

**ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN POWER SYSTEMS****COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNETICA EN SISTEMAS DE POTENCIA****MSc. Ing. Julio César Chacón Velasco****Universidad Industrial de Santander, UIS**

Escuela de Ing. Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

E-mail: cchacon@uis.edu.co

**Abstract:** One of the natural phenomena associated with the electromagnetic compatibility in the Electric Power Systems is the rays. Aspects related with their formation, development and statistical data, as well as the consequences of their incidence, direct and indirect, in the Electric Systems they are purpose of this paper. In a same way, some examples of electromagnetic compatibility and the possible protection that can be implemented to minimize the effect of this phenomenon are presented.

**Resumen:** Uno de los fenómenos naturales asociado con la compatibilidad electromagnética en los sistemas eléctricos de potencia son los rayos. Aspectos relacionados con su formación, desarrollo y datos estadísticos, así como las consecuencias de su incidencia, tanto directa e indirecta, en los sistemas eléctricos son objeto de este artículo. De igual manera se presentan algunos ejemplos de compatibilidad electromagnética y las posibles protecciones que se pueden implementar para minimizar el efecto de este fenómeno.

**Keywords:** Electromagnetic compatibility, Interference source, Electromagnetic coupling, Ceraunic level, Over-voltage, Induction voltages, Faraday cage, Protection devices.

**1. INTRODUCCION**

Este artículo presenta los aspectos fundamentales de la compatibilidad electromagnética (CEM) asociada con los efectos originados por las descargas atmosféricas y las posibles protecciones para garantizar el buen funcionamiento de un sistema eléctrico de potencia. La influencia o el impacto directo de una descarga atmosférica sobre un sistema eléctrico de potencia origina sobretensiones del orden de los millones de voltios lo que conduce a los investigadores en el área de la alta tensión a buscar la manera de medir estas señales empleando osciloscopios o registradores

de transitorios que solo pueden soportar señales del orden de los mili o microvoltios. Estas mediciones pueden ser distorsionadas por la acción del efecto del impacto de la sobretensión propiamente dicha, por lo tanto se hace necesario tener en cuenta las precauciones necesarias para registrar señales sin interferencia electromagnética.

En los laboratorios de alta tensión el empleo de cables coaxiales, el cuidadoso trazado de los recorridos de alimentación, control y medida se constituyen en los principales métodos para el registro de señales sin interferencia electromagnética.

La mayoría de las medidas de protección contra las descargas atmosféricas y contra los impulsos rápidos generados en los laboratorios de alta tensión<sup>1</sup> están asociadas con la lucha contra impulsos electromagnéticos. Los impulsos electromagnéticos asociados a los rayos forman parte importante del ambiente electromagnético natural de la mayoría del territorio colombiano sobre todos en los meses tormentosos asociados con las épocas de lluvias. La protección del equipo eléctrico de un sistema eléctrico es fundamental para su buen funcionamiento, sin embargo, los efectos experimentados por el ser humano a los enormes impulsos de corriente asociados a los rayos y por consiguiente su protección requiere de una atención particular.

## 2. DEFINICIONES

A continuación se presentarán algunas de las definiciones más importantes relacionadas con la compatibilidad electromagnética.

Por *compatibilidad electromagnética* (EMC) se entiende la habilidad de un dispositivo, equipo o sistema de funcionar satisfactoriamente en un entorno electromagnético (EM) sin introducir perturbaciones electromagnéticas no tolerables en ninguna otra parte de su entorno (IEC<sup>2</sup>).

Esta definición de de EMC implica dos aspectos bien diferenciados; *funcionar satisfactoriamente*, es decir, el equipo es tolerante con otros equipos, el equipo no es susceptible a señales EM que otros equipos ponen en el ambiente y *no producir perturbaciones EM intolerables*, es decir, la emisión de señales electromagnéticas por el propio equipo no origina problemas de interferencia electromagnética (EMI) en otros equipos.

Se entiende por *ambiente electromagnético natural* a la totalidad de los fenómenos electromagnéticos que existen en un determinado sitio.

<sup>1</sup> Estos impulsos se utilizan para simular en el laboratorio los efectos de los rayos, se les conoce como impulsos atmosféricos (IA) o simplemente impulsos tipo rayo.

<sup>2</sup> IEC - Comisión Internacional de Electrotecnia.

En un proceso de compatibilidad electromagnética existen tres factores que intervienen en la interacción: *La fuente de interferencia electromagnética, el mecanismo de acople y la víctima*, ver la Fig. 1. Los rayos emiten una señal de interferencia o disturbio (de carácter eléctrico y magnético) y se encuentran dentro de la categoría de fuentes de interferencia electromagnética.

*La emisión de la señal de interferencia (EI)* de la fuente se cuantifica a través de su magnitud y puede afectar a los equipos de una forma indeseable a través de *la generación de una señal de interferencia* de una amplitud dada (AI) que puede ser una corriente, una tensión, una potencia, un campo, etc.

Cada equipo es una fuente de interferencia<sup>3</sup>. Cada proceso eléctrico emite una magnitud útil y una magnitud de interferencia. Por ejemplo, un teléfono celular emite una magnitud útil que es la información, pero emite a su vez una magnitud de interferencia que puede afectar los sistemas de control y comunicación de un avión o puede ser causa de un incendio en una estación de gasolina.

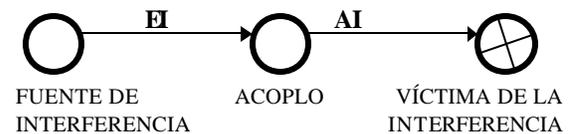


Fig. 1. Modelo elemental de interferencia en una dirección

*La magnitud de interferencia* puede estar libre en el espacio, puede ser estacionaria o puede estar ligada a un conductor.

*La víctima de la interferencia (VI)* es un equipo eléctrico que puede ser afectado o influido por una interferencia electromagnética.

*Un disturbio en la operación* es una influencia indeseada en el equipo, por ejemplo, al pasar debajo de una línea de transmisión el efecto de los campos electromagnéticos originados por la línea distorsionan la señal que emite un receptor de radio.

<sup>3</sup> Son fuentes de interferencia los hornos de arco, la soldadura eléctrica, los motores, las lámparas fluorescentes, las lámparas de descarga, las fotocopiadoras, los equipos de aire acondicionado, los electrodomésticos, etc. También la inducción mutua entre líneas y las maniobras de conmutación de las compañías eléctricas.

*Una limitación en la operación normal de un equipo* es una influencia que aunque puede ser aceptada, no es despreciable. Por ejemplo un teléfono celular cerca de la pantalla de un computador puede influir sobre ella sin generar efectos graves.

*Una operación errónea* es una influencia no aceptable en la operación del equipo. Por ejemplo, un rayo puede ocasionar que en un sistema petrolero cese el bombeo porque el computador central, influido por la señal del rayo, la entiende como una orden de parada emitida por el pulsador de parada de emergencia.

*Parada total de la operación*, es una influencia no aceptable en la operación del equipo. La operación puede ser restablecida solamente después de tomar medidas adecuadas. Un ejemplo sería la parada de una planta de producción de bombeo de petróleo como resultado de tarjetas de control quemadas por una sobretensión, o el incendio de un tanque de gasolina causado por el impacto de un rayo, o la pérdida de información de los archivos de un banco o el accidente de una persona causado por un rayo.

*Inmunidad a la interferencia* es la habilidad del equipo para resistir la interferencia hasta cierta amplitud, sin llegar al estado de *operación errónea*. Un ejemplo típico sería el aislamiento de los transformadores de distribución, los cuales pueden soportar tensiones de impulsos atmosféricos hasta cierto valor sin resultar afectados por los rayos.

*Umbral de interferencia* es la amplitud mas baja de una señal de interferencia que causa *operación errónea*. Por ejemplo el nivel básico de aislamiento (BIL) de un transformador de distribución es un voltaje umbral.

*El margen de seguridad a la interferencia* es el logaritmo de la relación entre el umbral de interferencia y la amplitud de la señal de interferencia.

*El acoplamiento C*, describe la relación mutua entre los circuitos de corriente en los cuales la energía es transferida de un circuito a otro:

$$EI \times C = AI \quad (1)$$

### 3. PROTECCION CONTRA RAYOS

#### 3.1 El fenómeno del rayo y su intensidad

Las descargas atmosféricas se desarrollan desde grupos activos de las llamadas nubes tormenta. Aproximadamente el 40% de las descargas atmosféricas son descargas entre nubes y la tierra las cuales representan el peligro más alto para los equipos de un sistema eléctrico y más aún para los sensibles equipos de un sistema electrónico. El 60% de las descargas ocurren dentro de las mismas nubes o entre nubes.

Las descargas atmosféricas se pueden clasificar en:

- descendentes y ascendentes
- negativas y positivas
- parciales o completas

Aproximadamente al 36% de las descargas que son únicas, se les conoce como *stroke*. Si la descarga se repite varias veces entonces se le conoce como *lightning stroke*.<sup>4</sup> El proceso del *leader*, que se propaga de la nube a la tierra empieza con un *lightning stroke* (una predescarga luminosa, conocida como *stepped leader*), seguido inmediatamente por *el return stroke*, que se propaga de la tierra hacia la nube.

La intensidad y la frecuencia de ocurrencia de los rayos determinan el riesgo de exposición del equipo en cuestión y de la interacción con los equipos sensibles.

Al criterio más antiguo para determinar la frecuencia de los rayos se le conoce como *Nivel Cerámico*.<sup>5</sup> Este nivel representa el número promedio de días trueno por año en determinada región, por ejemplo, el número promedio de días por año en el cual un trueno sería escuchado en un periodo de 24 horas. El nivel cerámico se consigna en mapas, en los cuales las líneas con niveles cerámicos constantes son graficados de una manera similar a las líneas de altitud en un mapa topográfico.

En cualquier tormenta siempre existen rayos dentro de las nubes, nube - nube y entre nubes y tierra. Estos últimos representan los más altos riesgos para los sistemas eléctricos por lo que es más apropiado

<sup>4</sup> El 21% de las descargas se repiten 6 o mas veces. El valor medio de las descargas múltiples es de 3.

<sup>5</sup> Del griego keraunos -rayo

determinar una *densidad de rayos a tierra*. Esta densidad puede ser determinada utilizando antenas eléctricas y contadores que sensen y registren el número de rayos que originen cambios tanto eléctricos como magnéticos.

En Colombia con la implementación, desde mediados de 1995, de un sistema de seis antenas LPATS basado en el método TOA (*Time of Arrival*), consistente en determinar la llegada de campos eléctricos originados por la caída a tierra de un rayo, se han alcanzado nuevas posibilidades en los estudios de los efectos ocasionados por las descargas atmosféricas.

La comparación entre los resultados de las mediciones de los días trueno y de la densidad de rayos para diferentes áreas presenta una alta correlación. Si la densidad de rayos a tierra ( $N_g$  - en número de rayos a tierra por  $\text{km}^2$ - año)<sup>6</sup> no esta disponible, la literatura ofrece diversas expresiones que permiten estimarla. Algunas de ellas son:

$$\begin{aligned} N_g &= 0,11T && \text{(EUA norte, según Horn y Ramsey)} \\ N_g &= 0,17T && \text{(EUA sur, según Horn y Ramsey)} \\ N_g &= 0,15T && \text{(EUA, según Brwon y Whitehead)} \\ N_g &= 0,04 T^{1,25} && \text{(Sudáfrica, según Eriksson)} \\ N_g &= 0,036 T^{1,3} && \text{(Rusia, según Kolokolov y Pavlova)} \\ N_g &= 0,15T && \text{(Mundo, según Golde)} \quad (2) \end{aligned}$$

Donde T es el nivel cerámico de la zona. Esta relación varía con los cambios en las condiciones del clima.

Los parámetros de la corriente del rayo, los rangos de sus valores y la forma del impulso de corriente se muestran en la Fig. 2 y 3. Los valores típicos de los parámetros son:

$$\begin{aligned} I &= 2\,000 - 200\,000 \text{ A} \\ S &= 5\,000 - 300\,000 \text{ kA}/\mu\text{s} \\ Q &= 1 - 1\,000 \text{ As (C)} \\ T_1 &= 0,1 - 10 \mu\text{s} \\ T_2 &= 10 - 100 \mu\text{s} \\ n &= 1 - 50 \text{ (40 o 50 descargas múltiples se han registrado con una duración de un segundo de todo el evento).} \end{aligned}$$

El voltaje entre una nube y tierra antes de una descarga a tierra se ha estimado entre 10 MV y 1 000 MV. Sin embargo, para un ingeniero de protección, para efectos de diseño, interesa la

tensión que aparece en el aparato de energía en que ocurre la incidencia.

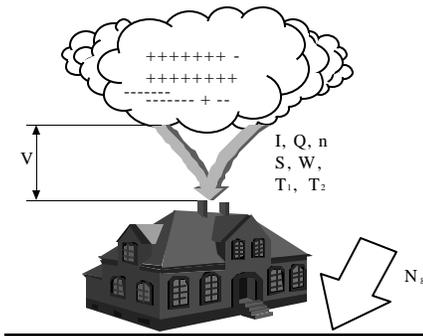


Fig. 2. Parámetros de una descarga atmosférica

Los efectos mecánicos y térmicos de los rayos están relacionados con los valores pico de la corriente I, la carga Q y la energía W. Los efectos dañinos causados por las tensiones inducidas estan asociados con la pendiente de la corriente del rayo.

### 3.2 Acoplamiento electromagnético y origen de las sobretensiones tipo rayo

El mecanismo por el cual la corriente de un rayo se acopla a una estructura, su interacción con las instalaciones eléctricas y los equipos depende del punto de impacto del rayo. Los posibles puntos de impacto de los rayos a tierra se muestran en la Figura 4.

Los efectos directos más peligrosos que un rayo puede ocasionar son:

- Incendios
- Heridas a personas y animales
- Daño a equipos eléctricos y electrónicos.

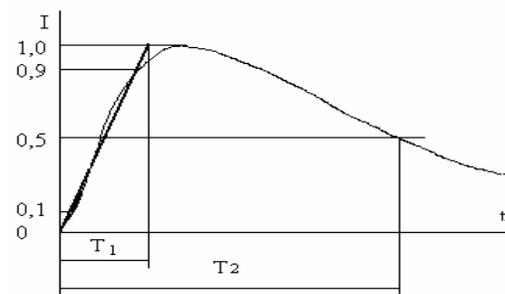


Fig. 3. Forma de la corriente de un rayo

<sup>6</sup> Fuente: Ref. 3, EPRI

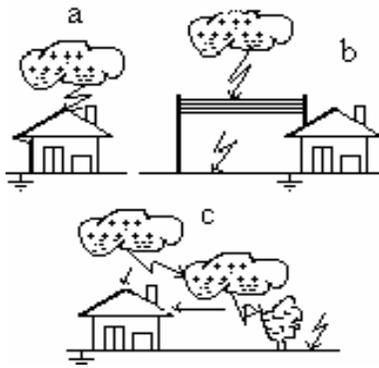


Fig. 4. Puntos posibles de impacto de un rayo: a) Impacto directo a una estructura, b) Impacto cercano a una línea de transmisión o a tierra, c) Impacto cercano a un objeto adyacente o a tierra

Los efectos de los rayos pueden ser extremadamente peligrosos para los sistemas de computo, de control, de regulación, de telecomunicaciones, para las fuentes de alimentación lo que puede originar pérdidas indeseables a los servicios públicos, a la producción industrial y a todo tipo de empresa en general. La descarga de un rayo durante una tormenta atmosférica, crea en las líneas una onda de corriente que se propaga en un radio de varios kilómetros y en la tierra eleva brutalmente su potencial, induciendo fuertes sobretensiones en los cables subterráneos y aumentando la tensión en las tomas de tierra.

Las sobretensiones en instalaciones de baja tensión y en equipos muy sensibles originadas por los impactos directos de rayos sobre una estructura o en cercanías de ella son ocasionadas por transferencias subsecuentes de señales debidas a acoplamiento resistivos, de campo magnético y de campo eléctrico.

- Acoplamiento resistivo (p.e. debido a la resistencia de puesta a tierra del sistema o a la resistencia de la pantalla eléctrica de los cables de señales)
- Acoplamiento de campo magnético (p.e. originado por las inductancias de los lazos conductores en la instalación)
- Acoplamiento de campo eléctrico (p.e. debido a las antenas tipo varilla vertical).
- En general se ha establecido que el acoplamiento por campo eléctrico dentro de una estructura es pequeño comparado con el acoplamiento magnético

El *acoplamiento resistivo* es la razón por la cual, parte de la corriente del rayo fluye por las estructuras conductoras externas, tales como los cables de fuerza o de señales que están ligados a la estructura impactada y que van a una tierra remota. Las corrientes parciales que fluyen por las pantallas de los cables de señales producen caídas de tensión en las pantallas las cuales aparecen entre los conductores internos y la pantalla. Esta es una tensión transitoria que puede crear interferencias en el sistema de información.

Además del acoplamiento resistivo, los mecanismos tanto por campo magnético como por campo eléctrico, también pueden manifestarse en los sistemas de comunicación y de potencia.

*Acoplamiento por campo magnético.* Se ha establecido que la corriente del rayo que fluye por un pararrayos a la tierra o por el canal de la descarga del rayo, produce un campo magnético, el cual es proporcional a la variación de la corriente en el tiempo hasta distancias del orden de 100 m. De acuerdo a la ley de Ampère, la intensidad del campo magnético  $H(t)$  es inversamente proporcional a la distancia  $r$  a partir del eje del canal de la descarga del rayo, supuesto rectilíneo y de gran longitud, transportando la corriente del rayo  $i$ ,

$$H = \frac{I}{2\pi r} \frac{A}{m} \quad (3)$$

En el sitio donde este campo magnético se acopla con los lazos formados por conductores, se inducen tensiones proporcionales a la variación de la intensidad del campo magnético en el tiempo  $dH/dt$  (inducción magnética), lo que permitirá realizar estimativos del acoplamiento del campo magnético con los cables de señales.

La inducción magnética también se presenta cuando un rayo impacta una bandeja metálica de transmisión de conductores de comunicación o de potencia. Si los conductores no son blindados, o no están instalados dentro de una tubería metálica, o la bandeja portacables no es blindada, el campo magnético de la corriente del rayo a distancias de 100 m induce tensiones del orden de magnitud de las señales transportadas por los cables, situación peligrosa pues estas señales pueden ser interpretadas como información errónea que lleve a operaciones indebidas del sistema.

Si el cable es blindado, la corriente del rayo puede viajar por la pantalla, produciendo tensiones transitorias indeseables por acoplamiento resistivo, pero que son de menor amplitud a las inducidas en los cables sin pantalla.

*Acoplamiento de campo eléctrico.* Cuando la carga eléctrica transportada por el líder descendente del rayo está próxima a la tierra, se inducen campos eléctricos muy altos (del orden de la magnitud del campo eléctrico de disrupción del aire, 500 kV/m) en un área aproximadamente de 100 m de radio a partir de su punto de impacto. Después de la formación de la descarga principal del rayo (la descarga de retorno con enormes cantidades de corriente) el campo eléctrico colapsa y se generan variaciones del campo eléctrico del orden de 500 kV/m/μs.

La magnitud de la corriente inducida por este proceso puede calcularse de acuerdo a:

$$i = \frac{dQ}{dt} = \epsilon_0 A \frac{dE}{dt} = \frac{500}{36\pi} A \quad (4)$$

Donde:

- A = es el área de la superficie en metros
- E = es el campo eléctrico de 500 kV/m
- Q = es la carga en C depositada sobre la superficie metálica.

Para una área expuesta de 100 m<sup>2</sup> se espera una corriente inducida de 442 A.

### 3.3 Ejemplos de EMC

Los fenómenos de acoplamiento electromagnético entre la fuente de interferencia y la víctima se pueden explicar mediante algunos ejemplos.

**Ejemplo: 1.** En la Fig. 5 se muestra una adaptación de la sombrilla-pararrayos de Barbeu-Duborg, utilizada a finales del siglo XVIII. Este dispositivo puesto de moda a raíz de la invención del pararrayos por parte de B. Franklin es demasiado peligroso en el evento fortuito de un rayo.

De acuerdo al modelo de interferencia en una dirección, la fuente de interferencia es el rayo que produce una emisión de interferencia EI que corresponde a la corriente del rayo.



Fig. 5 La sombrilla-pararrayos de Barbeu-Duborg. (Este dispositivo puede producir la muerte).

La víctima de la interferencia VI es la persona que lleva la sombrilla-pararrayos. La víctima de la interferencia es afectada por una descarga indirecta. La persona puede considerarse como un sofisticado y sensible equipo eléctrico, cuyas corrientes son básicamente corrientes iónicas.

Para el caso del acoplamiento por efecto resistivo la puesta a tierra del conductor es muy mala (por ejemplo a través de una resistencia de 50 Ω). En el caso del impacto de un rayo de polaridad negativa y de 7 kA<sup>7</sup> de amplitud el cual de acuerdo a datos estadísticos tiene una probabilidad de ocurrencia del 95%, ver [2], se produce una caída de tensión en la resistencia de puesta a tierra de 350 kV. Esta tensión aparece entre la mano y el pie del hombre de la sombrilla. Esta es una sobretensión mortal, la cual podría evitarse colocando la mano y el pie del hombre a un mismo potencial.

Para ello el hombre se debería parar en una superficie equipotencial, la cual podría ser un disco conductor en el suelo, equipotencializado con el conductor de tierra o "bajante" de la sombrilla-pararrayos. De esta manera se evitaría una diferencia de potencial entre los pies, mas esto no evitaría el salto de chispa causado en el brazo por el acople inductivo (por campo magnético).

Si tenemos en cuenta que el conductor bajante de la sombrilla-pararrayos posee una inductancia aproximada (L) de 1 μH/m y considerando una variación de la corriente (di/dt) de 4 kA/μs para el rayo con la misma probabilidad del 95%, se puede encontrar la caída de tensión (V<sub>L</sub>) entre la mano y el pie de la víctima de acuerdo a:

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (5)$$

<sup>7</sup> El 95% de los rayos no sobrepasan los 7 kA y el 5% restante no superan los 100 kA.

Como resultado del efecto del acople inductivo, la víctima de la interferencia electromagnética recibe 10 kV.

El efecto de la caída de tensión por acoplamiento de campo magnético se puede contrarrestar: Reduciendo la inductancia de la trayectoria seguida por la corriente o disminuyendo la pendiente de la corriente del rayo. La mejor forma de proteger a la víctima sería colocarla dentro de una *jaula de Faraday*, de tal forma que al circular la corriente por el exterior de la misma no exista campo magnético en el volumen interior.

Teniendo en cuenta tanto el efecto resistivo, como el capacitivo la víctima de la interferencia electromagnética estaría sometido a una tensión de 360 kV!!!.

Adicionalmente se presenta un acople capacitivo (por efecto del campo eléctrico) entre la víctima y la fuente de interferencia, ver Fig. 6. Aparece una corriente de desplazamiento que circula a través de la persona, independientemente de que la víctima no se encuentre en la trayectoria del rayo.

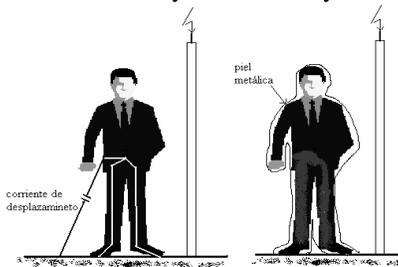


Fig. 6 Protección contra las corrientes de desplazamiento.

La forma más adecuada de proteger a la persona sería evitando que se comportara como un condensador; para esto se equipotencializa metiéndolo dentro de un traje conductor, el traje metálico es nuevamente una jaula de Faraday y las cargas inducidas sobre él se depositan y circulan por el exterior.

**Ejemplo: 2.** Otro ejemplo de compatibilidad electromagnética asociado con impulsos electromagnéticos generados por rayos sería el caso de cables de señales sin apantallamiento en una zona expuesta a este tipo de fenómenos. Es el caso del daño producido por un rayo en unas tarjetas de control ubicadas varios cientos de metros del sitio de impacto de un rayo. La fuente de

interferencia es el rayo. La emisión de interferencia o circuito primario de corriente es el canal del rayo. El canal del rayo produce tanto campos magnéticos como eléctricos. el circuito secundario, al cual se transfiere la corriente del rayo, son los cables de señales y demás conductores que están involucrados con el equipo fallado o víctima de la interferencia. Por cualquiera de los mecanismos de acoplamiento antes mencionados o por contribuciones simultáneas de todos ellos, se produce una señal o amplitud de interferencia electromagnética, la cual viaja por los cables hasta los equipos electrónicos. Si esta amplitud de interferencia es superior al umbral de interferencia del sistema o supera su nivel de inmunidad, se producen los siguientes eventos: Limitaciones en la operación manual del sistema, operaciones u ordenes erróneas del sistema o la parada total de la operación del sistema, que generalmente esta asociada a la destrucción de equipos o elementos electrónicos.

**Ejemplo: 3.** El caso más crítico se tendría con una descarga directa de un rayo, por ejemplo en un conductor de fase de una línea aérea de transmisión. La sobretensión generada por este fenómeno sería proporcional a la impedancia característica de la línea y a la magnitud de la corriente de la descarga del rayo. Esta sobretensión puede ser de varios millones de voltios. Para una corriente de 7 kA y con una  $Z_0 = 300 \Omega$  se tendrían 2.1 MV, lo que resulta en una imposibilidad práctica y económica para aislar las líneas de transmisión para soportar este tipo de sobretensiones. Se aplican procedimientos coordinados de diseño para hacer mínimos los efectos de los rayos, los cuales implican entre otras actividades:

- Apantallamiento de líneas y equipo.
- Aterrizaje efectivo.
- Aplicación de dispositivos de protección.

La presencia del sistema de apantallamiento o de guarda asegura que el rayo, que de lo contrario terminaría en un conductor de fase, termine en un alambre, un terminal, etc., que esté conectado eléctricamente al sistema de tierras.

Un sistema de tierras bien diseñado desvía la mayor parte de la corriente de descarga del rayo al subsuelo y así hace mínimas las sobretensiones destructivas ocasionadas por los rayos.

Los dispositivos de protección por sobretensiones<sup>8</sup> deben en el caso ideal, limitar las tensiones entre las caras del aislamiento de un aparato de energía por debajo de un valor especificado (el nivel de protección).

Como la mayoría de sistemas (comerciales, industriales, etc.) están interconectados a sistemas de energía, las perturbaciones que hayan en estos últimos se transmiten a ellos. Estos sistemas están sujetos también a descargas directas de rayos, por lo cual requieren guarda contra los rayos. Típicamente se instala un sistema de tierras a la vez que un sistema de protección contra rayos (guardas) para desviar a tierra todas las descargas atmosféricas directas. Los sistemas de tierra externos de los sistemas de energía comerciales o industriales se interconectan al sistema de energía, ver Fig. 7.

El sistema de protección contra rayos es básicamente un sistema de guardas diseñado para dirigir y conducir las sobretensiones del rayo al sistema de tierra externo a fin de hacer mínimas las diferencias de potencial dentro de la instalación. Un diseño coordinado del sistema externo de tierras, el sistema de protección contra rayos y el sistema interno de tierras pueden proporcionar un sistema reforzado contra rayos y otras fuentes de sobretensiones.



Fig. 7. Descripción conceptual del sistema aterrizado de una instalación industrial

#### 4. MEDIDAS PARA MEJORAR LA COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNETICA

De los ejemplos anteriores puede concluirse cuales son las medidas que deben tomarse para mejorar la compatibilidad electromagnética de un equipo sensible con su medio ambiente electromagnético.

<sup>8</sup> En la actualidad se utilizan supresores de sobretensiones de carburo de silicio con descargador y varistores de metal y óxido de Zn (pararrayos tanto para alta, como para baja tensión).

La primera medida se relaciona con actuar directamente sobre la fuente de interferencia electromagnética. En este caso puede disminuirse la emisión de interferencia empleando medidas especiales para el diseño de las componentes electrónicas. Por ejemplo: Apagar el teléfono celular dentro de los aviones antes de iniciar un viaje. Diseñar adecuadamente las antenas de los teléfonos celulares para que sea mínima la energía electromagnética que llegue al cerebro. Infortunadamente, como en el caso de los rayos, no puede hacerse nada para apagar la fuente de los rayos.

Sin embargo, se tiene la posibilidad de actuar sobre la víctima de la interferencia electromagnética, aumentando por ejemplo su nivel de inmunidad contra las amplitudes de disturbio electromagnético. Esto se logra aumentando los niveles de aislamiento de los transformadores de distribución o protegiéndolos cuidadosamente utilizando supresores de sobretensiones por ejemplo. En cualquiera de los dos casos se aumentarían los costos de diseño y protección de los equipos. La combinación de sistemas de puesta a tierra junto con sistemas de protección contra rayos mejora ostensiblemente la EMC.

Tal vez la mejor forma de compatibilizar los sensibles equipos electrónicos con su medio electromagnético es atacar los mecanismos de acoplamiento. Para evitar el acoplamiento resistivo debe recurrirse a la equipotencialización del sistema, para reducir las transferencias de voltaje. Para controlar los acoplamientos por campo eléctrico y magnético deben emplearse apantallamientos electromagnéticos, como el caso de la jaula de Faraday (se sugiere emplear varias bajantes para conducir la corriente directa del rayo a la tierra).

Otra forma fundamental consiste en filtrar las señales, eliminando las señales de alta frecuencia que interfieren en el sistema. El empleo de las protecciones de transitorios (SPD: *Surge Protecting Devices*) es el mecanismo más empleado para lograr el objetivo de compatibilizar los equipos sensibles con su medio electromagnético. En cualquier caso las medidas para mejorar la compatibilidad electromagnética deberán ajustarse a las normas internacionales que sobre este tema la IEC ha preparado.

## 5. REFERENCIAS

- [1]. Román C. F., “Aspectos generales de la compatibilidad electromagnética”. Presentada en 1999 en el seminario sobre protección de equipos sensibles contra rayos y transitorios electromagnéticos. Santafé de Bogotá, pp. 5-23.
- [2]. Loboda M., “Protection of sensitive equipment against LEMP”. Presentada en 1999 en el seminario sobre protección de equipos contra rayos y transitorios electromagnéticos. Santafé de Bogotá, pp 45-72.
- [3]. Anderson J. G., “Lightning Performance of Transmission Lines”. En Transmission Line Reference Book. EPRI. 1982. pp 545-597.
- [4]. Fink D.G., Beaty. H. W., “Manual de Ingeniería Eléctrica”. Cuarto tomo. Décimo tercera edición. McGraw-Hill. 1996.
- [5]. \_\_\_\_\_, “Circutor”. Catálogo general. Cap. 10. Descargadores de sobretensiones. 1997.
- [6]. Román C. F., “Ejemplos de compatibilidad electromagnética y las normas de la IEC para la protección contra rayos”. Mundo eléctrico colombiano. Vol. 14. N° 38. Enero-Marzo del 2000, p.p. 77-80.
- [7]. Sebastián J. L., “Fundamentos de compatibilidad electromagnética”. Addison-Wesley. Primera edición. Madrid. 1999.
- [8]. Rugeles J, “Conceptos básicos en la técnica de la alta tensión” Publicaciones UIS. Bucaramanga. 1991.
- [9]. Uman M., “Lightning”. Dover Publications, Inc. New York. 1984.