

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

FACULTAD DE CIENCIAS



TRABAJO FIN DE GRADO

**FÍSICA DE PELÍCULA
PULSOS ELECTROMAGNÉTICOS**

Departamento de Electricidad y Electrónica

Autor:

ALBERTO SARDIÑA DEL DEDO

Dirigido por:

ISMAEL BARBA GARCÍA
ANA CRISTINA LÓPEZ CABECEIRA

21 de Julio de 2017

Índice

1. Introducción	1
2. Características generales	2
2.1. Energías	2
2.2. Rango de frecuencias	3
2.3. Función de onda	4
3. Desarrollo Histórico	7
4. Nuclear EMP	11
4.1. Radiación Gamma	12
4.2. Corriente Compton	13
4.3. Conductividad del aire	14
4.4. Ecuaciones de Maxwell y Campos Radiantes	15
4.4.1. Caso completamente Simétrico	15
4.4.2. Explosión en la superficie	16
4.4.3. HEMP	19
4.5. Conclusiones	22
5. NNEMP	25
5.1. Solar EMP	25
5.2. E-bomb	26
5.3. Meteoric EMP	28
6. Lightning EMP	31
7. Blindaje	35
7.1. Conceptos básicos	35
7.2. Corrientes inducidas	40
7.3. Simulación	42
8. Recursos Filmográficos	49
8.1. Ocean 's Eleven	49
8.2. Matrix	53
8.3. Agents of S.H.I.E.L.D.	55
8.4. Godzilla	59
8.5. La guerra de los mundos	61
8.6. Otros ejemplos	63
9. Conclusiones	67
10. Bibliografía	75

Resumen.

En este trabajo se abordan los pulsos electromagnéticos desde un punto de vista teórico y práctico con el objetivo final de aplicar los conocimientos adquiridos al estudio y análisis de distintos recursos filmográficos donde aparecen. De este modo, podemos distinguir en el documento dos partes distintas.

En la primera de ellas, se realiza un estudio teórico necesario para comprender y poder alcanzar, en última instancia, el objetivo planteado. En primer lugar, y con cierta generalidad, se estudia las definiciones y características generales relativas al pulso electromagnético. Posteriormente, se presenta un desarrollo histórico para contextualizar el fenómeno desde un punto de vista experimental y teórico con referencias a las publicaciones existentes. A continuación, nos centramos detenidamente en las fuentes capaces de producir estos pulsos, apartados 4, 5 y 6. Para finalizar esta primera parte, se aborda de manera teórica conceptos básicos relativos a blindajes, para concluir con un ejemplo práctico realizado en un software de simulación electromagnética.

En la segunda parte, se realiza un análisis crítico de distintos ejemplos donde podemos encontrar de manera explícita el uso de pulsos electromagnéticos. En primer lugar, se aborda detalladamente distintos recursos que se encuentran en el ámbito cinematográfico donde aparece este fenómeno. Finalmente, se presenta un último apartado con referencias a otros ejemplos que podemos hallar en series, videojuegos y en la literatura.

1. Introducción

La física es una rama de conocimiento muy amplia que nos permite tener una visión crítica de la realidad que nos rodea, marcándonos límites y sobrepasando los que ya creemos que están limitados. Permittiéndonos avanzar tecnológicamente mejorando así nuestra calidad de vida y nuestra propia concepción de la naturaleza.

Por otro lado, el cine es una parte de nuestra actividad social y cultural que nos entretiene, pero que en muchas ocasiones nos educa. En el cine la realidad y la ficción se enfrentan, a veces caminando juntas y otras separadas. De esta manera nace en el cine un género conocido como ciencia ficción, utilizado como medio divulgativo para enseñar ciencia, pero que en ocasiones consigue lo contrario. De este modo, con la visión crítica que nos ofrece la física podemos hacer de la ciencia ficción una versión mejorada considerada como cine de ciencia.

Al igual que la física es una rama muy amplia, la ciencia que podemos encontrar en el cine también lo es. Podemos observar fenómenos visuales y temas catalogados como magia, tras los que realmente hay detrás conceptos básicos de óptica o principios elementales de física, incluso de química.

Un tema muy recurrente en el cine es el mundo de los superhéroes, tema en el que hay mucha física y que ya se ha analizado en muchas ocasiones con ojos críticos. En esencia, podría considerarse a un superhéroe como un ser humano capaz de controlar o superar un aspecto de la realidad física. De esta manera, podemos encontrarnos con infinidad de superhéroes asociados a las infinitas posibilidades físicas que la naturaleza nos brinda.

Otros temas más usados recientemente incluyen conceptos teóricos, relativistas y cuánticos. Por ejemplo, podemos observar en la gran pantalla realidades alternativas, universos paralelos, dimensiones adicionales y paradojas relativistas. Cuando estos temas se presentan en el cine, siempre causan fascinación en el espectador que se asombra ante la realidad distinta que nos ofrece la física a la percepción elemental que tenemos de ella. Como se suele decir, la realidad supera en ocasiones a la ficción.

El electromagnetismo es una rama muy extensa dentro de la física, sin embargo no lo es tanto dentro del mundo del cine. Como se ha mencionado, existen muchos ejemplos de física en el marco de los superhéroes. De este modo, es sencillo entender que el electromagnetismo es otra rama más representada en este ámbito. Quién no ha oído hablar de Electro o de Magneto, superhéroes que dominan a la perfección las leyes de Maxwell, y que tienen poderes tan sorprendentes como manejar a su antojo las propiedades elementales de los objetos de modo que son capaces de atraer o repelerlos con un magnetismo selectivo, como es el caso de Magneto.

Como el tema de los superhéroes es un tema muy recurrente, en nuestro caso nos alejaremos de él y trataremos otros dentro del electromagnetismo que son menos utilizados. De esta manera, se ha seleccionado un apartado de esta rama que puede encontrarse en el cine más veces de lo que se podría esperar, pero que rara vez viene acompañado de una correcta explicación científica, de modo que la ficción se superpone a la realidad. El fenómeno elegido se conoce en la literatura como pulso electromagnético y tiene la característica de provocar daños en los dispositivos electrónicos que se encuentre en su propagación. De modo que es típico encontrar este fenómeno como parte del argumento de varias películas y series para acabar con los sistemas de seguridad de ciertas instituciones o producir apagones o cualquier otro efecto que conlleve el beneficio o perjuicio de un colectivo.

De esta manera, trataremos en este documento la física relativa al pulso electromagnético, conocido habitualmente como ‘EMP’ o ‘PEM’. Veremos entonces todo lo relativo a la producción o generación de éstos, sus características generales, una breve introducción histórica, una introducción a la posibilidad de protegerse ante este fenómeno y finalmente una revisión crítica de las películas y ejemplos donde aparece.

2. Definición y Características Generales

Un pulso electromagnético (EMP)¹ es una emisión de energía electromagnética de alta intensidad capaz de producir daños o perturbaciones en dispositivos electrónicos, ocurriendo en un breve período de tiempo a modo de pulso. En esencia es una onda de choque electromagnética que se propaga a través del espacio con un rango de frecuencias determinado que interfiere con los dispositivos electrónicos que se encuentra en su trayectoria.

El origen de la energía emitida en un EMP puede ser de distintos tipos dependiendo de las fuentes que generan el propio pulso, pudiendo ser estas fuentes naturales o creadas por el hombre. A lo largo del documento explicaremos con bastante detenimiento las fuentes de pulsos EM ya sean naturales o humanas.

Además del tipo de energía emitida y las fuentes del pulso, existen otras características generales que trataremos a continuación. De este modo trataremos en este apartado la energía emitida, el rango de frecuencias y las funciones de ondas que se pueden asociar a estos pulsos con sus respectivas características.

2.1. Energías

En un EMP se producen campos eléctricos y magnéticos que se propagan a través del espacio transmitiendo energía e interactuando con los dispositivos que se encuentran en su trayectoria. La naturaleza de estos campos depende de la fuente que los haya producido y la amplitud de los mismos depende de la distancia a las fuentes. Como las principales fuentes de pulsos EM generan estos campos a largas distancias del objetivo, de la energía emitida nos fijaremos en el estudio de la radiación electromagnética, que es la parte de los campos capaces de transportar energía y momento sobre largas distancias.

La radiación electromagnética se refiere a las ondas asociadas a campos electromagnéticos que se propagan a través del espacio transportando (radiando) energía. Esta definición incluye ondas de radio, microondas, el espectro óptico y la radiación ionizante. En el siguiente apartado veremos qué rango de frecuencias se emiten en un EMP.

Desde el punto de vista clásico, la radiación electromagnética consiste en ondas formadas por oscilaciones sincronizadas de campos eléctricos y magnéticos que se propagan con velocidad de la luz. Estas oscilaciones de los campos son perpendiculares entre ellos y perpendicular a la dirección de la energía y la propagación de la misma formando una onda transversal.

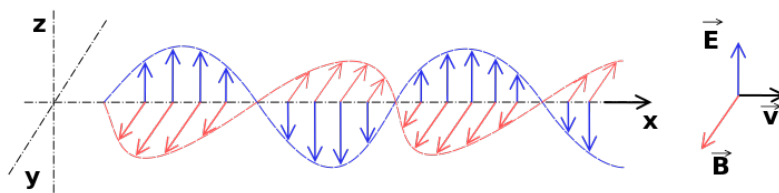


Figura 1: Onda Transversal EM asociada a la radiación.

Cuando una partícula cargada es acelerada, emite energía electromagnética. Se habla de radiación cuando las ondas electromagnéticas generadas en este proceso son capaces de propagarse libremente a través del espacio sin la continua influencia de las partículas que las generó. A esta radiación se le conoce habitualmente como aproximación de campos lejanos debido a que se propagan lo suficientemente lejos de las partículas fuentes. Sin embargo, hablamos de campos cercanos cuando los campos producidos por cargas y corrientes se encuentran cerca de las fuentes.

¹A lo largo del documento usaremos ‘EMP’ para referirnos al pulso electromagnético. Abreviatura procedente de sus siglas en inglés, puesto que son las más habituales en la literatura son las que usaremos aquí. Aunque también es normal encontrar en algunos artículos ‘PEM’ por sus siglas en español.

Tanto el campo eléctrico como el magnético asociado a la radiación electromagnética disminuyen de manera inversamente proporcional a la distancia a la fuente. De este modo la densidad de potencia radiada, dada por el valor del vector de Poynting², disminuye con el cuadrado de la distancia. Por lo que la potencia total irradiada también obedece esta ley. Ya que:

$$\mathcal{P} = \oint \langle \vec{S} \rangle \cdot d\vec{A}$$

Siendo $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ el vector de Poynting y $\langle \vec{S} \rangle$ el promedio espacial de éste integrado a lo largo de una superficie cerrada de sección $d\vec{A}$.

2.2. Rango de frecuencias

Cuando se genera un EMP la energía emitida se encuentra en un rango de frecuencias que va desde un límite inferior hasta un límite superior dependiendo de la fuente que genere el pulso. Cuando nos referimos al límite inferior, habitualmente hablamos de $0Hz$ (DC), aunque en determinadas ocasiones se fija este límite en la banda de muy bajas frecuencias (VLF) que se encuentra en el rango de $(10 - 30)KHz$.

Por otro lado, cuando nos referimos al límite superior generalmente se incluyen frecuencias que alcanzan hasta el rango de microondas, $(3 - 30)GHz$, excluyendo frecuencias superiores. Es decir, se excluyen tanto el espectro óptico como el espectro relativo a las radiaciones ionizantes, i.e., rayos X y gamma.

Al excluir el espectro óptico (infrarrojo, visible y ultravioleta) estamos dando por hecho que un EMP no es un fenómeno que pueda observarse visualmente. Una cosa bien distinta es que en el proceso de generación del pulso, existan otros fenómenos físicos que sean visibles, como por ejemplo cuando se produce un pulso a partir de un rayo. En este caso tenemos que el proceso de descarga eléctrica es un fenómeno visible, pero el propio pulso electromagnético generado no lo es. No hay que confundir la fuente que genera el pulso (puede ser visible) con el pulso en sí mismo.

Como ya se ha dicho el límite superior depende de la fuente en cuestión. De este modo, si consideramos el pulso generado en una explosión nuclear, apartado (4), veremos que el rango máximo alcanzado se encuentra en el orden de giga-herzios, es decir, en el rango de microondas (SHF) ya mencionado. Lo mismo ocurre con otras fuentes no nucleares como el 'Vircator' que veremos en apartados posteriores. Sin embargo, cuando nos referimos al pulso generado en un rayo, el rango máximo que alcanza el EMP se encuentra en el orden del mega-herzio.

Estas frecuencias máximas alcanzadas están estrechamente relacionadas con el tiempo mínimo en el que se genera o produce el pulso EM y evidentemente con la duración del mismo. De este modo, cuando veamos los pulsos producidos en una explosión nuclear veremos que el tiempo en el que se produce el pulso desde que se origina la explosión es del orden de nano-segundos (ns) que equivale a frecuencias de giga-herzios (GHz). De manera similar, en un rayo hablamos de tiempos de micro-segundos (μs) y frecuencias de mega-herzios (MHz).

Puede establecerse una relación (*tiempo - frecuencia*) a través de la transformada de Fourier³. En el siguiente apartado veremos la forma del pulso y las ecuaciones de las funciones de onda que se les puede atribuir en el dominio temporal. Elegimos este dominio por sencillez, pero ha de entenderse que pasar de un dominio a otro puede realizarse de manera sencilla vía la transformada de Fourier.

²Vector cuyo módulo representa la intensidad instantánea de energía electromagnética que fluye a través de una unidad de área perpendicular a la dirección de propagación de la onda electromagnética, y cuyo sentido es el de propagación.

³Transformación matemática muy conocida que nos permite pasar de un dominio a otro mediante un cálculo integral.

2.3. Función de onda

Cuando hablamos de un pulso EM, la forma del pulso es una característica muy importante a tener en cuenta. En el dominio temporal, esta forma nos da una idea de como cambia la amplitud del pulso en cada instante de tiempo, siendo la amplitud una magnitud que da cuenta de la intensidad de los campos electromagnéticos o la intensidad de las corrientes inducidas.

La forma real de un pulso electromagnético puede ser muy complicada, por ello se establecen modelos simplificados que dan cuenta de las características más generales. De manera muy simplificada, un EMP puede representarse como una función cuadrada donde el valor distinto de cero da una idea de la amplitud máxima que se genera en el pulso, y el intervalo de tiempo da cuenta del rango de frecuencias en el que tiene cabida.

La forma más habitual y la más utilizada para simulaciones consiste en una función doble exponencial que da cuenta del intervalo temporal en el que se alcanza el valor máximo de la amplitud y el intervalo de tiempo en el que la amplitud decae a cero. En la figura 2 puede verse estos dos modelos simplificados.

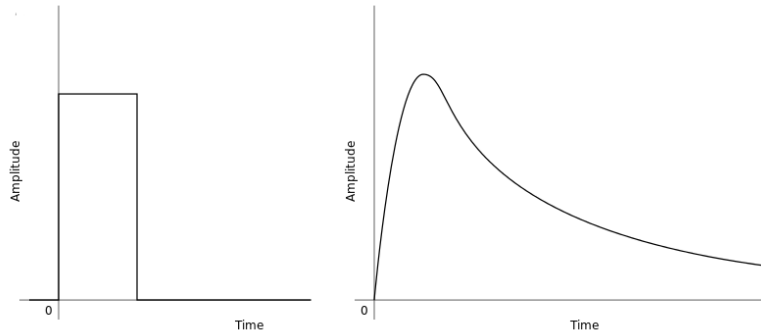


Figura 2: Modelos simplificados de la forma de un EMP.

Esta última función se construye a partir de la diferencia entre dos exponenciales (DEXP) con distintas constantes temporales. La función de onda del campo eléctrico asociado a esta forma del pulso puede construirse de la siguiente manera [1]:

$$E(t) = E_0 \cdot f(t)$$

Siendo E_0 el valor máximo del campo eléctrico y $f(t)$ una función temporal del tipo:

$$f(t) = \left[-e^{-\alpha t} + e^{-\beta t} \right] \cdot u(t)$$

Donde ($\alpha \geq \beta \geq 0$), siendo α la constante de tiempo de subida y β la de caída. Por otro lado, $u(t)$ es la función escalón de Heaviside (Unit Step):

$$u(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < 0 \\ 1 & \text{si } t > 0 \end{cases}$$

Esta función de onda es útil por su sencillez y nos indica claramente como el pulso comienza para $t = 0$, va aumentando su amplitud de manera pronunciada a razón de α y decae de manera más suave a razón de β . El único inconveniente que al principio podemos apreciar es que presenta una discontinuidad en la pendiente para $t = 0$.

En la figura 3 podemos apreciar distintas curvas que representan las funciones de ondas relativas a pulsos electromagnéticos producidos en una explosión nuclear de alta altitud

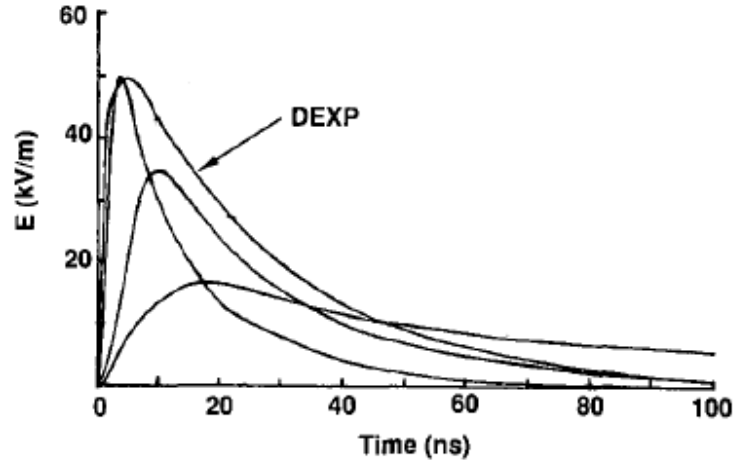


Figura 3: Diferentes curvas DEXP para un EMP.

[2]. Los valores típicos representados para la curva señalada con ‘DEXP’ son:

$$\begin{cases} E_0 = 50 \text{ KV/m} \\ \alpha = 6 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1} \\ \beta = 4 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1} \end{cases}$$

Del mismo modo que se ha definido $E(t)$ puede definirse $H(t)$ como $H(t) = H_0 \cdot f(t)$ siendo $f(t)$ la misma función utilizada con anterioridad. Por otro lado, al igual que hemos dado un valor típico para E_0 , puede darse un valor para la intensidad del campo magnético $H_0 = 140 \text{ A/m}$ [3].

Aunque estas funciones son las más utilizadas para el estudio de los pulsos EM, existen otras funciones que pueden utilizarse teniendo unas características más correctas para el estudio. Por ejemplo, puede utilizarse una función del tipo:

$$E(t) = E_0 \cdot \left\{ e^{-\alpha(t-t_0)} + e^{\beta(t-t_0)} \right\}^{-1}$$

Conocida como ‘QEXP’ por ser el cociente de dos funciones exponenciales. Tiene la ventaja de presentar continuidad en sus sucesivas derivadas, pero es no nula para tiempos negativos. Además, en el dominio de la frecuencia se adapta mejor a las curvas experimentales para frecuencias superiores a los 200 MHz [2].

3. Desarrollo Histórico

La historia del EMP comienza con el primer evento nuclear el 16 de julio de 1945. Ya en 1944, ante la posibilidad de efectuar pruebas nucleares, Enrico Fermi⁴ hizo sus primeras predicciones respecto a la posible generación de señales EM producidas durante la explosión nuclear. En el primer evento nuclear, ‘Trinity’, se tuvieron en cuenta dichas predicciones de modo que se tomaron unas primeras medidas ante las posibles consecuencias de la detonación, *“All signal lines were completely shielded, in many cases doubly shielded. In spite of this many records were lost because of spurious pickup at the time of the explosion that paralyzed the recording equipment.”* [4]. Hay que tener en cuenta que cuando nos referimos a la historia del EMP, nos referimos a la historia por parte del ser humano. Los pulsos EM pueden producirse también en la naturaleza, por ello, la historia del pulso EM podría remontarse a tiempos inmemorables, tan lejanos como los orígenes de la tierra.

Cuando se produce una explosión nuclear se genera un EMP⁵, luego la historia de los pulsos EM está implícitamente relacionada con los eventos nucleares. Las dos potencias nucleares por excelencia han sido USA y la URSS. En el primer caso, se han desarrollado unas 1054 pruebas nucleares entre 1945 y 1992, siendo los principales lugares de detonación Nevada y las islas Marshall. En el segundo caso, se reconocen de manera oficial unas 715 pruebas nucleares, desarrolladas entre 1949 y 1990.

Para ver los principales eventos desarrollados en la historia, mostraremos una tabla ordenada cronológicamente con los principales hitos [2, pág. 790]. Dicha tabla recoge las principales publicaciones y desarrollos teóricos en relación con el EMP, así como acontecimientos experimentales como puede ser la detonación de bombas nucleares.

En la tabla 1 se recogen los principales eventos tanto experimentales como teóricos hasta 1975 [5]. Respecto a eventos nucleares, aparte de la importancia de la primera detonación nuclear en 1945, cabe destacar la serie de experimentos realizados en 1962, conocidos conjuntamente como proyecto ‘Fishbowl’. Este conjunto de operaciones consistió en 5 pruebas nucleares de alta altitud, donde cabe destacar la prueba ‘Starfish’ que generó un EMP mucho más potente del esperado. En dicho evento se bloquearon las comunicaciones de radio durante al menos 30 minutos, y en Hawái, en un archipiélago situado a 1445 km del centro de la detonación, se produjeron apagones en las farolas de las calles y se dañó una línea telefónica.



Figura 4: Vistas de la explosión Starfish desde Honolulu.

⁴Enrico Fermi estimó la potencia de la primera explosión nuclear a partir del desplazamiento de unas hojas de papel provocado por el aire proveniente de la explosión.

⁵Un EMP producido en un evento nuclear se conoce en la literatura como NEMP, por sus siglas en inglés. Si la explosión tiene lugar a elevadas altitudes, entonces se le conoce como HEMP.

Tabla 1: Lista de acontecimientos históricos.

1945	Prueba Trinity
1951 1952	Primeras observaciones deliberadas del EMP, realizadas por Cower, Reines y Shuster. Reines sugiere la corriente Compton como fuente de EMP.
1952 1953	Primeras pruebas atómicas por parte de Gran Bretaña. Fallos instrumentales atribuidos a ‘Radioflash’, término usado antiguamente para referirse al EMP.
1954	Garwin de los laboratorios de los Álamos (LASL) propuso la generación de la corriente Compton por la rápida extensión de los rayos gamma como fuente.
1957	Primeras estimaciones de señales de HEMP usando modelo dipolar eléctrico.
1958	Reuniones entre US y Gran Bretaña, para discutir sobre asuntos de vulnerabilidad y protección ante un pulso EM.
1958	Publicaciones abiertas sobre HEMP por parte de la URSS, autor Kampaneets.
1959	Primer interés en el acoplamiento-EMP a cables del misil Minuteman.
1962	Operaciones FISHBOWL, primeras medidas e indicaciones del orden de magnitud de las señales de un HEMP.
1962	Prueba SMALL BOY, generación de un EMP a nivel de superficie.
1962	Karzas y Latter publican dos artículos abiertos sobre la detección de señales EM producidas en un pulso durante los eventos nucleares.
1963 1964	Primeras pruebas de pulsos EM llevados a cabo por el laboratorio de armas de las fuerzas aéreas (AFWL, laboratorios PHILIPS en la actualidad).
1963 1964	Longmire da una serie de conferencias en AFWL; presenta una teoría desarrollada sobre la explosión a nivel superficial del EMP y muestra que los picos de señales del HEMP se explican por una señal dipolar magnética.
1965	Karzas y Latter publican un artículo dando una aproximación de alta frecuencia para la señal dipolar magnética.
1967	Construcción del ALECS, primer simulador de guías de ondas, para la simulación de EMP en misiles.
1967	AJAX, prueba nuclear bajo tierra.
1974	MING BLADE, prueba de un EMP bajo tierra para confirmar modelos de la superficie de explosión en un EMP.
1975	DINING CAR, prueba de un EMP bajo tierra.
1975	MIGHTY EPIC, otra prueba de un EMP bajo tierra.

La importancia de este evento es que, por primera vez, se da a conocer al mundo las consecuencias a nivel global de un ataque EMP. Dicha explosión tuvo una potencia de $1,4Mt$ ⁶.

Como ya se ha mencionado, los eventos recogidos datan hasta 1975, ya que a partir de la década de los 70 la tecnología e investigaciones ya vigentes, sirvieron para que otras áreas aparecieran y empezaran a formarse. De tal modo que se fueron creando nuevas áreas más extensas basadas en los mismos principios, como puede ser el área HPM (High Power Microwaves), o el conjunto más extenso HPE (High Power Electromagnetics). Dicho conocimiento se extendió a estudios para conocer por ejemplo la física en torno a las regiones de origen de un rayo, ya que los procesos de ionización en estas regiones son parecidos al que se genera en un pulso EM. Del mismo modo, se aplicó para el uso de sensores electromagnéticos, simuladores y para el estudio de antenas en radares de pulsos. A partir de estos años, el número de publicaciones relativas a estos asuntos creció de manera considerable y empezaron a darse conferencias tratando estos asuntos. Organizaciones internacionales como URSI se sumaron a este movimiento [2].

⁶El megatón (Mt) es una unidad de masa, corresponde a 1 millón de toneladas. Es decir, $1Mt = 1Tg$ (Tera-gramo). Sin embargo, se utiliza para referirse a la potencia en una explosión. Se compara con su equivalente en toneladas de TNT. Tenemos que $1Mt$ equivale a $4,184,10^{15}J$

Tras la II guerra mundial y con el inicio de la guerra fría, no solo USA y la URSS estuvieron interesadas en cómo defenderse ante la posibilidad de un inminente ataque de HEMP. Varios países europeos empezaron a mostrar interés por estos aspectos, tras el evento Starfish en 1962 donde se mostró el rango de extensión que puede generar una explosión de este tipo.

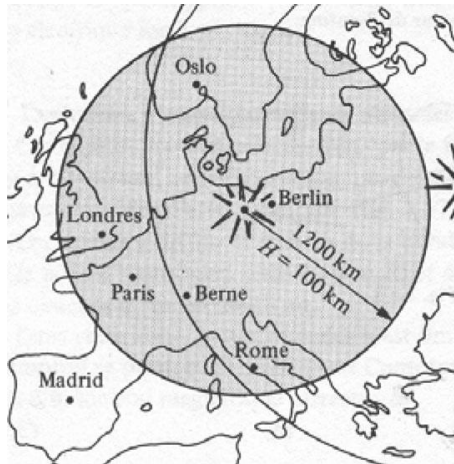


Figura 5: Extensión de un HEMP sobre territorio europeo.

Desde Europa se entendió que, como consecuencia de un ataque de dicho tipo, podía verse afectada gran parte del continente, dejando inoperativo servicios militares y suministros importantes. Por ello, fueron varios los países europeos que en el intervalo de tiempo entre 1970 y 1990 desarrollaron varios estudios, cálculos y simulaciones relativas a los pulsos EM [6]. No solo países pertenecientes a la OTAN, países neutrales como Suiza y Suecia realizaron diversos experimentos y publicaciones.

Debido a esta preocupación presente, en Suiza en la década de los 80, la estación de suministro de agua de Zúrich, se protegió frente a un hipotético ataque. En este mismo país se realizaron simulaciones de EMP, como por ejemplo la del proyecto VEPES en 1989 o el simulador VERIFY en 1999 [7]. En Suecia se desarrollaron también varios simuladores de EMP, el primero de ellos en 1970 para realizar estudios de acoplamientos de la radiación a los dispositivos y para la determinación de voltajes inducidos en cables. Posteriormente, se realizaron proyectos con simuladores como el SPERANS en 1984 y el SAPIENS 2 en 1990. En estos países y en otros como Italia, Francia, Alemania, Reino Unido⁷, Ucrania y Noruega se produjo un desarrollo importante tanto teórico como práctico, existiendo distintos ejemplos de simuladores para ver las consecuencias y las posibles soluciones. En Noruega, por ejemplo, en la década de los 70, se simuló un pulso EM a una profundidad de 30 metros bajo tierra, para medir la atenuación de los campos generados, midiéndose una atenuación que alcanzó los 40 dB.

Acabada la guerra fría en 1991, los estudios y simulaciones empezaron a cesar. Sin embargo, algunos países como Francia y Alemania continuaron realizando algunos estudios [6].

⁷En la tabla 1 puede observarse el término ‘Radioflash’, es el término utilizado inicialmente por los británicos para referirse al EMP. El nombre proviene del “click” que oían en los receptores de radio cuando se detonaba una explosión nuclear.

4. NEMP, Nuclear EMP

Cuando se produce una explosión nuclear se generan pulsos de rayos gamma, la interacción de estos con la materia presente en la atmósfera terrestre es la responsable de la generación de pulsos EM. El pulso EM generado por una explosión de este tipo se conoce como NEMP. Cuando la altitud de la detonación es muy elevada, superior a la atmósfera terrestre, denominaremos al pulso generado como HEMP. A continuación, revisaré los principios básicos en la generación de un pulso de este tipo para luego entrar en detalle en cada aspecto.

Los rayos gamma son fotones energéticos que en su recorrido a través del aire generan una corriente de electrones debido a la dispersión Compton⁸, dichos electrones ionizan las moléculas del aire, convirtiendo a éste en un conductor. Esta corriente de electrones, junto a otros factores, es la responsable de la generación de pulsos EM. Al ionizarse el aire, el valor de la conductividad del mismo es un factor crucial a la hora de determinar y limitar la magnitud de los campos, la amplitud del pulso y la función de onda del mismo. Cuando los rayos gamma salen hacia el exterior en la explosión, lo hacen a la velocidad de la luz. Del mismo modo, el pulso generado por la corriente Compton viajará a esta misma velocidad. Esta característica es importante ya que, señales EM generadas a distintas distancias de la fuente, y por tanto a diferentes tiempos, tienden a llegar simultáneamente a mayor distancia observada en el mismo rayo.

Por un lado, como característica general de un NEMP tenemos que la frecuencia del pulso se extiende hasta el rango de GHz , concentrado la mayor parte de su energía en el rango de $(10 - 100)MHz$ [5]. La frecuencia máxima alcanzada se corresponde con el tiempo mínimo de producción del pulso original de rayos gamma. En esencia, la explosión nuclear genera un pulso de rayos gamma en un tiempo del orden de nano-segundos (ns), que a su vez genera pulsos de corrientes Compton que a su vez son las que generan dicho pulso EM del mismo orden temporal.

Por otro lado, otro aspecto importante a tener en cuenta es la asimetría o simetría en la distribución de la corriente Compton, así como el propio medio que rodea a dicha corriente. Por ejemplo, si consideramos una distribución perfectamente simétrica en la componente radial de la corriente, solo se generarán campos eléctricos radiales, sin producirse ni componentes transversales, ni campo magnético, ni por supuesto radiación. Por el contrario, cuando existe asimetría se generan campos transversales y con ellos radiación EM.

Esta asimetría en las fuentes significa la existencia de componentes transversales en la corriente de electrones producido por los rayos gamma. Como principal factor en la generación de componentes transversales se encuentra el campo magnético terrestre, que hará que los electrones desvíen sus trayectorias rectilíneas, curvándose y produciendo radiación (señal dipolar magnética predicha por Longmire en 1963, tabla 1). Una explicación más completa se dará en el apartado (4.4).

En los siguientes apartados revisaremos, inicialmente, la física de la radiación gamma, la corriente producida por el efecto Compton y la conductividad del aire. Posteriormente, pasaremos a ver en más detalle la generación de los campos que producen el pulso EM, dejando el desarrollo matemático para los anexos.

⁸Proceso por el cual un fotón aumenta su longitud de onda perdiendo energía cuando colisiona con un electrón libre. El cambio en la longitud de onda depende únicamente del ángulo de dispersión, siendo $\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta)$

4.1. Radiación Gamma

La desintegración gamma es un proceso análogo al producido en una transición óptica, o al de la emisión de rayos X en átomos, pero a nivel nuclear. Ocurre cuando un núcleo excitado decae a un estado de menor energía, como por ejemplo el fundamental, emitiendo un fotón de energía igual a la diferencia de energía entre los dos estados nucleares [8]. La emisión de fotones es una forma de radiación EM, por eso a este proceso se le conoce también como radiación gamma. Este tipo de desintegración sigue normalmente a las desintegraciones Alpha y Beta que dejan núcleos en estados excitados. Una característica de estas desintegraciones es que tienen semividas muy cortas, del orden de nanosegundos.

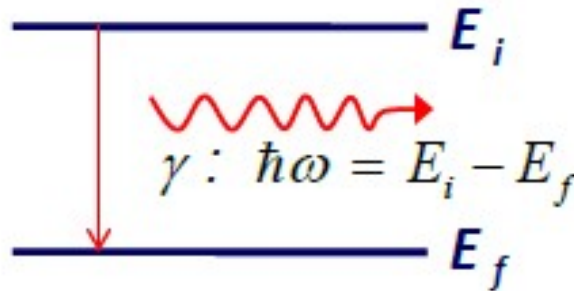


Figura 6: Proceso de radiación gamma.

Cuando se produce la explosión nuclear y se libera la radiación gamma, los fotones emitidos pueden tener distintos orígenes y tiempos de desintegración. Los primeros fotones en aparecer (y también en desaparecer) son conocidos como ‘Prompt gammas’, aparecen inmediatamente en un tiempo del orden de nanosegundos, dichos fotones se desintegran en decenas de ns y son los principales responsables del pulso y de la corriente Compton. Los otros fotones en la desintegración gamma provienen de la interacción de neutrones que dejan el dispositivo e interactúan con el aire y la tierra. Dicha emisión de nucleones suele darse en productos de fisión que tienen exceso de neutrones. Según la interacción de dichos neutrones con el medio podemos encontrar los siguientes tipos de gammas [9]:

- **Inelastic scatter gammas:** producidos cuando los neutrones colisionan con objetos sólidos, como la propia tierra. Se encuentran en el mismo orden temporal que los prompt gammas, pero evidentemente son posteriores a éstos.
- **Air inelastic gammas:** producidos por la interacción de neutrones energéticos con las moléculas presentes en el aire.
- **Ground and air capture gammas:** neutrones más lentos (menos energéticos) son atrapados por la tierra o aire. Debido a la baja densidad del aire respecto a la tierra, el proceso dura y se da en espacios temporales distintos.
- **Fission product gammas:** son los últimos que se dan, se producen por la fisión de restos procedentes de desintegraciones betas.

En la figura 7 podemos apreciar de manera comparativa los intervalos temporales de las diferentes fuentes para una explosión de 1 megatón.

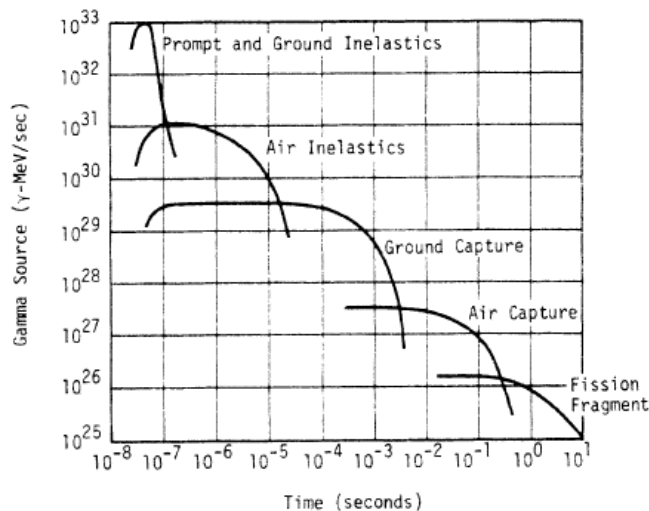


Figura 7: Distintas fuentes de rayos gamma y sus intervalos temporales.

Como ya se ha mencionado la principal contribución se debe a los prompt gammas, las demás contribuciones pueden no ser significativas según la altitud de la detonación del explosivo. No es lo mismo que la explosión se produzca a una altitud de nivel del mar que a una elevada altitud, en este último caso las contribuciones relativas al scattering inelástico o la captura terrestre son inapreciables y se ven retrasadas ya que los neutrones emplean un tiempo en alcanzar la superficie. Lo mismo ocurre con el aire presente en la atmósfera, a una muy elevada altitud los neutrones tardaran un tiempo en alcanzar dichas moléculas. La velocidad de los neutrones más rápidos es del orden de $50 \cdot 000 \text{ km/s}$ [10].

4.2. Corriente Compton

Cuando hablamos de corriente Compton nos referimos a la corriente generada por los rayos gamma que, en su recorrido por el aire, mediante el efecto o la dispersión Compton producen una corriente. Esta corriente está formada por electrones cuya distribución angular se agrupa en la dirección de avance del rayo gamma que la ha generado. Estos electrones en su recorrido por la atmósfera van colisionando con otros átomos produciendo la ionización del aire.

La energía media de estos electrones es aproximadamente la mitad de la energía del rayo gamma⁹, pero debido a las colisiones que van sufriendo finalmente acaban frenándose por completo, siendo la distancia que recorren de unos pocos de metros cuando nos encontramos a nivel del mar. Por otro lado, se van produciendo pequeñas dispersiones angulares que van desviando a esta corriente de la trayectoria ‘recta’ que seguían inicialmente, consiguiendo que finalmente el recorrido en la dirección incidente sea menor que la distancia mencionada con anterioridad, en particular $2/3$ dicha distancia [11].

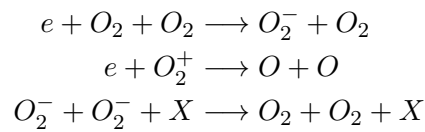
Inicialmente, la corriente Compton es radial, centrada en el foco de la explosión. Pero, como veremos en los siguientes apartados, puede aparecer una componente transversal de la corriente que será la responsable del pulso.

⁹El rango de energías de los rayos gamma producidos en una explosión nuclear es de $(0,1 - 10) \text{ MeV}$. Siendo los valores más habituales del orden de 1 MeV .

4.3. Conductividad del aire

Como se mencionaba en el apartado 4.2, los electrones en su recorrido por el aire pierden energía. Por cada par electrón-ion generado, un electrón pierde $85eV$, estos electrones secundarios tienen de media una energía de $10eV$. Sin embargo, algunos de ellos son más energéticos y pueden producir electrones terciarios, etc. Por ello, cuando el proceso de ionización ha finalizado, se forma un par electrón-ion por cada $34eV$ perdidos. Lo que se traduce en que, si nuestro electrón inicial tiene una energía de $1MeV$, se generará entonces aproximadamente 30.000 pares electrón-ion [10].

En el proceso de ionización del aire, los electrones e iones reaccionan de 3 posibles maneras con las moléculas presentes en el medio. Por un lado, los electrones libres pueden adherirse a las moléculas de oxígeno, generándose un anión. En segundo lugar, pueden darse procesos de recombinación disociativa. Finalmente, una tercera reacción puede ocurrir en la cual un anión y un catión se neutralizan en presencia de una tercera molécula. Los 3 procesos mencionados se esquematizan a continuación:



A partir de estas reacciones podemos conocer la densidad de electrones formados en estos procesos, lo que finalmente nos permitirá obtener la conductividad del aire. En el anexo III podemos encontrar la resolución de las ecuaciones diferenciales que tienen en cuenta estos procesos.

Finalmente, la conductividad del aire vendrá dado por:

$$\sigma = e\mu_e N_e$$

Donde μ_e es la movilidad electrónica y N_e la densidad de electrones.

4.4. Ecuaciones de Maxwell y Campos Radiantes

En este apartado vamos a ver los posibles campos que se obtienen según la altitud en la que se produzca la explosión y la simetría de las fuentes. Distinguiremos de esta manera 3 casos, el primero de ellos consiste en la situación en la que nos encontramos ante una simetría total de las fuentes, en el segundo tendremos una explosión producida a nivel superficial y en el último una explosión producida a una elevada altitud.

Para estas 3 situaciones intentaremos resolver las ecuaciones de Maxwell a partir de aproximaciones que iremos comentando.

$$\text{Ecuaciones de Maxwell} \left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{array} \right.$$

Dejando los desarrollos matemáticos en los anexos I y II. Sin embargo, expondremos los resultados principales obtenidos y sus interpretaciones.

4.4.1. Caso completamente Simétrico

Este es el caso más sencillo de todos y la situación que inicialmente tenemos en la generación de la explosión, por ello es el primero que comentaremos.

En esta situación, independientemente de la altura, suponemos que la corriente Compton producida por los rayos gamma solo tiene componente radial (no consideramos campo geomagnético ni asimetrías en la fuente). Además, tanto la conductividad como la densidad de corriente tienen simetría esférica. Como solo tenemos componente radial, el campo eléctrico será puramente radial y no tendremos componentes transversales ni de campo eléctrico ni magnético, es decir, estamos ante un sistema no radiante.

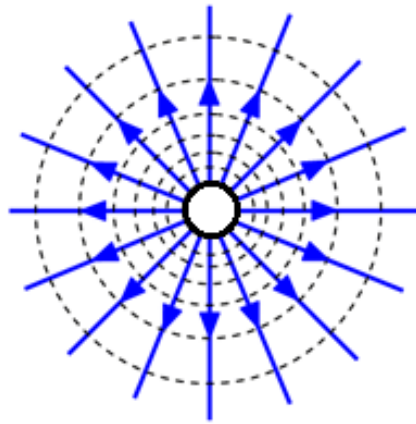


Figura 8: Distribución radial y simétrica en la fuente.

A partir de las ecuaciones de Maxwell, en particular del rotacional del campo eléctrico, puede deducirse sencillamente que:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \Rightarrow \vec{B} = cte. \forall t$$

Ya que el rotacional de un campo puramente radial es cero.

La única ecuación no nula es la ley de Ohm generalizada. Aquella que nos indica que la densidad de corriente total se debe a una corriente de arrastre o de conducción (relación constitutiva) y a la corriente de desplazamiento. Siendo \vec{J} la densidad de corriente asociada a la corriente Compton:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1)$$

Para resolver esta ecuación haremos dos aproximaciones según el dominio temporal que consideremos. Para tiempos suficientemente pequeños el campo eléctrico y la conductividad son tan pequeños que se puede despreciar la corriente de conducción respecto a la de desplazamiento. Esto se debe a que tanto σ como \vec{J} comienzan con valores relativamente pequeños, que irán aumentando con el tiempo.

Luego para este régimen tendremos que (1) se reduce a:

$$J_r \approx \varepsilon_0 \frac{\partial E_r}{\partial t} \leftrightarrow E_r \approx \frac{1}{\varepsilon_0} \int_{t_0}^t J_r dt'$$

De este modo, si la densidad de corriente crece con el tiempo de modo exponencial, entonces el campo radial eléctrico también lo hará, hasta alcanzar un valor máximo que veremos en la siguiente aproximación.

Por otro lado, para tiempos suficientemente grandes tendremos que la corriente de conducción irá aumentando hasta superar finalmente a la de desplazamiento, pudiendo esta última despreciarse. En esta situación:

$$\sigma \vec{E} \gg \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Luego:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \approx 0 \Leftrightarrow \vec{E} \neq \vec{E}(t)$$

Es decir, en esa situación el campo eléctrico es prácticamente independiente del tiempo, alcanzando un valor de saturación. Entonces la ecuación (1) se reducirá a:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$$

Luego, el campo eléctrico (radial) es:

$$E_r = \frac{J_r}{\sigma} = E_s \neq f(t)$$

Se dice que \vec{E} alcanza un valor de saturación, E_s . Este valor es constante y se alcanza para un tiempo suficientemente grande.

En [12] se dan valores del campo de saturación para distintas altitudes. Para una altura a nivel de mar, se tiene que $E_s \approx 6 \cdot 10^4 V/m$. Mientras que para mayores altitudes, $E_s \approx 4 \cdot 10^4 V/m$.

4.4.2. Explosión en la superficie

Cuando la explosión o generación de rayos gamma tiene lugar en el aire justo encima de la superficie terrestre o marítima, se genera una componente radial de la corriente Compton que como en el apartado anterior será la responsable de un campo eléctrico también radial. Sin embargo, debido a que las conductividades del agua y de la tierra son muy elevadas comparadas con las del aire donde se generó la explosión¹⁰, se tiene que se cortocircuita (anula) la componente radial del campo eléctrico cercano a la superficie y

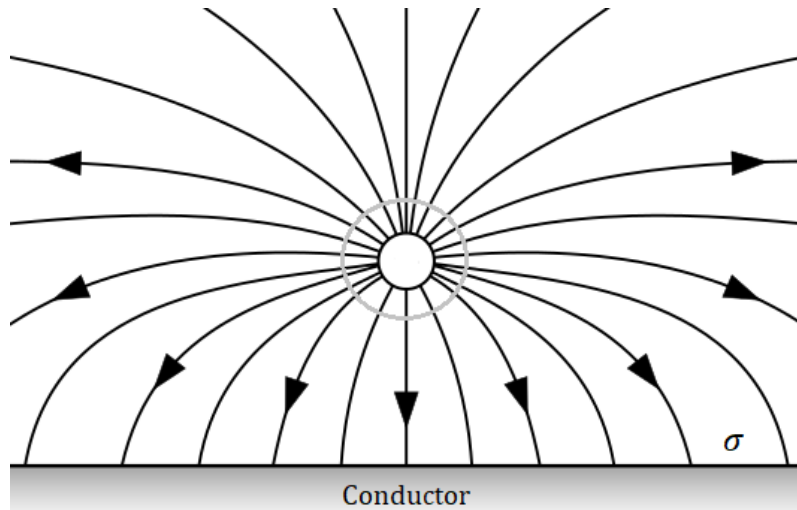


Figura 9: Líneas de campo en presencia de un conductor.

como resultado aparecen componentes transversales de campo eléctrico y magnético, que serán las responsables de la radiación y en definitiva del pulso.

Un cortocircuito ocurre cuando existe una diferencia de potencial entre dos nodos de un circuito y como consecuencia se genera una corriente no intencionada. En nuestro caso, debido a las diferencias entre las conductividades, se genera una corriente distinta a la componente radial de la corriente Compton, dicha corriente que se genera en la superficie tiene componente transversal y se la conoce como ‘corriente de retorno’.

En la figura 9 podemos apreciar como en un radio cercano al centro de la explosión tenemos una distribución simétrica y radial de la corriente, que es la responsable del campo eléctrico radial del apartado anterior que podía observarse en la figura 8. Sin embargo, debido a las diferencias de conductividades entre el suelo y el aire, la superficie terrestre actúa como un medio conductor curvando las líneas de campo cerca de la superficie¹¹. En esta línea de razonamiento, una forma sencilla de entender la existencia de estas componentes transversales es aplicar las condiciones de contorno a las superficies terrestres (o marítimas) que actúan como medio conductor. De esta forma se obtiene que las componentes tangenciales (o longitudinales) son idénticamente nulas a lo largo de la superficie del conductor y las únicas componentes no nulas son las transversales.

Al igual que en el apartado anterior, para la resolución de las ecuaciones y la obtención de los campos nos valdremos de aproximaciones. Del mismo modo, vamos a distinguir entre 3 fases distintas según el dominio temporal para poder hacer aproximaciones.

1. Fase ondulatoria

La primera fase de todas es aquella en la cual la corriente de conducción es lo suficientemente pequeña como para poder despreciarse frente a la de desplazamiento. Dicha corriente de conducción irá creciendo según avance el tiempo y se irá cargando hasta que el campo eléctrico radial alcance un valor máximo de saturación.

Utilizando coordenadas esféricas, las ecuaciones diferenciales que dan cuenta de los campos en esta fase son:

¹⁰La conductividad de la tierra es del orden de 10^{-2} mho/m y la del agua de 4 mho/m . Muy superiores comparadas con el aire, lo que nos permite interpretar a estas superficies como conductores.

¹¹Las líneas de campo de la figura 9 se asemejan a las de un dipolo eléctrico. Si el suelo actuase como un conductor perfecto, el campo eléctrico sería totalmente perpendicular en la superficie

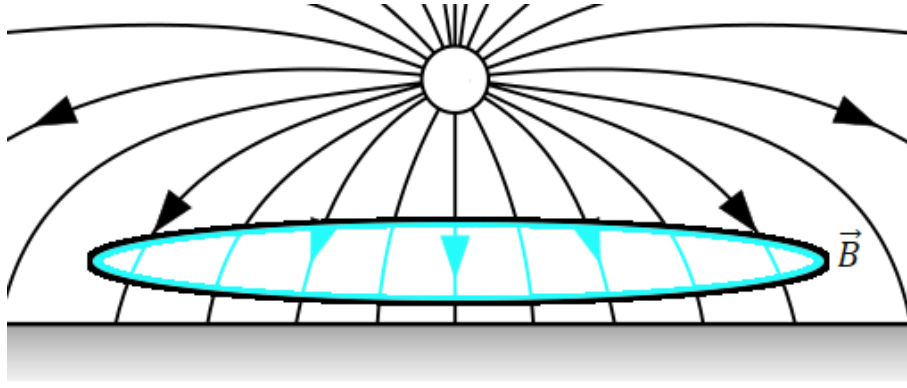


Figura 10: Campo magnético generado por la componente transversal de la corriente.

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial r} = -\frac{1}{\alpha} \frac{\partial J_r}{\partial \theta} + \frac{1}{2\alpha r^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \\ \frac{\partial E_r}{\partial t} = -J_r + \frac{1}{\sigma r^2} \frac{\partial^2 E_r}{\partial \theta^2} \end{cases}$$

Siendo $F = r \cdot (E_\theta + B_\phi)$. En el anexo II explicamos cómo se llegan a estas ecuaciones y los significados de los parámetros utilizados.

La interpretación a estas ecuaciones es sencilla [13]. La primera de ellas nos indica que el campo F es originado en la superficie y se propaga hacia arriba dispersándose según sale hacia el exterior. La segunda nos indica que E_r es atenuado y limitado por la conductividad σ . Ambas ecuaciones son de tipo difusión aun estando todavía en la fase ondulatoria. Durante esta fase la componente polar del campo eléctrico alcanza un máximo comparable al valor de saturación. Por otro lado, el campo magnético no alcanza todavía su valor máximo.

2. Fase de difusión

En esta fase se genera en la superficie (terrestre o marítima) una corriente transversal conocida como corriente de retorno debido a las diferencias de conductividades entre el aire ionizado y las superficies correspondientes. Dicha corriente producirá cerca de la superficie un campo magnético que se difunde en el aire (fase de difusión) y que penetra en la tierra (skin effect). A su vez, generará una componente transversal de campo eléctrico, que junto al campo magnético produce el EMP.

La ecuación que da cuenta del campo magnético es:

$$\left[\frac{\partial B_\phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{J_r}{\sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\partial B_\phi}{\partial z} \right) \right]$$

Usando coordenadas esféricas tenemos que la densidad de corriente transversal tiene componente polar, J_θ , y que por tanto genera (Ley de Ampère) un campo magnético de componente azimutal, B_ϕ . En la figura 10 puede apreciarse de manera esquemática el campo de inducción magnético generado por esta distribución de la corriente.

En el anexo II puede verse de manera más detallada la generación de estos campos a partir de esta corriente.

3. Fase Quasi-estática

Finalmente, en la última fase se produce un equilibrio cuasi-estático entre las dos componentes de corriente existentes. Dicho equilibrio se produce una vez se ha finalizado la difusión completa del campo magnético en el aire.

4.4.3. HEMP, explosión de alta altitud

Cuando nos referimos a un HEMP, nos referimos a un pulso EM generado por una explosión a altitudes superiores a los 100 km . Para estas altitudes, la fuente principal de rayos gamma que generan la corriente Compton es la correspondiente a los ‘prompt gamma’, siendo la más intensa de todas y la que lleva todo el peso. Del frente esférico que avanza a velocidad de la luz en todas las direcciones, nos fijaremos en la dirección vertical hacia abajo. Este pulso de rayos gamma en esta dirección comienza a interactuar con la atmósfera a altitudes de (40–50) Km . Cuando recorren una distancia aproximada de unos 10 Km en esta región, la corriente Compton alcanza su valor máximo, aproximadamente, a unos 30 km de altitud [14].

A estas altitudes, el campo geomagnético tiene una importancia significativa, siendo el principal responsable de la generación de la componente transversal en la corriente, obligando a los electrones a llevar trayectorias espirales. Cuando una partícula cargada describe un movimiento rectilíneo en presencia de un campo magnético uniforme, la trayectoria de la misma se ve modificada, produciéndose una desviación que obliga a la partícula a describir una trayectoria circular. Esto se debe a la fuerza de Lorentz:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

De este modo, a partir de la fuerza centrípeta puede obtenerse sencillamente que el radio de la nueva trayectoria que sigue la partícula es:

$$r_g = \frac{m \cdot v_t}{|q| \cdot B}$$

Siendo r_g el radio de giro o radio de Larmor y v_t la velocidad perpendicular o transversal al campo magnético. En la figura 11 observamos la fuerza existente en el caso de un electrón.

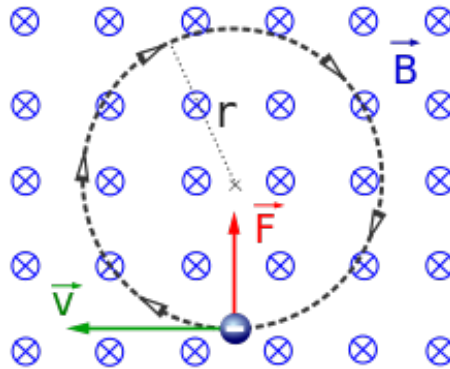


Figura 11: Radio de Larmor.

Para el caso que aquí nos concierne, este cambio en la trayectoria de las partículas cargadas significa que si inicialmente tenemos una distribución radial en la corriente, debido a la presencia del campo magnético terrestre tendremos componentes transversales en la corriente, que serán las responsables de la radiación electromagnética generada en el pulso.

Para las altitudes que estamos tratando, el radio de Larmor es comparable al recorrido libre medio de los rayos gamma, lo que quiere decir que los electrones que forman parte de la corriente Compton desvían sus trayectorias. Sin embargo, en el caso de altitudes inferiores como es el caso del apartado anterior, cabe destacar que el origen de la componente transversal no es el mismo como ya se vio. En ese caso el efecto del campo geomagnético es inapreciable ya que el radio de Larmor a nivel de mar es $r_g \sim (50 - 100)m$ que es considerablemente mayor que el recorrido libre medio de los rayos gamma en el aire [10].

Cuando una partícula cargada es acelerada, se produce radiación. En el caso de una partícula cargada como el electrón, cuya aceleración se debe al cambio en la trayectoria

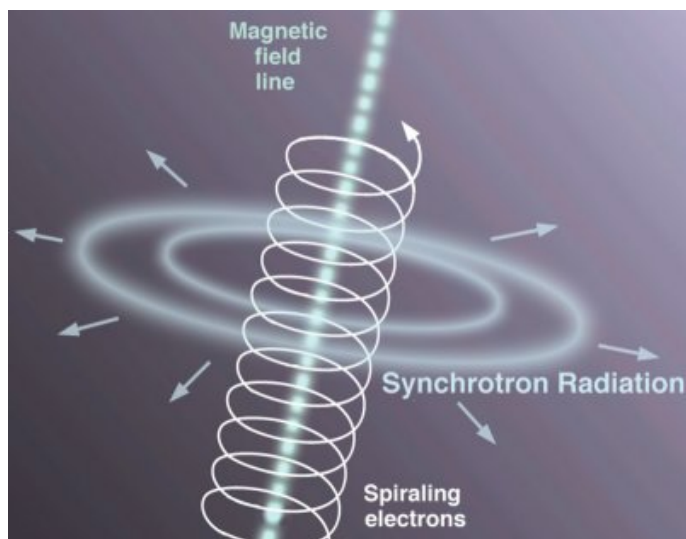


Figura 12: Radiación de sincrotrón.

producido por la presencia de un campo magnético, a la radiación generada se le conoce como radiación de ciclotrón. Cuando los electrones que producen esta radiación son muy energéticos¹² entonces se conoce como radiación de sincrotrón. En la figura 12 puede verse el mecanismo básico de este proceso donde puede apreciarse la trayectoria en forma de espiral y la radiación emitida.

Tras entender el proceso básico de radiación debido a la presencia del campo geomagnético, veamos con más detalle las componentes de la corriente que generan los campos radiantes. Igual que en el apartado anterior tendremos dos componentes en la densidad de corriente, una radial que producirá un campo eléctrico radial al igual que en (4.4.1) y (4.4.2). Por otro lado, una componente transversal que producirá un campo eléctrico transversal. Dicho campo produce un pulso largo y de pequeña amplitud.

En la figura 13 podemos apreciar las líneas de campo eléctrico para esta situación¹³. Dicha figura se obtiene para un corte transversal en un plano donde el foco de la explosión está en medio, y a su vez es perpendicular al campo geomagnético. Para otras direcciones, las distribuciones tanto del campo como la de la corriente describirían ‘hélices’ como las que se aprecian en la figura 12.

Esta componente transversal también produce un campo del tipo dipolar magnético. Que, en este caso, se caracteriza por ser un pulso de menor duración, pero de mayor amplitud. Este dipolo magnético fue descubierto por primera vez en los experimentos llevados a cabo en 1962 [15].

Por simplificar la resolución del problema, supondremos superficies planas tanto en la tierra como en la atmósfera. Por ello, usaremos coordenadas cartesianas, siendo ‘z’ la componente vertical, positiva en el sentido hacia abajo, de atmósfera a tierra. Elegiremos los ejes de tal modo que el campo geomagnético tenga dirección en el eje ‘Y’. De este modo, y siendo coherentes con los ejes elegidos, tendremos que la componente radial de la corriente será J_z y la transversal J_x . Por lo tanto, tendremos campos del tipo (E_x, E_z, B_y) .

A partir de las ecuaciones de Maxwell podemos llegar a la ecuación diferencial que da cuenta del campo eléctrico transversal. Véase el anexo III para más información.

$$\left[2 \frac{\partial E_x}{\partial z} + Z_0 \sigma E_x = -Z_0 J_x \right] \quad (2)$$

¹²Con energéticos nos referimos a electrones con velocidades relativistas, del orden de $0,9 c$.

¹³Las líneas de campo de esta figura describen una situación ideal, en la que hay una completa simetría y el campo magnético es uniforme. En una situación real dicho campo no podría considerarse como uniforme ya que existe una dependencia con la altura.

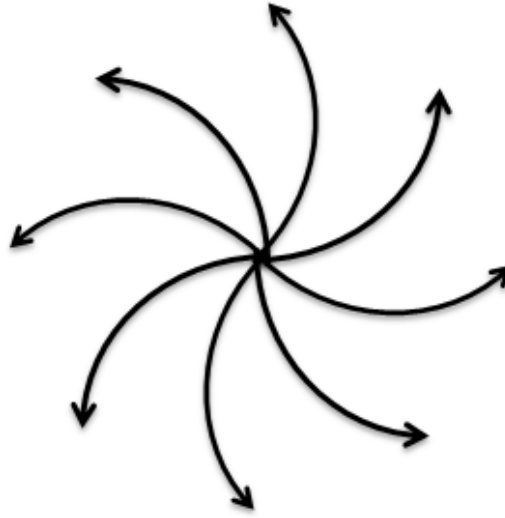


Figura 13: Distribución de las líneas de campo eléctrico en forma de espiral.

Siendo Z_0 la impedancia del vacío¹⁴. Dicha ecuación desarrollada por Conrad Longmire en 1964 es la ecuación básica dentro de la teoría del HEMP, y se conoce como “outgoing wave approximation” [16].

La solución a dicha ecuación tiene el mismo significado que el obtenido en el desarrollo de F. Para un tiempo de retardo τ fijo, E_x aumenta a razón de para elevadas altitudes. Del mismo modo, E_x alcanzará un valor de saturación cuando el valor sea

$$E_{x_{sat}} = -\frac{J_x}{\sigma}$$

Para una altitud por debajo de los 30 km , el valor del campo eléctrico transversal prácticamente permanece constante y el EMP se propaga como una onda libre. Otra consecuencia directa que puede obtenerse de esta ecuación es que el tiempo en el que se produce el EMP es equivalente al tiempo que tarda la corriente Compton en alcanzar su valor máximo. Es decir, la duración del pulso EM no es más que la duración del pulso de la corriente Compton [17].

Finalmente, indicar que en la literatura esta ecuación puede encontrarse en distintas formas. Como, por ejemplo, a la que llegaron Karzas y Latter en 1965, que es esta misma ecuación expresada en coordenadas esféricas [18]:

$$\left[2\frac{\partial}{\partial r} + Z_0\sigma \right] \vec{E}_t = -Z_0\vec{J}_{ct}$$

¹⁴La impedancia del vacío se define como $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \Omega$

4.5. Conclusiones

Tras haber visto en detalle los distintos conceptos y apartados necesarios para entender la producción de un pulso EM generado en una explosión nuclear, veamos de manera resumida las conclusiones que podemos obtener.

Cuando se produce una explosión nuclear se libera radiación gamma en todas las direcciones de modo que la interacción de esta radiación con las partículas presentes en la atmósfera terrestre generan un pulso EM. Como ya se ha visto, la generación del pulso dependía de varios factores como puede ser la altura de la detonación, las simetrías en las fuentes y la aplicación del campo magnético terrestre sobre la corriente de electrones Compton. Hemos hecho de este modo distinción entre NEMP a nivel superficial y un EMP a elevada altitud, HEMP. Sin embargo, no hemos distinguido explícitamente las distintas componente del pulso y las características que podemos encontrar de manera general en un NEMP.

De este modo, consideremos el pulso EM generado en la explosión como un pulso complejo formado por distintas componentes. Del mismo modo que lo hace la Comisión internacional Electrotécnica (IEC), podemos distinguir entonces en un NEMP tres componentes distintas, nombradas usualmente como (E_1, E_2, E_3) .

La primera componente de todas, E_1 , es la más rápida y la que más repercusiones a nivel electrónico puede generar. Esta componente del pulso se debe a los rayos gamma que denotábamos como prompt gamma en el apartado (4.1), de ahí a ser la componente más rápida en generarse y también la de menor duración. Debido a que la radiación gamma sale hacia el exterior en la explosión a la velocidad de la luz, la radiación de sincrotrón generada por cada electrón se adhiere de forma coherente con la generada por los demás electrones. De este modo, la señal electromagnética radiada consiste en un pulso de gran amplitud y de poca duración. En una explosión típica se produce un número de electrones del orden de 10^{24} , cada uno contribuyendo a esta radiación y formando en conjunto el EMP.

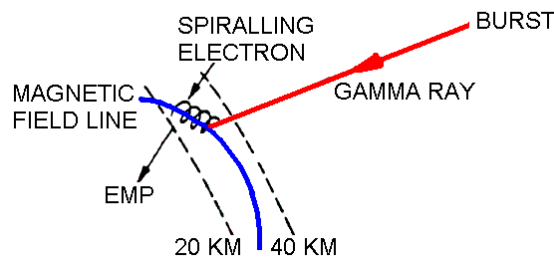


Figura 14: Mecanismo básico del HEMP.

Según la IEC esta componente tiene una duración de 1000 ns , la amplitud máxima se alcanza en 5 ns desde su origen y la amplitud decae a la mitad de su valor máximo en un tiempo del orden de 200 ns . De esta manera E_1 es considerada una componente de escasa duración pero de gran intensidad capaz de inducir voltajes muy elevados en medios conductores debido a las considerables magnitudes de los campos electromagnéticos que genera. Esta componente causa daños electrónicos debido a que produce voltajes superiores a la tensión de ruptura¹⁵, induciendo corrientes en los dispositivos capaces de provocar daños irreparables en sistemas como ordenadores o sistemas de comunicación.

En la figura 14 podemos apreciar el mecanismo básico de la generación de un pulso cuando la explosión es de alta altitud como se explicó en el apartado (4.4.3). Como vi-

¹⁵La tensión de ruptura es el voltaje mínimo necesario para que en un material aislante aparezcan partes con conductividad eléctrica.

mos entonces, cuando los rayos gamma llegan a alturas de unos $40km$ aproximadamente empiezan a interactuar con las partículas presentes en la atmósfera y gracias al campo magnético terrestre se produce finalmente el pulso de radiación electromagnética.

La segunda componente, E_2 , es la inmediatamente posterior a E_1 y tiene cabida desde $1\mu s$ hasta $1s$ después de haberse producido la explosión. Si recordamos en el apartado (4.1) veíamos los distintos tipos de rayos gamma que se generaban en la explosión. La componente E_2 del pulso EM se debe, principalmente, a los rayos gamma provenientes de los procesos de dispersiones inelásticas causadas por los neutrones (Inelastic Scatter gammas) . En la figura 7 podíamos comparar los intervalos temporales de los distintos tipos de radiación gamma existentes donde se observaba tanto la duración como el tiempo en el que aparecían posterior a la explosión. Debido a este rango de frecuencias, la protección contra esta componente del pulso podría considerarse más factible que para el caso de E_1 ya que como veremos en el apartado (6) es similar al rango en el que tiene cabida un rayo y podemos utilizar métodos de protección frente a rayos para esta parte del pulso, aunque podría ser de poca utilidad debido a la pre-existencia de E_1 .

Por último, la componente E_3 del pulso es la más tardía y produce un pulso muy lento con duraciones que van desde las decenas hasta las centenas de segundos. Se debe a la perturbación del campo magnético terrestre causado por la explosión nuclear durante unos instantes de tiempo y su posterior restauración a su valor original. E_3 produce corrientes geomagnéticas inducidas (GIC) en conductores eléctricos de modo que puede llegar a dañar o destruir componentes eléctricas como transformadores.

Esta componente tiene muchas similitudes con las corrientes generadas en una tormenta geomagnética causada por una eyección de masa coronal. En el apartado (5.1) explicaremos como es el pulso electromagnético generado por una eyección de masa coronal producida por el sol. Debido a esto, es habitual referirse a estas tormentas geomagnéticas producidas por el sol como ‘Solar EMP’, aunque estos pulsos EM no tienen componentes parecidas a E_1 y E_2 .

5. Non-nuclear EMP

Como ya hemos visto, en esencia un EMP se produce cuando se emite energía a modo de pulso de corta duración. De este modo existen varias formas de producir pulsos EM, ya sean por medios naturales o por la mano del hombre. Cuando nos referimos a la mano del hombre hemos visto el pulso producido en una explosión nuclear, siendo este pulso una de las consecuencias que se generan en la explosión. Sin embargo, existen otros medios creados por el hombre para generar las mismas consecuencias pero esta vez de manera intencionada.

A estos dispositivos capaces de generar estos efectos sin uso de tecnología nuclear se los conoce habitualmente como ‘non-nuclear EMP’.

Debido a que hemos tratado como fuente principal del EMP el producido en una explosión nuclear, vamos a ampliar el término NNEMP a toda fuente capaz de producir pulsos, ya sean por medios naturales o por la mano del hombre. Como fuentes naturales de pulsos veremos el producido por una explosión solar y el generado en un rayo, dejando este último para el apartado (6) donde se verá de manera más detallada.

5.1. Solar EMP

El sol es una distribución casi esférica de plasma que contribuye de manera importante como fuente de radiación electromagnética en nuestro sistema planetario. Ocasionalmente se produce en la capa más externa del sol, conocida como corona solar, erupciones de plasma que viajan como ondas de energía a través del espacio formando parte del viento solar. Cuando este viento solar alcanza la atmósfera terrestre se producen en ocasiones tormentas geomagnéticas capaces de producir los efectos típicos de un EMP.

Una tormenta geomagnética es una perturbación temporal de la magnetósfera¹⁶ terrestre causada por la onda de choque del viento solar que interactúa con el campo geomagnético. En determinadas ocasiones este viento solar está constituido por eyecciones de masa coronal (CME), que son ondas de intensa radiación EM emitidas por el sol en su período de actividad máxima. Esta emisión provocada por el sol de manera puntual que interacciona con el campo magnético terrestre es conocida habitualmente como ‘Solar EMP’.



Figura 15: Eyección de masa coronal (CME).

El campo magnético producido por el viento solar y el campo magnético terrestre interactúan de tal forma que la orientación relativa entre ambos es de vital importancia. Si la orientación entre ambos es tal que el campo magnético del viento solar incide sobre el nor-

¹⁶Región alrededor de un planeta en la que el campo magnético de éste desvía la mayor parte del viento solar formando un escudo protector contra las partículas cargadas de alta energía procedentes del Sol.

te magnético terrestre, entonces las partículas procedentes de este viento solar rebotarán sin causar daños sobre la magnetosfera terrestre. Si por el contrario la orientación es tal que incide sobre el sur magnético terrestre, entonces se inducen corrientes en la atmósfera terrestre produciéndose lo que habitualmente se conoce como tormenta solar [19].

Los efectos de estos procesos se sienten en la tierra aproximadamente 52 horas después de su generación, y las tormentas geomagnéticas pueden durar de uno a dos días [20]. Este EMP producido por el sol afecta en la tierra a regiones nórdicas de altas latitudes. Por ejemplo, en 1989 en la ciudad de Quebec de Canadá se produjo una tormenta geomagnética que colapsó el sistema de electricidad de la ciudad produciéndose un apagón [20].

En 1859 se produjo en la tierra la tormenta solar más potente jamás registrada, a esta tormenta se le conoce como evento Carrington en honor al primer astrónomo en observarla [21]. Según los científicos tormentas solares de estas magnitudes tienen probabilidades de ocurrir cada 100 años. Una tormenta solar como la producida en 1859 tendría en la actualidad unas repercusiones muy significativas, tales como el bloqueo de los sistemas GPS, sistemas de comunicación satélite y otras repercusiones tanto a nivel económico como social.

5.2. E-bomb

De los dispositivos fabricados por el ser humano capaces de producir pulsos EM con rangos de frecuencias capaces de acoplarse a dispositivos electrónicos y producir efectos comparables a los producidos en una explosión nuclear, destaca un dispositivo conocido como ‘e-bomb’, electromagnetic bomb.

Un esquema representativo de este dispositivo se encuentra en la figura 16. Este dispositivo está formado por varias fases, donde destaca la presencia de dos sectores conocidos como ‘FCG’, un tubo posterior a este llamado ‘vircator’ y finalmente una antena. Esta configuración permite al vircator producir radiación de alta potencia en el rango de microondas gracias a la potencias del orden de GW generados por los FCGs. Una bomba de este tipo capaz de generar $10GW$ de potencia, produciría campos electromagnéticos con intensidades del orden de kV/m en una extensión de $(400 - 500)m$ de diámetro [22].

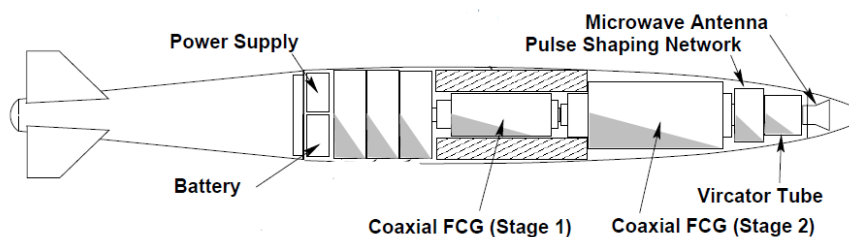


Figura 16: Esquema básico de una bomba electromagnética.

Un ‘FCG’ (Flux Compressive generator) es un dispositivo capaz de generar pulsos EM de larga duración con rangos de frecuencias por debajo de $1MHz$ y energías de mega-Julios [23]. La idea básica tras este dispositivo consiste en comprimir rápidamente, mediante una explosión controlada, el flujo de un campo magnético produciendo una corriente inducida. Para que este dispositivo funcione se necesita inicialmente una corriente que genere el primer campo magnético. La generación de esta corriente puede producirse por varias fuentes externas, como puede ser el uso de condensadores o bien otro FCG más pequeño capaz de provocar esta corriente inicial como puede verse en la figura 16.

El funcionamiento básico por el cual se genera esta corriente inducida puede observarse en las figuras 17 y 18.

En esta situación tenemos unas líneas de campo magnético atravesando una superficie delimitada por un anillo perfectamente conductor sobre el que se induce una corriente al

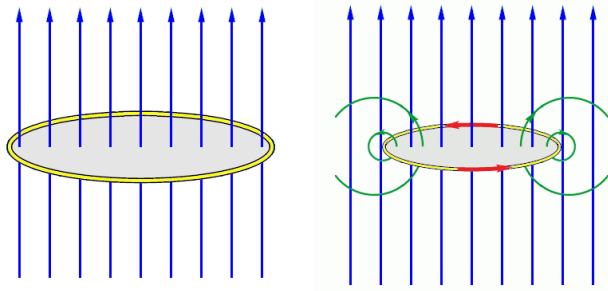


Figura 17: Proceso de compresión de flujo magnético.

reducir el área que éste encierra mediante una compresión rápida. Las líneas azules representan el campo magnético producido por una fuente externa, las flechas rojas representan la corriente inducida sobre el conductor y las líneas verdes representan el campo magnético producido por esta corriente inducida.

Para entender la corriente que se induce sobre el conductor haremos referencia a la ley de inducción de Faraday, que nos indica que el cambio temporal en el flujo magnético que atraviesa una superficie produce una fuerza electromotriz (voltaje) sobre el circuito que delimita o encierra dicha superficie.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

De este modo, al reducir la superficie se reduce el flujo magnético y con ello se induce una corriente sobre el conductor. De esta manera se genera un campo de inducción magnética (líneas verdes) y el flujo total se conserva [24].

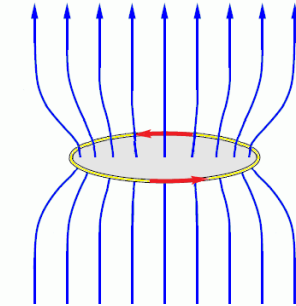


Figura 18: Configuración final.

Debido a la sencillez de este dispositivo, el pulso EM generado por un FCG no tiene las características deseadas para producir efectos en los dispositivos electrónicos como los generados en una explosión nuclear. En la figura 23 del apartado (6) puede compararse el rango de frecuencias y la anchura del pulso para un rayo, una explosión nuclear y un dispositivo de este tipo. Por todo esto, inmediatamente después de estos dispositivos se coloca un tubo llamado Viricator (Virtual Cathode Oscillator) capaz de producir radiación en el rango de frecuencias deseado.

La física de un viricator es bastante más compleja y por no entrar en detalles simplemente veremos el funcionamiento básico. Un viricator es un generador de microondas capaz de generar breves pulsos de radiación electromagnética de alta intensidad, permitiendo sintonizar un ancho de banda deseado. En la figura 19 puede apreciarse una configuración típica de este dispositivo.

Dentro del dispositivo se encuentra un cátodo a través del cual sale un intenso haz de electrones generado previamente por otro dispositivo, en nuestro caso los dos FCGs.

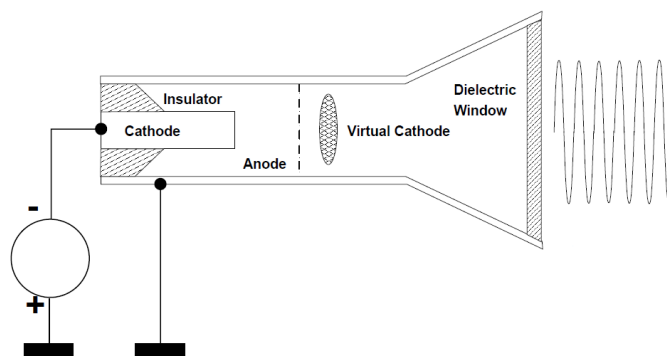


Figura 19: Virtual Cathode Oscillator.

Posterior al cátodo se encuentra un ánodo formado por rejillas a través del cual ciertos electrones muy energéticos son capaces de atravesar y formar una nube electrónica tras el ánodo formando un cátodo virtual. Sin embargo, los electrones formados en esta nube electrónica son atraídos de nuevo por el ánodo y vuelven a atravesarlo, para después ser repelidos de nuevo por el cátodo y así sucesivamente. Produciéndose de este modo una oscilación de los electrones entre el cátodo real y virtual en el interior del tubo generando de esta manera radiación electromagnética [25].

Finalmente se sitúa en la última parte del dispositivo una antena diseñada para acoplar la energía dentro y fuera de la bomba, y así proveer un camino eficiente para que la radiación electromagnética producida por el arma se acople a los distintos objetivos provocando el mayor daño posible [23]. La radiación EM que sale del arma tiene una polarización circular para poder así tener más probabilidades de afectar a un mayor rango de objetivos. Ya que las posibles aperturas y resonancias de los posibles objetivos seguramente tengan orientaciones arbitrarias respecto a la radiación saliente del arma, por ello una polarización circular sería más eficiente que una lineal.

5.3. Meteoric EMP

Existen dos situaciones distintas en las que un meteorito puede llegar a producir pulsos electromagnéticos. La más intuitiva es aquella en la cual un meteorito penetra en la atmósfera terrestre, desintegrándose e interactuando con la atmósfera dando lugar a la generación de un pulso. En esta situación, al producirse la desintegración los electrones son capaces de separarse del resto del meteorito (debido a que la movilidad electrónica es superior a la iónica), formando una zona de carga espacial y generando en última instancia una onda EM que se propaga a velocidad de la luz¹⁷.

La otra forma que tiene un meteorito de producir un pulso electromagnético es cuando colisiona con satélites y naves espaciales. Varios informes de fallos y anomalías en los sistemas electrónicos de estos objetos, sugieren que son causados cuando un meteorito impacta con las superficies de éstos, generando un EMP. Existen teorías que asocian este pulso EM a la producción de plasma cuando el meteorito colisiona, ionizándose a sí mismo y a parte del satélite o nave [26].

Cuando el meteorito colisiona con el satélite (o nave) tanto el meteorito como una fracción del satélite se evaporizan e ionizan, formándose instantáneamente una nube de plasma. Esta nube se expande en el vacío alrededor de la superficie de impacto con zonas espaciales de distintas cargas debido a las diferencias entre las movilidades electrónicas e iónicas. Esta separación de cargas puede producir un pulso cuando las partículas oscilan

¹⁷Este proceso viene acompañado por una onda mecánica que al colisionar con el suelo produce un sonido. El proceso es audible cuando el EMP se produce en el rango de frecuencias de ELF y VLF. A este fenómeno se le conoce como “electroponic boide”.

de manera coherente haciendo que el plasma oscile con la misma frecuencia que el movimiento de estas cargas, produciéndose entonces radiación EM.

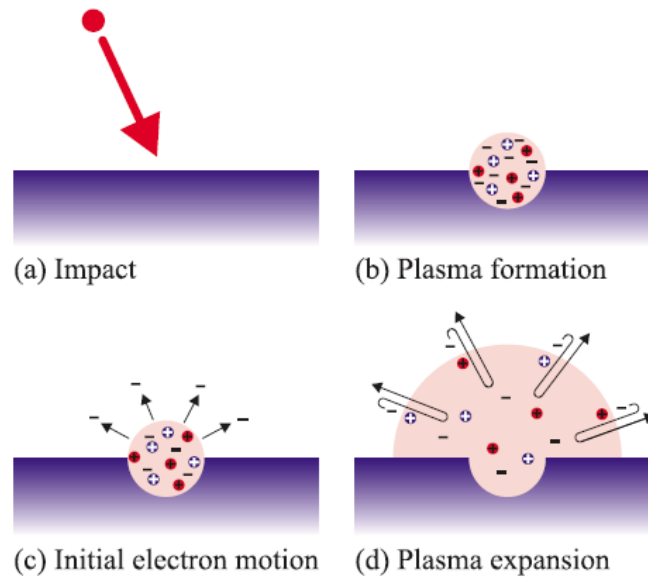


Figura 20: Proceso de producción del plasma y expansión.

En la figura 20 puede observarse el mecanismo básico de expansión y formación del plasma. Una vez se ha formado el plasma, hay un movimiento libre de electrones (fig. 20 (c)) que producirán radiación electromagnética debido a la radiación de frenado (bremsstrahlung). Sin embargo, esta radiación es ínfima debido a que los electrones radian de forma incoherente [26]. La radiación significativa ocurre en la expansión del plasma cuando los electrones de la superficie se separan de los iones, oscilando coherentemente a la misma frecuencia (fig. 20 (d)).

6. LEMP, Lightning EMP

Cuando hablamos de un pulso electromagnético producido por la descarga eléctrica generada en un rayo, nos referimos a la radiación EM que se propaga tras la producción de un rayo que va de nube a tierra. Dicho pulso EM se conoce en la literatura como LEMP. Existen distintos tipos de rayos¹⁸ y el origen de la formación de éstos y los procesos físicos o químicos que tienen lugar, no vamos a considerarlo aquí. En este apartado simplemente hablaremos de los pulsos EM que generan con el fin de compararlos con los producidos en una explosión nuclear.

Estos pulsos de radiación EM se deben al conocido ‘return stroke’. Cuando un rayo contacta con la tierra se genera un canal conductor a través del cual se produce la descarga, impactando en la tierra con valores de corriente que llegan a alcanzar hasta los 200 kA [27]. Se dice que la tierra tiene un potencial positivo respecto a la nube, que se ha cargado negativamente generando un canal de transmisión ionizado. Una vez se ha producido el impacto, parte de la corriente se emplea para ‘retornar’ desde la tierra hasta la nube a través del canal previamente producido, de ahí su nombre. Se produce entonces una onda que se expande con velocidad cercana a la de la luz, emitiendo radiación electromagnética a modo de pulso. En el primer pulso de todos (first return stroke) se alcanzan corrientes de hasta 35 kA [3]. Según va aumentando el número de ‘return strokes’, los valores de corriente van disminuyendo. Estos pulsos se producen en tiempos del orden de microsegundos. Y su duración es del mismo orden de magnitud. En la figura 21 podemos observar una función de onda utilizada en simulaciones de rayos para hacernos una idea del orden de magnitud de los tiempos empleados y las corrientes que se alcanzan.

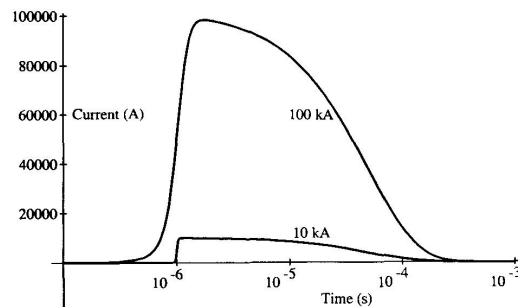


Figura 21: Corrientes e intervalo temporal en un LEMP.

Existen similitudes y diferencias entre los pulsos producidos por un rayo y los generados en una explosión nuclear. La primera similitud que podríamos asociar es la existencia de corrientes generadas por diferencias de conductividades entre dos medios. En el apartado (4.4.2) se explicaba que la producción del pulso EM se debía a las diferencias de conductividades entre la superficie y el aire, actuando la superficie terrestre como un medio conductor que generaba unos campos transversales asociados a una corriente de retorno. Del mismo modo acaba de verse que en el proceso de generación de un LEMP, el pulso se crea debido a unas diferencias de conductividades entre la tierra y la parte inferior de la nube, generándose un canal ionizado por el que retorna el pulso.

Entre las similitudes, destaca la física que tiene lugar en la generación del propio pulso, ya que las reacciones químicas en el aire y los parámetros de movilidad electrónica e iónica son similares en ambos casos [27]. Históricamente, se realizó un esfuerzo en comprender la física de uno para poder entender la del otro. Hay que decir que, respecto a este asunto, los procesos de interacción en la generación del pulso son más parecidos a los de una explosión

¹⁸Los tipos de rayos más comunes son los ‘cloud to ground’ y los ‘cloud to cloud’. También existe otro tipo menos común conocido como ‘ground to cloud’. En nuestro caso, vamos a ver el primero de ellos y el pulso que éste genera.

producida a nivel superficial que la producida en una de alta altitud. Otra similitud que se da en estos pulsos es que en ambos casos se producen sobrecargas que tienden a hacer que las respuestas de los sistemas sean no lineales.

Respecto a estudios de acoplamiento a dispositivos electrónicos, la mayoría de los estudios existentes realizan una comparación entre los efectos producidos por un LEMP y los producidos en un HEMP. Estudios de vulnerabilidad de este tipo se han desarrollado experimentalmente con aviones y también en simulaciones.



Figura 22: Avión F-106 de la NASA.

A parte de estas similitudes, lo que destaca al comparar estos pulsos son las diferencias que existen entre ellos. La primera diferencia básica entre éstos, es el rango de frecuencias en el que tienen cabida. Como se ha mencionado en apartados anteriores, la frecuencia de un NEMP se extiende hasta el GHz , ya que el tiempo de producción de éstos tiene lugar en un breve intervalo de tiempo que alcanza hasta las decenas de nanosegundos. Sin embargo, en el proceso de generación del LEMP hablamos de frecuencias de MHz . En la figura 23 puede observarse dicha diferencia para la generación de pulsos EM para 3 casos distintos¹⁹.

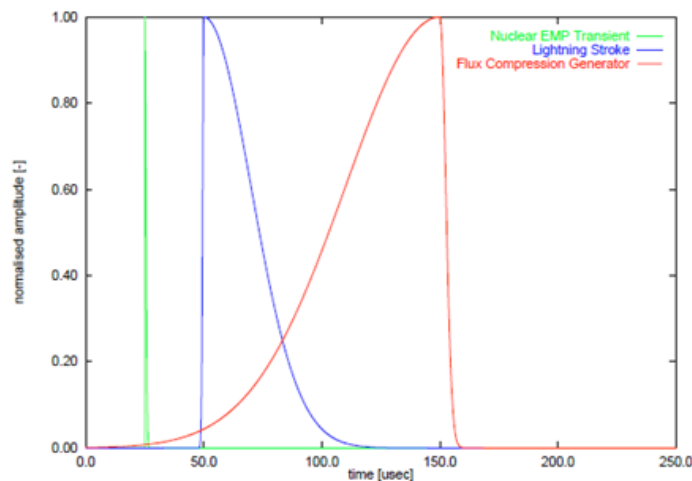


Figura 23: Comparación de tiempos entre distintos tipos de pulsos EM.

¹⁹El generador de compresión de flujo es un dispositivo que genera pulsos en un rango de frecuencias menor. Aquí haremos una referencia al apartado donde se encuentre esto.

Erróneamente se ha pensado durante mucho tiempo, que los efectos de un NEMP siempre superan a los producidos por los rayos, mientras que el poder o efecto de estos últimos en algún caso son superiores. Esto depende del rango de frecuencia en consideración, dado que en el rango de 10 KHz hasta los 10 MHz los efectos de un rayo son superiores a los de un NEMP. Respecto a los campos eléctricos, se puede demostrar lo mismo, pero limitándonos hasta el rango de frecuencias de 1 MHz. Por lo tanto, frases como “the EMP is a microsecond burst of electromagnetic energy, a hundred times more powerful than a lightning bolt” resultarían ser incorrectas [3].

Otra diferencia muy significativa es el rango de extensión. Mientras que los efectos de un rayo son locales, los de un HEMP se extienden sobre áreas de gran amplitud. Establecer una comparación directa entre ambos fenómenos es complejo ya que, necesariamente, están restringidos al estudio de los campos sobre una zona localizada del espacio, como puede ser un avión o cualquier otro objeto. Tales comparaciones no tienen en cuenta algunas diferencias importantes en los mecanismos de interacción, debido a la amplia extensión de un HEMP. Por lo tanto, soluciones locales para hacer frente a interrupciones que suelen tomarse para protección contra rayos, podrían no ser eficaces para el caso de un HEMP. Como mención de otra diferencia, comentar que el impacto directo de un rayo acopla al objetivo un canal conductor, mientras que el HEMP se inmiscuye en el objetivo como una onda.

Finalmente, todas estas diferencias, ya sean entre mecanismos de interacción, frecuencias, condiciones de ocurrencia y área de alcance, nos indican que una protección frente a uno de ellos, difícilmente nos inmunizaría frente al otro. Sin embargo, muchas de las interacciones con estos sistemas tienen una naturaleza similar, aunque sean diferentes en intensidad. Del mismo modo, algunas de las técnicas utilizadas son similares. De ahí los intentos por comprender ambos fenómenos conjuntamente y justificar sus comparaciones.

7. Blindaje

Cuando se produce un pulso EM la energía emitida podía tener distintas naturalezas. De modo que en la generación del pulso, se podían producir campos eléctricos, campos magnéticos y radiación electromagnética de manera que se generan corrientes inducidas que pueden interferir con dispositivos electrónicos produciendo daños o perturbaciones en los mismos. Estos dispositivos dañados pueden finalmente dejar de funcionar permanente y temporalmente o impedir el correcto funcionamiento.

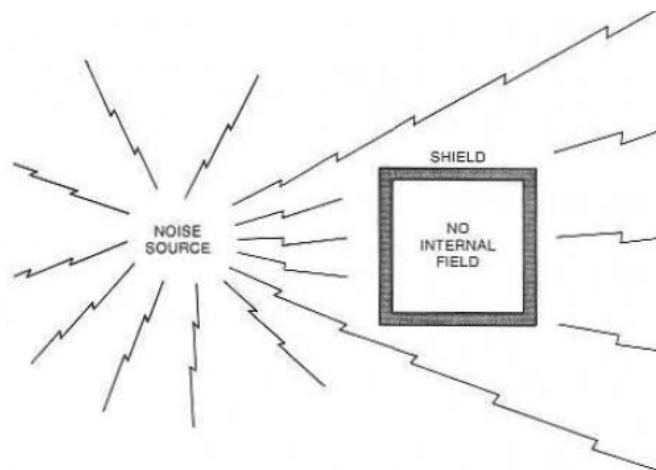


Figura 24: Blindaje frente a una radiación externa [28].

Debido a estas posibles consecuencias en un hipotético ataque de un EMP, para evitar o reducir el mayor número de daños posibles se puede proceder a realizar blindajes en los dispositivos que se quieran proteger.

En este apartado vamos a considerar los principios básicos relativos al blindaje, primero desde un punto de vista de los campos y segundo desde un punto de vista de las corrientes inducidas.

7.1. Conceptos básicos

Como concepto principal trataremos la efectividad de un blindaje. Magnitud que nos va a indicar cómo de efectivo es un blindaje para proteger a un dispositivo electrónico o a una parte de los componentes (circuitos, placas, ...) frente a posibles interferencias o acoplamientos. La efectividad puede definirse de manera sencilla como una relación entre el campo que se induce en el interior del dispositivo cuando no hay blindaje y el campo cuando existe blindaje.

De esta manera, se define la efectividad como el cociente entre las intensidades de los campos eléctricos (o magnéticos) expresada en escala logarítmica.

$$S_E = 20 \log \left(\frac{|E|_{sin}}{|E|_{con}} \right) \quad (dB) \quad (3)$$

Del mismo modo se define para la intensidad del campo magnético, H . Se define en decibelios²⁰ porque es una magnitud adimensional muy utilizada para expresar relaciones entre magnitudes cuyos valores pueden alcanzar órdenes de magnitud muy distintos.

La efectividad de un blindaje es una magnitud que depende de muchos factores como el tipo de campo, las distancias entre las fuentes, el propio blindaje y el dispositivo, la

²⁰Expresión logarítmica adimensional utilizada para expresar razones entre magnitudes. Puede definirse como la razón entre dos potencias o la razón entre dos campos. Como la potencia de una onda electromagnética es proporcional al campo al cuadrado, puede escribirse entonces como en (3).

frecuencia de la radiación, el tipo de material y sus propiedades, la presencia de discontinuidades, ...

Como el objetivo de este apartado es entender los conceptos básicos, vamos a ver un ejemplo muy sencillo para explicar las principales características. De este modo, vamos a ver un placa conductora sin discontinuidades y con un espesor finito. Para este caso, la efectividad es el producto (suma en dB) de tres términos.

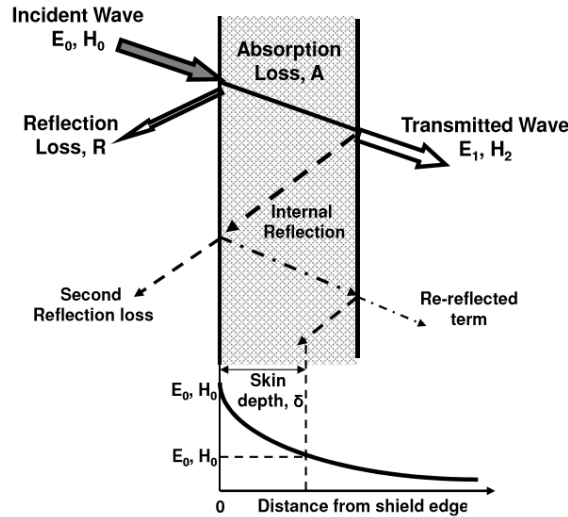


Figura 25: Placa conductora de espesor finito.

Los dos primeros términos suponen pérdidas en la magnitud de los campos, lo que quiere decir que la efectividad es mayor, siendo el blindaje mejor cuanto mayor sean estas pérdidas.

- Término de absorción, S_A :
 Representa la atenuación del campo al penetrar en el material. Cuando una señal EM se propaga en un conductor, el campo en su interior disminuye exponencialmente. El coeficiente que indica el grado de atenuación viene dado por la profundidad de penetración²¹.

De este modo si tenemos un campo incidente de intensidad E_i , en el interior del conductor tendremos que:

$$E = E_i \cdot e^{-x/\delta} \quad (4)$$

Siendo x el espesor de la lámina y δ la profundidad de penetración, donde ν es la frecuencia de la onda incidente, μ la permitividad del material y σ la conductividad.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \nu \mu \sigma}}$$

De esta forma cuanto mayor sea σ , menor será δ lo que quiere decir que el campo disminuye para una distancia menor y en definitiva la efectividad aumenta. Es decir, si aumentamos la conductividad del material, la efectividad aumenta. De manera equivalente, si la frecuencia es mayor, menor será δ y mayor S , es decir, señales de bajas frecuencias penetran más que las de altas frecuencias.

Sustituyendo (4) en (3) llegamos sencillamente a:

$$S_A = 20 \log \left(\frac{E_i}{E_i \cdot e^{-x/\delta}} \right)$$

²¹Distancia a la cual el valor del campo se reduce a su valor inicial dividido por e . Este concepto se conoce como 'skin depth'.

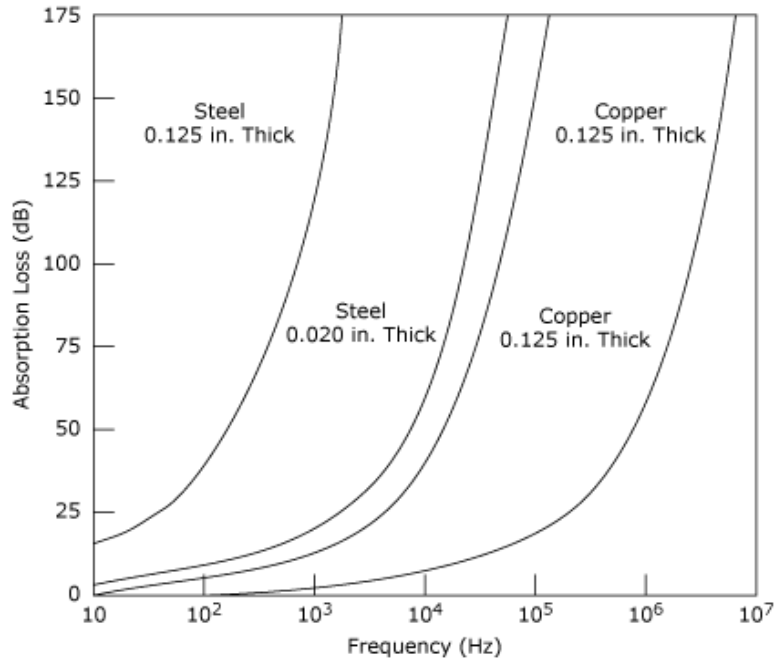


Figura 26: Término de absorción en función de la frecuencia [28].

De modo que sustituyendo δ y operando llegamos a:

$$S_A = \frac{20}{\ln 10} \cdot (x\delta) = 8,69 \cdot x\sqrt{\pi\nu\mu\sigma} \quad (5)$$

Expresión que nos indica que cada profundidad de penetración corresponde a 8,69dB de efectividad. De modo que si tenemos un blindaje cuyo espesor sea $x = 10 \cdot \delta$, entonces tendremos 86,9dB de atenuación. El término de absorción puede llegar a ser tan importante que el campo transmitido al interior del dispositivo sea nulo. Dependerá de la frecuencia y el espesor como puede verse en la figura 26.

■ Término de reflexión, S_R :

Cuando la señal EM se encuentra con una discontinuidad en la impedancia del medio que atraviesa, entonces se produce una reflexión. De este modo distinguimos dos reflexiones principales, por un lado tenemos una diferencia de impedancias entre el medio conductor que forma parte del blindaje y el medio en el que se propaga inicialmente la onda. Por otro lado, la diferencia entre el blindaje y el espacio posterior a éste donde se encuentra el dispositivo que queremos proteger. De esta manera, cuanto mayor sea la diferencia entre estos dos valores, mayor será el valor de S_R y con ello mayor la efectividad del blindaje.

Por un lado, la impedancia de una lámina conductora de conductividad σ es:

$$Z_c = \sqrt{\frac{j(2\pi\nu)\mu}{\sigma}}$$

Que evidentemente para un medio muy conductor es muy pequeña.

La otra impedancia corresponde al cociente entre el campo eléctrico y el magnético en el medio en el que se propaga la onda. Por lo que esta impedancia dependerá del propio medio, de la fuente que genera los campos y la distancia entre la fuente y el blindaje.

En este punto tenemos que distinguir entre la naturaleza de la energía emitida y la distancia a la fuente. Cuando hablamos de estar cerca o lejos de la fuente nos referimos a que la distancia a la fuente sea inferior o superior comparada con la

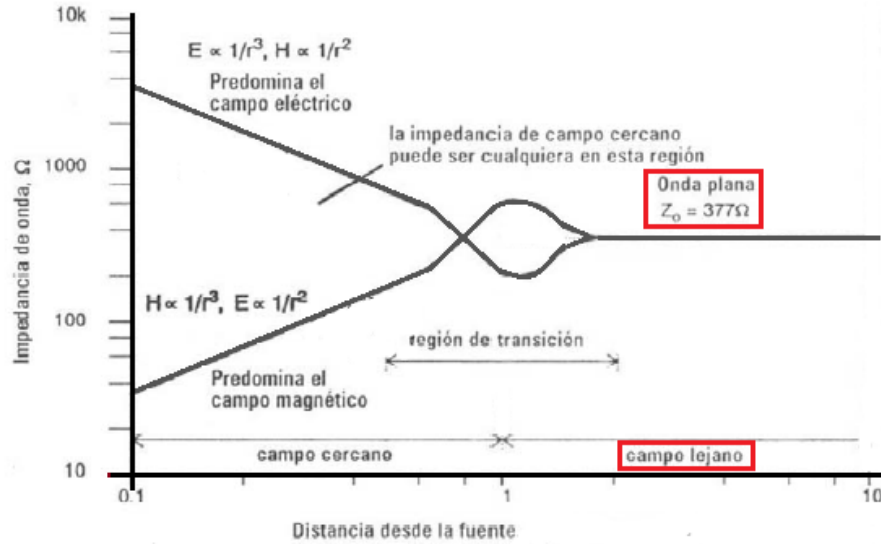


Figura 27: Impedancia en función de la distancia, normalizada a $\lambda/2\pi$.

longitud de onda de la radiación. De este modo, hablamos de campos cercanos cuando la distancia a la fuente es del orden o inferior a la longitud de onda. Cuando la distancia es muy superior a la longitud de onda, entonces hablamos de campos lejanos o de radiación. Por ejemplo, si la frecuencia es de 10Hz entonces estar cerca significa encontrarse a distancias no superiores a los miles de kilómetros. Sin embargo, si $\nu = 1\text{GHz}$, distancias de decenas de decímetros ya puede considerarse lejos.

Cuando hablamos de campos cercanos, puede predominar el campo eléctrico (considerar un campo del tipo dipolar eléctrico) o bien el magnético (tipo dipolar magnético). De este modo tendremos:

$$\text{Dipolo Eléctrico} \begin{cases} |\vec{E}| \propto 1/r^3 \\ |\vec{H}| \propto 1/r^2 \\ Z_0 \propto 1/r \end{cases}$$

Impedancia grande que disminuye con la distancia.

Si el campo que predomina es de tipo dipolar magnético:

$$\text{Dipolo Magnético} \begin{cases} |\vec{E}| \propto 1/r^2 \\ |\vec{H}| \propto 1/r^3 \\ Z_0 \propto r \end{cases}$$

Por otro lado, para distancias donde podemos aplicar la aproximación de campo lejano tendremos que la onda puede considerarse como una onda plana que se propaga en el vacío (aire en nuestro caso) cuyo valor de la impedancia es bien conocido y es igual a $Z_0 = 377\Omega$.

En la figura 27 podemos ver una gráfica que representa el valor de la impedancia en función de la distancia desde la fuente [29]. Puede apreciarse claramente como la impedancia alcanza un valor constante para distancias relativas a la aproximación de campo lejano.

En el caso de un NEMP podemos considerar válida esta última aproximación ya que el rango de frecuencias con mayor aporte de energía era de $(10 - 100)\text{MHz}$ como se vio en el apartado (4). Además, recordemos que la región donde se producían los

campos de radiación se encontraban a unos $30Km$ de altitud, lo que quiere decir que para dispositivos que se encuentren en la superficie terrestre, la distancia fuente-objeto es muy superior a la longitud de onda de la radiación emitida y el campo puede considerarse lejano.

- Término reflexión múltiple, S_M :

Además de las dos reflexiones principales, pueden ocurrir más reflexiones en el interior del blindaje de modo que el campo que se transmite al interior del dispositivo puede tener más contribuciones que la principal. Estas reflexiones múltiples hacen que la efectividad del blindaje disminuya debido a que es un término que contribuye a la transmisión del campo al interior. Este término está definido en función del coeficiente de reflexión como [28]:

$$S_M = 20 \log \left| 1 - \Gamma^2 e^{-2(1+j)\frac{x}{\delta}} \right|$$

$$\Gamma = \frac{Z_i - Z_{i'}}{Z_i + Z_{i'}}$$

Este valor solo es significativo para campos magnéticos en frecuencias bajas [30]. En nuestro caso al considerar frecuencias altas, la profundidad de penetración es pequeña y la exponencial tiende a cero, por lo que S_M también. Por lo que podemos olvidarnos de este término.

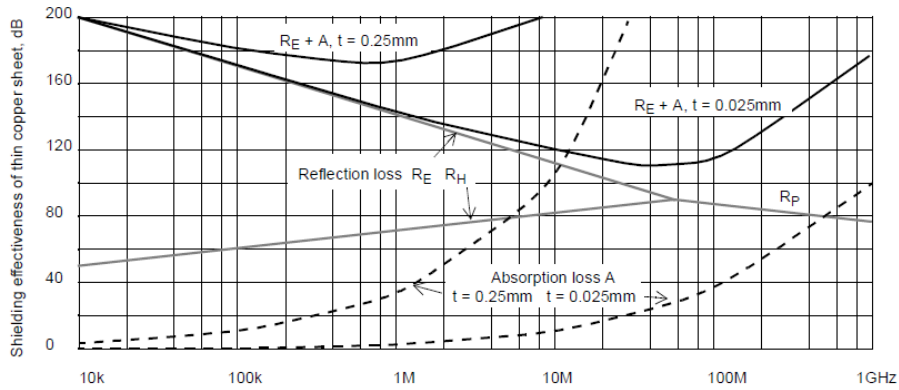


Figura 28: Efectividad en función de la frecuencia [29].

Como hemos podido ver los principales problemas que podemos tener cuando tratamos con blindajes, están asociados a campos magnéticos en bajas frecuencias. En nuestro caso no nos centramos en este apartado ya que las señales electromagnéticas del pulso conllevan frecuencias que se encuentran en rangos altos, concentrando la mayor parte de la energía en rangos de $(10 - 100)MHz$. El problema de baja frecuencia es útil cuando queremos blindar el exterior de los campos producidos por las fuentes en el interior del dispositivo. De todos modos, la solución al blindaje asociado a estos campos puede resolverse sustituyendo un material conductor por un material magnético. Ya que aumentando la permeabilidad μ podemos aumentar la efectividad, como puede inferirse de (5).

En la figura 28 podemos apreciar la efectividad de un blindaje que consiste en una lámina de cobre de espesor finito en función de la frecuencia. En esta gráfica podemos apreciar cómo de efectivo puede llegar a ser un simple blindaje metálico. El problema que podemos encontrar es cuando existen discontinuidades en el blindaje, como analizaremos en el siguiente apartado.

7.2. Corrientes inducidas

Una vez hemos visto los conceptos básicos relativos al blindaje, veamos desde el punto de vista de las corrientes inducidas cómo afectan la existencia de discontinuidades en el blindaje de dispositivos electrónicos. Anteriormente hemos visto que en el rango de frecuencias relativas al EMP, la efectividad del blindaje puede mejorarse con soluciones sencillas, el problema a la hora de blindar dispositivos electrónicos proviene de la presencia de aberturas, cables, o cualquier discontinuidad que permita que la onda penetre al interior del dispositivo reduciendo la efectividad.

En la situación de un EMP, los campos de radiación electromagnética generan corrientes que se inmiscuyen en los dispositivos electrónicos produciendo daños o perturbaciones. Estas corrientes generan altos voltajes en estos dispositivos, excediendo los límites máximos permitidos. En general, el principal problema surge cuando estas corrientes inducen voltajes en los elementos conductores de los dispositivos, pasando de un conductor a otro y alcanzando finalmente otras partes sufriendo daños irreparables. El acoplamiento de esta radiación es más significativo cuando tenemos elementos como antenas.



Figura 29: Array de antenas.

Una antena es un dispositivo conductor diseñado para emitir y/o recibir ondas electromagnéticas hacia el espacio. Cuando una antena transforma energía eléctrica en radiación electromagnética, actúa como emisor. El problema ocurre cuando tratamos con antenas receptoras, capaces de transformar la radiación electromagnética proveniente del pulso en energía eléctrica al interior de nuestros dispositivos. En esencia, la idea básica tras una antena receptora consiste en que la radiación electromagnética que incide en un conductor, produce que los electrones de su superficie oscilen, generándose de esta forma una corriente cuya frecuencia es la misma que la de la radiación incidente. Por ello, cualquier dispositivo que esté formado por antenas será muy vulnerable ante un EMP. De este modo, sistemas de comunicación, elementos de radio, radares y satélites, entre otros, serán muy vulnerables.

Otros sistemas vulnerables a los pulsos electromagnéticos son aquellos equipos que tengan estructuras MOS (Metal-Óxido-Semiconductor) entre sus componentes [23]. Ya que las corrientes inducidas por estos campos generan voltajes superiores a la tensión de ruptura²² de estas estructuras. De este modo, ordenadores o cualquier otro dispositivo con estas estructuras, en principio, se verían afectados. En general, elementos no conductores que protejan partes de un dispositivo electrónico, pueden llegar a permitir el paso de la corriente eléctrica siempre y cuando se supere la tensión de ruptura.

La corriente que se induce es tal que se opone al campo que lo genera (Ley de Lenz). De modo que si existen campos transversales electromagnéticos en el exterior del dispositivo,

²²Voltaje mínimo necesario para que en un material aislante aparezcan partes con conductividad eléctrica.

la corriente que circula en el interior anula a estos campos en una situación ideal. En la práctica debido a la presencia de discontinuidades, estos campos no se anulan y la efectividad del blindaje disminuye. Esto ocurre cuando de algún modo cortamos la circulación de la corriente.

De esta manera podemos hablar de aberturas en los dispositivos necesarias, por ejemplo, para introducir cables u otras consideraciones. Es importante en esta situación la orientación de la abertura en relación con la dirección de la corriente.

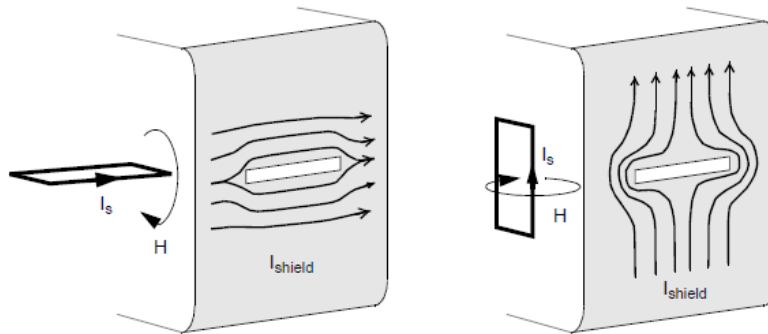


Figura 30: Presencia de discontinuidades en un blindaje [29].

Siendo en este caso la situación idónea la que produzca menor alteración al paso de la corriente, como puede observarse en la parte izquierda de la figura 30. En todo caso, de existir aberturas serán menos desfavorables a la efectividad del blindaje cuanto más pequeñas sean. Refiriéndonos con ‘pequeñas’ a que la longitud de onda de la señal emitida que queremos apantallar sea superior a las dimensiones de la abertura. Es decir, hablamos de ‘grande’ o ‘pequeño’ en comparación con la longitud de onda de la radiación incidente, lo que es pequeño para una frecuencia puede no serlo para otra. Por ejemplo, en el caso de un horno microondas podemos observar la existencia de rejillas cuyas aberturas son pequeñas respecto a las longitudes de onda asociadas a la frecuencias de microondas, impidiendo que salgan fuera del dispositivo. Sin embargo, las dimensiones de estas aberturas son grandes en comparación con las longitudes de onda asociadas al espectro visible, lo que permite que podamos ver el interior cuando miramos.

La profundidad de una abertura es una característica a tener en cuenta, ya que si ésta es mayor que el diámetro de la abertura, entonces puede hacer de guía de onda disminuyendo la efectividad del blindaje. Para el caso de alta frecuencias es un problema que debemos considerar. Ya que en una guía de ondas, existe una frecuencia de corte por encima de la cual la señal puede propagarse a través de la guía.

De igual manera que hemos hablado de aberturas como discontinuidades en nuestro blindaje, podemos hablar de las juntas como otra discontinuidad más. De nuevo la orientación de éstas con respecto a la dirección de la corriente es un factor determinante en el valor de la efectividad del blindaje. Si las juntas están orientadas de tal forma que se impide la correcta circulación de las corrientes, la efectividad disminuye. El caso ideal sería aquel en el que no hubiera una discontinuidad, es decir, que la impedancia en la junta fuera la misma que si no hubiera. Cuanto más grande sea esta impedancia, más discontinuidad y peor será el blindaje. Si esta impedancia es grande quiere decir que en la zona de una abertura, la corriente inducida genera una diferencia de potencial lo suficientemente elevada como para inducir un campo eléctrico al interior del dispositivo. De esta manera, cuanto menor sea la impedancia, mejor será el blindaje.

Por último hablar sobre la presencia de cables que conectan el exterior con el interior. Estos cables pueden hacer como guías de ondas de modo que los campos acoplados en los cables, se adentran en el interior del dispositivo saltándose las medidas tomadas en el blindaje.

daje y generando daños en los sistemas electrónicos. Por ello es importante proporcionar medidas de protección que blinden estos cables. De esta manera, sistemas de telecomunicaciones o cualquier otro sistema que lleven cables, en principio, serán vulnerables ante los efectos de un EMP.

7.3. Simulación con CST STUDIO SUITE [®]

En este apartado vamos a simular la radiación electromagnética generada en un pulso que alcanza un sistema blindado que presenta una discontinuidad. Para la simulación hemos utilizado un software llamado CST STUDIO SUITE que permite diseñar y analizar diferentes sistemas tridimensionales electromagnéticos en distintos rangos de frecuencia.

En nuestro caso haremos la simulación en el rango de microondas, considerando un EMP cuya frecuencia mínima parte de los $0Hz$ y alcanza una máxima de $15GHz$. Como dijimos en el apartado (2.2), la frecuencia máxima depende de la fuente que genere el pulso, pero de manera general el límite máximo se encuentra en este orden de magnitud, por ello el intervalo elegido.

De la energía liberada en el pulso nos interesa la asociada a la radiación electromagnética capaz de transportar energía a largas distancias de la fuente. En la aproximación de campo lejano, los campos electromagnéticos se propagan como ondas transversales (TEM). De este modo, en la simulación suponemos un frente de onda plano²³ con campos electromagnéticos transversales que representan la radiación procedente de una fuente lejana.

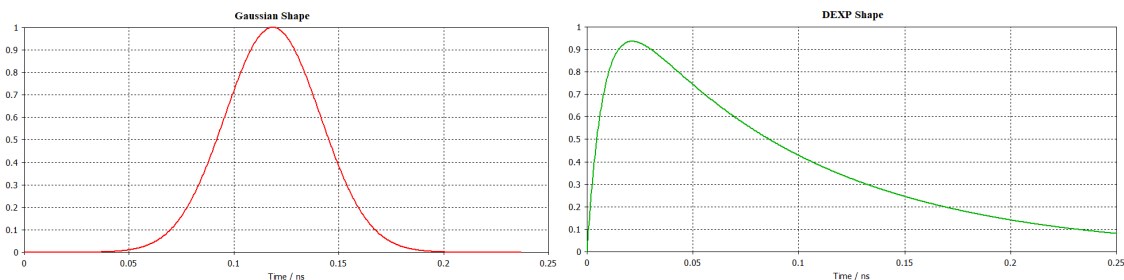


Figura 31: Curvas del EMP simulado.

Respecto a la forma del pulso supondremos por sencillez una señal de excitación representada por una onda Gaussiana. En la figura 31 podemos apreciar a la izquierda la forma del pulso que hemos utilizado en nuestra simulación. A la derecha observamos otro tipo de señal dada por una doble exponencial²⁴ como veíamos en la figura 3 del apartado (2.3) donde vimos las funciones de onda que podemos asignar a un EMP.

Estas curvas representadas en el dominio temporal nos dan una idea de cómo varía la amplitud (normalizada a 1) en cada instante de tiempo.

Nuestro sistema blindado consiste en una caja rectangular formada por un material conductor de espesor finito. La caja está hueca por dentro (vacío) y presenta una abertura que conecta el exterior con el interior. Esta abertura representa una posible discontinuidad que puede presentarse en un sistema que queramos blindar donde por ejemplo haya que introducir cables, necesite ventilación o cualquier otro motivo.

El software nos permite elegir el material y el diseño a nuestro gusto. En nuestro caso hemos elegido un metal con pérdidas, aluminio de conductividad $\sigma = 3,56 \cdot 10^7 S/m$.

En la figura 32 puede apreciarse la distribución del problema. Podemos elegir las orientaciones relativas entre la abertura de la caja y el frente de onda. Todas las orientaciones

²³Realmente podría considerarse esférico, pero a distancias lejanas de la fuente, considerarlo como plano a nivel local es una buena aproximación.

²⁴El software nos permite escribir cualquier función para nuestra simulación.

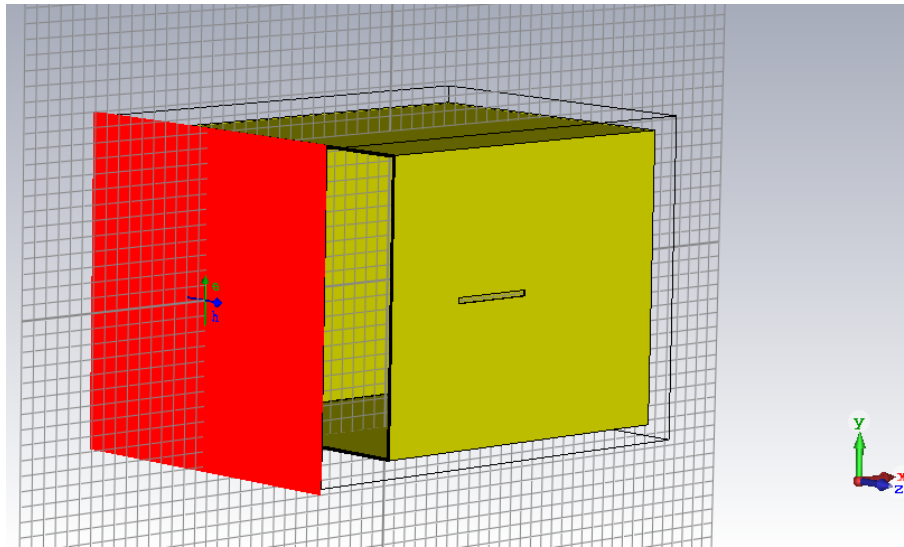


Figura 32: Caja con abertura y frente de onda plano.

pueden modificarse, podemos hacer que la onda incida en la dirección en la que está situada la abertura y analizar los campos que penetran al interior. En la imagen, el frente incide por un lateral de la caja y esta misma está seccionada para tener una visualización más esquemática del problema.

La simulación la haremos en el dominio del tiempo (puede hacerse un estudio de la frecuencia) monitorizando los campos eléctricos y magnéticos²⁵. Para ello se eligen unos puntos de control sobre la malla donde se quiere ver qué ocurre con los campos. En nuestro caso, elegimos puntos en el interior de la caja a la altura de la abertura.

Resultados

En primer lugar veamos el campo eléctrico en el interior de la caja para una onda TEM que incide por un lateral de la misma como se aprecia en la figura 32. El campo eléctrico oscila en la dirección del eje Y con una amplitud inicial de $1V/m$.

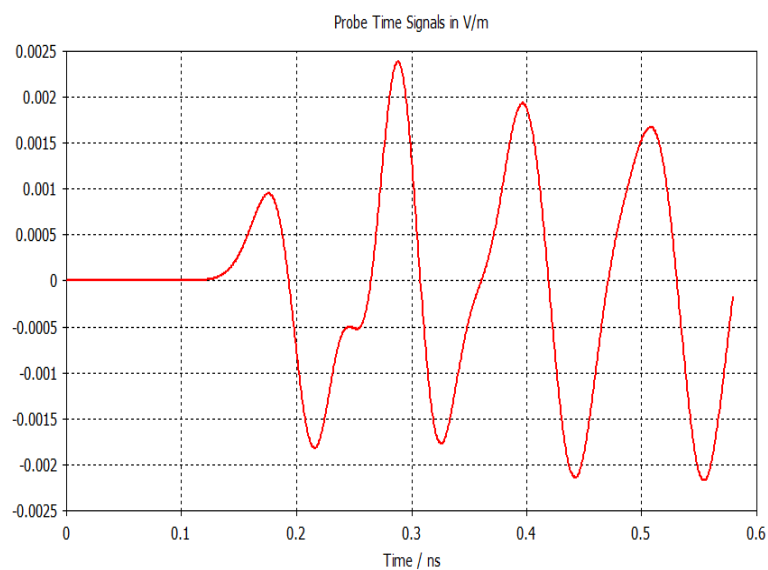


Figura 33: Campo eléctrico en el centro de la caja en función del tiempo.

²⁵También puede monitorizarse la potencia radiada, las pérdidas y las corrientes inducidas.

El valor del campo puede medirse en distintas posiciones dentro de la caja. Por ello utilizaremos la siguiente notación:

$$\begin{cases} E_{l,m,n}^\alpha \\ \alpha = x, y, z \\ (l, m, n) \rightarrow \text{Posición desde el centro de la caja } (0, 0, 0) \end{cases}$$

Con esta notación, en la figura 33 observamos el campo eléctrico en la dirección del eje Y en el centro de la caja, es decir, $E_{0,0,0}^y$. Si inicialmente tenía una amplitud de $1V/m$, podemos apreciar cómo la amplitud se ha reducido a $0,0025V/m$, es decir, la intensidad del campo se ha reducido 400 veces del valor inicial. Por lo que podemos inducir que el blindaje, aun presentando una discontinuidad, es bastante efectivo.

En esta misma figura, apreciamos un valor del campo igual a cero durante un breve intervalo de tiempo. Este tiempo es el que tarda la señal atenuada en alcanzar el centro de la caja desde que se produjo el pulso.

De este modo, podemos medir la intensidad del campo eléctrico (también magnético) en distintos puntos de la caja a la altura de la abertura, $E_{0,0,n}^y$ ²⁶. El valor máximo de n viene delimitado por el tamaño de la caja, siendo $n = 10$ el máximo posible.

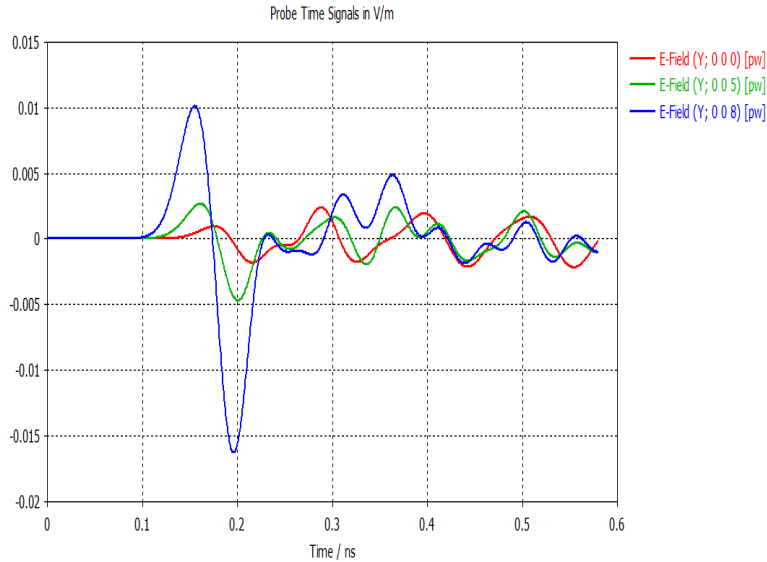


Figura 34: Campo eléctrico en función del tiempo en distintas posiciones de la caja.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, en la figura 34 podemos apreciar los campos (E_0^y, E_5^y, E_8^y). Como podemos apreciar, cuanto más cerca estemos de la abertura, mayor será la intensidad de los campos y menor la atenuación.

El pico de mayor intensidad, correspondiente a E_8^y , es 100 veces inferior al valor inicial del campo (fuera de la caja) y 4 veces superior al de E_0^y .

Finalmente, podemos observar el campo eléctrico en función de la frecuencia de la radiación incidente. En la figura 35 observamos distintas curvas del campo eléctrico para distintas posiciones en el interior de la caja, las mismas que el caso anterior. Del mismo modo, podemos apreciar cómo las intensidades de estos campos son mayores cuanto mayor proximidad haya entre el punto de estudio y el exterior de la caja.

Por un lado, podemos observar que la señal que entra (o sale) de la caja depende de la frecuencia de la radiación incidente y de las dimensiones de la abertura. Para frecuencias bajas, la longitud de onda de la radiación incidente es considerablemente mayor que las

²⁶Por simplicidad usaremos a partir de ahora E_n^α en lugar de $E_{0,0,n}^\alpha$

dimensiones de la abertura, por lo que apenas entra señal. Sin embargo, según aumenta la frecuencia, la longitud de onda disminuye, siendo similar o inferior al tamaño de la abertura, penetrando de este modo la señal al interior.

Por otro lado, los picos pronunciados que se observan corresponden a resonancias. Observamos cómo según aumenta la frecuencia de la onda, la amplitud es mayor y cómo para determinadas frecuencias se producen máximos de amplitud. Estas frecuencias resonante no dependen del tamaño de la abertura, si no de las dimensiones de la caja.

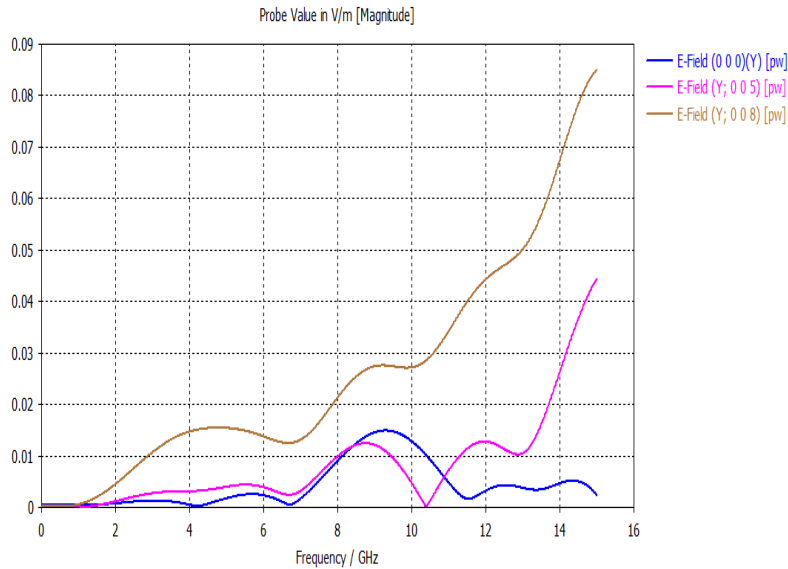
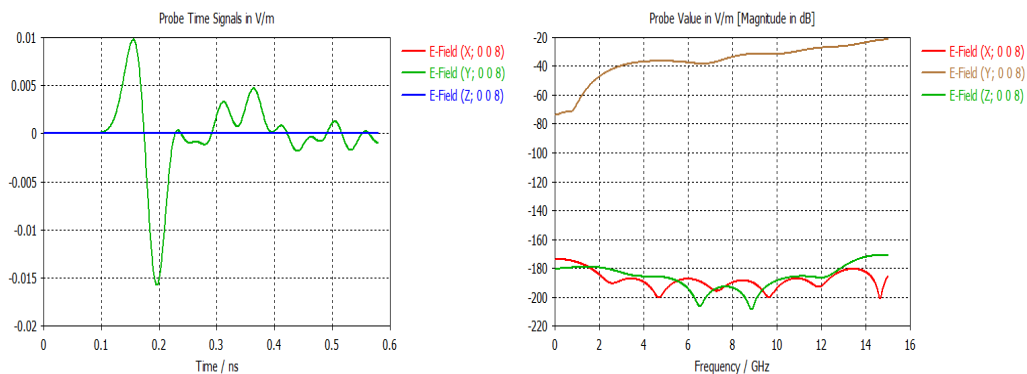


Figura 35: Campo eléctrico en el dominio de la frecuencia.

Para terminar analizando el campo eléctrico, hemos visto la dependencia de E^y con el tiempo y la frecuencia. Sin embargo, no hemos comentado nada respecto a las otras direcciones. Aunque el campo eléctrico oscile en la dirección del eje Y, en el interior de la caja podemos encontrar componentes E^x y E^z . Aun siendo muy pequeñas en amplitud, no son nulas.

En la siguiente figura podemos apreciar la existencia de estas componentes en ambos dominios. En 36a observamos la dependencia del campo eléctrico con la dirección en el dominio temporal. En una escala lineal, aparentemente tanto E_x^z como E_z^z son nulos.

Sin embargo, si utilizamos una escala logarítmica (magnitud en decibelios) como podemos apreciar en 36b, observamos que los campos son no nulos. La diferencia solo es apreciable en el dominio de la frecuencia, donde podemos ver que las frecuencias resonantes son distintas debido a las diferencias en las dimensiones de la caja.



(a) Dominio del tiempo.

(b) Dominio de la frecuencia.

Figura 36: Campos eléctricos para distintas direcciones en el interior de la caja.

Una vez hemos analizado el campo eléctrico, podemos analizar de manera equivalente qué ocurre con el campo magnético en el interior de la caja cuando este campo proviene de una onda electromagnética con intensidad de $1A/m$ y dirección la del eje Z.

En la figura 37a podemos apreciar las intensidades de los campos magnéticos en función del tiempo para distintas posiciones en el interior de la caja, siguiendo el mismo esquema de colores y distancias de la figura 34. Observamos un patrón parecido al que se obtenía para el campo eléctrico, pero en este caso el valor del campo en el interior es considerablemente inferior al exterior.

Del mismo modo, en la figura 37b apreciamos las intensidades de los campos magnéticos en función de la frecuencia. Observando valores de frecuencias donde la amplitud es mayor, que como en el caso anterior corresponden a resonancias que ocurren en el interior de la caja.

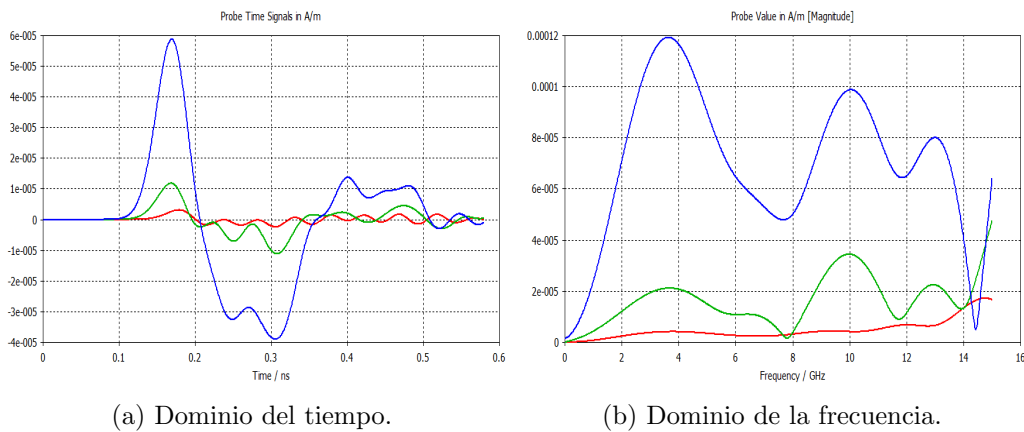


Figura 37: Campos magnéticos para distintas ubicaciones en el interior de la caja.

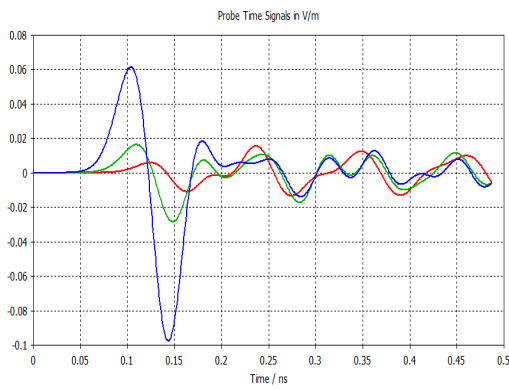
Finalmente, veamos los resultados obtenidos cuando el frente de onda incide sobre la misma dirección en la que se encuentra la abertura, es decir, la dirección de propagación de la onda coincide con la del eje Z.

En esta situación, la radiación incidente penetra con mayor intensidad que en el caso anterior. Obteniendo unos patrones parecidos, pero de mayor intensidad. Es decir, existe una dependencia evidente con la polarización de la onda.

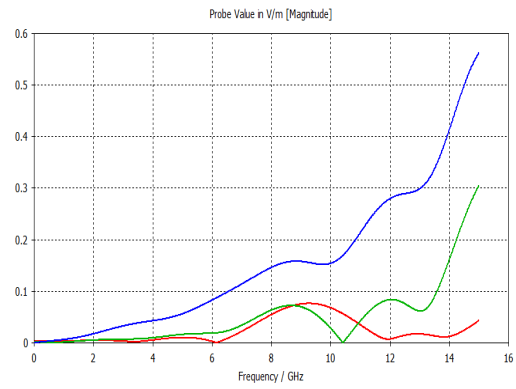
Podemos comparar los resultados de la figura 38a con los obtenidos en 34. De este modo, podemos observar que E_8^y es 6 veces mayor cuando la radiación incide frontalmente que lateralmente. Aun así, podemos concluir que aunque la radiación incidente no tenga la misma dirección que la abertura, los campos penetran en el interior con intensidades no nulas, siendo muy pequeñas.

Del mismo modo, comparando 38b con 35 podemos apreciar esta diferencia en el dominio de la frecuencia y observar las similitudes entre las formas de las curvas. En ambos casos, puede observarse cómo la señal no penetra al interior para bajas frecuencias, debido a la relación entre las dimensiones de la abertura y la longitud de onda de la radiación incidente.

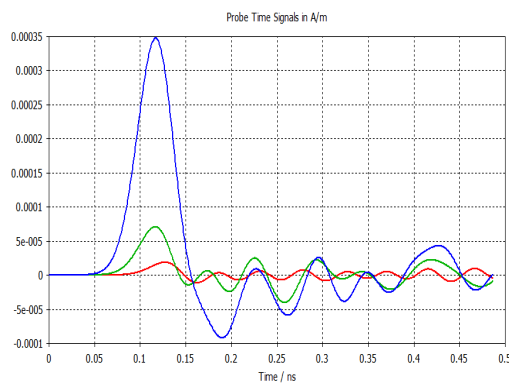
Por último, podemos de igual manera comparar los resultado obtenidos para el campo magnético en 38c y 38d con los obtenidos en 37a y 37b. De nuevo, apreciamos cómo la intensidad de estos campos son mayores en esta situación en la que la radiación incide frontalmente sobre la abertura.



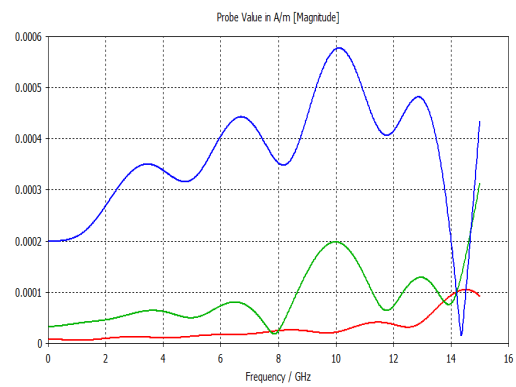
(a) Campo eléctrico en función de t .



(b) Campo eléctrico en función de f .



(c) Campo magnético en función de t .



(d) Campo magnético en función de f .

Figura 38: Campos EM cuando la onda incide frontalmente sobre la abertura.

8. Recursos Filmográficos

En esta sección revisaremos varios ejemplos que podemos encontrar en el cine, donde se trata de manera directa o indirecta el pulso electromagnético²⁷. También veremos algún ejemplo que podemos encontrar en series. En ambos casos analizaremos las referencias que se mencionan, indicando las cosas correctas y corrigiendo las erróneas cuando sea posible.

8.1. Ocean´s Eleven

Dirigida por Steven Soderbergh en 2001 y protagonizada por George Clooney como Danny Ocean y Brad Pitt como Rusty Ryan, en esta película podemos encontrar una referencia muy explícita de un dispositivo capaz de producir un EMP con el objetivo final de provocar un apagón en la ciudad de las Vegas, para así permitir a Danny y a sus 11 socios llevar a cabo el mayor robo de la historia de la ciudad. Como parte del argumento de la película, para poder realizar dicho robo, se requiere de un dispositivo capaz de generar un apagón que tenga, al menos, una duración de 30 segundos y así poder burlar la seguridad de los casinos más seguros del mundo.

¿Qué dispositivo sería capaz de provocar tal hazaña y dejar a oscuras una ciudad tan grande como Las Vegas? La opción más sencilla, y la más letal, sería detonar una bomba nuclear. El sentido común nos dice que el apagón provocado por dicho NEMP sería el menor de nuestros problemas y por ello debemos encontrar un dispositivo capaz de provocar las mismas consecuencias.

Cuando un arma nuclear estalla, libera un pulso EM que apaga cualquier fuente eléctrica que haya dentro de su onda expansiva. Eso no suele importar porque un arma nuclear destruye todo aquello que necesita la electricidad para funcionar -. Basher

Es en este momento cuando a Basher Tarr, encargado de desactivar la seguridad de la cámara donde se encuentra el dinero, se le ocurre la idea de usar un dispositivo llamado ‘pinza’ capaz de producir el apagón deseado. Pero si quieren producir un apagón de tales magnitudes, supuestamente comparables con las de un NEMP, deberán coger la más potente del mundo. Con este fin, robarán la pinza más potente jamás creada, que se encuentra en la ficticia universidad ‘California Institute of Advanced Science’.

La primera pregunta que nos puede surgir al pensar en tal dispositivo, es si existe un análogo a éste fuera de la ficción. Para responder a esta pregunta lo primero que tendríamos que tener en cuenta es si existe la posibilidad de producir tal apagón con algún dispositivo distinto de una bomba nuclear. La respuesta es rotundamente no. Sin embargo, esto no quiere decir que dicha pinza no tenga un equivalente real, si no que su equivalente no produciría en ningún caso un apagón de tales magnitudes.

¿Cuál es el equivalente real a este dispositivo? Parece ser que este dispositivo está inspirado en el ‘Sandia Z-pinch’, la pinza más potente creada hasta la fecha desarrollada en los laboratorios nacionales de Sandia, Estados Unidos.

I can confirm that Sandia´s Z machine is the inspiration for the movie´s gimmick-.
Neal Singer²⁸

Una pinza (pinch en inglés) es un dispositivo capaz de comprimir (pinzar) un filamento conductor mediante fuerzas magnéticas, siendo generalmente el conductor un plasma. El nombre ‘Z-pinch’ se debe al hecho de que una corriente inicial de electricidad genera un campo magnético con dirección polar que comprime un gas de partículas cargadas en la dirección vertical, conocida habitualmente como dirección ‘Z’.

²⁷A lo largo de esta sección utilizaremos indistintamente los términos EMP y PEM. Teniendo en cuenta que el uso de uno u otro simplemente proviene del idioma hablado en el ejemplo.

²⁸Neal es escritor del grupo de comunicaciones de los laboratorios Sandia. En varias ocasiones mantuvo conversaciones con los responsables de la película, quienes le preguntaron por el Z-pinch [31].

Sin entrar en detalles, el funcionamiento básico consiste en formar una columna de plasma en un tubo en cuyos extremos se encuentran dos electrodos de distinta polaridad generando una caída brusca de potencial entre ellos. Dicha diferencia de potencial produce la ionización del material en el interior del tubo generándose una corriente. Esta corriente es la responsable de la generación del campo magnético que se encarga de confinar el material en su interior, produciendo en algunos casos la fusión de los átomos en su interior.

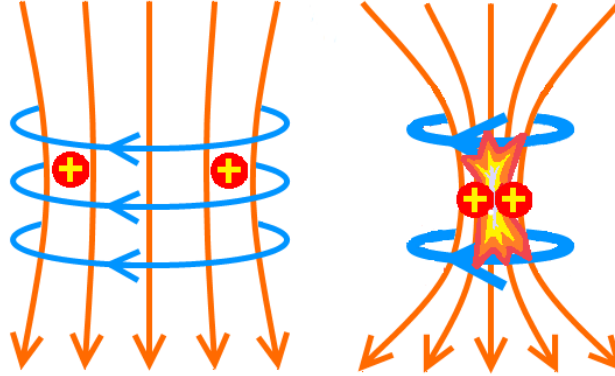


Figura 39: Funcionamiento básico de confinamiento magnético.

En la figura 39 puede verse el funcionamiento básico explicado. Originalmente estas pinzas fueron usadas para controlar y producir la fusión nuclear.

El Sandia Z-pinch es el generador de rayos-X más potente del mundo, pero como generador de pulsos EM podría considerarse un arma muy pobre. Jeff Quintez, director del Sandia Z-pinch, asegura que el dispositivo empleado en la película tiene poco que ver con la ciencia. Además, explica los pocos efectos que han llegado a producir sobre dispositivos electrónicos [31]:

We have on occasion interfered with the sensitive electronics in cameras and computers located in the same laboratory space ... but we have never caused a problem with any electronics or electrical system outside the accelerator building itself-. Quintez

Por ello, suponer un apagón de una ciudad entera como Las Vegas a partir de un dispositivo de este tipo, no puede catalogarse de otro modo que como un acto de ciencia-ficción. Independientemente de estas salvedades, podemos encontrar más errores que deben analizarse.

Primeros errores:

El principal error que puede considerarse es el hecho de generar el pulso EM con la pinza en el interior de la furgoneta. Ya que debido a la composición metálica de las paredes y el techo, la radiación emitida se verá apantallada atenuando la señal y disminuyendo los efectos del pulso. Como vimos a lo largo del apartado 7, un dispositivo constituido por metal puede ser muy bueno para apantallar las ondas electromagnéticas, de ahí su uso en blindajes. En realidad, producir el pulso con el dispositivo en el interior de la furgoneta y las puertas abiertas hace las veces de antena, limitando el rango de frecuencias que sale hacia el exterior de la misma.

Las dimensiones de la furgoneta limitarán la radiación emitida en un rango de frecuencias. Longitudes de ondas del orden de milímetros (GHz), saldrán hacia el exterior propagándose con una polarización predefinida. Sin embargo, longitudes de ondas superiores, del orden de metros (MHz), no saldrán hacia el exterior produciendo ondas estacionarias e interferencias en el interior de la furgoneta. En esencia, esta distribución puede compararse con la de una antena de bocina²⁹, como puede observarse en la figura 40.

²⁹Antena que actúa como una guía de onda en la cual el área de la sección se va incrementando progresivamente hasta un extremo abierto, comportándose como una abertura.



Figura 40: Detonación del pulso en el interior de la furgoneta y antena de bocina.

Si realmente el conjunto actuase como una antena, entonces la parte abierta de la furgoneta debería orientarse hacia la ciudad o la zona de esta donde quiere provocarse el apagón. En la escena podemos observar justo lo contrario, dejando la ciudad de espaldas. De modo que la radiación debería ser prácticamente atenuada en esa dirección, generando unos efectos muy reducidos.

Suponiendo que dispongamos de un dispositivo capaz de generar un EMP con estas características, una consecuencia llamativa de la detonación del pulso es que es de tal magnitud que es capaz de romper bruscamente el techo de la furgoneta donde se encuentra el dispositivo. La cuestión en este asunto es si como consecuencia de una onda EM que se propaga en un pulso, se podría de algún modo llegar al caso de romper objetos sólidos como el techo de una furgoneta. Los efectos de los pulsos EM producen interferencias electrónicas, pero en ningún caso pueden provocar daños mecánicos [32], ya que no son ondas mecánicas u ondas de presión. Como consecuencia de las corrientes que se inducen en el techo metálico podría generarse un calentamiento por efecto Joule, produciéndose de algún modo una deformación en el techo. Pero tal y como se observa en la película no podría asociarse a este efecto, más bien el efecto observado debería ser causado por una onda expansiva que produzca presión.

Apagón secuencial:

Dentro del mundo del cine uno de los errores más comunes que pueden observarse es la generación de apagones que se van produciendo por secuencias. Es decir, en lugar de producirse el apagón en un mismo instante de tiempo, es habitual encontrar como los edificios, farolas, o cualquier dispositivo que emita luz se van apagando paulatinamente.

En Ocean's eleven podemos observar desde el inicio del pulso como los dispositivos electrónicos van apagándose según la onda expansiva va alcanzándolos 'uno a uno' en su propagación, o al menos eso es lo que se observa.

¿Tendría sentido en el caso de un EMP un apagón secuencial? Como ya sabemos la velocidad a la que se propaga la onda expansiva generada en el EMP es la de la luz, siendo $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ en el vacío. De este modo, los distintos dispositivos que son alcanzados por la onda expansiva deberían apagarse casi instantáneamente, siendo la diferencia temporal inapreciable. Por ello, observar cómo los edificios más lejanos se van apagando más tarde (diferencias de segundos) que los más cercanos a la fuente, es un error importante que debería considerarse. Peor aún es observar casos en los que un mismo edificio sufre apagones por plantas, ventanas e incluso lámparas.

Lo que sí podría tener sentido es observar apagones por zonas en distintos tiempos. Siendo aún así estos tiempos del orden de microsegundos y del mismo modo prácticamente inobservables en estas escenas. Esto podría ser así debido a la diferencia en los tiempos de respuesta de los sistemas de suministros de energía eléctrica de cada zona de la ciudad.

De este modo, podría observarse como la zona A se apaga al completo en un instante t y la zona B en un instante posterior t' , siendo $\Delta t \sim \mu s$.

Siguiendo con el tema del apagón a gran escala que se produce en la película, otra consideración que podríamos tener en cuenta es el hecho de que una vez se ha producido, se restaura por completo la electricidad de la ciudad pasado 30 segundos desde el origen. La idea de que se restablezca la seguridad del edificio donde quieren robar pasado los 30 segundos es un argumento que en principio podría considerarse correcto. Pues puede ser que el edificio esté hecho de tal forma que se hayan tomado medidas preventivas ante posibles apagones³⁰. Aunque los efectos de un NEMP no sean locales como los de un LEMP, utilizar sistemas de protección similares a los que se toman frente a un rayo, podría ser una solución plausible si se quiere proteger una cámara de seguridad y más tratándose de las más seguras que puedan encontrarse en el mundo, o así se hace ver en el caso de Ocean's Eleven.

Sin embargo, considerar una restauración completa del sistema de redes eléctricas de una ciudad entera como Las Vegas en un tiempo de 30 segundos, no puede considerarse de otro modo que como ficción. Ya que en estos casos, recuperarse de un apagón no es una cuestión de segundos ni minutos, si no de varias horas.

Otros errores:

Justo antes de superar el último obstáculo, necesitan abrir una puerta a partir de un detonador cuya activación depende de un mando que funciona con pilas. En el momento de activar la detonación, el mando no funciona y lo atribuyen explícitamente a una consecuencia de la pinza que generó el pulso. Sin embargo, el elemento que hace no funcionar el mando en la película son las propias pilas y con un simple cambio de éstas por otras, consiguen finalmente detonar la puerta y conseguir sus objetivos.

Lo primero que nos llama la atención de esta escena es que un pulso EM sea capaz de estropear un sistema cuyos orígenes sean químicos como es en el caso de una pila. Sabemos que las consecuencias que generan los pulsos son electrónicas, pero en ningún caso pueden afectar a procesos químicos o mecánicos. Suponiendo que aún así pudiera causar daños en el sistema de la misma pila, qué sentido tendría entonces sustituir estas primeras por unas segundas. Evidentemente ninguno, pues si están estropeadas unas, deberían estarlo también las otras.

Una posible solución a este problema sería que como consecuencia del EMP el sistema electrónico del mando se hubiera fundido produciendo una hipotética ruptura en el sistema pila, aún así poco probable. En este caso, sustituir unas pilas por otras podría tener sentido, pero del mismo modo el sistema electrónico del mando seguiría estropeado y por más que cambiásemos de pilas seguiría sin funcionar.

³⁰En la película se habían tomado medidas ante la posibilidad de un apagón producido por otras causas. De ahí la idea de utilizar un dispositivo capaz de generar un EMP.

8.2. Matrix

En esta trilogía dirigida por las hermanas Wachowski y protagonizadas por Keanu Reeves como Neo, aparece como parte del argumento el uso de armas capaces de provocar pulsos electromagnéticos para protegerse contra las máquinas que quieren acabar con los últimos supervivientes que forman parte de la resistencia humana.

Estas armas de origen no nuclear (NNEMP) son capaces de deshabilitar cualquier dispositivo electrónico que se encuentre en su rango de acción, incluyendo los aerodeslizadores en los que están instalados.

En la primera entrega de la trilogía (1999), Neo y la tripulación de Morfeo tienen un primer encuentro con las máquinas (centinelas) que se encargan de vigilar, buscar y acabar con los últimos seres humanos que se encuentran en el mundo real, fuera de Matrix. Es en este primer encuentro cuando se hace referencia a este dispositivo de defensa:

An electromagnetic pulse disables any electrical system in the blast radius. It's the only weapon we have against the machines -.Trinity

Antes de la llegada de los centinelas, la nave se prepara para la detonación del arma inmovilizando el aerodeslizador y apagando todos los sistemas electrónicos del mismo. El hecho de apagar los sistemas electrónicos y la propia nave tiene una función doble. Por un lado, evitar ser vistos por los centinelas y así no tener que utilizar el arma, considerada último recurso de defensa.



Figura 41: Interruptor que activa el PEM.

Por otro lado, evitar dañar los dispositivos electrónicos del propio aerodeslizador o reducir su efecto. Respecto al hecho de apagar los dispositivos para evitar dañarlos hay parte de cierto y de falso. Mantener los sistemas apagados es uno de los consejos que dan distintas organizaciones para reducir daños en los sistemas electrónicos, como por ejemplo se aconseja en un informe elaborado por el departamento de energía de Estados Unidos, Oak Ridge National Laboratory [33]. Sin embargo, manteniéndolos apagados solo nos aseguramos de reducir el efecto del PEM³¹, pero no podemos asegurarnos de que un dispositivo solo sea vulnerable cuando está operativo.

En esta misma película, vuelve a recurrirse casi al final de la misma al uso del PEM para poder huir de los centinelas. Sin embargo, en este caso sí proceden al uso del arma. Un detalle que puede observarse en la película, es que los personajes se adelantan de manera correcta a los posibles efectos del PEM. En este caso, esperan a que Neo regrese de Matrix para poder detonar el arma, ya que como consecuencia del pulso la máquina que mantiene conectado a Neo con la realidad podría estropearse y perder así la conexión dejándole encerrado en el mundo virtual.

³¹En la traducción al español utilizan el término 'PEM' para referirse a lo que durante el documento hemos nombrado como 'EMP'.



Figura 42: Escena de la detonación del PEM.

En la figura 42 puede apreciarse un fotograma de la película en el que se ha procedido a la detonación del PEM. Inmediatamente posterior a la activación del interruptor se aprecia la expansión de la onda generada en el pulso a una velocidad lo suficientemente lenta como para ver los efectos que produce en las máquinas de manera secuencial. Aparte de este efecto secuencial que ya se ha visto y analizado en otros ejemplos, destaca la emisión de un espectro perfectamente visible para el espectador.

Como se mencionó en el apartado (2.2) en la generación típica de un pulso, el rango de frecuencias tiene un límite superior que depende de la fuente que lo genere. Este límite suele encontrarse en el rango de microondas ($3 - 30$)GHz, lo que significa que el rango relativo al espectro visible ($\nu \sim 300$ THz) estaría excluido, por lo que el proceso de emisión de la energía EM en el pulso debería ser un proceso inapreciable a la vista. Como también se mencionó, una posible explicación de la visualización de este fenómeno se asocia a la fuente del pulso. El PEM puede ser en muchos casos una de las consecuencias de otros procesos que sí pueden ser visibles, por ejemplo un rayo es un proceso cuya descarga eléctrica es perfectamente visible y produce un pulso, LEMP. De esta manera, no hay que confundir la fuente que produce el pulso (visible) con el pulso en sí mismo (no visible).

De este modo, en esta película podríamos asociar la visualización del pulso a la fuente, de origen desconocido, que lo produce. Según lo que puede observarse podría pensarse que el pulso está generado por una fuente capaz de producir una descarga electrostática (ESD), fenómeno al que le acompaña la generación de un pulso electromagnético. La descarga electrostática es un fenómeno en el que se genera una corriente eléctrica repentina y momentáneamente entre dos objetos con distinto potencial eléctrico, produciéndose efectos visibles como una chispa o el efecto corona³².

En la última entrega de la trilogía (2003), vuelve a utilizarse esta arma para combatir a las máquinas. De nuevo ante el uso del arma se menciona correctamente una de las consecuencias del PEM y por qué debe considerarse como un último recurso. Al final de la película activan el interruptor acabando así con las máquinas que habían entrado en Sión (ciudad de la resistencia) y con los sistemas de seguridad de la propia ciudad, consecuencia que había anticipado el jefe de la resistencia.

Nos quitarían más que eso, reventarían nuestros sistemas de defensa. Si disparan un IE perderemos el muelle -. Jefe de la Resistencia

Cabe destacar que en esta tercera entrega a la hora de referirse al PEM (pulso electromagnético), cambian la traducción llamándolo ahora 'IE' (impulso electromagnético).

³²Fenómeno que produce la ionización de un fluido que rodea a un conductor cargado, generándose un halo luminoso con forma de corona debido a que los conductores suelen ser de sección circular.

8.3. Agents of S.H.I.E.L.D.

En esta serie televisiva de Estados Unidos basada en los cómics de Marvel, podemos observar en el tercer capítulo de su cuarta temporada (2016 – 2017) un claro ejemplo de armas no nucleares capaces de producir pulsos electromagnéticos en distintas ciudades del mundo. La particularidad de este ejemplo es que la fuente que genera el EMP emite pulsos cada 2 segundos de modo que no se puede restablecer cualquier dispositivo electrónico que se encuentre dentro del rango de acción del arma, incluyendo suministros eléctricos de ciudades enteras. De este modo se plantea un método para poder encontrar la fuente que está generando los continuos pulsos y así poder mantener el control de las ciudades.

En las primeras escenas donde se producen los apagones pueden observarse de nuevo un tema que venimos analizando en varias ocasiones, los ya conocidos apagones secuenciales. En la ciudad de Los Ángeles una de las protagonistas de la serie menciona por primera vez la posibilidad de que los apagones estén producidos por dispositivos PEM, ya que como bien indica su compañera:

Cómo puede dejarte un apagón sin móvil.

A lo que ella responde que podría ser consecuencia de un PEM, explicando que se trata de una explosión de energía que interfiere en las señales electrónicas.



Figura 43: Extensión del PEM en 4 ciudades distintas.

Más adelante, una vez se ha concluido que los apagones son consecuencia de pulsos electromagnéticos³³, se decide localizar las fuentes de éstos para poder recuperar el control de las ciudades donde se están usando. Inicialmente se plantea localizarlos mediante dispositivos electrónicos de última generación (hipotéticamente blindados), pero debido a los continuos pulsos producidos por una avanzada tecnología, éstos quedan inoperativos. De esta forma, se dirigen a Miami con el fin de localizar la fuente del pulso. Debido a que los dispositivos electrónicos no funcionan, deciden localizar la fuente usando recursos caseros. Utilizaran para ello, brújulas hechas a partir de cubos de agua, corchos y agujas. Según el agente Fitz:

El PEM emite un pulso cada 2 segundos y durante ese momento se convierte en el norte magnético haciendo que tus agujas se desvíen unos grados en esa dirección. Basándome en cuanto se mueven cada vez, debería poder triangular el origen del PEM o al menos aproximarme bastante

La base de este método consiste en triangular la posición de la fuente a partir de las desviaciones producidas por los campos generados en estos pulsos.

³³Como puede apreciarse en la figura 43, apagones producidos en distintas ciudades tienen la misma extensión. Por lo que concluyen que la fuente debe ser un arma con tecnología PEM.

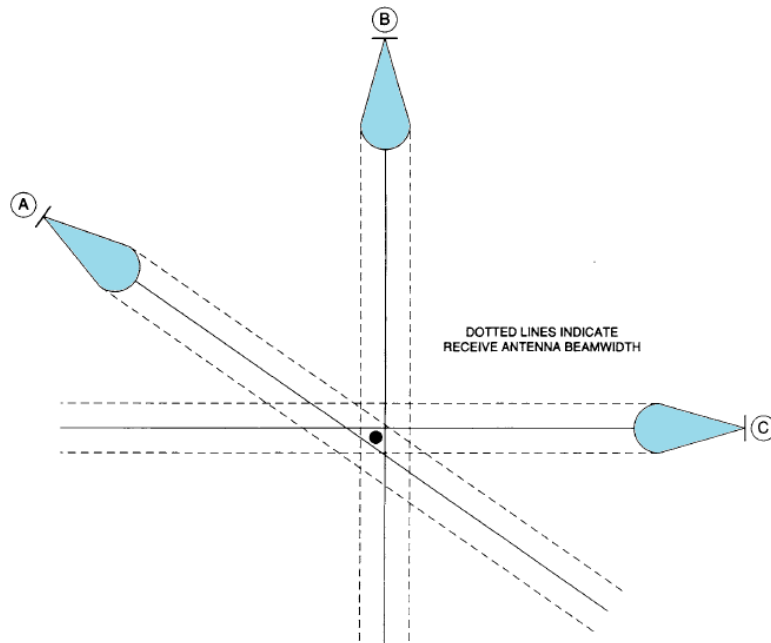


Figura 44: Método de triangulación a partir de 3 antenas direccionales.

La triangulación es un método matemático basado en triángulos que permite determinar la posición de un punto, usando exclusivamente medidas de ángulos³⁴. Este método es utilizado por ejemplo para hallar la posición de una persona cuando se ha perdido mediante una brújula, 3 referencias visuales y un mapa.

Sin embargo, en la situación en la que nos encontramos lo que se pretende determinar es la posición de la fuente de radiación electromagnética. En este caso, la técnica utilizada es la misma que la que se usa en técnicas de RDF (Radio Direction Finding). Este método consiste en localizar señales de radio a partir de dispositivos como antenas direccionales.

En la figura 44 puede apreciarse un esquema básico de este método. En principio podríamos utilizar dos dispositivos para estimar la localización de la fuente. Si por ejemplo usamos los dispositivos *A* y *B*, entonces la fuente se sitúa en una ubicación con un margen de error. Si en cambio incluimos un tercer dispositivo *C*, eliminamos la indeterminación obteniendo de manera más precisa la localización de la fuente (punto negro).

Estas antenas permiten medir la radiación del emisor indicando la dirección en la cual la potencia es máxima o mínima. De este modo, estas 3 direcciones en las cuales la radiación incidente es máxima, nos permite triangular la posición de la fuente.

De manera equivalente, en nuestro ejemplo se requieren 3 brújulas (3 dispositivos que actúen de ‘antenas’) para poder localizar el arma que emite los pulsos. En este caso, la dirección que nos permite triangular la posición, viene dada por el ángulo que se desvía la aguja debido al campo que emite la fuente. Para ello, en nuestro ejemplo deberíamos tener una distribución de las brújulas similar a la que se observa en la figura 44. Si en esta distribución situamos los tres dispositivos *A*, *B* y *C* cercanos entre ellos, entonces podemos entender que la localización de la fuente sea menos precisa. Esta situación se da en el capítulo, ya que los 3 personajes que dan medidas de estas desviaciones están situados relativamente cerca entre ellos como para cometer un error apreciable en la medida.

El campo magnético terrestre puede aproximarse como un dipolo magnético cuyo norte interactúa con la aguja imantada de una brújula, haciendo que ésta se desvíe en la dirección que indica este norte³⁵. Del mismo modo, el campo magnético generado en el pulso (puede aproximarse como una señal dipolar) desviará la aguja unos grados respecto

³⁴Cuando se determina a partir de distancias se conoce como trilateración.

³⁵Realmente el norte que indica la brújula viene marcado por la dirección del sur magnético. Sin embargo, por convenio este **Sur** es lo que habitualmente se conoce como **Norte** magnético.

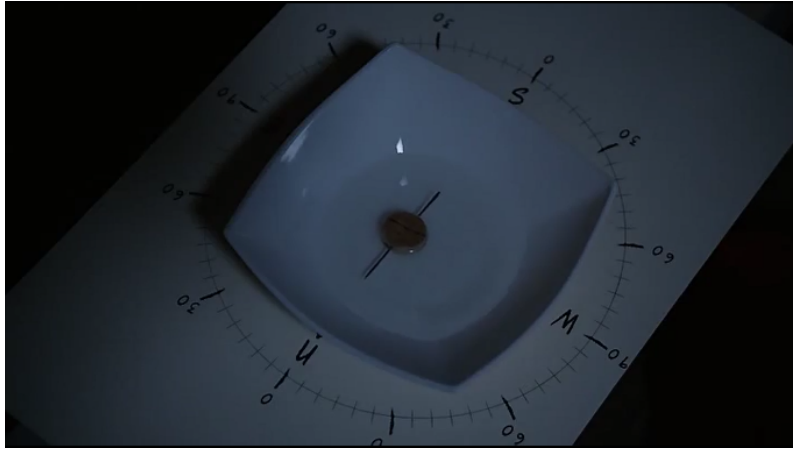


Figura 45: Brújulas caseras fabricadas para triangular la posición de la fuente.

al norte geomagnético. Por lo tanto, como bien indica Fittz, la medida de estos ángulos nos permitirá triangular la posición del arma.

Energía necesaria para desviar la aguja:

En esta parte haremos una estimación sencilla del orden de magnitud de la energía necesaria liberada en el pulso para desviar la aguja de la brújula. Este cálculo es simplemente para hacernos una idea de los órdenes de magnitud que están en juego, pero en ningún caso es un cálculo aproximado a una situación real, ya que tendríamos que tener en cuenta otras consideraciones.

Para esto tenemos que tener en cuenta dos consideraciones. La primera de ellas es que el campo magnético generado en el pulso debe ser considerablemente mayor que el de la tierra para poder así aproximar el nuevo norte magnético al creado por este campo. Si el campo del pulso es del mismo orden de magnitud que el de la tierra, entonces la desviación de la brújula se debe a un norte magnético combinación lineal de los dos campos. De modo, que el método utilizado nos aportaría una localización distinta a la real.

El campo magnético terrestre depende, entre otras cosas, de la latitud. Los valores típicos oscilan entre $(20 - 60)\mu T$, de este modo podemos suponer un campo geomagnético aproximadamente igual a $40\mu T$ para la ciudad de Miami³⁶. Como se requiere un campo muy superior a éste, podemos suponer un campo cien veces más intenso. De modo que $B = 4mT$.

La segunda consideración que tenemos que tener en cuenta es que la duración del pulso tiene que ser superior al tiempo de respuesta de la aguja de la brújula. Si el campo magnético producido en el pulso tiene aplicación durante un tiempo inferior al tiempo de respuesta, entonces la aguja no debería desplazarse. Podemos suponer un tiempo de respuesta igual a $t_r = 0,1s$, valor basado en [34].

Por otro lado, la duración del pulso debe ser superior al tiempo mínimo de percepción del ojo humano para apreciar el movimiento de la aguja. Es decir, el campo magnético tiene que durar lo suficiente para que el ojo sea capaz de ver la desviación de la aguja y poder anotar este valor. Casualmente este tiempo se encuentra en el mismo orden de magnitud que t_r ³⁷. Por lo tanto, si el tiempo de duración del pulso es inferior a la décima de segundo, entonces ni la aguja se desviaría, ni en caso de hacerlo el ojo humano podría

³⁶Usando el modelo más reciente (World Magnetic Moment) se obtiene un valor de $43,9\mu T$ para esta ciudad a nivel de mar. Dato recogido de NOAA: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/>.

³⁷El ser humano puede procesar de 10 a 12 imágenes separadas por segundo, percibiéndolas individualmente. Si se excede este número la percibirá como movimiento. En el cine se utilizaban 24 FPS.

https://en.wikipedia.org/wiki/Frame_rate

apreciar dicho movimiento.

Por lo tanto, podemos concluir que los pulsos (1 cada 2 segundos) tienen que tener duraciones de varias décimas de segundo para poder realizar los cálculos que se presentan en la serie. Normalmente, las duraciones de los pulsos electromagnéticos suelen ser del orden de centenas de nanosegundos en el caso de explosiones nucleares, y de decenas de microsegundos en el caso de rayos. Sin embargo, podríamos considerar factibles estos números, ya que como se indica en el episodio, la tecnología detrás de estos pulsos es muy avanzada y desconocida y podría de algún modo tener estas características.

De esta manera, haremos una estimación de la energía necesaria para desviar la aguja basándonos en estos datos.

Para el cálculo de la energía haremos uso del vector de Poynting y la potencia total irradiada definidas en el apartado (2.1). Recordemos que:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

Haciendo uso de la aproximación de campo lejano, tendremos que:

$$|\vec{S}| = Z_0 \cdot H^2 = (377\Omega) \cdot \left[\frac{(4mT)}{\mu_0} \right]^2 \approx 3,8GW/m^2$$

Esta aproximación tiene validez cuando la distancia a la fuente es muy grande comparada con la longitud de onda de la radiación incidente. En esa situación la onda que se propaga puede considerarse como una onda transversal electromagnética propagándose en el vacío, cuyo valor de la impedancia viene dado por: $Z_0 = |\vec{E}|/|\vec{H}| = 377\Omega$

Recordando que $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}(T \cdot m/A)$ puede llegarse fácilmente al resultado de arriba.

Para el cálculo de la potencia supondremos isotropía en la fuente y un frente esférico. De modo que:

$$\mathcal{P} = \oint \langle \vec{S} \rangle \cdot d\vec{A} = (3,8GW/m^2) \cdot 4\pi r^2 \sim 10^{16}W$$

Donde la integral se ha realizado a lo largo de una superficie esférica y a una distancia de 500 metros de la fuente.

De esta manera, la energía liberada en el pulso necesaria para desviar la aguja de la brújula un tiempo suficiente para su apreciación es:

$$\mathcal{E} = \mathcal{P} \cdot t_r \sim 10^{15}J$$

Podemos comparar esta energía con la liberada en las explosiones nucleares. En una explosión de este tipo la potencia se mide en función de megatonnes, siendo $1Mt$ un millón de toneladas cuya equivalencia en energía corresponde a $4,184 \cdot 10^{15}J$ ³⁸.

En la primera explosión nuclear, evento Trinity, la potencia de la bomba fue de $20Kt$ que equivalen aproximadamente a $10^{14}J$, lo que significaría que si toda la energía liberada en la explosión se empleara en producir un EMP, entonces para desviar la aguja de la brújula en este problema se requeriría una energía equivalente a 10 explosiones nucleares de este tipo.

Sin embargo, en una explosión nuclear la energía se emplea en otros procesos. Además, el pulso electromagnético generado en esta serie tiene como fuente un dispositivo fabricado exclusivamente para producir este fenómeno. Por lo tanto, esta comparación nos sirve para hacernos una idea de la energía liberada, pero no para concluir si es viable o no. Ya que como hemos mencionado, desconocemos la naturaleza de la fuente.

³⁸Mismo orden de magnitud que la necesaria en este ejemplo. Por ejemplo, en la explosión nuclear más potente hasta la fecha, conocida como bomba del Zar, se liberó una energía de $50Mt$.

8.4. Godzilla (2014)

En esta película de ficción dirigida por Gareth Edwards en 2014, aparece de manera muy recurrente el uso de pulsos electromagnéticos por parte de una criatura contra la que Godzilla tendrá que luchar para restaurar el orden en la tierra. En esta última versión de la serie filmica, un monstruo conocido como MUTO (Massive Unidentified Terrestrial Organism) es capaz de producir pulsos y así desactivar todos los dispositivos electrónicos que se encuentre en su rango de acción.

Aun tratándose de una película de ‘ciencia’-ficción donde sin lugar a duda la ficción se sobrepone a la realidad, podemos hacer un análisis de ciertos aspectos relacionados con los pulsos desde un punto de vista científico. Lo primero que podemos analizar cuando oímos hablar de estos pulsos producidos por el MUTO es el origen o una posible explicación en la generación de éstos. Respecto a este tema hay mucha especulación y poca explicación. Durante el curso de la película se menciona que este monstruo basa su fuente de alimentación en elementos radiactivos, de manera que una vez se ha completado su alimentación puede utilizar estos recursos de modo que pisando con sus extremidades fuertemente contra el suelo es capaz de producir una onda expansiva mecánica acompañada de una onda EM que interfiere con los sistemas electrónicos.

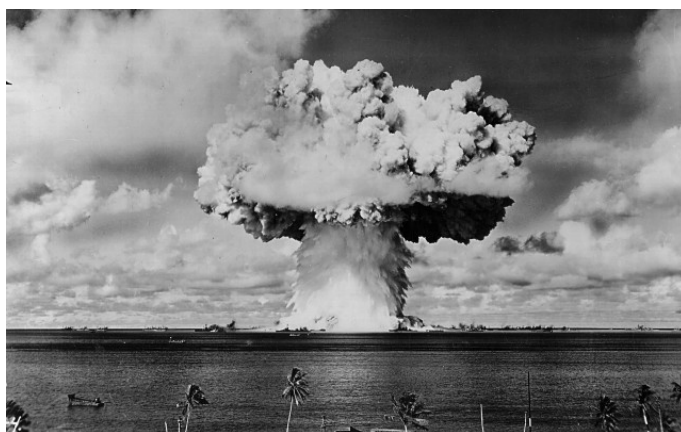


Figura 46: Prueba nuclear detonada en el atolón Bikini, islas Marshall.

La película tiene muchas referencias relativas al uso de armas nucleares³⁹ y sabemos que el uso de éstas pueden provocar pulsos EM como una de sus consecuencias. En este sentido puede inferirse una relación entre la radiactividad emitida en una explosión nuclear y la producción del pulso a partir de la radiación con la que se alimenta el MUTO. Podría hacerse una comparación con el pulso producido por una explosión nuclear a nivel superficial como se explicó en (4.4.2) donde una liberación de rayos gamma por parte de la bomba hacia que se ionizara el aire sobre la superficie estableciéndose una diferencia de conductividades que finalmente era la responsable del pulso. Sin embargo, suponer que el pulso generado por el monstruo es comparable con el producido por una explosión nuclear, conlleva mucha especulación y podemos afirmar en este caso que se trata de un aspecto puramente de ficción.

Apartando el tema de la fuente del pulso, podemos pasar a analizar las consecuencias inmediatas tras la generación de estos.

Eso no es un fallo en el transformador, es un pulso electromagnético. Afecta a todos los sistemas eléctricos en kilómetros a la redonda -. Joe Brody

³⁹Al inicio de la película, puede observarse imágenes reales de las primeras pruebas nucleares, figura 46. Más tarde, indican que estas pruebas de los años 50 llevadas a cabo en las islas Marshall en realidad eran intentos de acabar con Godzilla.

Comenta el padre del protagonista, físico nuclear e ingeniero jefe de la central nuclear de Janjira, Japón. Respecto a las consecuencias del EMP, podemos observar de nuevo el tema analizado en otros ejemplos de los apagones secuenciales. Este caso es más vistoso que otros porque puede verse claramente la onda expansiva generada en el pulso y como va alcanzando uno a uno los sistemas electrónicos que se encuentra en su camino. En el proceso de formación del pulso, al pisar fuertemente el suelo se genera una onda sísmica que a lo largo de la película se compara con la producida en un terremoto (en determinadas ocasiones pueden observarse sismogramas).

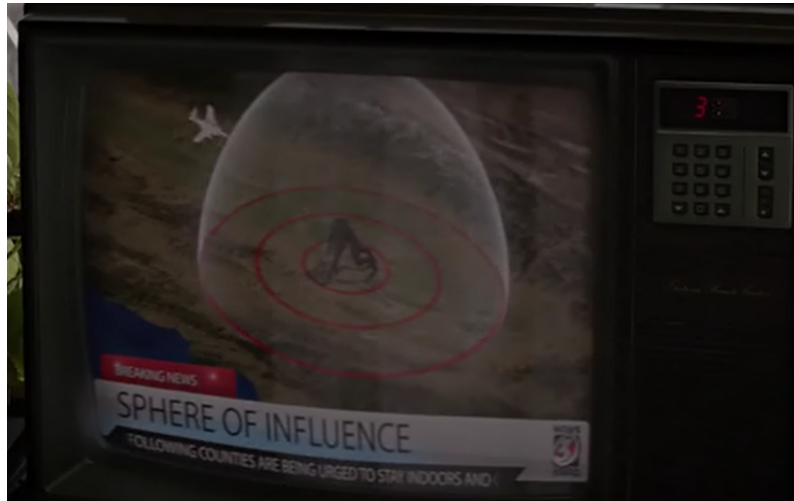


Figura 47: Rango de acción del EMP producido por el MUTO.

Lo realmente llamativo aquí, es considerar que esta onda sísmica y la onda EM tengan la misma velocidad de propagación, de ahí a que los apagones sucedan de manera secuencial según se propaga esta primera. Aparte de que una onda EM no requiere de un medio material para propagarse, la velocidad de estas ondas son significativamente superiores a las ondas mecánicas. En la figura 47 puede apreciarse un esquema representativo del pulso electromagnético y el rango de acción o ‘esfera de influencia’. Cualquier dispositivo electrónico que se encuentre dentro de esa cúpula, como un avión, se desactivará como consecuencia del pulso.

Ya casi al final de la película, podemos observar otro pulso electromagnético, pero esta vez producido desde el aire a una elevada altitud. Siguiendo la comparación que inicialmente hacíamos con las explosiones nucleares, ahora podría tener más sentido comparar el proceso de generación del pulso con el producido en un HEMP, apartado (4.4.3). Si suponemos que el MUTO se encuentra en altitudes superiores a los 20Km , una liberación de energía por parte de éste, podría interactuar con la atmósfera terrestre y el campo geomagnético dando lugar a radiación EM. La altura de vuelo a la que se genera, podría estimarse en función de la altura de vuelo de los aviones que caen cuando se produce el pulso. Algunos aviones pueden llegar a alcanzar estas altitudes, por ejemplo, el avión espía Lockheed SR-71 Blackbird alcanza una altura máxima de 26km .

8.5. La guerra de los mundos

En esta adaptación de la novela homónima de H.G. Wells dirigida por Steven Spielberg y protagonizada por Tom Cruise en 2005, puede verse los efectos producidos por pulsos electromagnéticos generados por una tecnología avanzada y desconocida por parte de los alienígenas que quieren invadir la tierra.

Inicialmente la película hace referencia a tormentas magnéticas que se suceden a lo largo de toda la tierra. Estas hipotéticas tormentas magnéticas tienen la particularidad de generar rayos que caen repetidamente en el mismo sitio, además de no provocar el sonido típico que viene acompañado en estas descargas, el trueno.

Tranquila, no caerá ahí otra vez. Porque los rayos no caen dos veces en el mismo sitio. . . No oigo los truenos.

Estas descargas con apariencias de rayos, en realidad son medios de transporte a través de los cuales los alienígenas bajan a la tierra. Además en este proceso son capaces de generar, de manera desconocida y sin explicación alguna, pulsos electromagnéticos capaces de desactivar todos los sistemas electrónicos y así acabar con las defensas de los ejércitos para poder conquistar la tierra.



Tras estas primeras escenas, podemos apreciar las primeras consecuencias de estos pulsos. Observamos así cómo las instalaciones eléctricas no funcionan, tampoco los móviles, relojes o cualquier dispositivo electrónico. Aunque realmente en la película no se mencione explícitamente el nombre 'pulso electromagnético', los efectos producidos en estas descargas nos indican que se tratan de éstos.

Como consecuencia de estos pulsos sobresale en la película el no funcionamiento de cualquier vehículo, incluyendo coches que posteriormente serán necesarios para la huida de los protagonistas. Respecto al tema de si los vehículos deberían dejar de funcionar como consecuencia de un pulso electromagnético es algo sobre lo que se ha especulado mucho. De este modo, instituciones como Oak Ridge National Laboratories [35] han elaborado informes donde desmantelan mitos como éste acerca de las consecuencias de un EMP, concluyendo que algunos vehículos podrían verse afectados, pero en ningún caso todos los vehículos deberían detenerse por completo. Este falso mito proviene de asociar los posibles fallos en los sistemas electrónicos de un coche con el fallo total del mismo.

Los coches están constituidos, en general, por carrocerías metálicas, ruedas de materiales muy aislantes e interiores no metálicos. Este sistema global tiene la particularidad de actuar como una jaula de Faraday⁴⁰, haciendo del coche un sistema blindado que impedirá en cierta medida el daño en los sistemas electrónicos [36]. Aun así, la presencia de posibles

⁴⁰Efecto por el cual el campo electromagnético en el interior de un conductor en equilibrio es nulo, anulando el efecto de los campos externos.

discontinuidades en el blindaje reducirá la efectividad del mismo, siendo una puerta de entrada a la radiación electromagnética, apartado (7). Otro modo de acoplamiento más directo de la radiación generada en un pulso puede ser la presencia de antenas o sistemas que actúen como tal. De esta manera, las antenas de un coche actuarían como método de entrada directa de la radiación EM.

Por último, destacar un fallo que llama bastante la atención. En la película, cuando se tiene por primera vez contacto con los alienígenas, puede apreciarse como los dispositivos electrónicos no funcionan, un hombre que intenta usar su teléfono móvil y pone cara extrañado al observar que no es capaz de llamar, otro que se acerca haciendo fotos con una cámara analógica, ...

Sin embargo, de repente un hombre empieza a grabar con una cámara digital la escena. De tal modo, que acaba filmándose la primera muerte de un ser humano a través de esta cámara, evidentemente completamente electrónica.



Figura 48: Cámara digital grabando la primera muerte.

Después de haberse tratado cuidadosamente todos los detalles y observar cómo ningún dispositivo electrónico funciona, llama mucho la atención este fallo que, sin duda alguna, se ha utilizado como recurso filmográfico.

8.6. Otros ejemplos

Finalmente, veamos una lista de otros ejemplos donde aparecen pulsos electromagnéticos que podemos encontrar en el cine, en series televisivas, libros e incluso videojuegos.

Este último apartado se plantea como una lista con distintas referencias sin entrar en tantos detalles como en los ejemplos anteriores, pero mencionando, brevemente, las características más relevantes.

Películas

A continuación, se presenta una lista de los ejemplos más representativos. Explicando de manera resumida qué se observa en estas películas.

1. GoldenEye

En la decimoséptima entrega de las películas de James Bond estrenada en 1995, como parte del argumento de la película se detona un pulso electromagnético (HEMP) en el espacio⁴¹, produciendo daños en los sistemas electrónicos.

Como consecuencia del pulso, entre otros efectos, los satélites británicos se desactivan. En la misma película también se hace referencia a sistemas blindados contra posibles ataques de EMP, como helicópteros militares y otros equipos.

2. Broken Arrow

En esta película de 1996 dirigida por John Woo y protagonizada por John Travolta, se detona una explosión nuclear bajo tierra (NEMP superficial) en una mina de cobre abandonada. Como consecuencia de la explosión se produce un pulso capaz de interferir en los sistemas electrónicos e incluso derribar un helicóptero que sobrevolaba cerca de la superficie.

Prediciendo los efectos que pueden producirse con la explosión, Travolta apaga el vehículo en el que se encuentra para reducir los efectos del pulso. Posterior a la destrucción del helicóptero, explica en qué consiste el EMP y sus consecuencias.

3. Batman: The Dark Knight Rises

En esta película del 2012 dirigida por Christopher Nolan, podemos ver un ejemplo de un dispositivo no nuclear (NNEMP) capaz de generar pulsos electromagnéticos. Durante una de las típicas escenas de persecución de estas películas, Batman activa un dispositivo capaz de inutilizar una de las motos que le están persiguiendo, consiguiendo de este modo huir de la situación.

4. Captain America: Civil War

En la última película de la trilogía Capitán América, estrenada en 2016, podemos observar los efectos de la detonación de una explosión que genera un EMP.

En este caso, Zemo detona el EMP en la planta que suministra la energía de la prisión alemana donde está detenido Bucky. Cuando se produce la explosión, los sistemas de seguridad de la prisión se desactivan durante unos momentos.

5. Independence Day: Resurgence

En esta película del 2016, los alienígenas generan una especie de pulso electromagnético cuando las naves terrícolas intentan atacar su nave principal. Este pulso se detona para desactivar sus armas militares, tendiéndoles una trampa.

El proceso de emisión de la radiación electromagnética es muy parecido al que se podía visualizar en Matrix. Es decir, la expansión de la onda es muy lenta y además viene acompañada por un destello colorido. En este caso de color verde.

⁴¹El proceso de formación del pulso puede compararse con el de la figura 14.

6. Revolt

En esta película británica de 2017, para defenderse de la invasión alienígena, los terrícolas son capaces de detonar EMP para desactivar los sistemas electrónicos de las naves alienígenas. Igual que en el ejemplo anterior, la expansión de la onda es de manera secuencial y acompañada de un destello colorido.

Series

Existen muchos ejemplos de series televisivas donde se utilizan, como parte del argumento, armas que producen pulsos electromagnéticos.

El abanico de posibilidades es muy amplio. Desde ataques nucleares realizados por terroristas capaces de afectar los sistemas de comunicaciones de países enteros (*Dark Angel*), hasta pulsos electromagnéticos generados por meteoritos (*Terra Nova*), pasando por dispositivos diseñados intencionadamente para generar pulsos como se trató en 5 y luego se vio en el ejemplo 8.3.

A continuación, se presenta una lista de los ejemplos más significativos que hemos encontrado:

1. *Dark Angel*
2. *Terra Nova*
3. *Jericho*
4. *MacGyver*: “Easy Target”
5. *Star Trek*: “Deep Space Nine”
6. *Falling Skies*
7. *Doctor Who*

Literatura

En la literatura también podemos encontrar distintos ejemplos de pulsos electromagnéticos. Ya sea en novelas, cómics e incluso mangas.

Quizás los casos más significativos, y también los más conocidos, puedan encontrarse en los cómics de superhéroes de Marvel. Hablando de estos superhéroes (o supervillanos) encontramos en los cómics de *X-men* a un conocido como ‘Magneto’, capaz de producir pulsos EM a su antojo. Teniendo en cuenta la de posibilidades que ofrece Magneto a la hora de manejar cualquier fenómeno en relación con el magnetismo, podría esperarse también que pudiera generar EMP. También podemos encontrar a ‘Tormenta’, capaz de generar pulsos al provocar rayos (LEMP).

Respecto al EMP en el ámbito del manga, el uso de pulsos electromagnéticos suele asociarse a explosiones nucleares que se detonan sobre países como Japón dejando al país entero en una especie de era oscura. Ejemplos de este tipo pueden encontrarse en *Highschool of the Dead* y *A certain magical index*.

Finalmente, respecto a la aparición de pulsos electromagnéticos en los libros, mencionar que éstos aparecen principalmente en las novelas de ciencia ficción. De este modo, podemos mencionar novelas de este género como *Neuromante* y autores como Charles Sheffield y Orson Scott Card.

Videojuegos

En el mundo de los videojuegos, el uso de armas nucleares y dispositivos no nucleares capaces de producir pulsos EM, es un tema muy recurrente en los juegos bélicos.

Por ejemplo, en los juegos de guerra como *Call of Duty* es muy habitual encontrar aviones que detonan EMP para acabar con los sistemas electrónicos de los enemigos, como pueden ser radares, sistemas de radio, mirillas electrónicas, . . .

Estos pulsos suelen tener un área de extensión bastante amplia y además no vienen acompañados de destellos ni apagones secuenciales.

Por otro lado, existen otros tipos de juegos como *Rainbow Six Siege* donde se utilizan dispositivos no nucleares (NNEMP) usados como granadas de mano, capaces de generar los mismos efectos pero con rangos de extensión muy limitados. Además, en estos casos, la detonación del pulso suele venir acompañada de un destello colorido tras el cual se produce el apagón.

A continuación, se presenta una lista con los videojuegos más representativos donde pueden encontrarse dispositivos y armas capaces de producir pulsos EM:

1. *Fallout*
2. *Halo*
3. *Call of duty: Modern warfare*
4. *Star Trek: Deep Space Nine*
5. *Overwatch*
6. *Infamous*
7. *Rainbow Six Siege*
8. *Starcraft*

Las listas mostradas con anterioridad son selecciones que se han elaborado siguiendo criterios de relevancia y pragmatismo. Parte de estos ejemplos pueden encontrarse en listas elaboradas como las que se encuentran en [37] y [38], donde además pueden encontrarse otros ejemplos.

9. Conclusiones

Este trabajo tiene dos grandes partes bien diferenciadas, una de revisión y explicación teórica del fenómeno asociado al pulso electromagnético y otra de aplicación de este estudio al análisis de distintos recursos filmográficos.

Tras una breve introducción y presentación de las características y definiciones generales relativas a los pulsos electromagnéticos. En la primera parte, se han realizado los siguientes trabajos:

- Contextualización histórica del fenómeno. Recopilando los hitos más significativos ordenados cronológicamente. Al final de esta sección, se ha elaborado un trabajo de selección de información asociada al pulso electromagnético en el continente europeo.
- Explicación detallada de las distintas fuentes capaces de generar pulsos electromagnéticos y de los procesos físicos que tienen lugar. Este trabajo se ha dividido en tres partes:
 - Pulsos nucleares: desarrollando una teoría detallada y complementada con anexos matemáticos para explicar y entender los procesos físicos que dan lugar a la producción del pulso.
 - Pulsos no nucleares: explicando las distintas fuentes, naturales o humanas, de origen no nuclear capaces de provocar tales pulsos.
 - Pulso producido por un rayo: explicación del fenómeno básico en la generación del pulso, llevando a cabo un trabajo de comparación entre el pulso generado en una explosión nuclear y el generado en esta situación

Respecto a esta parte del trabajo, cabe destacar que no existe una bibliografía específica que complete el desarrollo teórico aquí explicado. De esta manera, se ha realizado un trabajo de búsqueda y recopilación bibliográfica, encontrándonos con la dificultad que presenta encontrar dicha información debido a que en determinadas ocasiones ésta se encuentra censurada por sus fines bélicos.

- Introducción y desarrollo de los principios básicos de blindajes electrónicos, con el objetivo final de plantear una posible solución frente a un hipotético ataque de un EMP. En esta parte final, se ha realizado una simulación con un software de electromagnetismo, CST STUDIO, donde se ha simulado un pulso electromagnético que alcanza un sistema blindado que presenta una discontinuidad, como puede ser una abertura.

Una vez adquirido los conocimientos básicos asociados al EMP, se ha procedido a realizar un estudio analítico de distintos ejemplos donde pueden observarse este fenómeno. De esta forma, en esta segunda parte, se han realizado los siguientes trabajos:

- Búsqueda de recursos cinematográficos donde aparece de manera directa o indirecta el pulso EM y sus efectos. En esta parte, además de encontrar ejemplos en el cine, se han buscado otros ejemplos que pueden darse en series televisivas, videojuegos e incluso en la literatura. De esta manera, se ha presentado dos referencias bibliográficas adicionales donde el lector puede encontrar otros recursos no mencionados en el trabajo.
- Finalmente, se ha realizado un análisis crítico de los ejemplos más representativos bajo la visión exhaustiva que nos ofrece la física. De este modo, se han analizado distintos ejemplos en detalle, corrigiendo los errores cometidos y destacando los aciertos.

Antes de diferenciar entre la fase ondulatoria y la de difusión, presentaremos las ecuaciones generales que nos permitirán llegar a los resultado a los que se llegaron en 4.4.2. Sean las ecuaciones:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (7)$$

$$\nabla \cdot J_t + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

Ecuaciones escritas en el sistema internacional⁴². Además, como puede observarse solo tendremos en cuenta las ecuaciones de Maxwell que nos aportan información sobre cómo evolucionan los campos. Ya que las otras dos ecuaciones, no nos dan esta evolución temporal y sus resultados son triviales debido a que, evidentemente, tanto ρ como B son inicialmente nulos. En la ecuación de continuidad cuando escribimos J_t nos referimos a la suma de la corriente de conducción y la corriente Compton.

Debido a la simetría esférica del problema, a la hora de resolver el problema haremos uso de las coordenadas esféricas.

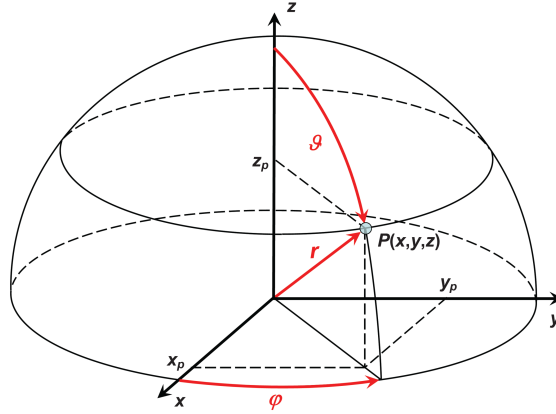


Figura 49: Coordenadas esféricas.

Como se mencionó en 4.4.2, por un lado, tendremos una componente radial de la corriente que producirá una componente eléctrica también radial. Por otro lado, tendremos una componente transversal, dicha componente tendrá dirección polar. Debido a esta componente polar de la corriente, se producirá una componente azimutal de campo magnético, campo de inducción magnético debido a la ley de Biot y Savart. A su vez, tendremos otra componente polar de campo eléctrico. Luego, las componentes eléctricas y magnéticas serán del tipo (E_r, E_θ, B_ϕ) .

Luego (6) y (7) se transforman en:

⁴²Podría escribirse en el sistema cesagesimal, CGS. En dicho sistema cambia la unidad de carga y aparece el factor 4π en las ecuaciones de Maxwell. Sin embargo, no aparece en los campos y tiene la ventaja de que el campo eléctrico y magnético tienen la misma dimensión y son iguales para una onda plana en el vacío.

$$\frac{\partial B_\phi}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rE_\theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} E_r \quad (9)$$

$$\frac{\partial E_\theta}{\partial t} + \sigma E_\theta + J_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rB_\phi) \quad (10)$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \sigma E_r + J_r = \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta \cdot B_\phi) \quad (11)$$

Estas son las ecuaciones de Maxwell en aire. En tierra tendríamos que multiplicar a los términos de la izquierda de las dos últimas ecuaciones por la permitividad relativa de la tierra, ϵ_g .

Para simplificar y tener una mejor comprensión de estas ecuaciones, vamos a introducir las siguientes magnitudes. Introducimos el tiempo de retardo (en unidades de longitud) y los campos transversales F y G, relativos a ondas salientes y entrantes respectivamente.

$$\begin{cases} \tau = c \cdot t - r \\ F = r (E_\theta + B_\phi) \\ G = r (E_\theta - B_\phi) \end{cases}$$

Sustituyendo estos cambios de variable en (9, 10, 11), llegamos a:

$$\frac{\partial F}{\partial r} + \frac{\sigma}{2} F = -r \cdot J_\theta + \frac{\partial E_r}{\partial \theta} - \frac{\sigma}{2} G \quad (12)$$

$$c \cdot \frac{\partial G}{\partial \tau} + \frac{\sigma}{4} G = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \frac{\partial G}{\partial r} - r J_\theta - \frac{\partial E_r}{\partial \theta} - \frac{\sigma}{2} F \right] \quad (13)$$

$$c \cdot \frac{\partial E_r}{\partial \tau} + \sigma E_r + J_r = \frac{1}{2r^2 \cdot \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} [\sin \theta \cdot (F - G)] \quad (14)$$

Para hallar las soluciones a estas ecuaciones, llegado este punto distinguiremos entre la fase ondulatoria y la de difusión para aplicar sus correspondientes aproximaciones.

1. Fase ondulatoria

Para tiempos suficientemente pequeños la corriente de conducción puede despreciarse, también la corriente de retorno con componente polar, J_θ .

$$\text{Aproximaciones} \begin{cases} \sigma \vec{E} \ll \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ J_\theta \approx 0 \\ G \approx 0 \end{cases}$$

La última aproximación se debe a que F se integra en r y G en τ , de lo que podemos inferir que:

$$\text{Órdenes de magnitud} \begin{cases} \int d\tau \rightarrow c \cdot t = 3,10^8 \text{ m/s} \cdot 10 \text{ ns} \sim m \\ \int dr \rightarrow 100 \text{ m} \end{cases}$$

Por lo que G es mucho más pequeño y puede despreciarse frente a F. Por lo tanto, utilizando estas aproximaciones en (12) y (14) llegaremos a:

$$\frac{\partial F}{\partial r} = -\frac{\sigma}{2} F + \frac{\partial E_r}{\partial \theta} \quad (15)$$

$$c \cdot \frac{\partial E_r}{\partial \tau} = -J_r + \frac{1}{2r^2} \frac{\partial F}{\partial \theta} \quad (16)$$

La ecuación (16) se ha obtenido de (14) haciendo $\theta = \pi/2$. Lo que significa que nos situamos sobre la superficie terrestre de acuerdo al problema y a las coordenadas que pueden apreciarse en la figura 49.

Llegados a este punto, tenemos que hacer una distinción en el valor de la conductividad para llegar a las 2 ecuaciones diferenciales que se presentaron en 4.4.3.

De acuerdo a Bergen R. Suydam [10], la fase ondulatoria se divide en dos partes según el valor de σ sea superior o inferior a $(2\pi\lambda_a)^{-1}$.

a) Si $\sigma < \frac{1}{2\pi\lambda_a}$

En este caso podemos despreciar el término σF de (15). Si en esta ecuación derivamos respecto a r :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial F}{\partial r} = \frac{\partial E_r}{\partial \theta} \right) \Rightarrow \frac{\partial^2 F}{\partial \tau \partial r} = \frac{\partial^2 E_r}{\partial \tau \partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial E_r}{\partial \tau} \right)$$

Si ahora tenemos en cuenta (16), entonces:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial E_r}{\partial \tau} \right) = -\frac{1}{c} \frac{\partial J_r}{\partial \theta} + \frac{1}{2r^2 c} \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2}$$

Finalmente,

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial F}{\partial r} \right) = -\frac{1}{c} \frac{\partial J_r}{\partial \theta} + \frac{1}{2r^2 c} \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \quad (17)$$

El primer término de la derecha, nos indica el origen de fuente del campo transversal F , dicho origen se encuentra en la superficie terrestre, ya que J_r tiende hacia cero según va desde el aire a la superficie. Debido a la linealidad de la ecuación, si la densidad de corriente radial crece exponencialmente a razón de $e^{\alpha r/c}$, también lo hará F (también E_r). Entonces la ecuación (17) se transforma en:

$$\left[\frac{\partial F}{\partial r} = -\frac{1}{\alpha} \frac{\partial J_r}{\partial \theta} + \frac{1}{2\alpha r^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \right] \quad (18)$$

Que es la ecuación que aparece en el apartado (4.4.2) donde ya se hizo su interpretación.

b) Si $\sigma > \frac{1}{2\pi\lambda_a}$

En este caso no podemos despreciar el término σF de (15), pero sí podemos despreciar $\frac{\partial F}{\partial r}$. Entonces la ecuación (15) se transforma en:

$$F = \frac{2}{\sigma} \frac{\partial E_r}{\partial \theta} \quad (19)$$

Luego, la ecuación (14) se convierte finalmente en:

$$\left[\frac{\partial E_r}{\partial t} = -J_r + \frac{1}{\sigma r^2} \frac{\partial^2 E_r}{\partial \theta^2} \right] \quad (20)$$

Que es la segunda ecuación que aparece en el apartado (4.4.2) donde ya se hizo su interpretación.

2. Fase de Difusión

En esta fase, la superficie terrestre (o marítima) actúa como un medio conductor. Por lo que se puede despreciar la corriente de desplazamiento. Además,

$$\text{Aproximaciones} \begin{cases} \sigma \vec{E} \gg \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \longrightarrow \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \sim 0 \\ E_r \gg E_\theta \longrightarrow E_\theta \sim 0 \end{cases}$$

De modo que las ecuaciones (9) y (11) se transforman en:

$$\frac{\partial B_\phi}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \theta} \quad (21)$$

$$E_r = -\frac{J_r}{\sigma} + \frac{1}{\sigma r} \frac{\partial B_\phi}{\partial \theta} \quad (22)$$

Donde de nuevo se ha usado que $\theta = \pi/2$. Si ahora hacemos $\partial E_r / \partial \theta$ y sustituimos en (21), entonces:

$$\frac{\partial B_\phi}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(-\frac{J_r}{\sigma} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{\sigma r} \frac{\partial B_\phi}{\partial \theta} \right) \quad (23)$$

Esta ecuación puede simplificarse si se introduce una nueva variable, $z = r \cdot (\frac{\pi}{2} - \theta)$. Teniendo en cuenta que ahora:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial r} \longrightarrow \frac{\partial z}{\partial r} \frac{\partial}{\partial z} = \left(\frac{\pi}{2} \right) \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial \theta} \longrightarrow \frac{\partial z}{\partial \theta} \frac{\partial}{\partial z} = -r \frac{\partial}{\partial z} \end{cases}$$

De este modo, llegamos a la ecuación de difusión cuya interpretación ya se dio:

$$\left[\frac{\partial B_\phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{J_r}{\sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\partial B_\phi}{\partial z} \right) \right] \quad (24)$$

Anexo II

Desarrollo Matemático HEMP

Según el eje de coordenadas elegido en (4.4.3) teníamos componentes (J_z, J_x) para la densidad de corriente y componentes (E_x, E_z, B_y) para los campos. De este modo las ecuaciones de Maxwell son:

$$\frac{\partial B_y}{\partial t} = -\frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (25)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\sigma E_x - J_x - \frac{\partial B_y}{\partial z} \quad (26)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = -\sigma E_z - J_z \quad (27)$$

Introduciendo el tiempo de retardo τ y los campos F y G como en el **Anexo I**.

$$\begin{cases} \tau = c \cdot t - z \\ F = (E_x + B_y) \\ G = (E_x - B_y) \end{cases}$$

Teniendo en cuenta que ahora al hacer las derivadas, usaremos:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \rightarrow c \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} \\ \frac{\partial}{\partial z} \rightarrow \frac{\partial}{\partial z} - c \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} \end{cases}$$

Aplicando estos cambios de variables y haciendo (25) + (26) y (25) - (26) llegamos sencillamente a las ecuaciones:

$$\frac{\partial F}{\partial z} + \frac{\sigma}{2} \cdot F = -J_x - \frac{\sigma}{2} \cdot G \quad (28)$$

$$c \cdot \frac{\partial G}{\partial \tau} + \frac{\sigma}{4} \cdot G = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial G}{\partial z} - J_x - \frac{\sigma}{2} \right] \quad (29)$$

$$c \cdot \frac{\partial E_z}{\partial \tau} = -\sigma E_z - J_z \quad (30)$$

La última de estas 3 ecuaciones es una ecuación desacoplada para el campo eléctrico radial. Y tiene exactamente el mismo significado que en los casos anteriores, apartados (4.4.2) y (4.4.1). Para tiempos suficientemente pequeños, la corriente de conducción se puede despreciar respecto a la de desplazamiento.

Pero, según avanza el tiempo, ésta va aumentando hasta alcanzar un valor límite conocido como campo de saturación, $E_{z_{sat}} = -\frac{J_z}{\sigma}$

Para la resolución de (28) despreciaremos, como en el anexo I, el término σG . Ya que, igual que antes basándonos en razonamientos de órdenes de magnitud, se tiene que G es muy pequeño comparado con F . De este modo,

$$\frac{\partial F}{\partial z} + \frac{\sigma}{2} \cdot F = -J_x \quad (31)$$

En (31) podemos apreciar como el origen del campo transversal F se debe a la fuente $-J_x$ y es atenuado por el término de conducción $\frac{\sigma}{2} \cdot F$. Por otro lado, para altitudes superiores a los 30 km, tanto J_x como σ aumentan con la altura a razón de $e^{z/H}$, siendo

H la altura atmosférica [10]. Por ello, para alturas suficientemente elevadas la atenuación es insignificante y el término de conducción σF puede despreciarse. Luego:

$$F(z, \tau) \approx - \int_{z_0}^z J_x(z', \tau) \cdot dz' \approx -H \cdot J_X(z, \tau) \quad (32)$$

Si, por el contrario, en (31) despreciamos el sumando $\partial F/\partial z$, entonces F alcanzará el valor de saturación $F_{sat} = -2J_x/\sigma$.

Cuando el valor de F alcanza dicho valor se alcanza la saturación, en este caso la saturación se alcanza más fácilmente que con el campo eléctrico radial. Esto se debe a que F se obtiene integrando J_x sobre z , y E_z integrando J_z sobre τ .

Si suponemos que $G \approx 0$, tendríamos entonces que $E_x \approx B_y$; $F \approx 2E_x$. Entonces la ecuación (28) podría escribirse como:

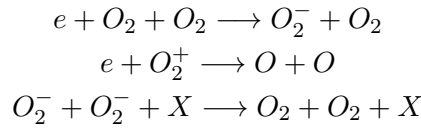
$$\left[2 \frac{\partial E_x}{\partial z} + \sigma E_x = -j_x \right] \quad (33)$$

Que es exactamente igual a la ecuación (2) que escribimos en los apartados teóricos donde se dio su interpretación.

Anexo III

Conductividad del aire

A partir de las siguientes reacciones:



Podemos hallar la densidad electrónica necesaria para el cálculo de la conductividad del aire. Las ecuaciones diferenciales que tienen en cuenta estos procesos son:

$$\frac{dN_e}{dt} = S - k_1 N_e - k_2 N_e N_+ \quad (34)$$

$$\frac{dN_+}{dt} = S - k_2 N_e N_+ - k_3 N_- N_+ \quad (35)$$

$$\frac{dN_-}{dt} = k_1 N_e - k_3 N_- N_+ \quad (36)$$

Siendo $S \sim e^{\alpha t}$ la tasa de producción de pares electrón-ion. Tendremos que la solución a la ecuación (34) será:

$$N_e = \frac{S}{(\alpha + K_1)}$$

Por lo que la conductividad

$$\sigma = e\mu_e N_e = e\mu_e \cdot \frac{S}{(\alpha + k_1)}$$

10. Bibliografía

- [1] Carl E Baum. Some Considerations Concerning Analytic EMP Criteria Waveforms. Technical Report October, 1976.
- [2] Carl E. Baum. From the Electromagnetic Pulse to High-Power Electromagnetics. *Proceedings of the IEEE*, 1992.
- [3] Martin A. Uman et al. A comparison of lightning electromagnetic fields with the nuclear electromagnetic pulse in the frequency range $10^4 - 10^7$ Hz. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1982.
- [4] K. T. Bainbridge. Trinity Report LA-6300-H . *Los Alamos Scientific Laboratory*, May 1976.
- [5] Carl E Baum and Life Fellow. Reminiscences of High-Power Electromagnetics. 2007.
- [6] Michel Ianoz. A review of HEMP activities in Europe (1970-1995). *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*.
- [7] D. V. Giri and Carl E Baum. The Relationship Between NEMP Standards and Simulator Performance Specifications. 2009.
- [8] Johann Leandro Meier, Dalibón Bähler, and Eugenia Laura. Desintegración radiactiva. 2005.
- [9] D.R. Evans. *The Atomic Nucleus*. New York, 1955.
- [10] Conrad L. Longmire. On the Electromagnetic Pulse Produced by Nuclear Explosions. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1978.
- [11] Conrad L. Longmire and H.J. Longley. Improvements in the Treatment of Compton Current and Air Conductivity in EMP Problems. *Report DNA-3192T*, 1971.
- [12] K.S.H. Lee. EMP Interaction: Principles, Techniques and Reference Data. *AFWL-TR*, 1980.
- [13] Conrad L. Longmire. Close-In: E. M. Effects Lectures I through IX. *Report LAMS-3072*.
- [14] Conrad L. Longmire. Fifty Odd Years of EMP. *NBC Report*, pages 47–51.
- [15] W. J. Karzas and Richard Latter. The Electromagnetic Signal Due to the Interaction of Nuclear Explosions with the Earth’s Magnetic Field. *Journal of Geophysical Research*, 1962.
- [16] E. M. Effects Lectures X and XI. *Los Alamos Scientific Lab.*, April 1964.
- [17] Close-In: E. M. Effects Lectures X through XI. *Report LAMS-3073*.
- [18] W. J. Karzas and Richard Latter. Detection of the electromagnetic radiation from nuclear explosions in space. *Physical Review*, 1965.
- [19] Jerry Emanuelson Solar Storms. ‘futurescience.com. *Available at: <http://www.futurescience.com/emp/solar-storms.html>*. [Accessed: 20- Jun- 2017].
- [20] Solar EMP. *empactamerica.org. Available at: https://web.archive.org/web/20110726030320/http://www.empactamerica.org/solar_emp.php*, 2011. [Accessed: 21- Jun- 2017].

- [21] The grand aurorae borealis seen in Colombia in 1859. sciencedirect.com. *Available at:* <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117715006109>, 2016. [Accessed: 3- Jul- 2017].
- [22] Michael Abrams. Dawn of the E-Bomb. *IEEE Spectrum*, 2003.
- [23] Carlo Kopp. The Electromagnetic Bomb - a Weapon of Electrical Mass Destruction. 1996.
- [24] Stephen et Al. Younger. Scientific Collaborations Between Los Alamos and Arzamas-16 Using Explosive-Driven Flux Compression Generators. *Los Alamos Science Number*, 1996.
- [25] B. V. Alyokhin et al. Theoretical and Experimental Studies of Virtual Cathode Microwave Devices. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1994.
- [26] S. Close, P. Colestock, L. Cox, M. Kelley, and N. Lee. Electromagnetic pulses generated by meteoroid impacts on spacecraft. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010.
- [27] Edward F. Vance and Martin A. Uman. Differences Between Lightning and Nuclear Electromagnetic Pulse Interactions. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1988.
- [28] Henry W Ott. *Noise Reduction Techniques in Electronic*. New York, second edition, 1988.
- [29] Tim Williams. *EMC for Product Designers*. fourth edition.
- [30] Clayton R Paul. *Introduction to Electromagnetic Compatibility Second Edition*. New Jersey, second edition.
- [31] Neal Singer. Ocean’s Eleven Filmmakers ‘pinch’ Sandia Technology. *SANDIA Lab News*, 2015.
- [32] Washington State Department of Health. Electromagnetic Pulse, What is it and How is it Created. (September), 2003.
- [33] Oak Ridge National Laboratory. Electromagnetic Pulse : Effects on the U . S . Power Grid. 2010.
- [34] International Electrotechnical Commission. CISPR 16-1-1 2006. *IEC*, 2007.
- [35] Jerry Emanuelson EMP Myths. futurescience.com. *Available at:* <http://www.futurescience.com/emp/EMP-myths.html>, 2015. [Accessed: 5- Jul- 2017].
- [36] Cuando cae un rayo sobre un coche. circulaseguro.com. *Available at:* <http://www.circulaseguro.com/cuando-cae-un-rayo-sobre-el-coche/>, 2013. [Accessed: 5- Jul- 2017].
- [37] EMP. tvtropes.org. *Available at:* <http://tvtropes.org/pmwiki/pmwiki.php/Main/EMP>, 2017. [Accessed: 14- Jul- 2017].
- [38] Electromagnetic pulse in popular culture. wikipedia.org. *Available at:* https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_pulse_in_popular_culture, 2017. [Accessed: 22- Jun- 2017].