntan a que los CEM podrían tener determinados efectos biológicos. Sin embargo, por su propia metodología, la extrapolación a las personas no pueden hacerse directamente. La importancia de estos estudios es que nos ayudan a formular, como en el caso de la melatonina, hipótesis sobre los posibles mecanismos de acción de estos campos, que a su vez nos podrían ayudar a interpretar los estudios sobre colectivos de personas expuestos a estos campos.

**Figura N° 2.2**

**Un modelo de carcinogénesis. Algunos investigadores no hablan ya de estas tres fases, sino que se refieren a sucesivos genotóxicos (iniciadores) y modificaciones “epigenéticas”: estas, sin producir mutaciones, favorecen la carcinogénesis**



**Tabla N° 2.4****Efectos de las intensidades de CEM con relación a las****Neoplasias**

Campo Magnético de 1 $\mu\text{T}$ A 25000 $\mu\text{T}$ actuando solos	Dos estudios (del mismo grupo de investigadores) muestran un incremento de linfomas a 25000 $\mu\text{T}$
Campo Magnético junto a agentes cancerígenos promotores) durante 3 meses o dos años	
Tumores de mama (7 estudios) 0.3 $\mu\text{T}$ a 30000 $\mu\text{T}$	Incremento de tumores a intensidades entre 50 y 100 $\mu\text{T}$ . A intensidades más altas (15 $\mu\text{T}$ a 30000 $\mu\text{T}$ ), no hay efectos.
Tumores de piel (6 estudios) 50 $\mu\text{T}$ a 2000 $\mu\text{T}$	Solo un estudio sugiere una mayor incidencia
Tumores de hígado (2 estudios) 0.5 $\mu\text{T}$ a 500 $\mu\text{T}$	Ninguna alteración
Leucemia (4 estudios) 2 $\mu\text{T}$ a 1000 $\mu\text{T}$	Ninguna alteración
Tumores cerebrales (1 estudio) 1 $\mu\text{T}$ a 100 $\mu\text{T}$	Ninguna alteración

### **2.3 Límites y recomendaciones para la exposición a campos eléctricos y magnéticos**

En los últimos años, organismos locales, nacionales e internacionales han aprobado diversas normas que limitan la exposición a CEM, tanto de trabajadores como público en general.

Las más restrictivas son dos normas americana, que limitan a 15 y a 20  $\mu\text{T}$ , respectivamente, la intensidad del campo magnético derivada de sus líneas de transporte eléctrico, basándose en no sobrepasar los niveles ya existentes de campo eléctrico.

Mención especial merecen las propuestas de la Comunidad Europea para trabajadores que establece un límite (“nivel de acción”) de 6 kV/m y 200  $\mu\text{T}$ , y de 5 kV/m y 100  $\mu\text{T}$  para el público en general.

Las principales instituciones son las siguientes:

- ❖ **ICNIRP.**- Comisión internacional sobre radiaciones no ionizantes (Depende del IRPA, agencia internacional de protección radiológica).  
Es la única que establece límites diferentes para 50 y 60 Hz.
- ❖ **CENELEC.**- Comité europeo de normalización electrotécnica.  
Propuesta de norma experimental.
- ❖ **NRPB.**- Junta nacional de protección radiológica. Gran Bretaña.
- ❖ **ACGIH.**- Conferencia americana de higienistas industriales.
- ❖ **C.E.**- Comunidad europea.

Según estas instituciones, obtenemos los límites y recomendaciones para la exposición laboral (Tabla Nº 2.5) y para el público en general (Tabla Nº 2.6).

**Tabla N° 2.5**

**Límites y recomendaciones de exposición de CEM en el  
trabajo**

<b>ORGANISMO</b>	<b>Campo Eléctrico (kV/m)</b>	<b>Campo Magnético (<math>\mu</math>T)</b>
<b>ICNIRP</b> ❖ 60 Hz. todo el día ❖ 50 Hz. todo el día	8.3 10	420 500
<b>CENELEC</b> ❖ Todo el día ❖ Pocas horas	10 30	1600 1600
<b>NRPB</b>	12	1600
<b>ACGIH (USA)</b>	25	1000
<b>C.E.</b>	6	200



Este fenómeno conocido y estudiado desde 1920, precisa para su generación un voltaje muy alto y la presencia de un gas, como el aire, en torno al mismo, y se ve asimismo favorecido por parámetros tales como la humedad ambiental (que llega a multiplicar por 10 la posibilidad de su formación), el estado superficial de los conductores (el fenómeno se incrementa con las irregularidades) y la relación entre la sección útil y la superficie exterior de los conductores.

Consecuencias directas de este fenómeno son la pérdida de potencia eléctrica, el ruido o perturbación radioeléctrica o ruido ambiental.

La consecuencia de la perturbación radioeléctrica se halla muy definida. Existen referencias técnicas que permiten conocer "a priori" el tipo y nivel de señal (espectro de frecuencia, perfil transversal y fluctuaciones del nivel perturbador) que puede producir una instalación lineal, así como las actuaciones necesarias para mantener el campo eléctrico superficial por debajo de 25 kV/cm y evitar tal fenómeno.

Para conseguirlo, se puede recurrir a la división de un conductor en varios subconductores, mantener las superficies pulidas, revisar periódicamente la existencia de elementos mal ajustados, etc.

En ocasiones, las líneas pueden también actuar como captadoras de señal de frecuencia de TV (> 30 MHz.), perjudicando la recepción de otras antenas e, incluso, generando en ocasiones un reflejo o sombra en los televisores.

El ruido audible de muy baja intensidad que producen las líneas eléctricas es también una consecuencia del efecto corona. Con una frecuencia variable de entre 100 y 150000 Hz., se asemeja al zumbido de las abejas, si bien se ve

generalmente disimulado por el ruido de fondo, de manera que sólo es perceptible en lugares muy silenciosos o cuando la humedad ambiental es elevada.

Otro aspecto relevante y de incidencia de los campos electromagnéticos, son el efecto que repercute sobre los marcapasos cardíacos. Ya en los primeros marcapasos se preveía la necesidad de que fueran resistentes a los tratamientos de desfibrilación, para que el generador de impulsos no se viera afectado por las corrientes de choque.

Las generaciones posteriores de marcapasos que interactúan con el corazón, es decir, esperan una señal eléctrica del mismo para desencadenar la respuesta, están diseñados para convivir con las interferencias electromagnéticas, de modo que, cuando los campos ambientales son intensos, el procesador ordena los marcapasos un ritmo prefijado, ignorando esta interferencia.

Los marcapasos unipolares son especialmente sensibles por tener un solo electrodo aislado eléctricamente. El campo puede entonces inducir una tensión eléctrica entre la punta del electrodo y el marcapasos.

Para campos eléctricos de 50 Hz. , sin embargo, no deberían producirse interferencias por debajo de 2.5 kV/m.

Para campos magnéticos, la probabilidad de interferencia depende, sobre todo, de la sensibilidad de los marcapasos. Para sensibilidades de 0.5 a 2 mV (milivoltios), se calculan intensidades de interferencias de 14 a 55  $\mu$ T. En los marcapasos bipolares, el riesgo de interferencia es mucho menor.

De cualquier forma, la mejor manera de conocer el riesgo de que los campos exteriores puedan afectar el funcionamiento de éste u otros aparatos es consultar al fabricante, que dispone de amplia serie de ensayos.

## **2.5 Importancia del apantallamiento electromagnético**

La intensidad de los CEM decrece rápidamente con la distancia de la fuente. Por ello, la acción más inmediata y eficaz para disminuir las dosis es el alejamiento respecto de aquella.

Esta medida no siempre es posible, por lo que, en tal caso, se puede recurrir a la reducción de los campos en origen.

A veces hay posibilidades de reducir el CM con un simple reordenamiento eléctrico o geométrico de los elementos activos o con la interposición de otros circuitos compensadores.

Las acciones posibles para reducir las exposición a CM generados por la red son de dos tipos: activas y pasivas.

Las primeras atacan el problema en la misma fuente, es decir, actúan sobre parámetros cuya variación reduce la intensidad de campo, tales como:

- ❖ Alejar el elemento de los potenciales receptores (elevar o enterrar más la línea).
- ❖ Disminuir la distancia entre las fases.
- ❖ En los sistemas con más de un circuito, combinar adecuadamente la ubicación de las distintas fases.
- ❖ Cambiar las características de la instalación (desde el número de subconductores, hasta un eventual aterramiento).

- ❖ Disminuir la intensidad de la corriente que atraviesa la línea.
- ❖ Procurar el máximo equilibrio de cargas en las fases, algo de fácil solución en líneas de alta y media tensión, pero muy complejo en las de baja tensión.
- ❖ Crear pasillos o ductos en los que se introduzcan cuantas líneas sean reglamentariamente posibles con criterios de cancelación de campos.
- ❖ Instalar un circuito periférico a la instalación, haciendo circular por él, una corriente y una fase determinadas, en función de las condiciones de la línea para cancelar el campo.

Las técnicas de apantallamiento no eliminan el campo, sino que “modifican” su forma. Se utilizan generalmente para proteger equipos sensibles. Las más habituales son de dos tipos:

- ❖ Blindaje con materiales tipo metálicos y otros equivalente, que reducen las líneas de CM.
- ❖ Pantallas electromagnéticas activas (circuitos eléctricos), que crean un campo opuesto al que se desea reducir.

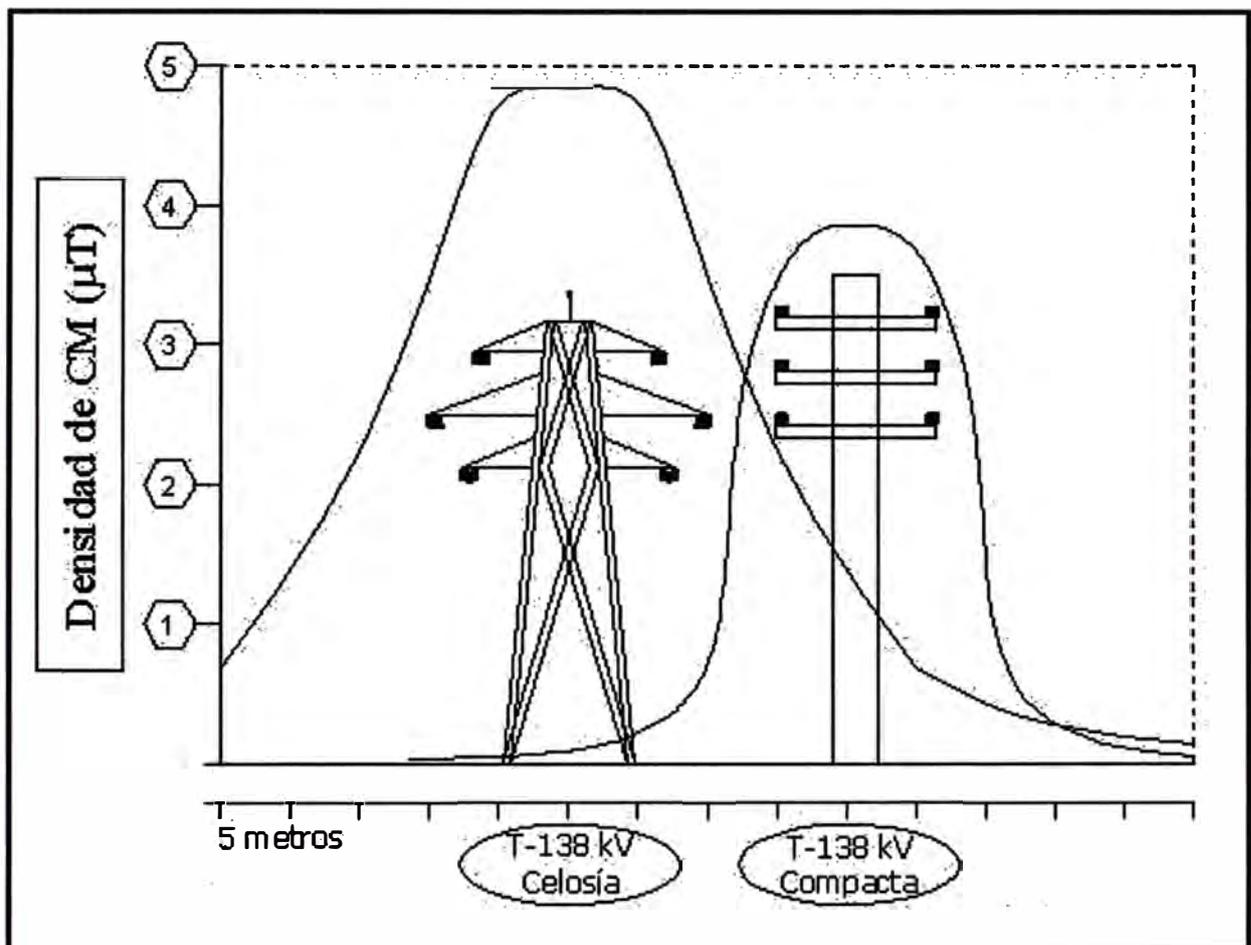
En el caso de los electrodomésticos, simples cambios en su diseño reducen la generación de CM.

De igual manera, ciertos criterios de diseño para los cableados en la construcción y en las instalaciones eléctricas de viviendas y oficinas, pueden reducir apreciablemente los niveles ambientales.

En las figuras N° 2.3; N° 2.4; N° 2.5; N° 2.6; se indican a título orientativo las máximas reducciones de densidad de campo que se pueden conseguir con algunas de las actuaciones mencionadas.

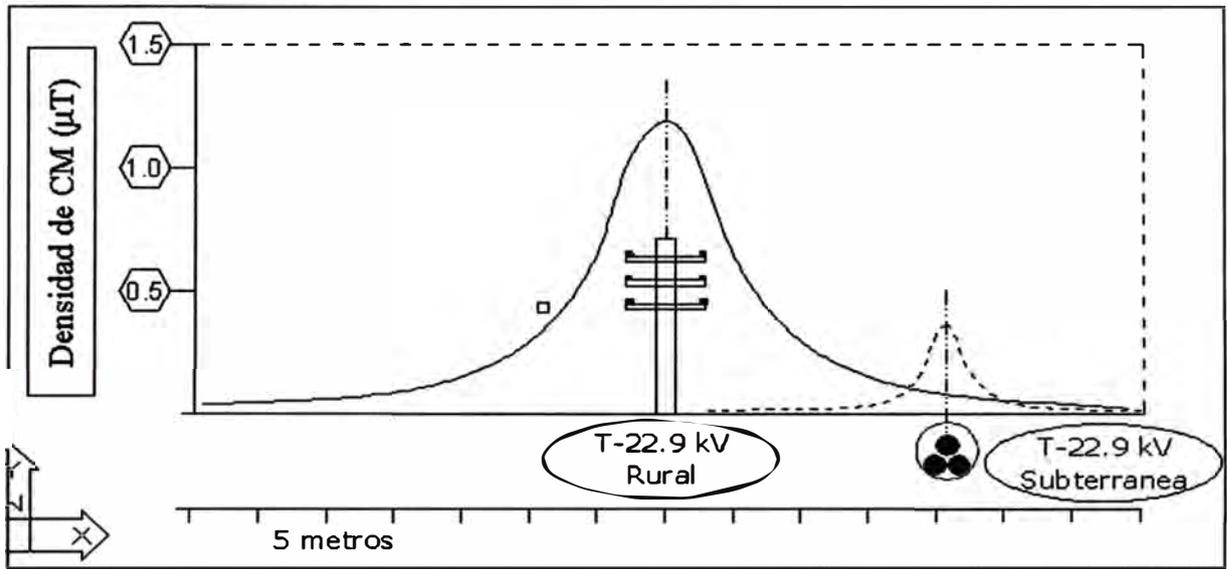
**Figura N° 2.3**

**Compactación al máximo de la línea eléctrica aérea, combinando esta acción con una reubicación de las fases en un orden adecuado.**



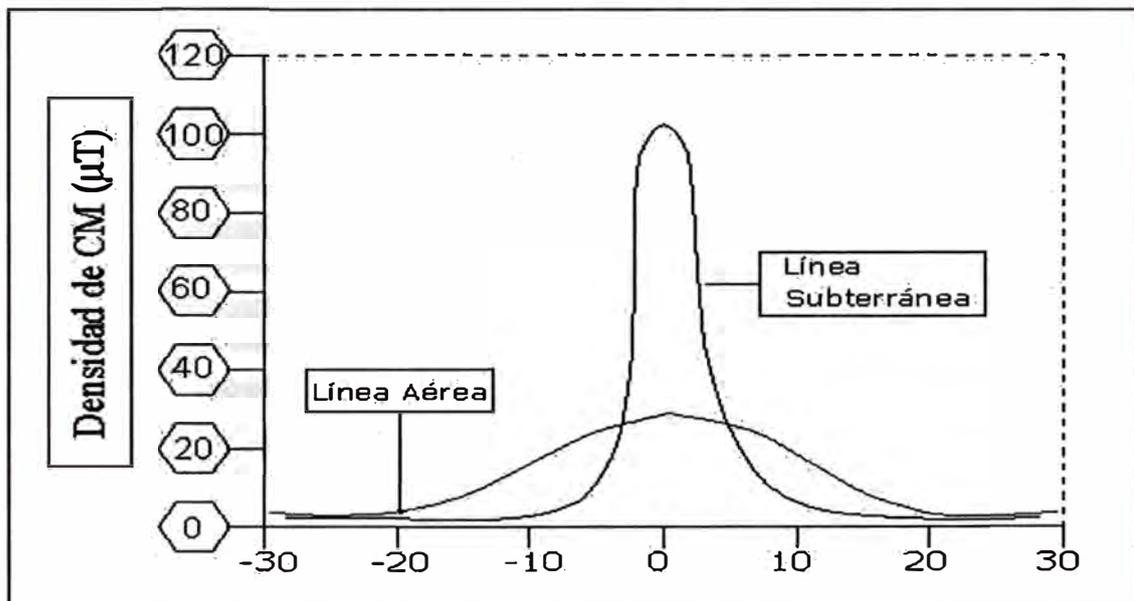
**Figura N° 2.4**

**Cambio de una línea aérea a subterránea.**



**Figura N° 2.5**

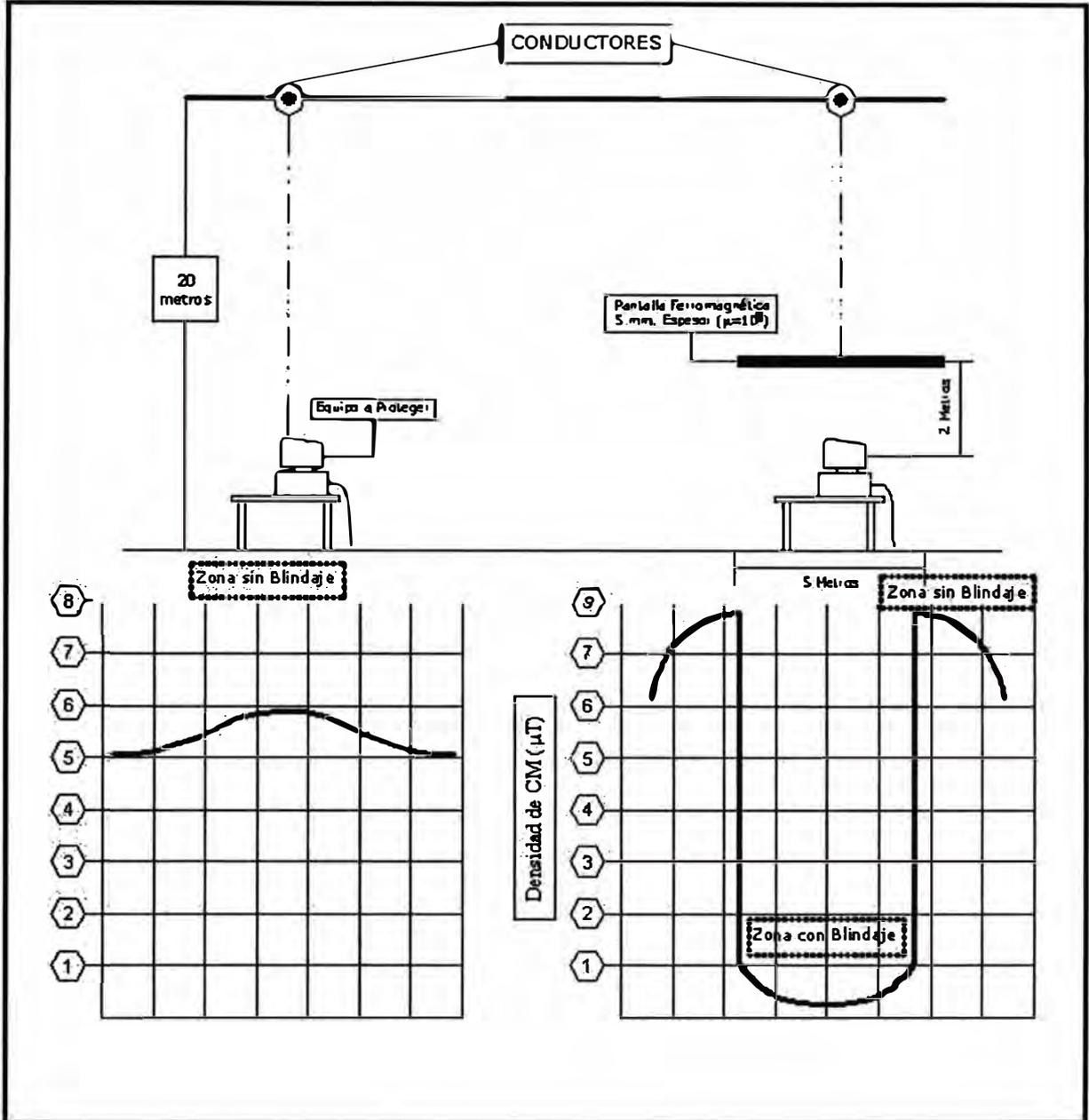
**Cambio de línea aérea de 400 kV (2000 amperios) a subterránea.**



**Densidad de campo magnético medida a 1 metro del suelo.**

**Figura N° 2.6**

**Modificación del CEM con apantallamiento local.**



## **CAPÍTULO III**

### **DESCRIPCION DE SUBESTACIONES TIPO CASETA O CONVENCIONALES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE LIMA**

Las subestaciones tipo caseta o también denominadas convencionales, son unidades que están conectadas a la red de media tensión que distribuye la energía eléctrica a los usuarios de media tensión o de baja tensión.

Estas subestaciones están formadas por un sistema en media tensión y un sistema de baja tensión bien definidos, generalmente uno enfrente del otro.

Se caracteriza principalmente porque su equipo es de tipo interior y está instalado en una construcción apropiada, en la que se han previsto pasadizos y espacios de trabajo necesarios, para realizar mantenimiento o maniobras en la subestación.

Están conformados de una caseta de material noble de 3.5 metros de ancho por 6 metros de fondo 3 metros alto. En el lado izquierdo tal como se muestra en el Plano N° 01 del anexo, encontramos las siguientes celdas:

- ❖ Celda de Transformación.
- ❖ Celda de Llegada.

- ❖ Celda de Salida.
- ❖ Celda de clientes en Media tensión.

### 3.1 Sistema de media tensión

El sistema de media tensión comprende todos los elementos y equipos que se encuentren a las tensiones normalizadas de 10 y 22.9 kV; entre los elementos y equipos considerados tenemos:

- ❖ **Barras de Media Tensión.-** Conformado por platinas de cobre electrolítico duro sólido de 99.9% de pureza, la sección es rectangular de 50 mm x 5 mm de espesores de acuerdo a la carga a transportar, estas se conectan directamente a los cables de llegada de media tensión y tienen la función de distribuir la energía a las celdas de distribución. Estas barras son soportadas por medio de aisladores los cuales deben soportar el sobre esfuerzo electromecánico a lo que se expondrían en caso de inyectarse corrientes de cortocircuito.
- ❖ **Seccionadores Unipolares.-** Para uso interior, maniobra por accionamiento manual sin carga por medio de una pértiga, con soportes aisladores de 20 o 32 kV según corresponda la tensión nominal de la subestación, con terminales metálicos para conexión a las barras.
- ❖ **Seccionador de Potencia.-** Para uso interior, tripolar, apertura con carga, accionamiento manual. Su diseño deberá ser basado en el principio modular (compacto), esta previsto para el montaje de tres fusibles limitadores de corriente, de operación silenciosa y sin emisión de gases. El seccionador deberá actuar automáticamente al accionar manualmente un mecanismo de palanca (manivela) y varilla desde el exterior frontal de la celda.  
  
Se usa para clientes en media tensión con potencias de hasta 500 kW.

Entre los parámetros a considerar para seleccionar el seccionador en sistema de distribución son:

- Tensión de servicio
  - Tensión máxima de servicio
  - Corriente nominal
  - Capacidad de cierre
  - Tensión de prueba a 60 Hz a 1 minuto a tierra entre polos
  - Nivel de aislamiento de impulso (BIL)
  - Corriente de corta duración
- ❖ **Interruptor de Potencia.-** Para uso y montaje interior, están provistos para operar y proteger alimentadores troncales subterráneos, aéreos e instalaciones por medio de la operación conjunta con un relé electrónico integrado sin el uso de fuente auxiliar (para la actuación de las funciones de protección).
- El relé electrónico debe ser de tiempo inverso y definido para proteger alimentadores troncales subterráneos, aéreos e instalaciones contra cortocircuitos y fallas a tierra no direccionales, sin fuente de tensión auxiliar, operación en cascadas alimentados por transformadores de corriente tipo protección.
- Se usa para clientes en media tensión con potencias mayores a 500 kW y menores 1000 kW.

Los parámetros a considerar para seleccionar son los siguientes:

- Corriente nominal
- Tensión nominal
- Tensión máxima
- Corriente de ruptura simétrica RMS (3 seg.)
- Corriente de ruptura asimétrica (valor pico)
- Frecuencia nominal
- Secuencia de operación nominal
- Tensión de ensayo a frecuencia industrial
- Tensión de ensayo con onda de impulso}

- ❖ **Fusible Limitador de Corriente Tipo Interior.-** Elemento provisto para proteger alimentadores laterales subterráneos y/o aéreos para corrientes de cortocircuito. Se instalan en el SECCIONADOR DE POTENCIA TRIPOLAR, al que ordenan apertura de las tres fases, cuando actúa el indicador de fusión, de uno o más fusibles.

Los parámetros a considerar para seleccionar son los siguientes:

- Corriente nominal
- Tensión nominal
- Capacidad de corte

- ❖ **Descargador de Sobretensión sin Desconectador.-** Se utilizarán de tipo interior, debido principalmente a maniobras de apertura y cierre de interruptores, recloser, etc. y fallas a tierra intermitentes.

Se utilizarán en la primera subestación convencional que se encuentre desde el inicio de un alimentador troncal en 10 kV del sistema de distribución.

Los parámetros a considerar para seleccionar son los siguientes:

- Varistor encapsulado
- Tensión nominal
- Contenedor
- Índice de corriente de descarga
- Clase de descarga de línea
- Energía de manejo
- Línea de fuga

### **3.2 Sistema de baja tensión**

El sistema de media tensión comprende todos los elementos y equipos que se encuentren a las tensiones normalizadas de 0.22 kV; entre los elementos y equipos considerados tenemos:

- ❖ **Barras de Baja Tensión.-** Conformado por platinas de cobre electrolítico duro sólido de 99.9% de pureza, la sección es rectangular de 50 mm x 5 mm de espesores de acuerdo a la capacidad de potencia de la subestación.
- ❖ **Llaves de distribución.-** Conformado por todas las salidas de los cables del subsistema de distribución secundaria, encargados de llevar la energía a los clientes y/o usuarios en baja tensión (220 voltios), utiliza un sistema de protección en caso de cortocircuitos por medio de fusibles tipo lamina

y los llamados NH. Las llaves pueden ser del tipo tripolares o unipolares, de acuerdo a lo que se requiera.

### **3.3 Puesta a tierra en baja tensión y media tensión**

Se considerará para la construcción de pozos a tierra:

- ❖ **Pozo de Tierra.-** Para la protección de personal se construirá un pozo de tierra para el lado de media tensión y otro para el lado de baja tensión. Los pozos de tierra serán de 0.80 x 2.90 m., ejecutada con bentonita y sal higroscópica. En el centro del pozo se instalará una varilla de cobre de 5/8" de diámetro (16mm.) de sección por 2.4m. de largo.

En el extremo superior e inferior llevarán conectores tipo AB para empalmar con el cable de tierra.

Se deberá seguir los siguientes pasos para su ejecución:

La excavación se realizará de una dimensión de 0.80 x 0.80 m. y una profundidad de 0.50 m., más que la longitud de la varilla. En caso de que el terreno sea deleznable, se ampliará la boca del pozo en una o dos gradas laterales, según se requiera.

Una vez efectuada la excavación deberá prepararse el lecho profundo que consiste en verter una solución salina de 25 kg. de sal (NaCl) en 150 litros de agua (1 cilindro) y esperar que sea absorbido totalmente para luego esparcir en el fondo 15 kg. de sal en grano.

La tierra fina deberá ser separada de los conglomerados de arena y piedra que no son utilizables para el relleno.

La preparación del relleno del pozo se efectuará mezclando en seco la tierra fina ya extraída con bentonita; la tierra de procedencia externa para completar el relleno, puede ser seca de cualquier lugar excepto tierra de cultivo (tierra de chacra).

Seguidamente se coloca la varilla en el centro del pozo y se vierte la mezcla de tierra y bentonita hasta alcanzar una altura de 1.20 m. desde el fondo del pozo. En este nivel se vierte una dosis de solución salina. Cuando esta solución haya sido absorbida se esparce 10 kg. de sal en las paredes del pozo, formando un collar de sal.

A continuación se prosigue con el relleno, hasta alcanzar una altura de 2.3 m. en este nivel nuevamente se vierte otra dosis de solución salina y se espera su absorción antes de continuar con el relleno de acabado.

La cobertura final se puede hacer con la misma tierra del sitio debiendo tener presente que al cabo de 24 horas, la superficie del área rellenada se hundirá 0.10 m.

- ❖ Conductor.- El conductor de conexión a tierra del lado de baja tensión de la subestación será de cobre electrolítico desnudo, 7 hilos,  $95\text{mm}^2$  de sección y temple blando; el conductor de puesta a tierra del lado de alta tensión será de las mismas características de la anteriormente descritas de sección  $35\text{mm}^2$ .
- ❖ Electrodo y conector.- será de cobre de 16 mm. de diámetro por 2.40m. de longitud y vendrán previstos de dos conectores de bronce del tipo AB y estará provisto de un personal con cabeza hexagonal.

❖ Mediciones de puesta a tierra.- Para los pozos de tierra las mediciones de tierra se deberá tener las resistencias siguientes:

- Resistencia de puesta a tierra en media tensión < 25 Ohmios.

- Resistencia de puesta a tierra en baja tensión < 15 Ohmios.

## **CAPÍTULO IV**

### **CALCULO DEL CAMPO ELECTRICO GENERADO POR LAS BARRAS DE BAJA TENSION DE UNA SUBESTACION CONVENCIONAL**

#### **4.1 Consideraciones generales**

Para el cálculo del campo eléctrico generado por las barras de distribución de baja tensión, se tomará las consideraciones siguientes:

- El valor obtenido resulta de los aportes de los campos eléctricos de las tres barras.
- Se tomará un punto P del eje z, en el punto medido de la barra 2, es allí donde se concentra la mayor distribución de campo eléctrico.
- Se considera a las barras como alambres finitos, que presentan una distribución lineal de carga eléctrica.

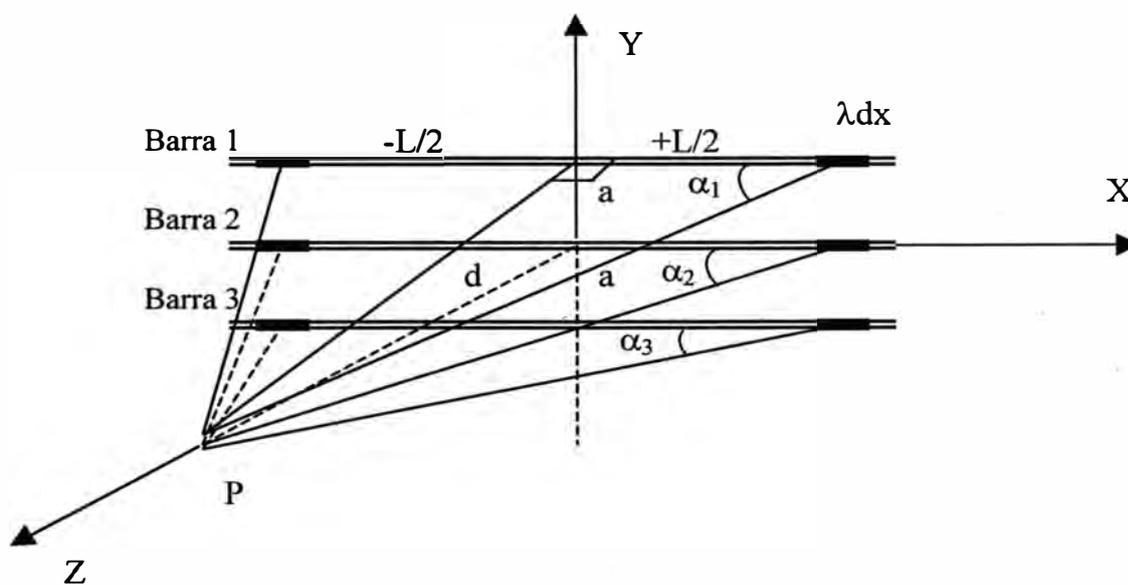
## 4.2 Desarrollo del cálculo

En la Figura N° 4.1 se muestra las barras cargadas, los parámetros presentados son los siguientes:

- ❖  $\lambda$  Distribución de carga lineal de las barras de baja tensión.
- ❖  $L$  Longitud lineal de la barra
- ❖  $d$  Distancia de la que se halla el campo eléctrico en el eje Z
- ❖  $a$  Separación existente entre las barras

**Figura N° 4.1**

**Representación gráfica de las barras de BT en una Subestación  
Convencional**



Determinamos el Campo Eléctrico para la Barra 1

$$\vec{E}_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\lambda dx' (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \quad \text{Se tiene que } \vec{r} = (x, a, 0) \text{ y } \vec{r}' = (0, 0, d), \text{ de aquí se}$$

tiene que  $\vec{r} - \vec{r}' = (-x, -a, d)$ ; luego se integra desde  $-L/2$  a  $+L/2$ , se tendrá la siguiente expresión:

$$\vec{E}_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \frac{\lambda dx' (-x', -a, d)}{(x'^2 + d^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}}; \text{ considerando } x' = \sqrt{a^2 + d^2} \tan(\alpha)$$

Realizando el cambio de variable correspondiente y evaluando la integración se obtiene:

$$\vec{E}_1 = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 (d^2 + a^2)} (0, -a \operatorname{sen} \alpha_1, d \operatorname{sen} \alpha_1). \quad (4.1)$$

Para la Barra 2 se tendrá:

$$\vec{E}_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\lambda dx' (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \quad \text{Se tiene que } \vec{r}' = (x', 0, 0) \text{ y } \vec{r} = (0, 0, d), \text{ de aquí se}$$

tiene que  $\vec{r} - \vec{r}' = (-x', 0, d)$ ; luego se integra desde  $-L/2$  a  $+L/2$ , se tendrá la siguiente expresión:

$$\vec{E}_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \frac{\lambda dx' (-x', 0, d)}{(x'^2 + d^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}}; \text{ considerando } x' = d \tan(\alpha) \quad (4.2)$$

Realizando el cambio de variable correspondiente y evaluando la integración se obtiene:

$$\vec{E}_2 = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 d} (0, 0, \operatorname{sen} \alpha_2) \quad (4.3)$$

Para la Barra 3 el campo será igual en modulo que para la barra 1, solo cambiara la dirección del campo lo que resulta:

$$\vec{E}_3 = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0(d^2 + a^2)}(0, +a\text{sen}\alpha_1, d\text{sen}\alpha_1). \quad (4.4)$$

Luego el campo resultante será la suma de los 3 campos parciales es decir:

$$\vec{E}_R = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{2d\text{sen}\alpha_1}{(d^2 + a^2)} + \frac{\text{sen}\alpha_2}{d} \right) \hat{k} \quad (4.5)$$

Sabemos que:

$$\text{Sen}\alpha_1 = \frac{L}{2\sqrt{\frac{L^2}{4} + a^2 + d^2}} \quad (4.6)$$

$$\text{Sen}\alpha_2 = \frac{L}{2\sqrt{\frac{L^2}{4} + d^2}} \quad (4.7)$$

Luego evaluando en la siguiente expresión

$$E_R = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{2d\text{sen}\alpha_1}{(d^2 + a^2)} + \frac{\text{sen}\alpha_2}{d} \right) \hat{k} \quad (4.8)$$

Se obtiene:

$$E_R = \frac{\lambda L}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{2d}{(d^2 + a^2)\sqrt{\frac{L^2}{4} + a^2 + d^2}} + \frac{1}{d\sqrt{\frac{L^2}{4} + d^2}} \right] \hat{k} \quad (4.9)$$

## CAPÍTULO V

### CALCULO DEL CAMPO MAGNETICO GENERADO POR LAS BARRAS DE BAJA TENSION DE UNA SUBESTACION CONVENCIONAL

#### 5.1 Consideraciones generales

Para el cálculo del campo magnético generado por las barras de distribución de baja tensión, se tomará las consideraciones siguientes:

- El valor obtenido resulta de los aportes de los campos magnéticos de las tres barras.
- Se tomará un punto P del eje z, en el punto medio de la barra 2, es allí donde se concentra la mayor distribución de campo magnético.
- Se considera a las barras alambres finitos, que presentan una distribución lineal de corriente eléctrica.

En la Figura N° 5.1 se muestra las barras de baja tensión por donde circula corriente los parámetros presentados son los siguientes:

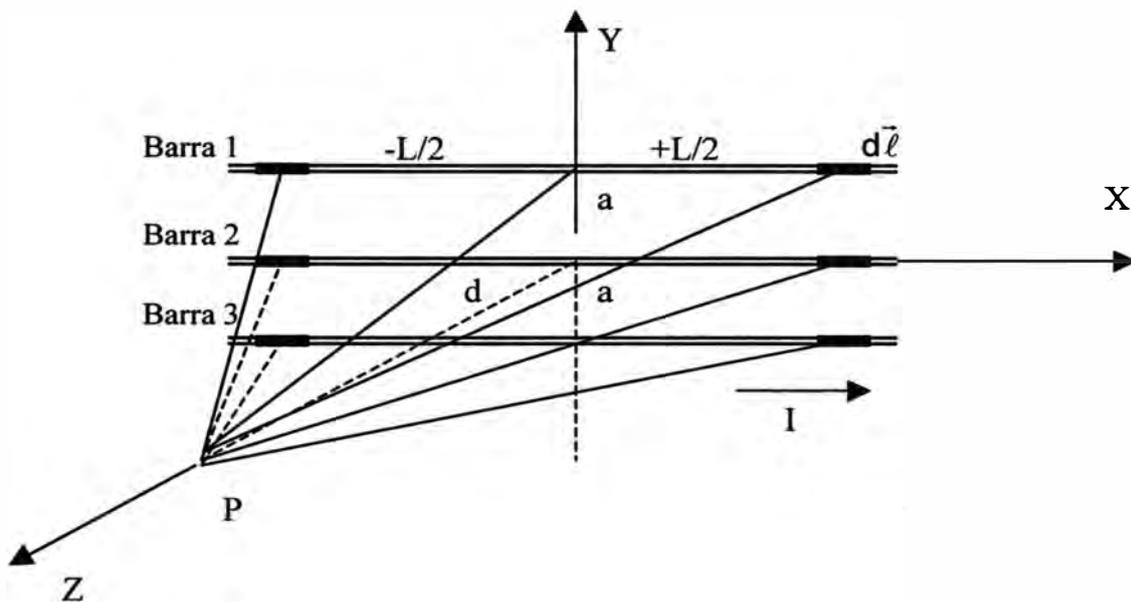
- ❖  $\lambda$  Distribución de corriente lineal de las barras de baja tensión.
- ❖ L Longitud lineal de la barra
- ❖ d Distancia donde se halla el campo eléctrico en el eje Z
- ❖ a Separación existente entre las barras

## 5.2 Desarrollo del cálculo

Se tiene la siguiente distribución de las barras:

**Figura N° 5.1**

### **Representación gráfica de las barras de BT en una Subestación Convencional**



Aplicando la ley de Biot y Savart cuya expresión es:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{I d\vec{\ell} \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \quad (5.1)$$

Aplicando a las barras de la subestación convencional resulta:

Para la Barra 1 tenemos:

$$d\vec{\ell} = dx'(1,0,0)$$

$$\vec{r} = (0,0,d)$$

$$\vec{r}' = (x',a,0)$$

I corriente estacionaria que circula por las barras.

$$\vec{r} - \vec{r}' = (-x',-a,d)$$

$$\vec{B}(\vec{r}_2) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{x}'(1,0,0) \times (-x', -a, d)}{|-x', -a, d|^3} \quad (5.2)$$

De esta expresión resolvemos el producto vectorial, resultando la siguiente expresión:

$$(1,0,0) \times (-x', -a, d) = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 1 & 0 & 0 \\ -x' & -a & d \end{vmatrix} = (0, -d, -a)$$

Introduciendo en la expresión de Biot y Savart tenemos:

$$\vec{B}(\vec{r}_2) = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[ \int \frac{d(dx')}{(x'^2 + a^2 + d^2)^{3/2}} \hat{j} + \int \frac{a(dx')}{(x'^2 + a^2 + d^2)^{3/2}} \hat{k} \right] \quad (5.3)$$

Integramos desde  $-L/2$  a  $+L/2$  se obtiene:

$$\vec{B}(\vec{r}_2) = -\frac{\mu_0 I L}{4\pi(a^2 + d^2) \sqrt{\left(\frac{L^2}{4} + a^2 + d^2\right)}} (0, d, a) \quad (5.4)$$

Para la Barra 2 tenemos:

$$d\vec{\ell} = dx'(1,0,0)$$

$$\vec{r} = (0,0,d)$$

$$\vec{r}' = (x,0,0)$$

$I$  = corriente estacionaria que circula por las barras.

$$\vec{r} - \vec{r}' = (-x,0,d)$$

$$\vec{B}(\vec{r}_2) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{dx'(1,0,0) \times (-x,0,d)}{|-x,0,d|^3} \quad (5.5)$$

De esta expresión resolvemos el producto vectorial,

$$(1,0,0) \times (-x',0,d) = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 1 & 0 & 0 \\ -x' & 0 & d \end{vmatrix} = (0,-d,0)$$

Introduciendo en la expresión tenemos:

$$\vec{B}(\vec{r}_2) = -\frac{\mu_0 I d}{4\pi} \int \frac{dx'}{(x'^2 + d^2)^{3/2}} \hat{j} \quad (5.6)$$

Integramos desde  $-L/2$  a  $+L/2$  se obtiene:

$$\vec{B}(\vec{r}_2) = -\frac{\mu_0 I L}{4\pi d \sqrt{\left(\frac{L^2}{4} + d^2\right)}} \hat{j} \quad (5.7)$$

Para la Barra 3 el campo será igual en modulo que para la barra 1, solo cambiara la dirección del campo lo que resulta:

$$\vec{B}(\vec{r}_2) = -\frac{\mu_0 I L}{4\pi(a^2 + d^2) \sqrt{\left(\frac{L^2}{4} + a^2 + d^2\right)}} (0, d, -a) \quad (5.8)$$

Luego el campo resultante será la suma de los 3 campos parciales es decir:

$$\vec{B}_R = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 = -\frac{\mu_0 I L}{4\pi} \left[ \frac{1}{d \sqrt{\left(\frac{L^2}{4} + d^2\right)}} + \frac{2d}{(a^2 + d^2) \sqrt{\left(\frac{L^2}{4} + a^2 + d^2\right)}} \right] \hat{j} \quad (5.9)$$

## CAPÍTULO VI

### EVALUACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNETICO PARA EL CASO DE UNA SUBESTACION CONVENCIONAL

En una subestación convencional las barra de baja tensión generalmente se encuentran ubicados sobre el lado derecho de la puerta de ingreso al recinto y las dimensiones convencionales son:

Longitud de la barra	(L)	2.20 m
Separación entre barras	(a)	0.15 m
Corriente máxima en barras	(I)	2000 Amp.
Velocidad de Arrastre de los electrones		$10^6$ m/s

Evaluaremos las expresiones del campo eléctrico y magnético anteriormente halladas para los datos mostrados, para lo cual usaremos el programa MATLAB:

- ❖ Campo Eléctrico: Se presenta los resultados en la Tabla N° 6.1, utilizando las unidad del Sistema Internacional obtendremos la Intensidad del Campo Eléctrico en N/Coulomb. Cabe resaltar que se calcula el campo eléctrico desde el centro de la fuente hasta 2 metros de la misma, en intervalos de 0.10 metros.
- ❖ Campo Magnético: Se presenta los resultados en la Tabla N° 6.1, los mismos que están presentado en Tesla. Cabe resaltar que se calcula el campo eléctrico desde el centro de l fuente hasta 2 metros de la misma, en intervalos de 0.10 metros.

**Tabla N° 6.1**

***Intensidades de Campo eléctrico y magnético calculados a diferentes distancias de la fuente***

Distancia de Cálculo del Campo (Metros)	Campo Eléctrico $\times(10^8)$ (N/coulomb)	Campo Magnético (Tesla)
0,1000	5,7662	6,4127
0,2000	4,0140	4,4641
0,3000	2,9915	3,3269
0,4000	2,3147	2,5743
0,5000	1,8473	2,0544
0,6000	1,5098	1,6791
0,7000	1,2570	1,3979
0,8000	1,0619	1,1809
0,9000	0,9079	1,0097
1,0000	0,7841	0,8720
1,1000	0,6831	0,7597
1,2000	0,5997	0,6669
1,3000	0,5301	0,5895
1,4000	0,4715	0,5243
1,5000	0,4217	0,4690
1,6000	0,3791	0,4216
1,7000	0,3424	0,3808
1,8000	0,3106	0,3455
1,9000	0,2829	0,3146
2,0000	0,2587	0,2877

De los resultados obtenidos podemos hallar la fuerza experimentada por un electrón que viaja a la velocidad de arrastre, inmerso en estos campos producidos por las barras de baja tensión. Obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla N° 6.2, se aprecia que los resultados por la interacción eléctrica son despreciables en comparación con los campos magnéticos.

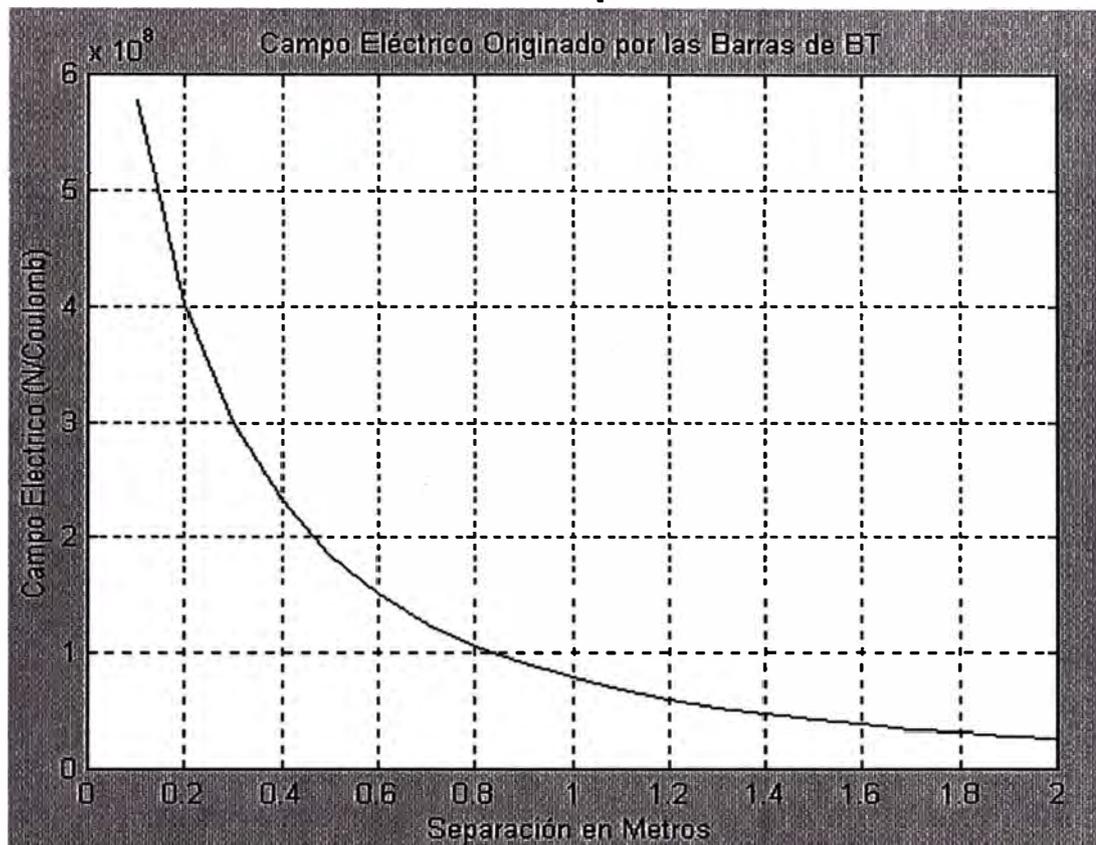
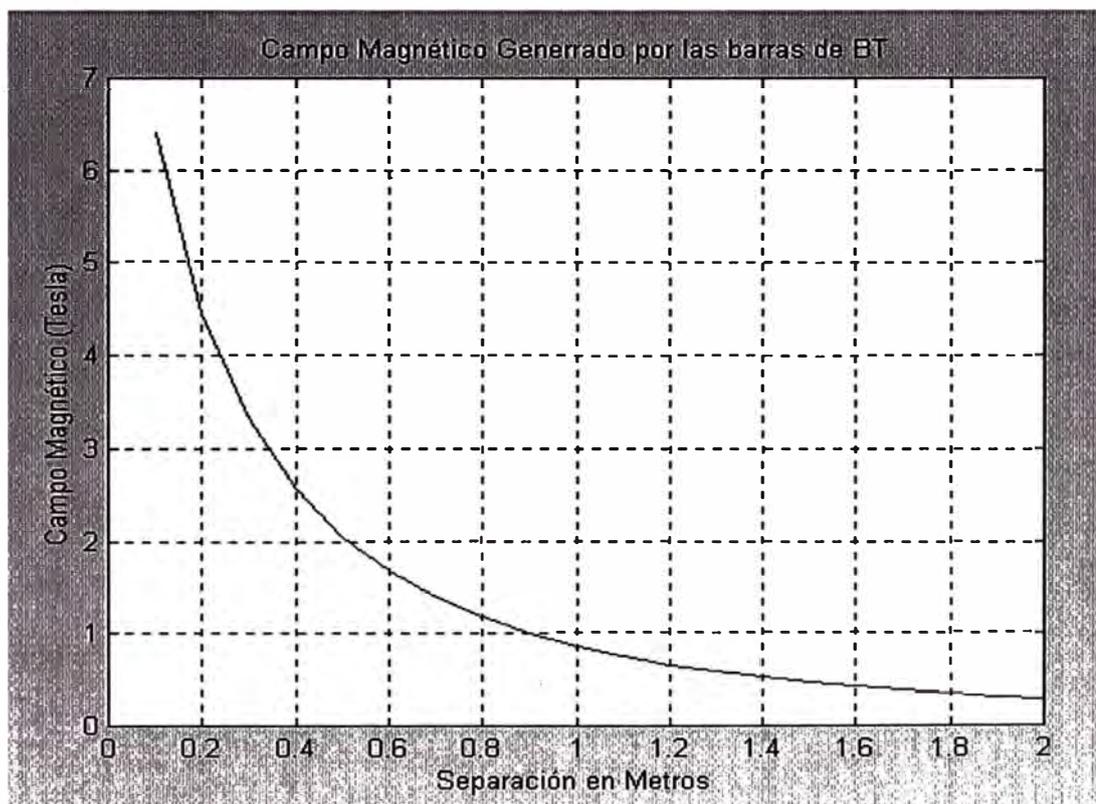
**Tabla N° 6.2**

***Fuerza eléctrica y magnética calculados a diferentes distancias de la fuente***

Distancia de Cálculo del Campo (Metros)	Fuerza Eléctrica (nN)	Fuerza Magnética (mN)
0,1000	9,226E-02	1,026E-01
0,2000	6,422E-02	7,143E-02
0,3000	4,786E-02	5,323E-02
0,4000	3,704E-02	4,119E-02
0,5000	2,956E-02	3,287E-02
0,6000	2,416E-02	2,687E-02
0,7000	2,011E-02	2,237E-02
0,8000	1,699E-02	1,889E-02
0,9000	1,453E-02	1,616E-02
1,0000	1,255E-02	1,395E-02
1,1000	1,093E-02	1,216E-02
1,2000	9,595E-03	1,067E-02
1,3000	8,482E-03	9,432E-03
1,4000	7,544E-03	8,389E-03
1,5000	6,747E-03	7,504E-03
1,6000	6,066E-03	6,746E-03
1,7000	5,478E-03	6,093E-03
1,8000	4,970E-03	5,528E-03
1,9000	4,526E-03	5,034E-03
2,0000	4,139E-03	4,603E-03

En ambos casos en comparación con la masa del electrón la fuerza originada es suficiente para desviar la trayectoria de un electrón que viaja en el espacio con una dirección y sentido dado.

A continuación en los gráficos N° 6.1 y 6.2 se muestra, la tendencia de los campos eléctricos y magnéticos con respecto a la separación de la fuente.

**Gráfico N° 6.1 : Campo Eléctrico****Gráfico N° 6.2 : Campo Magnético**

## **CAPÍTULO VII**

### **DESCRIPCIÓN DE LA TECNICA DEL APANTALLAMIENTO**

Para nuestro caso particular vamos a utilizar una Jaula de FARADAY aterrada, la cual se instalará en la subestación convencional, con el fin de confinar tanto el campo eléctrico y magnético generado por las barras de baja tensión.

Esta malla debe ser de cobre electrolítico, la cual debe estar sólidamente aterrada se recomienda conectarla al pozo de baja tensión existente en subestaciones convencionales, las cocadas deben ser de 1" de lado para no permitir que exista dispersión de las líneas de campo.

Se debe tener cuidado en el momento de la instalación, de no hacer contacto con los cables existentes para no producir un cortocircuito.

Se muestra las fotos de la malla instalada en la subestación convencional N° 622 de Luz del Sur, cuyas barras de Baja tensión originaban interferencia electromagnética a los monitores y equipos del predio adyacente; además se generaba diferencia de potencial entre las carcasas de los equipos y puntos de tierra de consideración, siendo un riesgo considerable tanto para los usuarios como para los equipos.

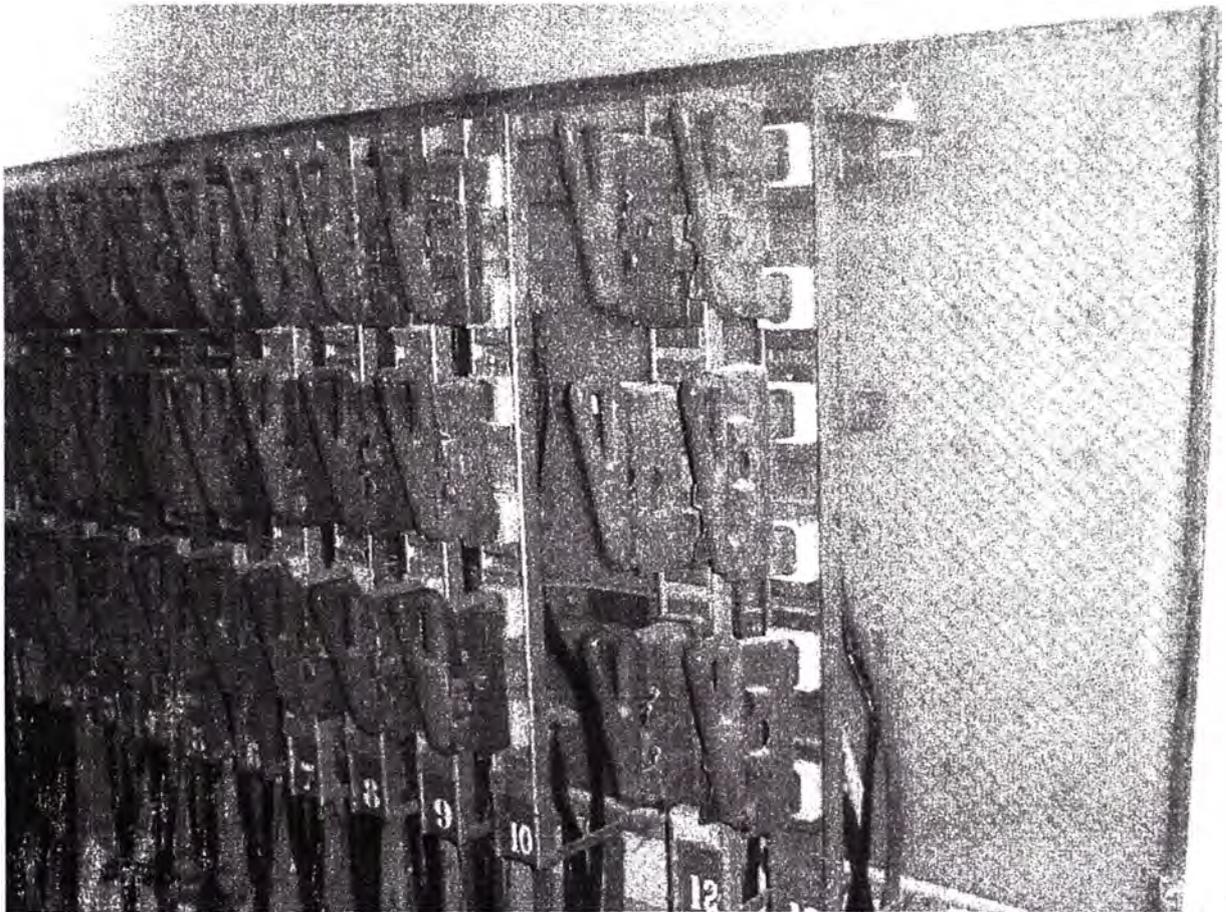
Luego se visitó la subestación para realizar pruebas obteniendo los resultados siguientes:

- ❖ Usando la pinza amperimétrica del otro lado del muro que dividía la subestación con el predio; en esta se obtenía una lectura de 0.3 Amperios, esto era a una distancia de 0.90 metros de la fuente.
- ❖ También se obtuvo tensión de 12 a 13 voltios, tomando una medida entre un punto que se encontraba a 0.30 metros de la fuente y la varilla de puesta a tierra.

Como conclusión se determino que el problema provenía de los campos eléctricos y magnéticos provenientes de las barras de baja tensión de la subestación.

**Foto N° 7.1**

**Llaves de baja tensión en subestación convencional protegido con la Jaula de FARADAY recubierta con fibra de vidrio para aislarlo de posibles cortocircuitos**



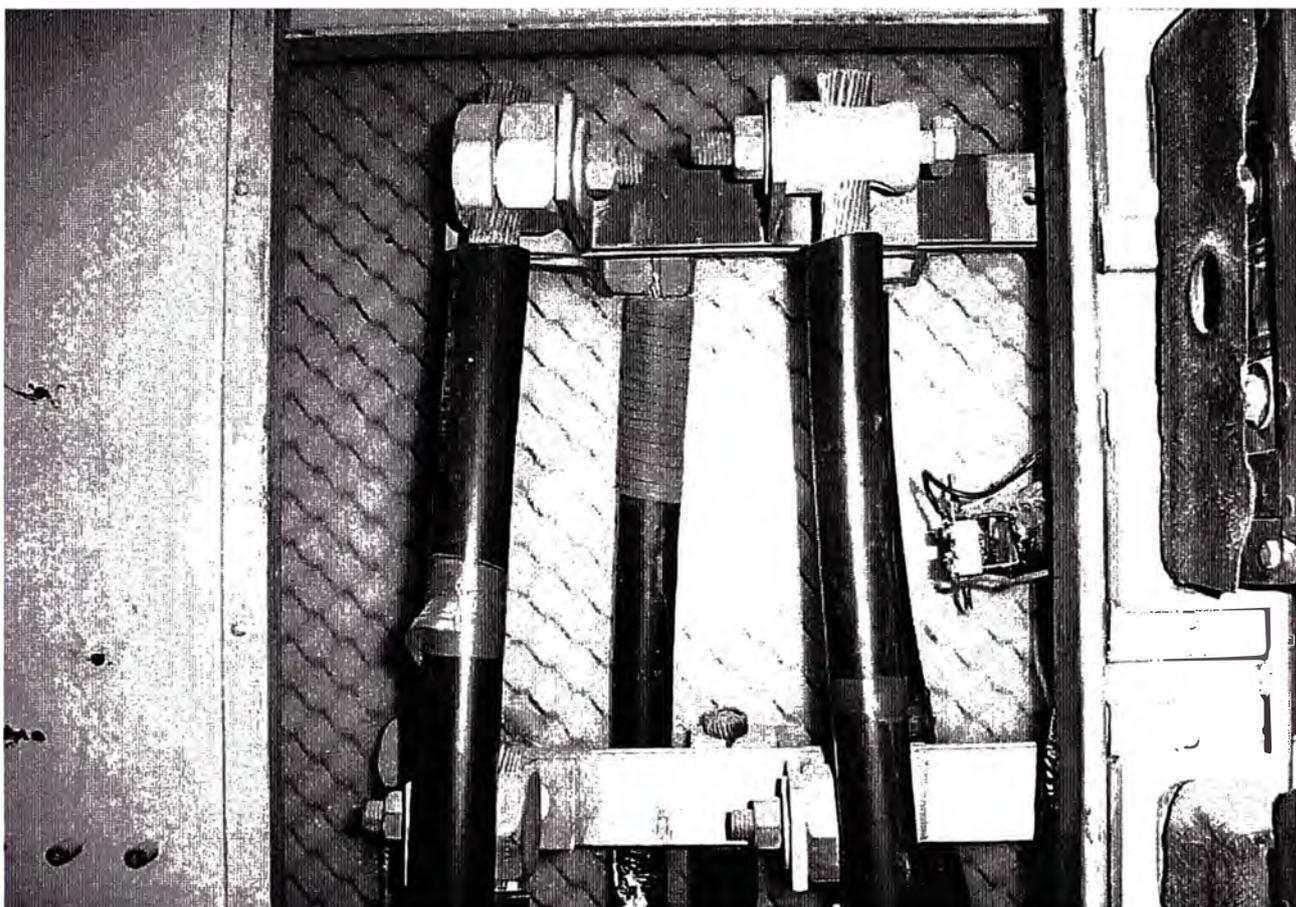
**Foto N° 7.2**

**Vista de frente de las llaves de baja tensión en subestación convencional se ve la  
Jaula de Faraday en el fondo de la imagen**



**Foto N° 7.3**

**Llega de los cables de comunicación del tipo NYY 4 ternas de 185 mm<sup>2</sup>, a las barras de Baja Tensión procedente del disyuntor del transformador se nota que también se encuentra apantallado**



**Foto N° 7.4**

**Conexión de la Jaula de FARADAY al pozo de tierra de baja tensión con cable trenzado desnudo de 70 mm<sup>2</sup>.**



**Foto N° 7.5**

**Fachada exterior de la SE 622 véase la división existente con el predio adyacente donde se presentaban problemas de interferencia electromagnética.**



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

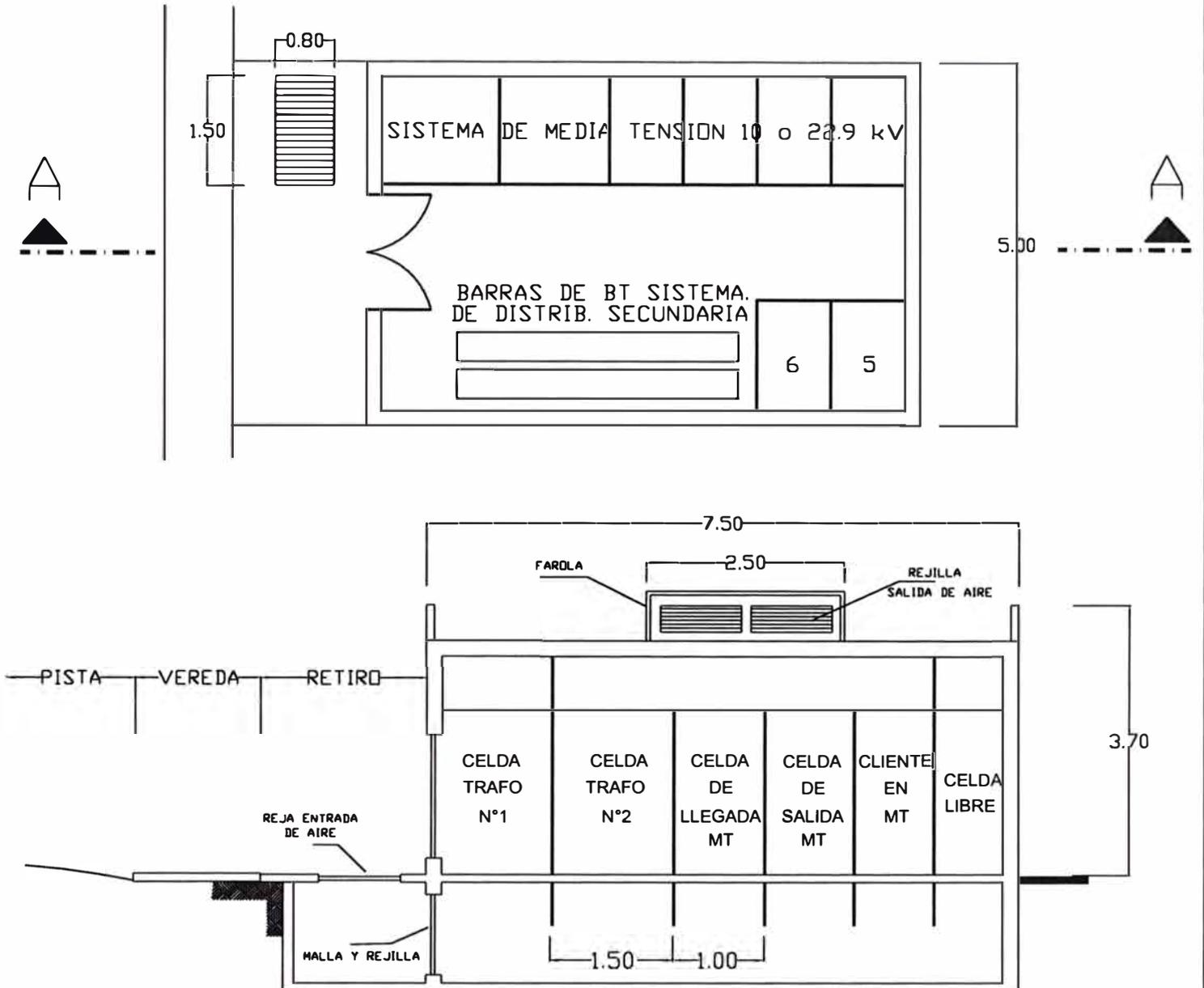
1. De los estudios realizados no se ha determinado que la radiación electromagnética cause daños sobre el organismo de los seres humanos, se han detectado ligeros trastornos y cansancios, en personas con características particulares.
2. De las tablas mostradas se concluye que para niveles bajos de tensión y altas corrientes, la fuerza originada por el campo magnético es mucho mayor que la originada por el campo eléctrico, considerándose despreciable esta última con respecto a la anterior.
3. El apantallamiento electromagnético es el método más importante y sencillo a utilizar, para contrarrestar los efectos electromagnéticos, sólo si es que no se puede alejar la fuente de la radiación.
4. El campo electromagnético en las cercanías de las barras de baja tensión tiene una intensidad suficiente para producir interferencias en los equipos de cómputo y electrónicos, además de producir corrientes parásitas en las carcasas de los equipos que no tienen un buen aterramiento.
5. Se recomienda la construcción de los blindajes de Faraday tanto para la instalación de subestaciones de distribución y para lugares donde se van

a tener equipos de computo, señales, médicos, etc.; a fin de descartar cualquier efecto electromagnético en los predios aledaños.

6. Realizar un programa mantenimiento tanto para la malla de apantallamiento de protección, pozo de puesta a tierra y los puntos de conexión entre la malla y el pozo, sabido es que la sulfatación y puntos de corrosión, presentan una alta resistencia para los corrientes estáticas a liberar.

## **ANEXOS**

SE CONVENCIONAL DE SUPERFICIE TAMAÑO (5.00 X 7.50)



CORTE A - A

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

PROYECTO: DISTRIBUCION DE EQUIPOS EN SUBESTACIONES CONVENCIONALES

ESPECIALIDAD:

INGENIERIA ELECTRICA

GRADUANDO:

EDUARDO JAVIER SANES CALDAS

FECHA:

AGOSTO 2003

DIBUJO:

EJSC

ESCALA:

S/E

PLANO  
N° 1

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1]** Grupo Pandora "Campos Eléctricos y Magnéticos de 50-60 Hz.", España, 1998.
- [2]** Zhan Marcus "Campos Electromagnéticos", Ed. Mc Graw-Hill, 1995.
- [3]** Reitz John, Mildford Frederick y Christy Robert, "Fundamentos de la Teoría Electromagnética", Fondo Educativo Interamericano, 1984.
- [4]** Ministerio de Energía y Minas, "Código Nacional de Electricidad Tomo I y V", Dirección General del Electricidad, 2001.
- [5]** Ministerio de Energía y Minas, "Código Nacional de Electricidad Tomo I y V", Dirección General del Electricidad, 2001.