



RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN EL COMPLEJO HIDROELÉCTRICO FORTUNA

B. Fernández¹ y G. Batista²

Universidad de Panamá, ¹Centro de Investigaciones con Técnicas Nucleares

²Escuela de Física

RESUMEN

La Empresa EGE Fortuna S.A. realizó una auditoria en el Complejo Hidroeléctrico del mismo nombre con la finalidad de elaborar un Plan de Adecuación y Manejo Ambiental. Esta incluyó, por primera vez en Panamá una auditoria de las radiaciones no ionizantes de baja frecuencia y alta intensidad, lo que constituye un hito en la historia regional en política ambiental. Para ello se tuvo que diseñar, aplicar y validar un método que permitiera dar recomendaciones para aplicar de manera racional el principio precautorio sobre los efectos estocásticos de dichas radiaciones. En este trabajo se reportan los elementos fundamentales del método utilizado.

PALABRAS CLAVES

Fortuna, auditoría, radiaciones no ionizantes, baja frecuencia, alta intensidad.

INTRODUCCIÓN

En recientes artículos (Zárate 2002 & Castillo 2002) se describió el Complejo Hidroeléctrico Fortuna, se presentaron algunos resultados de la auditoría ambiental realizada, se esbozaron lineamientos del Plan de Adecuación y Manejo Ambiental y se dio la voz de alarma acerca del peligro que representa el proyecto eólico promovido por la ANAM y otras empresas para la preservación del equilibrio del ecosistema. Sin embargo, dentro de la auditoría también se incluyó el estudio de las radiaciones no ionizantes de baja frecuencia y alta intensidad (RNIBFAI) (Fernández 2001). Por primera vez en Panamá una empresa, EGE Fortuna S.A., que aspira a colaborar con el Estado

panameño para lograr el objetivo nacional importante de mejorar la producción nacional respetando la protección del ecosistema, realiza la auditoría de este rubro importante con miras a dictar las normas que protejan al trabajador como parte importante de la empresa.

En este artículo presentamos el diseño del método utilizado para la medición, los resultados más relevantes de la auditoría (RNIBFAI) realizada en Fortuna y la intercomparación con la hidroeléctrica La Estrella (Batista 2002) para la validación de los resultados.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Las radiaciones no ionizantes constituyen la parte del espectro electromagnético cuya energía como fotón es demasiado débil para romper los enlaces de los electrones de los tejidos por efecto fotoeléctrico o Compton. La Física Cuántica nos enseña que aunque sean de alta intensidad (un gran número de fotones), no pueden causar ionización directa.

Los efectos biológicos de estas radiaciones (Universidad de Atacama, 2001) se están tipificando y los múltiples estudios indican que estas radiaciones desde el umbral hasta las altas intensidades, en la mayoría de los materiales, producen vibraciones moleculares, generando calor (de ahí su empleo doméstico, en medicina, e industrial con el fin de calentamiento). Suponiendo el mismo efecto para baja intensidad en los materiales biológicos se prevé que puede producir quemaduras a partir de una determinada cantidad (acumulación) de energía absorbida, en un tiempo dado. Las radiaciones de frecuencias extremadamente bajas (como la producida en generadores de plantas de electricidad) se consideraban inocuas. Sin embargo, podemos señalar que analizando el modelo de membrana de una célula se ha notado que el potencial de polarización puede ser alterado con relativa facilidad, por una onda electromagnética de baja intensidad y baja frecuencia, en efecto, *“pueden producir cambios eléctricos en la membrana de todas las células del cuerpo, alterando los flujos celulares de algunos iones, sobre todo el calcio, lo que podría tener efectos biológicos importantes. Así, se han publicado varios estudios en las últimas dos décadas, buscando una posible relación de los campos electromagnéticos de baja frecuencia e intensidad con el origen de determinados cánceres, sobre todo leucemias. También se*

han intentado relacionar con alteraciones del aparato reproductor, neurológico y cardiovascular, y con malformaciones fetales”.

No existe literatura todavía convincente que muestre los efectos de los campos electromagnéticos de baja intensidad en el ser humano. Sin embargo, hay algunos estudios realizados con voluntarios, sometidos a varias horas a campos de baja frecuencias, y se expresa que *“luego de esta exposición... tras realizar diversas pruebas clínicas y fisiológicas de hematología, electrocardiograma, ritmo cardíaco, presión arterial o temperatura del cuerpo, no hubo efectos significativos a corto plazo”*. Pero el principio precautorio nos conduce a recomendar la menor exposición posible. Cuando hay situaciones competitivas para la toma de decisiones se debe entonces evaluar el riesgo.

RIESGO ELECTROMAGNÉTICO

El concepto de riesgo y de fuentes de riesgo ha sido estudiado en forma creciente durante los últimos años. El riesgo está íntimamente ligado con la combinación de la noción de pérdida y la de probabilidad. Al analizar el riesgo el concepto probabilístico es esencial, ya que si no tiene un carácter azaroso no se constituye en un riesgo, sino en una situación determinista conocida. La evaluación del riesgo conlleva conocimiento y éste, a su vez, permite la convivencia controlada con el riesgo. El desarrollo científico y tecnológico nos impone la convivencia diaria con situaciones de riesgo, lo que no es necesariamente nocivo, ya que el conocimiento de las posibilidades de su recurrencia y de los posibles efectos que produce nos permite convivir de manera controlada con la situación.

La parte probabilística del riesgo lo hace un poco más complejo de analizar de acuerdo a las características del fenómeno estudiado. Un ejemplo de esto es el análisis de los efectos de los bajos niveles de radiación ionizante o los efectos estocásticos de la corriente eléctrica, que nos llevan a realizar un análisis muy detallado de las variables que lo afectan y del fenómeno en sí.

El **“riesgo electromagnético”** está ligado a la posibilidad de circulación de la corriente eléctrica en el interior del cuerpo humano, sin contacto eléctrico directo, suponiendo que el cuerpo humano es un

conductor de electricidad. Los efectos de la corriente eléctrica en el ser humano pueden ser de dos tipos: deterministas y estocásticos.

La literatura sobre los efectos deterministas del contacto humano directo con la corriente eléctrica es abundante. Los factores que influyen y determinan los efectos del contacto de la corriente eléctrica en el cuerpo humano son: la intensidad de corriente, resistencia del cuerpo humano, tensión aplicada, frecuencia, duración del contacto eléctrico, recorrido de la corriente a través del cuerpo y capacidad de reacción de la persona. Primeramente, debemos considerar que el paso de la corriente en el cuerpo humano puede ser considerado como la suma de dos impedancias, una externa y otra interna. La primera está directamente relacionada con el área del cuerpo que entra en contacto y la segunda con la trayectoria que sigue la corriente en el cuerpo; es decir, la impedancia total es dependiente de la extensión superficial a través de la cual se produce el contacto externo (piel) y el tipo de órgano interno. La impedancia externa tiene componentes tanto resistivos como capacitivos; además, varía con la tensión aplicada, la frecuencia de la corriente eléctrica, la duración del tiempo de paso, el tipo de piel, la humedad de la misma, entre los factores más importantes. La interna es básicamente resistiva. Este tipo de efectos son bien conocidos y las empresas eléctricas lo manejan muy bien desde los inicios de la industria eléctrica.

EFFECTOS ESTOCÁSTICOS DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA ALTERNA

Ya se ha iniciado un proceso para tomar en cuenta los efectos estocásticos de la radiación de altas y bajas frecuencias. Generalmente, 300 Hz es el valor de umbral para diferenciar las bajas de las altas frecuencias. A este nivel de frecuencia, tan bajo, las longitudes de onda son muy grandes (6 000 km a 50 Hz, y 5 000 km a 60 Hz). Los campos eléctricos y magnéticos se producen por la presencia de las corrientes en los equipos e instalaciones. Todo aparato conectado a la red de electricidad está sometido a un campo eléctrico que es más intenso cuanto más nos acerquemos al aparato. Los campos magnéticos se producen en la cercanía de sistemas en funcionamiento y es proporcional a las intensidades de corriente a las que se esté trabajando. Los campos magnéticos son capaces de atravesar las superficies externas de los aparatos y el cuerpo humano, y los variables inducen corrientes eléctricas en los sistemas conductores

(es decir, aquellos que poseen electrones cuasi-libres en el interior de la estructura).

A las frecuencias de 50/60 Hz los campos eléctricos y magnéticos naturales tienen intensidades muy bajas. La mayor exposición de las personas proviene de la utilización de la corriente eléctrica. La literatura ofrece artículos que comentan que los campos eléctricos y magnéticos bajo las líneas de transmisión eléctricas aéreas de los núcleos de las ciudades pueden llegar a 12 kV/m y 30 mT; en las plantas de distribución y generación, 16 kV/m y 270 mT; y en las viviendas 500 V/m y 150 mT. Mencionan también que para las áreas industriales de trabajo, como en el caso de los soldadores, se pueden generar hasta 130 mT.

Se han sugerido normas sobre la exposición máxima de las personas en campos magnéticos estáticos. En 1987, **la Organización Mundial de la Salud** recomendaba no estar sometidos a campos “*superiores a 2,0 T*” para períodos de corta exposición. Ese mismo año el **Laboratorio Nacional “Lawrence” de Livermore en Estados Unidos** coincidía con este criterio para períodos cortos y 60 mT máximo para el campo promedio ponderado en todo el cuerpo. El **Consejo Nacional de Protección Radiológica del Reino Unido** y la **Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales**, en 1993, no sugirieron valores significativamente diferentes. En 1994, la **Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante** señaló que, para el público en general, sometido a campos estáticos, los niveles deben ser menores de 40 mT y para la exposición laboral, de 200 mT. Se hace la anotación de que para las personas con marcapasos cardíacos la norma debe ser menor que 0,50 mT.

En las instalaciones de las plantas generadoras de electricidad los niveles de corriente eléctrica son altos, por consiguiente es interesante saber cómo afectan al medio circundante los campos electromagnéticos que se producen y al ser humano, en particular. Los equipos y personas que se encuentran en este medio, podrían ser sensibles a los efectos de estos campos. En el interior de las partes conductoras de los equipos y en los órganos de alta conductividad de

los humanos, estos campos pueden producir corrientes, y esto es un factor de riesgo.

Los efectos estocásticos de la radiación electromagnética no están claramente establecidos. Hasta ahora, se ha tratado con mucha atención estos efectos para radiaciones electromagnéticas de altas frecuencias; sin embargo, no debemos dejar a un lado los efectos que surjan de corrientes con bajas frecuencias. Los campos magnéticos generados por corrientes alternas con altos niveles de intensidad de corriente, pueden inducir, en áreas particularmente sensibles, campos magnéticos que alterarían funciones básicas del organismo, detectables a mediano y largo plazo.

Los campos magnéticos inducidos pueden atravesar regiones del cuerpo humano y afectar órganos sensibles a sus efectos, de acuerdo con las conductividades de los tejidos que los forman. Es por esto, que las normas que se han sugerido intentan mantener las corrientes eléctricas inducidas a niveles por debajo de los que se dan en el cuerpo humano de manera natural. Algunos autores adelantan que las corrientes inducidas por un flujo de corriente externo pueden crear en los vasos sanguíneos grandes efectos hemodinámicos o cardiovasculares.

La conductividad de los órganos del cuerpo es un parámetro de gran importancia al observar el posible efecto de las corrientes inducidas a que se vean sometidos. En junio de 1996, Camelia y Sami Gabriel del Departamento de Física del King's College de Londres, Inglaterra, publicaron un estudio titulado *“Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies”* sobre las propiedades dieléctricas (conductividad y permitividad) de diferentes órganos del cuerpo humano.

El objetivo del trabajo fue agrupar las mediciones hechas en el tema durante las últimas cinco décadas, para ser utilizadas en la elaboración de un modelo de curva de conductividad y de permitividad en función de la frecuencia, para cada órgano, en diferentes animales; de forma tal que permitiera extrapolar a valores que no habían sido medidos. Se diseñaron experiencias para medir las conductividades y permitividades en órganos diferentes, a distintas frecuencias, por tres métodos diferentes y se compararon los resultados con las predicciones

de las curvas modelos. Todas estas mediciones se realizaron directamente sobre el tejido, algunas in situ y otras sobre tejidos de animales muertos recientemente, sin tomar en cuenta la impedancia de la piel. En la realización de las mediciones utilizaron tres sistemas de análisis de impedancias y los datos experimentales se obtuvieron colocando las muestras en un recipiente cónico de 5,0 cm de arista en la base y un número adecuado de mediciones que les permitiera el análisis estadístico. Los materiales utilizados fueron órganos humanos producto de autopsias hechas no más de 24 a 48 horas después de la muerte, piel humana en vivo y tejidos animales muy frescos (no más de dos horas después de la muerte). Los resultados del estudio muestran los datos experimentales de conductividades y permitividades (en tablas y gráficos para 45 órganos).

Entre sus resultados resaltan que el comportamiento la impedancia del tejido biológico (incluyendo el humano), para frecuencias menores de 100 Hz, es principalmente resistiva. Este resultado en el límite de la región coincide con otros que se habían recopilado dentro del mismo estudio. Por lo tanto, nuestra estimación de corrientes inducidas máximas en los tejidos analizados se basó en los valores de conductividades para frecuencias por debajo de 100 Hz. El órgano que menor resistividad presenta es el músculo. Por ello, sería útil el estudio de los efectos a largo plazo de corrientes inducidas por sistemas de altas y bajas corrientes, como las generadas en una planta de producción de electricidad para una población. El objetivo a corto plazo que debe perseguir el estudio del impacto a la salud sería el de los efectos neurológicos en los sistemas musculares para trabajadores expuestos.

En sus resultados Gabriel & Gabriel (1996) presentan una tabla de conductividades para diferentes partes del cuerpo (sin tomar en cuenta la piel). Le presentamos los resultados en las tablas N° 1 y 2.

Tabla N°1. Conductividad (S/m), de partes del cuerpo a tres frecuencias

<i>Frecuencia</i>	<i>Cuerpo Completo</i>	<i>Cabeza</i>	<i>Torso</i>	<i>Brazo</i>	<i>Pierna</i>	<i>Rodilla</i>
<i>50 Hz</i>	0,216	0,254	0,223	0,195	0,196	
<i>10 kHz</i>	0,276	0,285	0,256		0,238	0,222
<i>100 kHz</i>	0,288	0,30	0,332		0,239	0,243

Tabla N° 2. Valores estimados de la conductividad (S/m) de tejidos corporales a frecuencias menores de 100 hz a la temperatura corporal.

TEJIDO	DUCK 1990	GRABRIEL 1996	TEJIDO	DUCK 1990	GRABRIEL 1996
Vejiga		0,20	Lengua		0,30
Médula Osea		0,05	Cartílago		0,18
Fluido Espinal	1,81	2,00	Hueso cortical	0,020	0,020
Cerebelo		0,10	Mamas		0,060
Colon		0,10	Testículos		0,40
Cornea	0,40		Grasa		0,040
Vesícula biliar	1,6	1,4	Materia Gris	0,30	0,10
Riñones	0,90	0,10	Hígado	0,12	0,070
Pulmón Inflado	0,050	0,080	Pulmón Exhalado	0,10	0,20
Corazón	0,20	0,10	Cristalino		0,25
Sangre	0,68	0,70	Materia Blanca	0,10	0,060
Músculo	0,40	0,35	Piel mojada		0,10
Páncreas	0,13	0,22	Bazo		0,10
Tendón	0,30		Orina	3,3	
Nervio	0,40	0,030	Humor Vítreo		1,5
Intestino Delgado		0,50	Tiroides		0,50
Estómago		0,50			

CORRIENTES ELÉCTRICAS, CAMPOS MAGNÉTICOS Y CORRIENTES INDUCIDAS EN EL HUMANO

Si la corriente es alterna, el campo magnético es variable con el tiempo, y todo campo magnético en movimiento con respecto a un sistema de coordenadas induce una corriente eléctrica en un conductor eléctrico, en reposo en el sistema de coordenadas y situado en la vecindad del campo. Estos fenómenos anteriormente descritos, son la base del funcionamiento de los transformadores, de los motores y generadores eléctricos.

Las líneas de transmisión de alta tensión transmiten corrientes alternas de 60 Hz y generan campos electromagnéticos en su vecindad. Su

intensidad depende de la distancia, del voltaje y de la corriente que pasa por la línea. En una línea de corriente alterna monofásica, el campo magnético alterno es tan rápido que una brújula no tiene tiempo a cambiar de posición, por lo que permanece quieta, como si no hubiera un campo que la altere.

Hay que tener en cuenta que las líneas de alta tensión son siempre tres cables o múltiplos de tres, por ser trifásica la máquina que produce corriente eléctrica, y si las tres fases estuvieran con la misma intensidad (el mismo consumo) y muy juntas, la resultante del campo magnético alterno sería 0; pero esto no ocurre normalmente, y la diferencia de carga por fase como la distancia entre los cables hace que induzcan un campo magnético alterno hasta varios metros de distancia. La forma del campo magnético alterno inducido por la corriente eléctrica en los otros casos (transformadores, motores, cables domésticos, antenas de radiofrecuencia y telefonía móvil, radares, etc.) depende de la posición de los conductores y de los materiales que intervienen, si son magnéticos o paramagnéticos.

MÉTODO EXPERIMENTAL

Daremos sólo algunos elementos del método experimental. En otra publicación completa se darán los detalles del método y de los resultados experimentales. Para la medición de corrientes inducidas se utilizó el método propuesto por uno de los autores (BFG). Se calibraron tres bobinas, una por cada eje del espacio (norte-sur, este-oeste y vertical), sobre las cuales se induce un campo magnético a partir de una bobina idéntica tomada como primario de referencia. Se caracterizaron las bobinas a partir de los parámetros más relevantes: resistencia, impedancia, número de vueltas, geometría del embobinado, volumen del conductor. (Resistencia interna $66,7 \Omega$, impedancia 317Ω , 3 400 vueltas, volumen de $0,000 507 \text{ m}^3$). La impedancia de 317Ω es pertinente, pues la resistencia total más baja encontrada, medida incluyendo el efecto de la piel, es de 500Ω . Se calculó el campo que debe generar esa bobina en el punto central de su geometría en función de la corriente directa que circula y se comparó con el campo medido (en las tres direcciones del espacio), con un teslametro Didaline (Perron) MT 3921 con sonda a efecto Hall (dos escalas: 10 mT y 100 mT y perilla de ajuste a cero). El campo

magnético en la dirección de la orientación del eje de la bobina lleva a un ajuste de 0,80. Después se estudió la dispersión del campo debido a las distorsiones geométricas agregando hasta tres bobinas, espacialmente distribuidas sobre el eje de simetría de las bobinas y las correcciones alcanzan el decimal. Posteriormente se estudió la respuesta a una corriente variable a 60 Hz. Se hizo variar la distancia del secundario con respecto al primario para una corriente eficaz dada y se estableció que la variación es exponencial decreciente con la distancia en las tres direcciones del espacio. También se estableció, una dependencia lineal extremadamente buena entre la corriente en el primario y voltaje inducido en el secundario para diferentes distancias tal como lo predice la Teoría. Repetimos las experiencias con las mismas bobinas y, además, también calibramos una pareja de bobinas alineadas según el eje de simetría de resistencia interna total $3,73 \Omega$ e impedancia $7,43 \Omega$. Con estos valores nos acercamos a las resistencia más baja de los órganos $5 \Omega/m$. Además, hicimos una representación cartográfica del voltaje inducido en las tres direcciones, evitando distorsiones debida a objetos cercanos.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se hizo un monitoreo del campo magnético estático y de las corrientes inducidas en toda la casa de máquina, el pozo de cables y en el parque de transformadores contiguo a la casa control del complejo de Fortuna. Igualmente, se midió en la casa de máquinas, en los patios de transformadores de planta La Estrella. Además, se hicieron mapas de las regiones cercanas de cada uno de los transformadores. Se detectaron los puntos críticos para recomendar las medidas que se deberían tomar para aplicar el principio de la menor exposición posible. Se compararon los resultados entre Fortuna y la Estrella con la finalidad de establecer si los órdenes de magnitud de los resultados de una central de 300 MW comparada con una central de 27 MW eran proporcionales a sus respectivas potencias de producción, indicando la coherencia de los resultados. Los valores continuos más altos se encontraron cerca de los transformadores de las turbinas. Los valores picos más altos aparecen en los transformadores de alto voltaje para la transmisión. Los valores de campo magnético estático son relativamente bajos (dentro de las normas), pero las personas con marcapasos no deben acceder a los lugares inspeccionados. Las

normas aplicadas por la empresa de acceso restringido y el menor tiempo posible son apropiadas.

ABSTRACT

EGE Fortuna, S.A. made an environmental audit in Fortune complex to elaborate an adaptation plan and environmental handling procedures. For the first time in Panama this included a low frequency and high intensity non ionizing radiation audit, being an historical reference for the environmental politics in the region. The authors designed, applied and validated a method for these measurements for future recommendations to take into account in the plan and environmental handling procedures to avoid stochastic effects of the radiations in a rational way of the precaution principle.

KEYWORDS

Fortuna, audit., non ionizing radiation, low frequency, high intensity.

REFERENCIAS

Zárate P., M. F. 2002. El proyecto eólico de generación de energía eléctrica dentro del área protegida de Fortuna: un caso de energía limpia con serios problemas ambientales. *Revista Tecnociencia* Vol 4, N° 2.

Castillo, M. De Los A. 2002. Auditoría y Plan de Adecuación y Manejo Ambiental del Complejo Hidroeléctrico Fortuna y su Reserva Forestal. *Revista Tecnociencia*. Vol. 4, N° 1.

Fernández, B. 2001. “Estudio de la Radiación Electromagnética en la casa de máquinas de la Hidroeléctrica La Fortuna”. Informe a la Empresa AES Panamá. Fac. de Ciencias. Universidad de Panamá.

Batista, G. 2002. “Estudio de la Radiación No Ionizante de baja frecuencia en la Hidroeléctrica La Estrella”. Escuela de Física. Universidad de Panamá.

Gabriel, C. & Gabriel, S. 1996. “Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies” Departamento de Física, King’s College Londres. <http://www.brooks.af.mil/AFRL/HED/hedr/reports/>

Universidad de Atacama. 2001. "Contaminantes Físicos".
Departamento de Ingeniería de Minas.
<http://plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/geolamb/>

Beninson, D. 1996. Riesgo Radiación a baja dosis. Revista Seguridad Radiológica de la Asociación Radiológica Argentina.
<http://www.radioproteccion.org.ar/>

Tuotromedico.com 2002. Radiaciones Ionizantes y Radiaciones No Ionizantes. http://www.tuotromedico.com/temas/radiaciones_ionizantes.htm

Recibido octubre del 2002, aceptado marzo del 2003.