

# INTRODUCCIÓN A LAS FUENTES INTENCIONALES DE INTERFERENCIAS QUE CONTRIBUYEN AL AMBIENTE ELECTROMAGNÉTICO

Hildeberto Jardón-Aguilar

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Depto. de Ing. Eléctrica

Av. IPN No 2508, esq. Av. Ticoman, CP: 07000, México DF

Tel: 57473779; hjardon@cinvestav.mx

**Resumen:** Todos los equipos y sistemas electrónicos, radioelectrónicos y de radiocomunicación son susceptibles a ser interferidos, indispuestos, dañados permanentemente, o destruidos con energía electromagnética emitida por sistemas destinados para estos fines. La energía electromagnética puede entrar por cualquier apertura del equipo electrónico o por la antena de sistemas radioelectrónicos y de radiocomunicación. Estas fuentes de ambiente electromagnético intencional pueden ser de banda angosta, de banda ancha, de ultra banda ancha o de hiper banda ancha.

En el artículo se analizan las trayectorias de penetración, tipos de fuentes de ambiente electromagnético intencional, sus efectos en equipos y sistemas electrónicos, radioelectrónicos y de radiocomunicación, así como su clasificación empleando diferentes parámetros.

## 1.- INTRODUCCIÓN

La sociedad moderna cada día se soporta con mayor énfasis en sistemas electrónicos y de comunicación para realizar con mayor eficiencia y comodidad sus diferentes tareas en la oficina, industria, escuela, hogar, etc. Todo dispositivo, equipo o sistema que emplea energía eléctrica tiene la potencialidad de ser fuente de energía electromagnética [1, 2], la cual puede afectar el funcionamiento de cualquier equipo o sistema electrónico, como también tiene la potencialidad de captar energía electromagnética inducida o radiada por otros equipos eléctricos, electrónicos, o radioelectrónicos. En este trabajo sólo se analiza la potencialidad de dispositivos, equipos y sistemas electrónicos, radioelectrónicos, o de radiocomunicación de captar energía electromagnética presente en el lugar de su colocación, dejando para un artículo posterior la problemática del acoplamiento por medios conductores de oscilaciones que tengan la potencialidad de dañar y/o interferir a equipos y sistemas electrónicos. También por claridad, a menos que se presta a alguna ambigüedad, a todo dispositivo, equipo o sistema electrónico, radioelectrónico o de radiocomunicación, se denominará simplemente equipo electrónico.

Los equipos electrónicos cada vez realizan funciones más complejas y a más altas velocidades, lo cual requiere que los circuitos integrados sean de mayor escala de integración y

operen a más altas frecuencias. Para alcanzar estas características es indispensable que los transistores que conforman a los circuitos integrados sean de dimensiones más pequeñas, ya que el material que se emplea para la gran mayoría de los circuitos integrados sigue siendo el silicio, y se puede afirmar de manera simplificada, que todos los circuitos integrados digitales de los equipos electrónicos están contruidos de silicio. En este material, como en cualquier otro, o aleación que se emplea en la electrónica integrada, los portadores de carga tienen una cierta movilidad, y para hacer que los circuitos respondan a más alta velocidad se tiene que reducir las dimensiones de los transistores.

El achicamiento de estas dimensiones está acompañado de la disminución de los voltajes de ruptura, y también de la reducción de la corriente de fusión de sus terminales y de otras interconexiones. Lo anterior viene asociado con el incremento de la posibilidad de que los circuitos integrados sean dañados si existen en éstos voltajes y corrientes que sobrepasen determinados niveles.

Si se supone que los circuitos y el equipo electrónico están bien diseñados y contruidos, o sea que operan con voltajes y corrientes dentro de sus niveles de seguridad, existe la potencialidad que puedan crecer los voltajes y corrientes en las terminales e interconexiones de los circuitos y de los equipos debido a la inducción o captación de energía electromagnética incidente y recibida por el equipo electrónico. Si estos voltajes y corrientes sobrepasan

determinados niveles existe la posibilidad que el equipo electrónico sea interferido, indispuerto, dañado ligeramente o destruido de forma masiva y permanente.

## 2. FÉNOMENO DE RESONANACIA EN EQUIPOS ELECTRÓNICOS

Usualmente en los circuitos digitales y en otros de banda ancha, fuera de su sistema de alimentación, no se emplean inductores e inclusive pueden estar ausentes los capacitores. En una primera aproximación se puede suponer que en las trayectorias de las señales no existe la posibilidad que se presenten procesos de resonancia, lo cual es incorrecto.

Si por una terminal o interconexión, por pequeña que sea, circula corriente, en éstas aparecen campos magnéticos y se almacena energía en dichos campos. La capacidad de un elemento de almacenar energía en un campo magnético se representa por una inductancia.

Para que circule una corriente por una terminal o interconexión se necesita aplicar una diferencia de potencial en sus extremos, si se tiene una diferencia de potencial aparecen campos eléctricos y se almacena energía en dichos campos. La capacidad de un elemento de almacenar energía en un campo eléctrico se representa por una capacitancia.

Lo anterior nos permite afirmar que aunque físicamente no se conecten inductores y capacitares en un circuito o equipo electrónico se puede presentar un conjunto de resonancias debido a las inductancias y capacitancias intrínsecas a toda terminal o interconexión. Estas resonancias pueden ser serie o paralelo. Si éstas tienen un carácter de resonancia serie, se presenta en las terminales de los elementos intrínsecos amplificación de voltaje, el coeficiente de amplificación es igual al factor de calidad equivalente ( $Q$ ).

De forma simplificada

$$Q = \frac{\omega L}{R}$$

Donde

$\omega$  es la frecuencia angular.

$L$  es la inductancia.

$R$  es la resistencia.

El voltaje en las terminales de los elementos intrínsecos es

$$V_L = QV_e \quad (1)$$

Donde:

$V_L$  es el voltaje en la inductancia y es igual al voltaje en la capacitancia.

$V_e$  es el voltaje en las terminales del circuito resonante serie que conforman los elementos intrínsecos.

Si éstas tienen un carácter de resonancia paralelo, se presenta en las terminales de los elementos intrínsecos amplificación de corriente

$$I_C = QI_e \quad (2)$$

Donde

$I_C$  es la corriente a través del capacitor equivalente de terminales e interconexiones.

$I_e$  es la corriente de entrada al circuito resonante paralelo.

Como todo equipo electrónico tiene un conjunto amplio de terminales e interconexiones con diferentes longitudes y topologías es de esperarse que se puedan presentar varias frecuencias de resonancia tanto serie como paralelo.

La ecuación 1 indica que si a un circuito se le ha inducido un cierto voltaje y se presenta el fenómeno de resonancia serie en las terminales e interconexiones existe la posibilidad que la componente de dicho voltaje con frecuencia idéntica a la de resonancia sea amplificada  $Q$  veces. Si el factor de calidad es, por ejemplo 100, y se ha inducido un voltaje de 1 mV, en las terminales de la inductancia equivalente o capacitancia se tendría 100 mV. Un voltaje de 100 mV en un transistor de alta sensibilidad y de alta frecuencia o de alta velocidad puede ser suficiente para dañarlo permanentemente.

## 3. CAMINOS DE PENETRACIÓN DE LA ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA EN EQUIPOS ELECTRÓNICOS

Todo equipo electrónico tiene diferentes caminos por los cuales la energía puede penetrar [1-7]. Existen

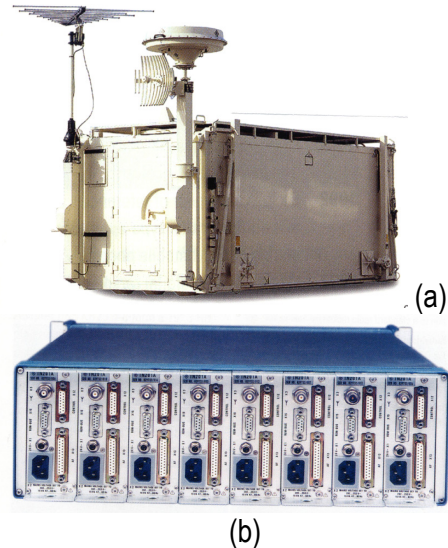
algunos que su puerto de entrada es un excelente transductor de energía electromagnética no guiada en voltajes y corrientes. Este transductor es la antena receptora de cualquier sistema de recepción de todo sistema radioelectrónico o de radiocomunicación. Los sistemas de radiorrecepción son diseñados para que sean de alta sensibilidad, lo cual implica que pueden realizar su función básica con señales de amplitud muy pequeñas de entrada y esto va acompañado con el hecho de que pueden ser interferidos, indispuestos, dañados o destruidos con oscilaciones electromagnéticas de amplitud relativamente pequeña [1-7]. La gran mayoría de los sistemas radioelectrónicos y de radiocomunicación son equipos electrónicos de banda angosta, por lo que su alta susceptibilidad tiene lugar en un intervalo angosto de frecuencias [1, 2].

Otros equipos electrónicos como por ejemplo computadoras, robots, sistemas electrónicos de control, equipo industrial y de oficina, etc. no tienen un dispositivo de entrada que sea eficiente transductor de energía electromagnética no guiada en energía electromagnética guiada, pero tienen aperturas, ya sea de ventilación, de terminales de entrada y salida, terminales de alimentación, etc. Por las cuales puede penetrar la energía electromagnética no guiada. La eficiencia con que penetra la energía por estos puertos depende de la frecuencia o frecuencias de las componentes de la energía electromagnética, del tamaño y orientación de las aperturas. Por ejemplo si la apertura tiene una longitud próxima a un cuarto de longitud de onda de la energía electromagnética incidente, la apertura se comporta como una excelente antena receptora. Incluso si la longitud de la apertura es igual o mayor que una longitud de onda, ésta se puede comportar como una antena receptora con ganancia mayor a la unidad.

Una representación grafica de los caminos de penetración de la energía electromagnética se muestra en la figura 1.

En la figura 1a se muestra el ejemplo de un receptor de propósitos especiales [8], no obstante que el conjunto de radiorreceptores está blindado, existen caminos por donde puede introducirse energía electromagnética: antena, sistema de ventilación, sistema de alimentación, etc. En la figura 1b se presenta la parte posterior de un equipo electrónico [8] donde se muestra un

conjunto de puertos de entrada y salida así como los de alimentación, no obstante que el equipo se encuentra en un chasis metálico, el blindaje no es



**Fig. 1** Ejemplos de: (a) un radiorreceptor profesional, (b) parte trasera de un equipo electrónico

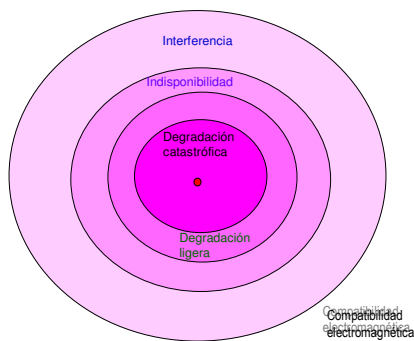
perfecto por la presencia de estos puertos. Cuando la energía electromagnética penetra por la antena se dice que lo hace por la *puerta de frente* [2], en el caso que la energía electromagnética se introduzca por algún puerto de entrada o de salida, por el puerto de alimentación o incluso por medios conductivos a través del sistema de alimentación o de cables de interconexión se dice que la energía electromagnética penetró por la *puerta trasera* [2]. Inclusive si el blindaje no es continuo y tiene uniones y si éstas no son perfectas o no están en buen estado, por ellas también puede introducirse energía electromagnética. Cuando el nivel de la energía es lo suficientemente grande tiene la potencialidad de interferir, indisponer, dañar o destruir al equipo electrónico [3-9].

#### 4. EFECTOS POTENCIALES CAUSADOS SOBRE EL EQUIPO ELECTRÓNICO POR LA ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA

Cuando la energía electromagnética incidente en un equipo electrónico induce corrientes y voltajes, ésta puede causar un conjunto de efectos potencialmente dañinos al funcionamiento o al mismo equipo electrónico. Si los niveles de voltajes y corrientes inducidos son menores a un cierto nivel, el funcionamiento de los equipos electrónicos no se ve alterado y se dice que se cumple con las condiciones de compatibilidad electromagnética; en el caso que los niveles de voltajes y corrientes inducidos

sobrepasan dicho nivel, el funcionamiento de los equipos se ve alterado y se dice que el equipo fue interferido, no se cumplen las condiciones de compatibilidad electromagnética, pero cuando desaparece o disminuye de nivel la energía electromagnética incidente en los equipos electrónicos, éstos vuelven a funcionar adecuadamente, como fueron diseñados; si aún crece más el nivel, además de interferir el funcionamiento de los equipos, éstos son indispuestos, tal que aunque desaparezca o se reduzca el nivel de la energía electromagnética los equipos electrónicos no funcionan adecuadamente hasta que no sean restablecidos, esta condición se denomina *indisponibilidad de equipos electrónicos* por energía electromagnética incidente. Si aún crece más el nivel de la energía electromagnética, los equipos pueden dañarse quemándose uno o varios transistores, de uno o varios circuitos integrados o tabletas de los equipos electrónicos. Para que éstos vuelvan a funcionar es indispensable repararlos, esto es, cambiar a los transistores o circuitos integrados dañados, a este proceso se denomina “*daño permanente*” del equipo electrónico causado por la electromagnética incidente, o *degradación ligera*; si crece aún más el nivel de la energía electromagnética, los equipos electrónicos pueden sufrir un daño masivo, esto es, varios transistores, circuitos integrados, tabletas electrónicas resultan dañados, de tal forma que ya es muy difícil o imposible reparar a los equipos electrónicos y es necesario sustituirlos, en este caso se dice que los equipos electrónicos sufrieron su *destrucción* o *degradación catastrófica*.

Una forma grafica de representar los potenciales efectos de la energía electromagnética sobre los equipos electrónicos se muestra en la figura 3.



**Fig. 3** Efectos de las fuentes de ambiente electromagnético intencional sobre equipos electrónicos

El tamaño de las áreas de los diferentes efectos que causa el ambiente electromagnético intencional sobre los equipos electrónicos es función de: la potencia efectiva radiada, las pérdidas de propagación, caminos de penetración, susceptibilidad de los equipos electrónicos, ancho de banda de los equipos, intervalo de frecuencias y ancho de banda del ambiente electromagnético intencional.

## 5. SUSCEPTIBILIDAD DEL EQUIPO ELECTRÓNICO AL AMBIENTE ELECTROMAGNÉTICO INTENCIONAL

En función del tipo del equipo electrónico, éstos pueden ser susceptibles a cualquiera de los fenómenos mostrados en la figura 3 y el nivel requerido puede ser tan pequeño como pW o se requieran niveles tan grades como W. Por ejemplo, los receptores de sistemas radioelectrónicos y de radiocomunicación pueden tener sensibilidades de -110 dBm y oscilaciones intencionales de niveles de -90 dBm los pueden interferir, oscilaciones de -50 dBm pueden indisponerlos, oscilaciones de -30 dBm los pueden dañar de forma permanente. Esta característica se debe a que todo receptor de cualquier sistema radioelectrónico o de radiocomunicación está diseñado para funcionar adecuadamente con señales muy pequeñas, el dispositivo de entrada del sistema de recepción es un eficiente transductor del ambiente electromagnético en ondas de voltaje y corriente, y uno de los dispositivos de entrada de todo radioreceptor es un amplificador de radiofrecuencia de alta sensibilidad.

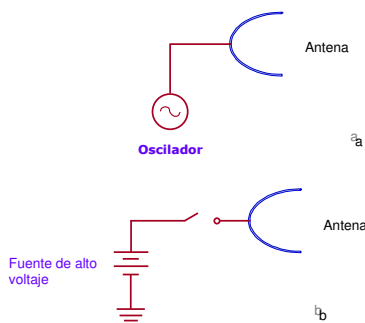
Otros equipos electrónicos requieren ambientes electromagnéticos de mayor nivel para ser interferidos, indispuestos, dañados o destruidos. Por ejemplo, considérese el equipo electrónico mostrado en la figura 1b: la penetración de la energía electromagnética al equipo no es a través de un transductor eficiente, los circuitos integrados requieren señales relativamente grandes (V o fracciones de V) para que realicen sus funciones fundamentales, lo cual exige que el ambiente electromagnético intencional debe ser de mayor nivel para que los equipos sean interferidos, indispuestos, dañados o destruidos.

Una diferencia fundamental entre estos dos grupos de equipos electrónicos es que los radioelectrónicos y de radiocomunicación son principalmente vulnerables a oscilaciones de banda angosta en contraste cuando la energía penetra por la puerta trasera de los equipos electrónicos, éstos son principalmente vulnerables a

oscilaciones de banda ancha, de ultra banda ancha o de hiper banda ancha.

## 6.- TIPOS DE FUENTES DE AMBIENTE ELECTROMAGNÉTICO INTENCIONAL

De forma simple, una fuente de ambiente electromagnético intencional puede ser una fuente de potencia de gran nivel y una antena. Su representación simplificada se muestra en la figura 4.



**Fig. 4** Representación simplificada de fuentes de ambiente electromagnético intencional

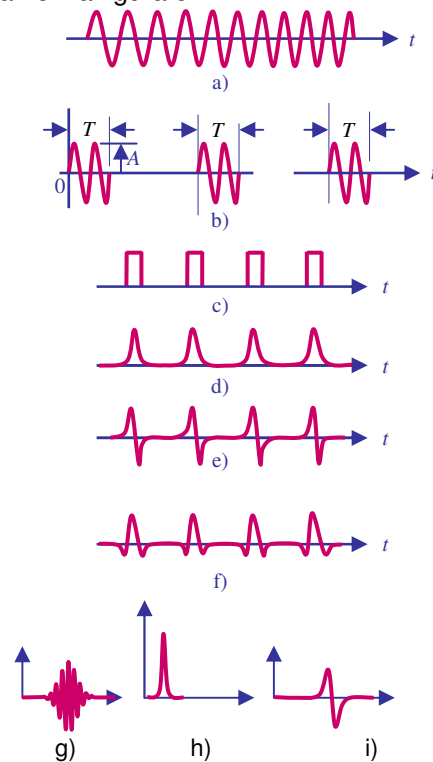
En la figura 4a se muestra como fuente a un oscilador conectado directamente a una antena, este oscilador puede generar una oscilación continua, un pulso de RF o un conjunto de pulsos de RF; en la figura 4b se tiene una fuente de alto voltaje, un interruptor y una antena, estas fuentes pueden emitir un pulso o un conjunto de pulsos. Aunque la fuente de alto voltaje junto con el interruptor proporcione pulsos unipolares, al ser radiados, éstos adquieren un carácter bipolar con envolvente gaussiana de ultra banda ancha (UWB) o de hiper banda ancha.

Del análisis anterior se tiene que las fuentes de ambiente electromagnético intencional pueden clasificarse empleando diferentes parámetros, algunos de los más importantes son: ancho de banda, tecnología, tipo de señal, características temporales, potencia, portabilidad, número de veces que se pueden emplear, entre otros.

**Ancho de banda:** Las fuentes pueden ser de banda angosta, de banda ancha, de ultra banda ancha, de hiper banda ancha. Ejemplo del primer tipo es la fuente mostrada en la figura 4a cuando ésta emite una onda continua, o pulsos de RF, en los cuales su duración es tal que en cada uno de

ellos se tienen varios periodos de la señal de RF. Las figuras 4a y 4b pueden representar fuentes de banda ancha de ultra banda ancha o de hiper banda ancha, lo cual está en función de la duración del pulso si éste es de banda base, en el caso de los pulsos de RF, el ancho de banda está en función del número de periodos de la oscilación de RF que dura cada pulso.

**Tipo de señal y características temporales:** las fuentes de ambiente electromagnético intencional pueden radiar todo un conjunto de formas de onda, en particular las fuentes de energía pueden proporcionar señales continuas de RF, o pulsos de banda base o de RF. Ejemplos de estas formas de onda se muestran en la figura 5



**Fig. 5** Formas de onda proporcionadas por el generador de potencia de las fuentes de ambiente electromagnético intencional: a) onda continua de RF, b) tren de pulsos de RF, c) tren de pulsos rectangulares de banda base, d) tren de pulsos gaussianos de banda base, e) y f) trenes de pulsos gaussianos diferenciados; g) monopolpulo de RF con varios ciclos, h) monopolpulo gaussiano de banda base, i) monopolpulo monociclo

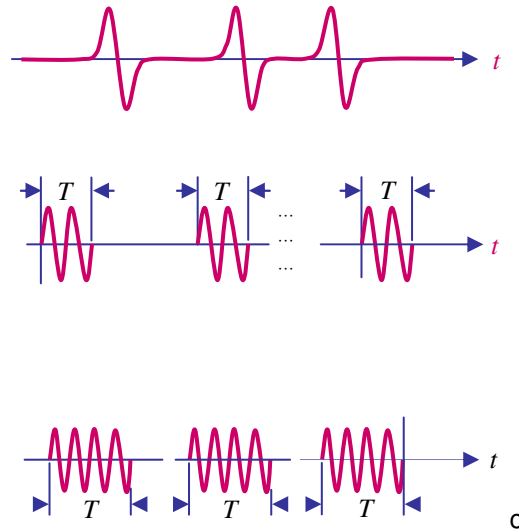
Las fuentes de ambiente intencional pueden radiar una onda continua, un tren de pulsos o un solo pulso y estos pueden tener diferentes anchos de banda, por ejemplo: la señal de la figura 5a es una onda senoidal continua, por lo tanto representa una oscilación de

banda angosta; la señal de la figura 5b representa un tren de pulsos de RF y la oscilación puede ser de banda angosta, banda ancha, de UWB, o de hiper banda ancha; en la figura 5c se muestra un tren de pulsos de banda base, en función de la duración de los pulsos, la oscilación puede tener diferentes anchos de banda; en la figura 5d se muestra también un tren de pulsos de banda base pero en este caso la forma de onda es tipo gaussiana; las señales de las figuras 5e y 5f son trenes de pulso obtenidas al diferenciar los pulsos de forma gaussiana o rectangulares. Puesto que las antenas se comportan como filtros pasa banda, estas formas de onda pueden corresponder a los pulsos radiados por las antenas cuando se les alimenta con señales de banda base como de la forma de las figuras 5c y 5d; en la figura 5g se muestra una señal que consiste sólo de un pulso de RF con envolvente de forma gaussiana; en la figura 5h se muestra la forma de onda de una señal que consiste de un solo pulso de forma gaussiana; finalmente, en la figura 5i se muestra una señal de un solo pulso de RF que contiene un solo ciclo, este pulso normalmente es de ultra banda ancha o de hiper banda ancha.

Cuando se tiene una señal que corresponde a un pulso o a un tren de pulsos de RF su ancho de banda es función del número de ciclos que contiene cada pulso, por ejemplo en la figura 6 se tienen trenes de pulsos de RF, pero en la figura 6a corresponden a pulsos monociclo, en la figura 6b a pulsos que contienen dos ciclos y en la figura 6c a pulsos que contienen varios ciclos, si los pulsos duran lo mismo, el tren 6a tiene un ancho de banda más amplio que el tren 6b y éste tiene un ancho de banda más amplio que el tren 6c. El tren 6a corresponde a una señal de ultra banda ancha o de hiper banda ancha, mientras que el tren 6b corresponde a una señal de ultra banda ancha, mientras que el tren 6c corresponde a una oscilación de banda ancha o de banda angosta en función del número de ciclos.

**Tecnología:** en función del alcance de la fuente de ambiente electromagnético intencional, para su desarrollo puede requerirse de componentes de uso amplio y para su construcción el desarrollador sólo requiere conocimientos básicos de electrónica, a estas fuentes se les denomina *fuentes de baja tecnología*; en otras es indispensable emplear componentes con disponibilidad relativamente amplia en el mercado y el desarrollador requiere tener habilidades

equivalentes a la de un especialista general en el área de electrónica de RF y microondas, a estas fuentes se les denomina *fuentes de tecnología media*;



**Fig. 6** señales de tipo trenes de pulsos de RF: a) monociclos, b) biciclos, c) policiclos

para el desarrollo de fuentes de mayor nivel de potencia es indispensable emplear componentes especiales de acceso restringido o de muy difícil acceso y su desarrollo requiere de un equipo de especialistas con habilidades refinadas en áreas de electrónica de RF y microondas, de altas energías, de altos voltajes y altas corrientes, de antenas para grandes niveles de potencia, a estas fuentes se denominan *fuentes de alta tecnología*.

**Potencia:** en función del área en el cual la fuente de ambiente electromagnético intencional debe destruir, dañar, indisponer o interferir al equipo electrónico y de las condiciones de propagación, los niveles de potencia radiada pueden estar en el intervalo de W a decenas e incluso centenas de GW. Para transmitir ondas de UWB o de hiper banda ancha, se requiere que la fuente proporcione pulsos muy breves, esta característica abre la posibilidad de radiar pulsos de gran nivel empleando fuentes de alimentación de baja energía.

**Portabilidad:** las fuentes de ambiente electromagnético intencional pueden ser fijas, personales o móviles en un vehículo terrestre, aéreo o marítimo. Lo anterior está en función de la aplicación, número y nivel de pulsos a radiar y del tiempo de generación del ambiente electromagnético intencional.

**Número de veces que se pueden emplear:** con frecuencia las fuentes de ambiente electromagnético intencional pueden emplearse múltiples veces y depende de la fuente de alimentación, pero si éstas van colocadas por ejemplo en un cohete son de uso de una sola vez.

## 7. CONCLUSIONES

Muchas actividades vitales de la vida moderna están basadas en el empleo masivo de equipos, dispositivos y sistemas electrónicos, radioelectrónicos y de radiocomunicación, los cuales pueden ser interferidos, indispuestos, dañados permanentemente o destruidos por equipos especiales denominadas, en el ámbito civil, como *fuentes de ambiente electromagnético intencional*. Normalmente estas fuentes están destinadas a sacar de operación a la infraestructura electrónica y de comunicaciones. La vulnerabilidad del equipo electrónico y así de buena parte de la infraestructura fundamental de la sociedad, crece conforme se incrementa la escala de integración de los circuitos y tiene la posibilidad de realizar operaciones más complejas y a más altas velocidades, o cuando es de mayor sensibilidad. Las fuentes de ambiente electromagnético intencional pueden radiar oscilaciones de banda angosta, banda ancha, UWB, o de hiper banda ancha, en función del equipo electrónico a ser interferido, indispuesto, dañado o destruido. Por esta razón es indispensable que la sociedad y sus autoridades deben empezar a considerar los potenciales riesgos que pueden representar a la infraestructura de la sociedad, tomar medidas de protección y tener medios para detectar y medir ambientes electromagnéticos anómalos.

## REFERENCIAS

[1] H. Jardón-Aguilar *“Compatibilidad Electromagnética de los Sistemas de Radiocomunicación”* Alfa-Omega, México, 1996.

[2] H. Jardón-Aguilar, M. A. Peyrot-Solis, G. M. Galvan-Tejada *“Guerra Radioelectrónica y Monitoreo del Uso del Espectro Electromagnético”* libro de uso interno de la Secretaría de Marina de México, 2008.

[3] H. K. Floring *“The future battlefield: a blast of gigawatts? [microwave-based weapons]”*

Spectrum IEEE, Vol. 25, No 3, March 1988, pp. 50-54.

[4] G. Ni, B. Gao, J. Lu *“Research on High Power Microwave Weapons”* APMC 2005 Asia-Pacific Microwave conference Proceedings, 4-7 Dec. 2005, pp. 4.

[5] W. D. Prather, C. E. Baum, R. J. Torres, F. Sabath, and D. Nitsch *“Survey of Worldwide High-Power Wideband Capabilities”* IEEE Trans. On Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, No 3, August 2004, pp. 335-343.

[6] C. E. Baum *“Reminiscences of High-Power Electromagnetic”* IEEE Trans. On Electromagnetic Compatibility, Vol. 49, No. 2, May 2007, pp. 211-218.

[7] R. L. Schweitzer *“Radio Frequency Weapons and the infrastructure”* Joint Economic Committee United States Congress, June 17, 1997, <http://www.house.gov/jec/hearing/espionag/scweitz.htm>.

[8] Rohde and Schwarz *“The World of Radio Communications”*, Catalog 2004/2005.

[9] R J. Barker and E Schamiloglu *“High-Power Microwave Sources and Technologies”*, edited by IEEE (Wiley-IEEE Press, 2001).