



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de dispositivos de EMP para ataques no letales e
inutilización de equipos electrónicos*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Andrés Pintos Carrillo

DIRECTORES: Miguel Rodelgo Lacruz

CURSO ACADÉMICO: 2018-2019

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de dispositivos de EMP para ataques no letales e
inutilización de equipos electrónicos*

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

En la actualidad, se están produciendo muchos avances en el campo de las armas EMP (Electromagnetic Pulse) o armas de pulso electromagnético. Los estudios comenzaron en la guerra fría con la detonación de bombas nucleares a gran altura. A día de hoy, estas armas podrían llegar a dejar el continente norteamericano entero sin electricidad. Las armas EMP son una manera barata de causar grandes daños materiales, sin dañar a las personas directamente, evitando así sanciones de la comunidad internacional. Debido a su enorme potencial, en este trabajo se realiza un estudio sobre las armas EMP. Más específicamente, se estudian los tipos de armas EMP que existen, sus efectos sobre la salud y los equipos electrónicos, la amenaza que suponen en estos momentos, la protección ante esta amenaza, y la cumplimiento de estas armas del Derecho Humanitario Internacional.

Además, se ha diseñado un pequeño montaje de laboratorio para comprobar experimentalmente los efectos de los pulsos electromagnéticos. Este montaje está basado en un generador de pulso de alto voltaje y un arco eléctrico. Como resultado se ha conseguido inutilizar una calculadora y un reloj digital.

PALABRAS CLAVE

EMP, pulso electromagnético, nuclear, amenaza, montaje, protección, vulnerabilidad, Convenios de Ginebra.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, y antes que diga nada, me gustaría dedicar este trabajo y mis 5 años en la Escuela a mi padre y a mi madre, Andrés Pintos Santiago y María Salud Carrillo Lacida, de los cuales no se puede estar más orgulloso. Los dos, aparte de darme los valores y pilares, que me han permitido soportar y sorpasar los momentos más complicados de mi vida, son la principal razón de que, a día de hoy, sea como soy, de lo cual no puedo estar más orgulloso.

Me gustaría empezar los agradecimientos con una cita: “Si quieres ir rápido camina sólo, pero si quieres llegar lejos ve acompañado.” Esta ha sido la filosofía de este trabajo. Desde el primer momento, me intenté poner en contacto con toda la gente que pude, puesto que desde mi humildad, sé que no soy el mayor experto en los temas que trato en este TFG. Dicho esto me gustaría agradecer su apoyo y conocimientos, así como los contactos obtenidos, para seguir investigando, a los siguientes:

- A mi tutor, Miguel Rodelgo Lacruz, por haberme tolerado los primeros contratiempos, así como por haber soportado mi complicada y enrevesada expresión escrita a lo largo de este proyecto. Y por las últimas cesáreas que ha habido que practicarle a este TFG.
- Al CC Antonio Valles Castro, por su apoyo y la bibliografía aportada para este proyecto, vital para su desarrollo. Sobre todo por nunca dejar de creer que este trabajo podía ser posible.
- Al TN Diego Mejías Mendoza, por haberme puesto en contacto con el CC Arenas Marín, y por haberme trasladado, información vital que después he usado en este TFG.
- Al CC Pedro José Arenas Marín, por haberme planteado las principales ideas acerca del montaje experimental, basado en su proyecto de fin de especialidad.
- Al TN José Manuel Piñero Álvarez, por la información obtenida acerca de las políticas TEMPEST y las acreditaciones de seguridad del CNI.
- Al TN Luis Francisco Sánchez Álvarez, por aportarme, bastante de la bibliografía necesaria para el desarrollo de este trabajo.
- Al TCOL Carlos López Alves de Amorín, por su apoyo en la parte del TFG referente al Derecho Humanitario Internacional.
- Al COL Javier López de Turiso y Sánchez, por transmitirme su interés y ponerme en contacto con el CAP Guillermo Pérez Aranda, que ha sido de importancia vital para este proyecto.
- Al CAP Guillermo Pérez Aranda, su interés desde el día que me puse en contacto con él. También por los muchos contactos proporcionados dentro de INTA, que han ayudado a saber cual es la situación de España ante esta amenaza.
- Al CN Ingeniero Javier De Ory Arriaga, y a todas las personas con las que me puso en contacto que me han proporcionado la información acerca de la protección de los operadores y los equipos ante los pulsos electromagnéticos.
- A todos mis compañeros y amigos que en algún momento de estos meses, me han echado una mano, ya sea aportando bibliografía, informándose para ver si podían ayudar, o simplemente para darme ánimos.

Para terminar, después de esta larga lista de agradecimientos, me gustaría decir que “es de bien nacido ser agradecido”.

Muchas gracias a todos los que han colaborado en este TFG y lo habéis hecho posible, el AF Andrés Pintos Carrillo.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas	5
1 Introducción	6
1.1 Motivación	6
1.2 Objetivos generales	7
1.3 Objetivos específicos.....	7
2 Estado del Arte	8
2.1 Qué es un pulso electromagnético.....	8
2.2 Difracción Compton.....	8
2.3 Historia de las Armas de pulsos electromagnéticos.....	9
2.4 Generalidades sobre empleo del pulso electromagnético como arma.....	10
2.5 Clasificación de las armas basadas en energía electromagnética.....	12
2.5.1 Natural.....	12
2.5.2 Nuclear	13
2.5.3 Generados por los sistemas no nucleares	18
2.6 Efectos.....	22
2.7 Protección ante los pulsos electromagnéticos.....	22
2.7.1 Blindaje	23
2.7.2 TEMPEST	24
2.7.3 Protección ante pulsos electromagnéticos a bordo de barcos.....	25
2.8 La protección ante pulsos electromagnéticos en la Armada.....	27
2.9 Efectos de los pulsos electromagnéticos en la salud.....	28
2.9.1 Definiciones	28
2.10 Las armas de pulsos electromagnéticos y el Derecho Humanitario Internacional.....	33
2.10.1 Guía para el examen jurídico de las armas, los medios y los métodos de guerra nuevos.....	33
2.10.2 Marco jurídico: normas que han de aplicarse a las armas, los medios y los métodos de guerra nuevos.....	34
2.11 Examen de la licitud de las armas basadas en la energía electromagnética.....	35
2.11.1 Nucleares.....	36
2.11.2 No nucleares	37
3 Desarrollo del prototipo	39
3.1 Introducción	39
3.2 Montaje experimental.....	39
3.3 Componentes	39
3.3.1 Generador.....	40
3.3.1 Arco eléctrico	41
3.3.2 Bobina	42
3.3.3 Interruptor.....	45
3.3.4 Caja protectora	45
3.3.5 Elementos de medición.....	47
3.3.1 Uso del osciloscopio y del polímetro.....	48
4 Pruebas y validación.....	50
4.1 Seguridad personal y de equipos	50

4.2 Medición de la intensidad del generador.....	50
4.3 Medición de la frecuencia de salida del generador	52
4.4 Medición del voltaje de los generadores mediante el divisor de corriente.	52
4.5 Medición del voltaje de los generadores mediante la distancia del arco.	54
4.6 Caracterización del pulso	55
4.7 Medición de la frecuencia del pulsos según distancia del arco.....	55
4.8 Medición de voltaje en el osciloscopio en función de la distancia.	58
4.9 Prueba final	59
5 Conclusiones y lineas futuras	62
5.1 Introducción.	62
5.2 Futuras aplicaciones de las armas EMP	63
5.2.1 Sistema antimisiles	63
5.2.2 Ataques a satélites	64
5.2.3 Sistemas de seguridad automática.....	64
5.2.4 Equipos de defensa individual.....	65
5.2.5 Detención de vehículos	65
5.2.6 Avances en el campo de la protección ante pulsos electromagnéticos	65
5.3 Grado de cumplimiento de los objetivos.....	66
5.4 Lineas futuras	67
5.5 Despedida.	67
6 Bibliografía.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 2.2-1 Efecto Compton [4]	9
Ilustración 2.4-1 Alcance de las bombas nucleares de gran altitud [4]	11
Ilustración 2.5-1 Esquema de clasificación de armas, elaboración propia	12
Ilustración 2.5-2 Absorción de los efectos de las detonaciones nucleares de altitud por la atmósfera [4]	13
Ilustración 2.5-3 Valor del campo eléctrico en función del tiempo [4].	14
Ilustración 2.5-4 Relación del valor del campo según la frecuencia [4]	14
Ilustración 2.5-5 Detonación nuclear en superficie durante la guerra fría [16]	15
Ilustración 2.5-6 Detonaciones nucleares de Hiroshima y Nagasaki [16]	16
Ilustración 2.5-7 Formación del campo eléctrico en detonaciones fuera de la atmósfera [4]	17
Ilustración 2.5-8 Firma de la salida de EEUU del acuerdo nuclear con Rusia [17]	18
Ilustración 2.5-9 Funcionamiento de una FCG [3]	19
Ilustración 2.5-10 Low Frequency E-Bomb General Arrangement MK84 Packaging [13]	19
Ilustración 2.5-11 Funcionamiento del arma EMP MHD [5]	20
Ilustración 2.5-12 Funcionamiento de un arma EMP MHD [12]	20
Ilustración 2.5-13 Funcionamiento de un Vircator [19]	20
Ilustración 2.7-1 Blindaje de los cables exteriores a bordo de un barco [4]	25
Ilustración 2.7-2 Los distintos TPDs y su voltaje máximo [6]	26
Ilustración 3.2-1 Circuito del montaje experimental, elaboración propia	39
Ilustración 3.3-1 Generador N°1 y sus especificaciones [33]	40
Ilustración 3.3-2 Generador N°2 y sus especificaciones [33]	40
Ilustración 3.3-3 Circuito de un generador de alto voltaje basado en las bobinas Tesla [34]	41
Ilustración 3.3-4 Interior del Generador de Pulsos	41
Ilustración 3.3-5 Medición de voltaje de salida, elaboración propia	42
Ilustración 3.3-6 Calibres del cobre [37]	42
Ilustración 3.3-7 Bobinas de cobre [33]	43
Ilustración 3.3-8 Sistema de referencia para prototipo [39]	44
Ilustración 3.3-9 Modelo de interruptor empleado, elaboración propia	45
Ilustración 3.3-10 Caja metálica usada como protección, elaboración propia	46
Ilustración 3.3-11 Jaula de Faraday [41]	47
Ilustración 3.3-12 Circuito del divisor de tensión, elaboración propia	47
Ilustración 3.3-13 Divisor de tensión, elaboración propia	48
Ilustración 3.3-14 Osciloscopio empleado, elaboración propia	48

Ilustración 3.3-15 Restricciones de seguridad [42]	48
Ilustración 3.3-16 Multímetro empleado, elaboración propia	49
Ilustración 3.3-17 Restricciones de seguridad del multímetro [43]	49
Ilustración 4.2-1 Pinza amperimétrica, elaboración propia	50
Ilustración 4.2-2 Circuito de la medición de la intensidad, elaboración propia	51
Ilustración 4.3-1 Circuito para la medición de la frecuencia del generador, elaboración propia	52
Ilustración 4.3-2 Salida del generador sin nada conectado, elaboración propia	52
Ilustración 4.4-1 Circuito para medición de la frecuencia según longitud de arco	53
Ilustración 4.5-1 Comparación de los dos generadores, elaboración propia	55
Ilustración 4.6-1 Pulso generado a 25 cm, elaboración propia	55
Ilustración 4.7-1 Circuito para la medición de la frecuencia según la longitud de arco	56
Ilustración 4.7-2 Medición de la frecuencia de los pulsos, elaboración propia	56
Ilustración 4.7-3 Gráfica de relacion frecuencia vs. distancia, elaboración propia	57
Ilustración 4.7-4 Gráfica de relación frecuencia vs. distancia, elaboración propia	58
Ilustración 4.9-1 Montaje del experimento final, elaboración propia	60
Ilustración 5.2-1 Países que tienen misiles intercontinentales y los alcances que tienen, incluyendo los lanzados por submarinos [40]	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.9-1 Densidad de flujo magnético 0 Hz a 1 Hz [24].....	29
Tabla 2.9-2 Valores límite de exposición relacionados con los efectos para salud para el campo eléctrico in situ de 1 a 10 MHz [24]	30
Tabla 2.9-3 Valores límite de exposición relacionados con los efectos sensoriales por el campo eléctrico in situ de 1 a 400 Hz [24]	30
Tabla 2.9-4 Niveles de acción para campos magnéticos estáticos [24]	30
Tabla 2.9-5 Niveles de acción para campos eléctricos de 1 Hz a 10 MHz [24]	30
Tabla 2.9-6 Niveles de acción para el campo magnético [24]	31
Tabla 2.9-7 Niveles de acción para corrientes de contacto [24]	31
Tabla 2.9-8 Valores de exposición relacionados con efectos para la salud para campos electromagnéticos de 100 kHz a 6 GHz [24]	31
Tabla 2.9-9 Valores límite de exposición relacionados con los efectos sensoriales para campos electromagnéticos de 300 MHz a 6 GHz [24]	32
Tabla 2.9-10 Valores límite de exposición relacionados con los efectos para la salud para campos electromagnéticos de 6 a 300 GHz [24]	32
Tabla 2.9-11 Niveles de acción para campos eléctricos y magnéticos de 100kHz a 300 GHz [24]	32
Tabla 2.9-12 Niveles de acción para corrientes de contacto y corrientes inducidas en las extremidades [24]	33
Tabla 4.2-1 Medición de la corriente de salida de los generadores	51
Tabla 4.4-1 Comprobación de la salida del generador N°1	53
Tabla 4.5-1 Voltaje de Generador N°1	54
Tabla 4.5-2 Voltaje del Generador N°2	55
Tabla 4.7-1 Relación frecuencia-distancia de arco del generador N°1	57
Tabla 4.7-2 Relación de frecuencia-distancia de arco del generador N°2	58
Tabla 4.8-1 Relación de la distancia-voltaje de pico	59
Tabla 4.9-1 Evolución de la calculadora boca-arriba según distancia	60
Tabla 4.9-2 Evolución de la calculadora boca-abajo según distancia	61

1 INTRODUCCIÓN

Este apartado tratará de dar respuesta a las preguntas de por qué este trabajo tiene importancia y dónde nace el interés acerca de este tema.

1.1 Motivación

Tal y como reza la RAE, un arma es “un instrumento, medio o máquina destinada a atacar o defenderse” [1]. Esta misma institución también define la energía electromagnética como “aquella almacenada en una región de espacio que podemos atribuir a la presencia de un campo electromagnético” [1]. Por lo tanto, las armas electromagnéticas, son el conjunto de armas que se basan en la realización de un daño, o lo evitan, mediante un componente de carácter electromagnético.

En el mundo, en el que vivimos, existe un incremento en el interés de los países sobre la amenaza contra pulsos electromagnéticos y el empleo de estos como arma [2] [3]. Debido a los grandes daños que provoca en aparatos eléctricos, podría convertir a buques de guerra, como bien dicen los primeros informes acerca de este tema, en un mero bloque de hierro flotante [4].

El origen del estudio de las armas EMP (electromagnetic pulse) son las primeras pruebas de Bombas nucleares [5]. Los estadounidenses se dieron cuenta que al detonar las bombas en Japón, los sistemas electrónicos se veían dañados. Al descubrir que había una relación entre la potencia que detonaban y el radio de actuación de los daños provocados, se llevo a cabo una larga investigación acerca del suceso para darle una respuesta científica [6].

Grandes estudios se han llevado a cabo desde entonces. En la actualidad, se cree que Rusia podría haber llegado a diseñar un sistema que evitaría que los sensores de las fragatas sean capaces de seguir a una aeronave. Muchos son los rumores que apuntan que esta será la futura amenaza del siglo XXI. Su alto grado de daño añadido al hecho de que apenas afecta a la vida humana, hacen de este tipo de armas una muy buena forma de intimidación [2].

Ejemplo claro de esto es el sobrevuelo del USS Donald Cook por parte de dos Sukhoi-24, donde los cazas rusos sobrevolaron hasta 12 veces el buque americano [7]. Se cree que el sistema de combate AEGIS fue incapaz de seguir al caza, según el periódico “voice of Russia”, actualmente conocido como “RIANOVOSTI”, y el director adjunto del Instuto de EEUU y Canada para la Academia Rusa de Ciencias. En el otro lado, el mando americano lo niega [8].

Esto, añadido al continuo avance de la guerra electrónica, con equipos cada vez más avanzados, hace que exista una creciente preocupación. Uno de estos avances es la explotación de los pulsos electromagnéticos para la inutilización temporal o total de equipos electrónicos. En la actualidad en el caso de la Armada Española, al igual que en el caso las Fuerzas Armadas Españolas, ha crecido la preocupación sobre la importancia de este tipo de armas y han comenzado a desarrollar un plan de investigación y de desarrollo sobre este tipo de dispositivos [9].

Algunos de los países más desarrollados en defensa y algunas altas instituciones de estos países las consideran las armas estratégicas del siglo XXI [2], que van a marcar las principales amenazas. Esto se debe a que el esfuerzo que tendría que hacer un país para recuperarse de esta clase de ataque es brutal, también se debe a que la sociedad occidental de hoy en día no vería con buenos ojos el empleo de armas nucleares, debido al elevado número de daños personales que estas producen y el enorme tiempo que se tarda en recuperarse de un ataque nuclear. Sin embargo, al tratarse de un arma que no está diseñada para causar bajas directamente sino para provocar un apagón en una determinada zona específica, sería el arma idónea para la sociedad actual. [10]

Llegado a este punto, observando que las Fuerzas Armadas Españolas están desarrollando su doctrina acerca de las armas EMP, mientras se redacta este proyecto. He llegado a la conclusión de que este tema podría no solo ser útil para desarrollar un buen trabajo, sino también podría ayudar a las Fuerzas Armadas Españolas. Esta es la razón de ser de este Trabajo de Fin de Grado.

1.2 Objetivos generales

Este Trabajo de Fin de Grado tendrá los siguientes objetivos generales:

- Estudiar la vulnerabilidad de unidades y buques de la Armada ante los pulsos electromagnéticos.
- Estudiar los métodos de protección ante este tipo de amenaza.
- Crear un pequeño montaje experimental de arma basada en el pulso electromagnético para comprobar sus efectos.

1.3 Objetivos específicos

Cada uno de estos objetivos, conllevan sus propios hitos desarrollados a continuación.

- Demostrar la vulnerabilidad de unidades y buques ante los pulsos electromagnéticos.
 - Acotar la amenaza actual.
 - Estudiar los efectos de los pulsos electromagnéticos sobre la salud.
 - Estudiar los procesos de generación de pulsos electromagnéticos.
 - Caracterizar este tipo de armas según el Derecho Humanitario Internacional.
- Estudiar los métodos de protección ante este tipo de amenaza.
 - Conocer los tipos protección ante pulsos electromagnéticos.
 - Proponer mejores sistemas de protección ante ataques de pulsos electromagnéticos.
 - Proponer un balance entre la protección de los equipos y su posible efecto sobre las capacidades del equipo.
- Crear un pequeño montaje experimental de arma basada en el pulso electromagnético.
 - Diseñar teóricamente el prototipo.
 - Estudiar los efectos que pueda tener en la salud y en dispositivos electrónicos.
 - Estudiar previamente los riesgos en el trabajo con los pulsos electromagnéticos.
 - Montar del prototipo.
 - Realizar un ensayo sobre un objetivo concreto.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Qué es un pulso electromagnético

El pulso electromagnético, EMP, en sus siglas en inglés, es la emisión de energía electromagnética de alta intensidad en un breve período de tiempo [11]. Si la emisión es lo suficientemente fuerte, es capaz de inducir altos voltajes sobre los conductores expuestos, provocando en muchos casos, un mal funcionamiento del circuito, entre otros efectos, o su inutilización.

Cabe destacar que los pulsos electromagnéticos, no serán capaces de provocar grandes daños en los seres humanos directamente. El hecho de que no provoquen grandes daños sobre la vida humana también es de gran importancia, ya que serán capaces de realizar daños estratégicos sin causar bajas, de forma directa [12]. Por ejemplo, un arma de pulsos electromagnéticos dejaría a un barco de combate sin sistemas de recepción o sin los sistemas eléctricos y electrónicos que carezcan de protección. Estos sistemas de protección se desarrollarán más en profundidad en adelante.

Es decir, un pulso electromagnético tiene como propósito la negación al enemigo de la capacidad de explotación de sus equipos [6] [13]. En este trabajo se estudiará la amenaza actual de este tipo de armas EMP, así como los avances que se cree que algunos países han llevado a cabo acerca de los dispositivos basados en energía electromagnética.

El pulso electromagnético generado por una detonación nuclear tiene tres componentes que se suceden una detrás de la otra [11]: E I, E II, y E III.

- La primera parte consistiría en un campo eléctrico de decenas de kilo voltios por metro y un rápido tiempo de subida de corta duración. Esta primera parte afectaría solamente al horizonte visual y estaría polarizado de forma proporcional a la dirección del campo geomagnético local y la dirección de propagación. Es por ello, que, para latitudes más alejadas del ecuador, el campo está orientado horizontalmente. Este hecho se evidencia en los ensayos rusos de bombas nucleares de gran altitud, cuando estas ocasionaron un daño mucho más severo que las bombas nucleares de gran altitud de los norteamericanos, debido a la relación entre la latitud de la declaración de la tierra.
- La fase intermedia tiene lugar cuando los rayos gamma dispersos e inelásticos de los neutrones crean una ionización adicional que se caracteriza por ser del orden de 10 a 100 V/m, y tener una duración de 100 nanosegundos a decenas de milisegundos.
- La tercera parte, conocida como el impulso electromagnético magneto-hidrodinámico, tiene su origen en la explosión. Se caracteriza por una baja amplitud del campo eléctrico, del orden de decenas de mV/m, un largo tiempo de subida, segundos, y una larga duración del impulso, centenas de segundos. Estos, son bastante parecidos a las tormentas magnéticas que afectan las líneas de transmisión y distribución, que pueden dañar los componentes principales de los sistemas de energía como es el caso de los transformadores.

Las tres componentes del campo electromagnético debido a una explosión nuclear son causadas por las distintas fases provocadas tras la detonación que tienen lugar debido al efecto Compton.

2.2 Difracción Compton

Este efecto se da cuando los rayos gamma ocasionados por una detonación nuclear tienen lugar en una zona de cierta densidad de moléculas de aire. Se basa en la liberación de electrones de las moléculas de aire debido a la incidencia de rayos gamma. Estos electrones de alta energía se desplazan en dirección de los rayos gamma [6].

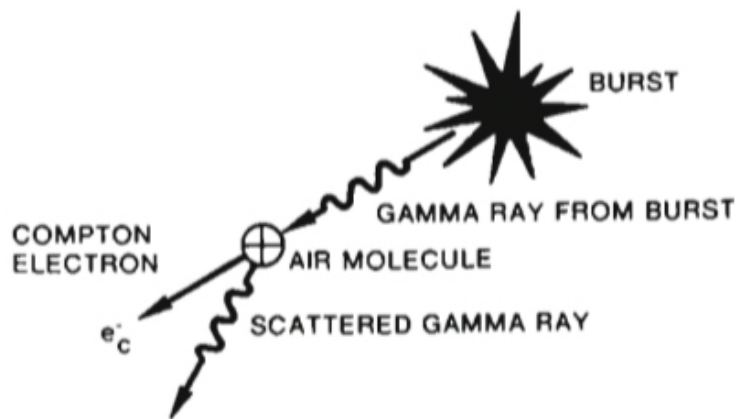


Ilustración 2.2-1 Efecto Compton [4]

La región de la atmósfera donde se produce este efecto es la denominada región fuente. Las dimensiones de su espesor y altura se definen según la altura de la detonación (HOB), de la potencia y tipo de bomba nuclear. Un espesor habitual suele ser de entre 20 a 40 Km sobre la superficie terrestre, pero puede llegar a ser de 70 Km, entre los 10 Km y los 80 Km de altura sobre la superficie terrestre, si la HOB es de 300 Km.

El hecho de que se produzca esta difracción es la causa principal del campo eléctrico generado, que será el causante de los daños a aparatos eléctricos y electrónicos, es por ello, que es de vital importancia. También dado que depende de la densidad del aire, el efecto que tenga depende de la altura de detonación. Es por ello, que para bombas de gran altura, solo tiene lugar la componente EIII. El efecto del campo electromagnético de una detonación nuclear tiene región de acción LOS, *line of sight*, es decir, que estará limitado por el alcance visual desde la altura de detonación. El tipo y la potencia de la bomba son temas que dejaremos aparte en este proyecto.

2.3 Historia de las Armas de pulsos electromagnéticos.

Aunque se trata a las detonaciones nucleares como los primeros fenómenos causantes de este tipo de pulsos, el mismo efecto tiene lugar en ocasión de erupciones solares, que aunque aleatorias y totalmente impredecibles, producen los mismos efectos. Esto se debe a que no son más que la transmisión de energía a través del aire de manera rápida, en este caso, debido a la energía liberada por el sol. Ejemplo de este tipo de fenómeno fue el “Evento Carrington” (1859). En esta ocasión, una importante tormenta solar, dejó a Norteamérica, Europa, y parte de Australia y Asia, con el sistema telegráfico severamente dañado [12]. Posteriormente, aunque de mucho menor entidad, se registró el mismo tipo de efectos en Canada (1989), y Norteamérica y Sudáfrica (2003) [2]. Aunque estas tormentas solares fueron de menor importancia, produjeron efectos más severos debido al hecho de que los países estaban mucho más desarrollados electrónicamente.

El estudio de los pulsos electromagnéticos tiene su origen en los primeros ensayos de las detonaciones nucleares. El físico Enrico Fermi predijo, en la primera detonación nuclear, que los rayos gamma provocarían la ionización atmosférica, y pidió que se aislasen fuertemente las líneas de comunicación de los aparatos de medida [5]. Sin embargo, este esfuerzo fue en vano dado que muchas de las mediciones durante el ensayo se vieron alteradas debidas en su mayor parte a la destrucción de algunos de estos aparatos de medida. Fue entonces cuando se empezó a hablar de un pico de energía electromagnética.

Tras los próximos ensayos americanos nucleares, se volverían a producir estos efectos en los aparatos de medida. Pero no fue hasta las primeras puebas de detonaciones nucleares en altura, cuando

realmente se vió que los efectos en los equipos electrónicos eran mucho más dañinos en las dotaciones en altura que en superficie.

Durante la operación “Fishbowl”, en el experimento “Starfish Prime”, se detonaron 1,4 megatones a 400 kilómetros de altura, sobre una región inhabitada del océano Pacífico. Los efectos de la detonación se notaron hasta Hawai, a unos 1500 kilómetros del distancia del lugar del experimento, dañando las líneas de conducción eléctrica y las comunicaciones por microondas [10] [6] [5]. Quedó claro entonces que este efecto sería de vital importancia para los estados, para su futuro empleo con fines estratégicos.

Por su parte, la por entonces Union Soviética, URSS, llevo a cabo, el “Proyecto K” [5] [3]. Este proyecto aunque de menor categoría, tuvo unos efectos muchas más devastadores, debido en parte a la relación entre la orientación e intensidad del campo magnético terrestre en latitudes más altas. Durante el proyecto se detonan varios artefactos de 1,3 y 300 kilotones a 300 kilómetros de altura. Estas prácticas fueron además una manera de demostrar el poder de la unión frente a la coalición de países aliados.

Los distintos frentes se dieron cuenta que no es necesario el empleo de bombas nucleares, cuyos efectos son difícilmente controlables es por que ello que más tarde se introducen más armas no nucleares basadas en la energía electromagnética. Durante la guerra de Irak, el ejercito de los Estados Unidos y las Fuerzas Armadas australianas comienzan a dar empleo a un proyecto en el que llevan trabajando mucho tiempo, las bombas-e [2].

Las llamadas e-bombs, en inglés, son las llamadas bombas electromagnéticas [13]. Estas bombas electromagnéticas se emplean para inutilizar aparatos eléctricos en un pequeño radio de acción sin la necesidad del uso de energía nuclear. Se basan en la detonación de una carga en un extremo de un tubo de cobre que a su vez está bobinado por un cable de alto voltaje cargado eléctricamente mediante una fuente ajena. Al detonar la carga el tubo de cobre se deforma haciendo un cortocircuito con la bobina que esta cargada creando un campo electromagnético en sentido opuesto al lugar donde se encontraba la carga. Un ejemplo de este tipo de artefactos es la bomba electromagnética de baja frecuencia MK-84.

Existen grandes sospechas de que las fuerzas armadas rusas han invertido mucho tiempo y capital en el estudio de la explotación de la energía electromagnética dando lugar a casos como el acontecido en el mar Adriático, donde una fragata Americana fue sobrevolada por un caza ruso que se cree montaba el sistema de guerra electrónica más avanzado desarrollado por el país soviético [8] [7].

2.4 Generalidades sobre empleo del pulso electromagnético como arma.

Las características principales de las armas EMP son, en primer lugar, que no tienen un conocimiento previo de los sistemas a los que están atacando, es decir, que van a atacar diferentes sistemas, sin ninguna clase de discriminación [12]. En segundo lugar, no son afectadas por el tiempo meteorológico. En tercer lugar, tiene un rango de aplicación muy amplio, desde afectar solamente un equipo en concreto hasta dejar sin electricidad al continente norteamericano entero. En cuarto lugar, producen daños desde temporales hasta la destrucción de los equipos de forma permanente. En quinto lugar, la defensa de equipos eléctricos y electrónicos ante este tipo de amenaza supone la protección de todo el sistema electrónico y el eléctrico qué tenga que ver con el sistema que queremos defender, es decir, el coste para poder ser efectivamente protegido ante este tipo de amenaza es muy alto. En sexto lugar, los pulsos electromagnéticos no están diseñados para causar daños a la vida humana directamente. Por último, destacar que una de las limitaciones que tiene este tipo de arma es que, sólo son efectivas hasta el alcance visual del arma.

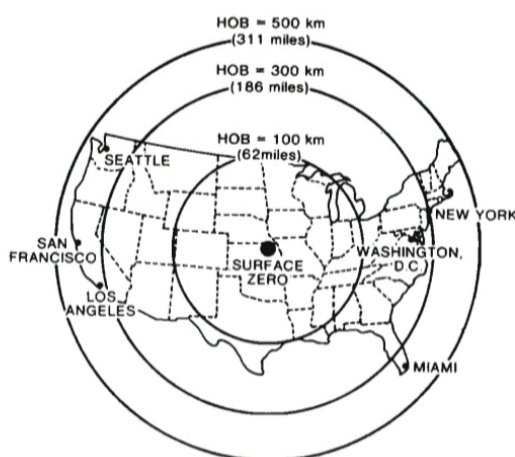


Ilustración 2.4-1 Alcance de las bombas nucleares de gran altitud [4]

Cómo hemos podido ver previamente, el pulso electromagnético produce un campo electromagnético particularmente intenso en su radio de acción. Este aspecto es de gran importancia militar ya que permite la negación de las capacidades de aparatos eléctricos y electrónicos, en especial, computadoras y receptores de radio o radar. El desarrollo científico ha logrado que el uso de la tecnología de microondas de alta potencia así como las técnicas de generación de pulso sean viables, lo que permite evitar los costes y la radiación de las explosiones nucleares. Además en la actualidad, las grandes masacres provocadas por las armas nucleares mencionadas anteriormente, serían altamente condenadas por los principales países de las Naciones Unidas y llevarían consigo una serie de represalias, que en muchos casos el país que ha llevado a cabo ese ataque no se puede permitir. Es por ello que aparte de los pulsos generados por las armas nucleares, en la actualidad se han desarrollado una serie de armas que tienen los mismos efectos que un pulso electromagnético de gran altura careciendo del componente nuclear que acarrea altos peligros.

Por otro lado, el daño causado por las armas basadas en pulsos electromagnéticos estará limitado por [13]:

- La forma y medio en la que es lanzada.
- La vulnerabilidad de la víctima.
- La inteligencia del Electronic Order of Battle enemigo.
- La situación de la atmósfera.
- La existencia de daños colaterales.

En primer lugar, las bombas electromagnéticas están limitadas en la forma y el medio en la que son lanzadas, ya que, una bomba nuclear detonada a 20 Km de la superficie terrestre generará un pulso de características diferentes que si es detonada a 500 m de la superficie, como ya se explicará en el siguiente capítulo.

La vulnerabilidad de la víctima será clave para determinar la magnitud del ataque necesario para realizar el daño deseado. Las características de los distintos sistemas de protección ante este tipo de amenaza serán aportados en este trabajo, posteriormente.

La inteligencia del Electronic Order of Battle enemigo es clave para determinar la clase de pulso necesario para que causar el daño deseado. El EOB es un documento en el cual se detallan los distintos equipos que tiene el enemigo acompañado de las diferentes frecuencias a las que trabajan estos. De esta manera se diseñará un pulso con un ancho de banda lo suficientemente amplio como para abarcar dispositivo a batir.

La situación de la atmósfera, es importante para la explotación del componente electromagnético de las detonaciones nucleares, debido a que el campo generado por la radiación electromagnética será diferente en una zona con muchas partículas de aire que en una zona donde sean menores.

La existencia de daños colaterales es importante para la determinación del artefacto a emplear, debido a que por ejemplo, el empleo de bombas nucleares con los fines de negar el uso de ciertos equipos al enemigo, sin causar un elevado número de bajas, es bastante complicado. Es por ello que se emplean otro tipo de sistemas mucho menos lesivos con la vida humana.

2.5 Clasificación de las armas basadas en energía electromagnética

Las armas basadas en el pulso electromagnético, varían entre sofisticadas armas nucleares hasta pequeñas y baratas bombas electromagnéticas [3]. Todas tienen en común que están diseñadas para causar daños temporales o permanentes en equipos electrónicos y eléctricos. La clasificación está basada en la causa del pulso electromagnético: una causa natural, la detonación de un explosivo nuclear o un dispositivo diseñado para generar campos electromagnéticos variables per se. La clasificación de las armas basadas en energía electromagnética será definido por su tiempo de duración, su campo electromagnético, y su banda de frecuencia.

A la hora de la clasificación de las armas basadas en la energía electromagnética, se seguirá el siguiente esquema:

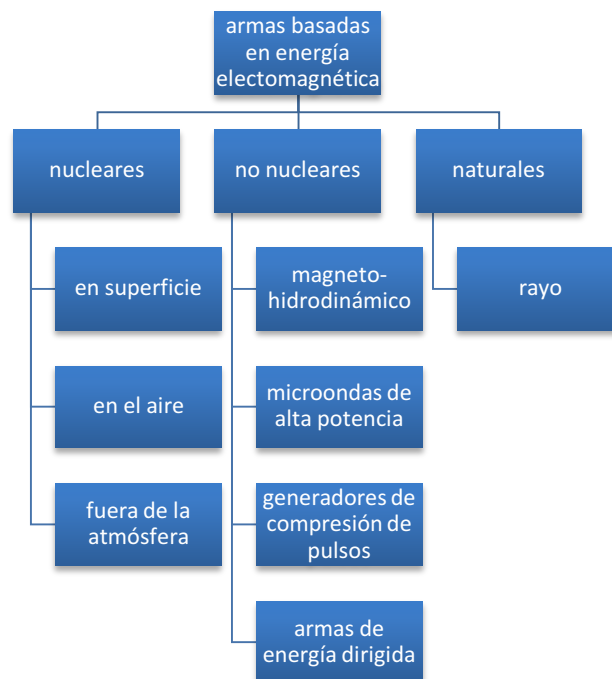


Ilustración 2.5-1 Esquema de clasificación de armas, elaboración propia

2.5.1 Natural

El pulso electromagnético de origen natural es el pulso electro magnético causado por un rayo tal y como lo define la IEC 62305, es a día de hoy, la clase de pulso electromagnético más conocido y ante el que mejor preparados estamos [14]. Por ello que es un buen punto de partida a la hora de dar una explicación a las diferentes tipos de armas basadas en la energía electromagnética.

Dado que la detonación nuclear ha sido explicada previamente, me apoyaré en ella para dar una explicación más clara, exponiendo las diferencias y las semejanzas [15]. En primer lugar, en el caso del rayo, al igual que la detonación nuclear, se trata de emisión de energía, en la cual una pequeña parte de

la energía liberada, será en forma de radiación electromagnética. En una detonación nuclear se libera mucha más energía que en el caso de un rayo, por lo que la energía electromagnética liberada es mayor en una detonación nuclear que en el rayo. Por otra parte, mientras que la principal forma de radiación del rayo es radio-estática, en la detonación nuclear es no solo estático, sino que tiene muchas más componentes pudiendo dañar en un rango de componentes mayor. Otra característica importante, son los tiempos de subida y bajada del impulso. Los tiempos de subida del rayo son del orden de microsegundos, mientras que en el caso de la detonación nuclear es del orden de nanosegundos. Es por ello, que los pulsos electromagnéticos causados por las detonaciones nucleares son bastante más complicados de controlar.

Este tipo de amenaza es conocida globalmente, y a día de hoy, son pocos los sistemas electrónicos y eléctricos que no posean sistema pararrayos. Aunque, por desgracia, la protección contra los rayos no es suficiente para hacer frente a los diferentes tipos de pulsos electromagnéticos. Esto es debido principalmente a que los pulsos electromagnéticos tienen unos tiempos de subida y bajada bastante más cortos que los rayos, como mencionaba en el párrafo anterior.

2.5.2 Nuclear

Para explicar mejor el pulso electromagnético generado en una detonación nuclear, comenzaré por el EMP de gran altitud que aparte de ser el pulso que provocó el descubrimiento de este fenómeno, es el que aporta una mejor imagen para su aplicación [2].

El pulso electromagnético de gran altitud, o bomba de Arco Iris, es un tipo de ataque de pulso electromagnético ejecutado mediante la detonación de un arma nuclear a una altitud lejos de la atmósfera terrestre [6]. El hecho que caracteriza a este tipo de bombas es que están detonadas a una gran altura y tienen la capacidad de generar pequeñas auroras, lo que llevó a bautizarlas como bombas de Arco Iris. La explicación de la efectividad de este tipo de artefactos viene dada por la cantidad de energía de los rayos gamma y X, liberados durante una explosión nuclear, que son altamente penetrantes e ionizantes. Este tipo de detonaciones, tiene una corta duración pero crea un campo electromagnético de kilómetros de diámetro.

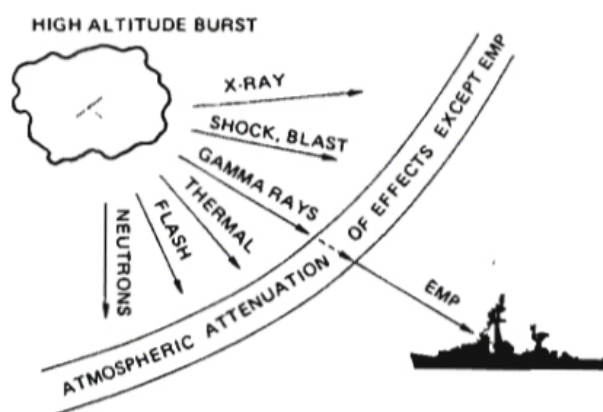


Ilustración 2.5-2 Absorción de los efectos de las detonaciones nucleares de altitud por la atmósfera [4]

El campo electromagnético generado está comúnmente definido por la expresión [13]:

$$E(t) = \frac{K \cdot E_{pk} \cdot e^{a(t-ts)}}{1 + e^{(a+b)(t-ts)}} \quad (\text{KV/m}) \text{ para } 0 < t < 1 \text{ ms.}$$

En la expresión, se definen los valores típicos como:

- E_{pk} como el valor pico del campo eléctrico = 50 KV/m

- K como la constante de normalización = 1,2
- a como la constante de tiempo de subida del pulso (s^{-1}) = $5 * 10^8$
- b como la constante de tiempo de bajada del pulso (s^{-1}) = $2,3 * 10^7$
- ts como el parámetro de desplazamiento de tiempo (s) = 10^{-8}
- tiempo de interés (s)

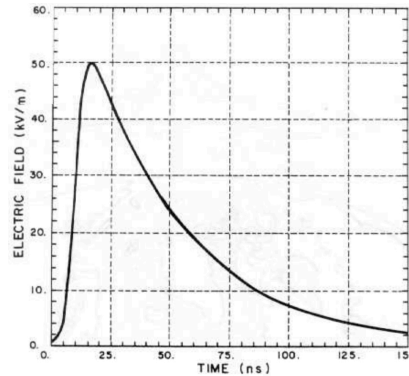


Ilustración 2.5-3 Valor del campo eléctrico en función del tiempo [4].

Como se puede ver en la imagen, la onda generada tiene un tiempo de subida muy corto comparado con el tiempo de bajada que tiene. Se podría hablar de una doble exponencial, como la llaman los principales libros de texto al respecto [4].

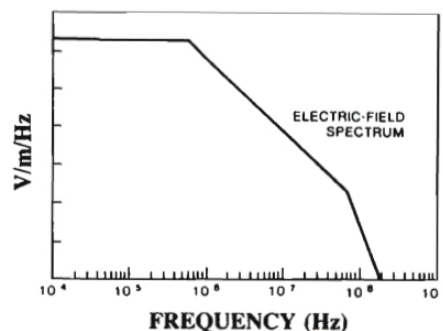


Ilustración 2.5-4 Relación del valor del campo según la frecuencia [4]

El *black-out*, es decir, la carencia de corriente eléctrica en un radio de acción, es uno de los efectos de la bomba de pulsos electromagnéticos de gran altitud [12]. Cuanto mayor sea la altura de detonación mayor será el radio de acción, no solamente por la onda termocinética inicial, sino porque tras esta onda queda un gran área de aire ionizado y excitado.

Para poner un ejemplo práctico, se ha estudiado que bastaría con un arma de 1 o 2 MT detonado a una altitud de 250 millas, provocaría un campo de 10 a 50 kV/m, produciendo un daño grave, y inutilizando los equipos electrónicos y eléctricos en todo el continente norteamericano [2]. Esto demuestra que con una o varias de estas pequeñas explosiones nucleares por encima de la atmósfera podríamos causar un daño muy grave, sin causar directamente una masacre del calibre de una detonación nuclear como Hiroshima o Nagasaki.

Las detonaciones nucleares se clasifican en tres tipos, según su lugar de detonación: la explosión nuclear en superficie, la explosión nuclear en el aire, y el pulso electromagnético auto generado [3].

2.5.2.1 Explosión nuclear en superficie

El SBEMP (*Surface Burst Electromagnetic Pulse*) en sus siglas en inglés, se define como una explosión nuclear por debajo de los 200 m de altura desde la superficie. El pulso electromagnético alcanzará un radio de 3 a 5 Km con origen en su detonación. A su vez, produce campos electromagnéticos fuera de la zona de detonación de 5 KV/m a distancias de 10 Km o más. Este último campo mencionado se caracteriza por una baja frecuencia, del orden de 100 KHz, afectando a sistemas que trabajen en la frecuencia anterior y sistemas que poseen sistemas de captación de energía de gran apertura, véase largas líneas de transmisión [13].

Al igual que con el pulso electromagnético de gran altitud, el pulso electromagnético generado por una explosión nuclear de superficie genera rayos gamma y estos a su vez difractan los electrones Compton separándolos de sus átomos y generando iones positivos. Esto crea campos eléctricos en sentido radial de hasta 100KV/m con tiempos de subida de nanosegundos. Dado que la tierra es mejor conductora que el aire, estos campos generan un flujo de corriente a través de la tierra en sentido contrario a los campos generados por el efecto Compton. Estas corrientes a su vez, generan un campo magnético en sentido azimutal. Dado que estos campos magnéticos son más fuertes en la superficie que en aire a medida que nos aproximamos a la frontera aire-tierra el campo magnético disminuye, produciendo campos eléctricos verticales. Al final, el resultado de campos y corrientes es el equivalente a la corriente que genera un dipolo vertical que radia lejos del área de detonación, de forma inversamente proporcional a la distancia [4].



Ilustración 2.5-5 Detonación nuclear en superficie durante la guerra fría [16]

Esta clase de detonaciones sí cabe destacar que son enormemente dañinas para la vida humana, son de grandes efectos como ha quedado demostrado por los numerosos ensayos realizados por los EEUU durante la guerra fría. Sin embargo, no causarían los efectos deseados de dejar una zona sin electricidad sin causar bajas directamente. Aunque sí dejaría una zona importante sin electricidad, sería debido a enorme explosión que este tipo de artefactos generan. Dado que en este nuevo tipo de guerra lo que se busca es la negación de los medios enemigos sin causar bajas humanas directamente, este no sería el medio idóneo para conseguirlo [16].

2.5.2.2 Explosión nuclear en el aire

El ABEMP (*Air Burst Electromagnetic Pulse*), en sus siglas en inglés, es el pulso creado a raíz de una detonación nuclear a altitudes entre 200 m y 20-30 Km. Al igual que ocurría en el caso anterior, la detonación provocará una separación de cargas, generando un campo eléctrico en sentido radial a la zona de explosión. Pero a diferencia del caso anterior al estar la detonación más separada de la superficie de

la tierra, la mayoría de la corriente se conducirá por el aire, y no aparecerán las componentes magnéticas azimutales. El resultado será un campo del orden de 300 KV/m a unas distancias de 5 Km [13].

Cabe añadir que este tipo de pulsos a diferencia de los SBEMP, dentro del área de detonación generalmente afectan con la misma intensidad que los SBEMP, mientras que en la zona de radiación donde se genera el campo, la intensidad es mucho menor.

Un claro ejemplo de este tipo de explosiones han sido, a lo largo de la historia, las detonaciones de Hiroshima y Nagasaki, donde las detonaciones nucleares provocaron 166.000 y 80.000 muertes aproximadamente. Ambas detonaciones se realizaron a una altura estimada de entre 500 y 600 metros, respectivamente. Aunque el efecto del pulso generado sea menor que en el de detonaciones a más altura, el daño en daños humanos es gigantesco comparado con el de una detonación de gran altitud. Esta es la razón por la cual este tipo de detonaciones, sería condenada por los países de las Naciones Unidas [16].

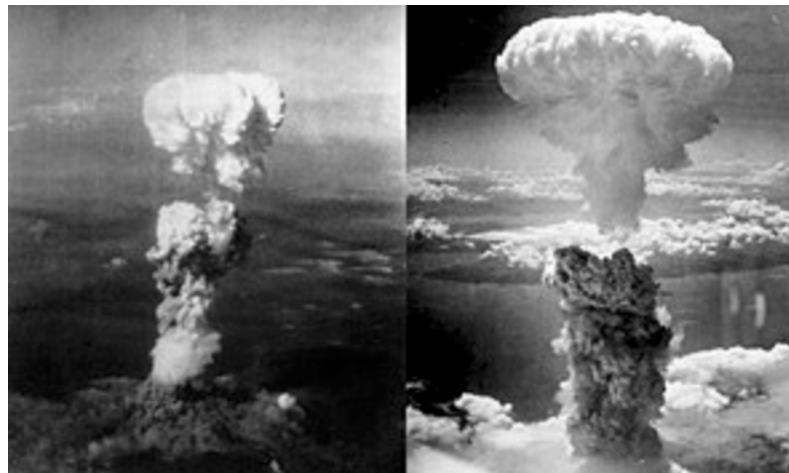


Ilustración 2.5-6 Detonaciones nucleares de Hiroshima y Nagasaki [16]

2.5.2.3 Explosión nuclear fuera de la atmósfera.

El SGEMP (*Self Generated Electromagnetic Pulse o System Generated*), en sus siglas en inglés, es el causado por explosiones nucleares fuera de la atmósfera. Este pulso es producido por la acción de los rayos gamma y los rayos X generados por la detonación. Debido que la detonación tiene lugar en la atmósfera, los efectos de radiación de los SGEMP apenas se notarían en la superficie de la tierra, sin embargo, generarían un campo electromagnético muy grande [13] [6].

Este sería el tipo de explosiones deseado debido principalmente a la magnitud de los campos electromagnéticos generados. Como se puede ver en las sucesivas imágenes, la detonación provocaría la radiación gamma fuera de la atmósfera. Esta radiación, junto con los distintos efectos de la bomba nuclear, como la explosión de calor, o la onda de presión, serían atenuados y absorbidos por la atmósfera. La atmósfera actuaría como un escudo ante este tipo de efectos. El único fenómeno ante el cual no estaríamos protegidos por la atmósfera sería el efecto del pulso electromagnético provocado por la detonación [2].

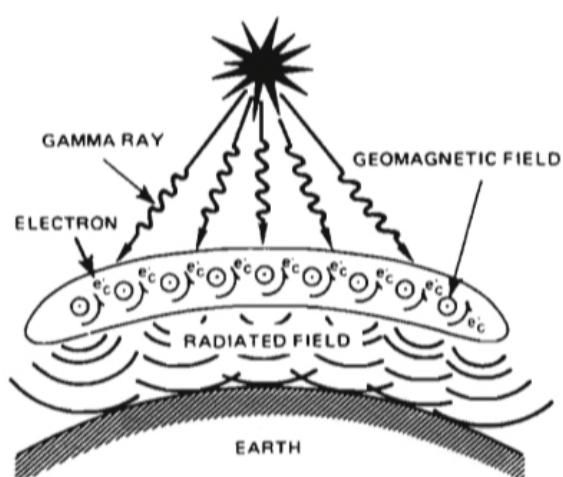


Ilustración 2.5-7 Formación del campo eléctrico en detonaciones fuera de la atmósfera [4]

Este tipo de detonaciones sería eficaz para destruir una constelación de satélites, o para destruir misiles balísticos intercontinentales. A día de hoy se está estudiando su aplicación para la protección ante ataques de misiles balísticos intercontinentales, pero se encuentra en la fase de investigación.

Tras haber clasificado los distintos tipos de arma nuclear según su empleo, se tratará el nivel de amenaza las armas EMP en la actualidad. En primer lugar, las armas nucleares de gran altitud o bombas Arco Iris, requieren dos cosas: la capacidad de desplegar bombas nucleares y la de poder llevar esta carga nuclear a una gran altura. La altura a la que se detona la carga nuclear debe ser de al menos de 25 millas, siendo más efectiva a aproximadamente 70 millas, teniendo siempre en cuenta que tienen una limitación de alcance visual [2] [3] [10].

Ahora mismo se estima que los Estados Unidos, Rusia, Reino Unido, Francia, China, India, Pakistán, e Israel son capaces de proyectar una bomba arco iris y 11 países no se encuentran lejos de conseguirlo, basándome en un informe del año 2010 del Ministerio de Defensa norteamericano acerca de la amenaza de armas basadas en el pulso electromagnético. En 2010, ya había más de 128.000 cabezas nucleares construidas desde 1945, y probablemente más, que se desconozcan. Por otro lado, 30 países son capaces de elevar una cabeza nuclear a la altura necesaria para provocar una bomba Arco Iris. Cabe destacar el caso concreto de Corea del Norte, la cual ha declarado oficialmente la posesión de cabezas nucleares y una amplia variedad de misiles balísticos con diferentes cargas de combate. También se considera la posibilidad de que China mediante una sucesión de bombas nucleares de gran altitud sea capaz de dejar a sus vecinos más próximos sin electricidad [2].

En estos últimos dos años las grandes potencias nucleares, EEUU y Rusia, han roto el acuerdo que firmaron en 1987, durante la guerra fría. Este acuerdo impedía a estos países la utilización de misiles balísticos y de crucero nucleares o convencionales que tuviesen un alcance de entre 500 y 5500 Km. Además, permitía a ambas partes del tratado inspeccionar las instalaciones militares del otro, para supervisar la destrucción de las armas mencionadas. Tras varias acusaciones de haber roto el pacto, el presidente de los EEUU, decidió, el día 1 de Enero de este año, retirarse del pacto alegando que ya estaba roto. Esto puede propiciar que los dos países recuperen la capacidad de volver a armarse nuclearmente, elevando de nuevo la amenaza ante este tipo de ataque [17].



Ilustración 2.5-8 Firma de la salida de EEUU del acuerdo nuclear con Rusia [17]

En el año 2018, se creó una comisión de comisión a raíz de la orden ejecutiva del presidente Donald Trump 13.800, de título “Reforzar ciberseguridad de las redes federales y las infraestructuras críticas”, la cuál eleva un documento de título “Evaluar la amenaza del pulso electromagnético.”, concluye que “Con el desarrollo de pequeños arsenales nucleares y misiles de largo alcance por parte de los nuevos enemigos radicales de los EEUU, la amenaza de un ataque por el pulso generado por una detonación de una bomba nuclear se ha convertido en una de las maneras en que esos países pueden causar una daño devastador a los EEUU. Es por lo tanto de gran importancia que los EEUU hagan frente a la amenaza que suponen los ataques de pulsos electromagnéticos nucleares como un asunto crucial y existencial [18].”

2.5.3 Generados por los sistemas no nucleares

Las armas EMP se pueden clasificar en cuatro clases. En primer lugar, los generadores de compresión de pulsos, en segundo lugar, los generadores magneto-hidrodinámicos, los pulsos de alta potencia microondas, y las armas de energía dirigida.

2.5.3.1 Generadores de Compresión de Pulsos.

Estos dispositivos son la punta de lanza de la tecnología armamentística. Las primeras demostraciones de armas EMP llegaron de la mano del científico Clarence Fowler en el Laboratorio Nacional de los Álamos en California, EEUU. Los FCG, por sus siglas en inglés *Flux Compression Generator*, son capaces de generar decenas de MJ de potencia eléctrica con un tiempo de pulso del orden de los 10 segundos. Una buena comparativa para hacernos una idea de la magnitud de la potencia de este tipo de dispositivos es que la corriente producida es del orden de 10.000 y 100.000 veces la producida por un rayo. Se basa en la generación de una compresión mediante una explosión rápida, transformando la energía de la explosión en un campo magnético. Para la producción de esta clase de artefactos es necesaria la generación de un pulso de corriente del orden de decenas de KA o MA [12].

Tras la investigación sobre las diferentes configuraciones, el modelo más prometedor resultó ser el FCG coaxial. Se basa en un tubo cilíndrico de cobre, que se rellena de alto explosivo rápido. Este tubo se bobina mediante una cable de cobre, denominado estator. A su vez, para proteger el interior este conjunto se cubre mediante un elemento no conductor, por ejemplo, kevlar. Cuando se produce la explosión, el tubo deformado cortocircuita la bobina. Esto, provoca la compresión magnética de forma rápida y baja la inductancia de la bobina. El efecto final es un pulso ascendente de corriente que alcanza su punto más alto en el momento de destrucción del artefacto. Es bastante habitual el uso de una cadena de FCGs para iniciar un FCG mayor. Cabe destacar que este tipo de dispositivo aunque generen grandes potencias, solo pueden generar pulsos a frecuencias menores de 1 MHz. El problema que esto supone es que limita el rango de dispositivos que se verían afectados por este sistema, a la vez que sería muy complicado la concentración de la energía que salga del dispositivo [3].

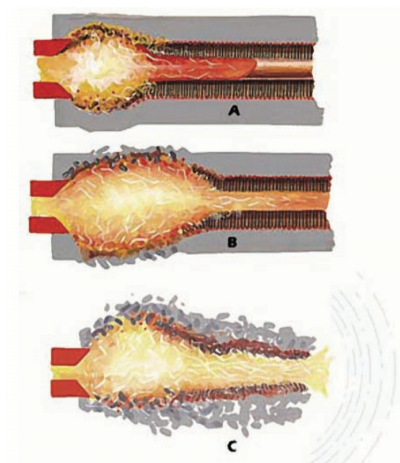


Ilustración 2.5-9 Funcionamiento de una FCG [3]

Los generadores de compresión de pulsos son el arma que más ha madurado, siendo los primeros en ser usados por tanto la URSS, como los Estados Unidos, en los años 50. Este sistema es relativamente fácil y técnicamente sencillo de diseñar por lo que se cree que es uno de los tipos que más proliferan. También se trata de una de las armas más baratas de construir, los expertos hablan de que cada una cuesta alrededor de 400 \$. [12] Un ejemplo claro de estos dispositivos son las bombas-e que fueron una de las armas más utilizadas en la guerra contra Irak. [13] Otro ejemplo de las bombas mencionadas anteriormente son las *Low Frequency E-bomb General Arrangement MK84 Packaging*, basadas en la tecnología FCG [2].

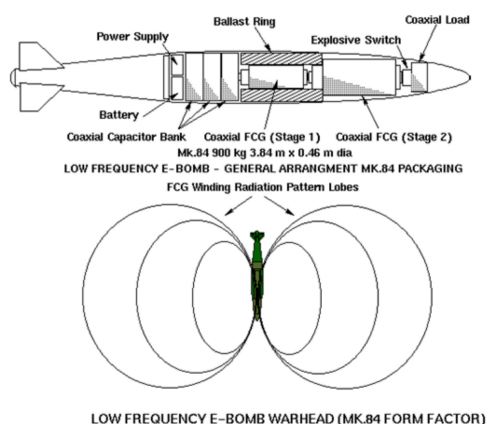


Ilustración 2.5-10 Low Frequency E-Bomb General Arrangement MK84 Packaging [13]

2.5.3.2 Generadores magneto-hidrodinámicos

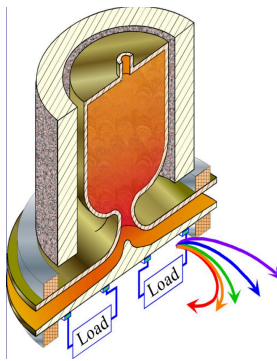


Ilustración 2.5-11 Funcionamiento del arma EMP MHD [5]

Los generadores magneto-hidrodinámicos, MHD en sus siglas en inglés, consisten en un plasma de gas ionizado explosivo en movimiento en presencia de un campo magnético. Los electrodos en contacto con el chorro de plasma recogen la corriente. Para optimizar el arma, se utilizan aditivos en el gas que hacen que ionice durante la combustión. Habitualmente se usan combustibles sólidos. Aunque este tipo de artefactos aún se encuentra en desarrollo, a día de hoy pequeños dispositivos MHD se emplean para alimentar FCGs [13] [2].

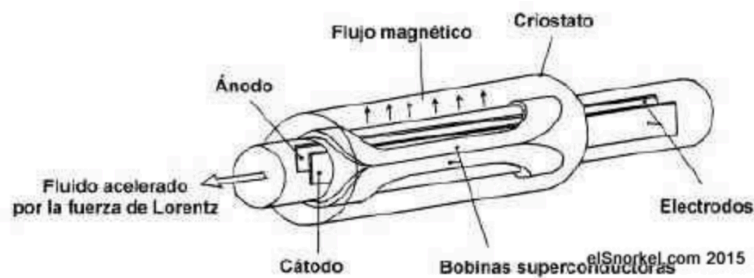


Ilustración 2.5-12 Funcionamiento de un arma EMP MHD [12]

No se poseen evidencias que ya existan armas de este tipo listas para el combate lo que sí se conoce es que este tipo de mecanismos es el futuro en lo que a armas EMP se refiere. Esto es debido a que este tipo de armas, podría llevar un gran pulso electromagnético fuera de la atmósfera, en la mayoría de los casos emplean combustible sólido.

2.5.3.3 Microondas de alta potencia.

Los dispositivos de generación de microondas de alta potencia, HPM en sus siglas en inglés, son dispositivos que se basan en la generación de ondas microondas para la causar un daño material en el enemigo. El ejemplo más evidente de este tipo de armas es el Vircator [12].

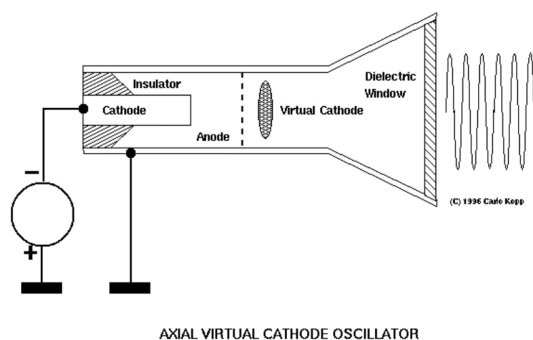


Ilustración 2.5-13 Funcionamiento de un Vircator [19]

El oscilador virtual de cátodo, Vircator (*virtual cathode oscillator*) en sus siglas en inglés, da solución a los problemas que tenía el FCG, es decir, es capaz de generar pulsos en frecuencias por encima del megahercio, y consigue que la potencia generada sea canalizable, consiguiendo que el rango de dispositivos vulnerables ante este tipo de dispositivo sea más grande que el de los FCGs. A día de hoy es el dispositivo más viable, en el campo de las armas electromagnéticas [19]. Los Vircator se han convertido en el arma electromagnética idónea por varias razones:

- Son capaces de generar una radiación de alta potencia
- Son de simple construcción.
- Son de pequeño tamaño pero robustos.
- Pueden operar en un ancho de microondas muy amplio, desde los 300 MHz a los 30 GHz.
- Tienen un rango de dispositivos vulnerables mucho mayor que los dispositivos anteriormente mencionados en este capítulo.

Aunque sean sencillos de construir, los fundamentos que rigen el funcionamiento de este tipo de dispositivos es bastante más complejo que los mencionados anteriormente. La idea principal es acelerar un haz denso de electrones contra una malla ánodo. Al pasar los electrones por esta malla, forman un área cargada tras el ánodo. El dispositivo se debe diseñar para generar un área cargada tras el ánodo que oscile en frecuencias microondas, consiguiendo potencias de pico muy elevadas. Los ensayos previos realizados consiguen niveles de potencia del orden de 170 MW y 40 MW.

Existen dos configuraciones, la axial y la transversal. La axial genera un campo transversal magnético, y la transversal genera un campo transversal eléctrico. En la actualidad el sistema que más empleo tiene es el sistema la configuración axial ya que ha producido potencias más altas. En la mayoría de los casos, la salida consiste en una guía de onda de bocina cónica, que canaliza la energía.

Algunos de los países que se conoce que han comprado o están desarrollando esta tecnología son Estados Unidos, Australia, el Reino Unido, Rusia, y Suecia. Sin embargo, cualquier país que dependa de la tecnología de información para poder sustentar su economía probablemente esté pensando en construir uno, es por eso que se cree que pueden proliferar bastante rápido. A día de hoy, se conoce que el Instituto Nacional de Investigación en Defensa sueco ha comprado una bomba rusa por un valor de 100.000 dólares que usa pulsos electromagnéticos para destruir todos los equipos electrónicos en su radio de acción [2].

El enorme radio de acción que estos dispositivos son capaces de crear, la hacen muy peligrosa para la propia plataforma lanzadora, es por ello que estas armas deben usar métodos donde la plataforma que se encargue del lanzamiento carezca de peligro alguno. Estos sistemas pueden ser los Fire-and-Forget o los sistemas de lanzamiento con guía GPS. De esta manera se lograría que estos sistemas llegen al punto de detonación de una forma más controlada, evitando así daños colaterales [12].

2.5.3.4 Armas de energía dirigida.

Estas armas emplean un pulso electromagnético a través de un conductor para acelerar un proyectil. Por lo tanto, estas armas no se diseñan con el propósito de generar un pulso, sino de acelerar un proyectil. Aun así, se consideran dentro de las armas EMP dado que dependen de la generación de este pulso para lograr su objetivo.

El *rail gun* se basa en un motor homopolar, donde una corriente eléctrica alimenta un par de conductores paralelos. El proyectil se coloca haciendo contacto en ambos conductores cerrando la corriente del circuito. Ambas corrientes provenientes de los conductores paralelos interactúan entre sí, dando lugar al movimiento del proyectil a alta velocidad. En la actualidad, la Marina de los Estados Unidos, utiliza la energía electromagnética para la propulsión de proyectiles más lejos y más rápido [20].

El *coil gun* es como se llama comúnmente a los cañones de Gauss. Fue inventado por Kristian Birkeland en 1904. Se basa en una sucesión de electro-imanes, normalmente bobinas, para conseguir la

aceleración de una proyectil a alta velocidad. A día de hoy, no existen armas diseñadas con estos mecanismos, todos los sistemas que existen son de tipo artesanal [21].

2.6 Efectos.

Los efectos de las armas EMP son dependen de la frecuencia. Para VLF LF MF y HF, tienen lugar desvanecimientos y destrucción de los equipos objetivo. Para VHF, UHF, SHF, y EHF tiene lugar absorción, dispersión, copamiento del rayo, centelleo y fluctuaciones de frecuencia y fase en los objetivos determinados [6].

Los efectos en los satélites debidos a los rayos gamma, X y partículas de neutrones causan daños en su superficie. La penetración en el interior del satélite depende de la radiación transitoria en la electrónica. Aquellas partículas radioactivas provocan un envejecimiento prematuro de satélite. Para evitarlo, se pueden utilizar técnicas de *hardening*. Estas técnicas incluyen blindaje anti-radiación, blindaje contra electromagnetismo, protección de circuitos y la selección de buenos componentes y materiales.

Estos mismos efectos tienen lugar en las instalaciones y equipos electrónicos, en forma de daño físico de los componentes del equipo, así como los trastornos en la lógica de los circuitos. Lo que ocurre con estas armas es que a diferencia de las bombas nucleares tienen un menor impacto sobre la vida humana.

Cabe destacar dos maneras de penetrar dentro de un equipo electromagnético. Por una parte están los pulsos electromagnéticos que consiguen entrar por sistemas de recogida de energía, como puede ser una antena. Esta penetración es denominada por la puerta delantera. Por otra parte, están los pulsos que penetran dentro de equipos electrónicos mediante pequeños resquicios o imperfecciones del sistema, esta penetración es denominada por la puerta trasera [15] [4].

La diferencia entre que un pulso electromagnético entra por la puerta delantera o por la puerta trasera lo determinará la frecuencia a la cual trabaje el equipo y el pulso, y la perfección del sistema de protección del mismo. En el caso en el que la frecuencia de trabajo del circuito que se quiera dañar coincida con la frecuencia del pulso generado los daños en el objetivo serán de mucho mayor calado. Para poder causar todo el daño posible, trataremos de que nuestro pulso abarque el mayor número de frecuencias, de esta manera conseguiremos que nuestro equipo pueda causar daño a un mayor número de equipos.

Otra manera que tienen de penetrar es mediante saturación. Por ejemplo, los transistores MOSFET, *metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*, microprocesadores basados un semiconductor, son dañados permanentemente usando campos eléctricos de más de 10 V/metro. Mediante el uso de armas basadas en energía electromagnética son bastante fáciles de distorsionar o inutilizar, en muchos casos provocando el mal funcionamiento del estos. Es por ello que los dispositivos que trabajen mediante el uso de esta serie de elementos son especialmente vulnerables contra los pulsos electromagnéticos [15].

En la actualidad es muy complicado saber con exactitud la potencia necesaria para inhabilitar un dispositivo. Se suele hablar de la susceptibilidad del más débil, es decir, de todo un circuito electrónico aquel elemento que sea más vulnerable a la acción de un pulso electromagnético será aquel que marque cual es la susceptibilidad del circuito completo. Más adelante se especificará cuales son las distintas aproximaciones a la hora de proteger las distintas instalaciones [2].

2.7 Protección ante los pulsos electromagnéticos.

La protección de los equipos frente a armas basadas en pulsos electromagnéticos está definida según los siguientes parámetros:

- El nivel de amenaza.

- La necesidad de supervivencia.
- El nivel de susceptibilidad.
- Los requerimientos operacionales y funcionales del sistema a proteger.

El empleo de estos sistemas de protección debe tener en cuenta que los efectos de un EMP en un equipo determinado pueden verse afectados por los efectos de un pulso electromagnético a muchos kilómetros de distancia de la detonación. No debido al campo generada persé sino debido a las corrientes generadas a causa del campo generado. Por lo tanto, debemos proteger las zonas amenazadas por esta clase de detonaciones, sino que también debemos proteger aquellos equipos conectados a las zonas o equipos amenazados.

La teoría de protección de estos sistemas se basa en tres componentes ambientales:

- Los efectos de las corrientes de tierra.
- Los efectos de los campos magnéticos.
- Los efectos de los campos eléctricos.

Para protegerse ante los efectos de las corrientes de tierra, se deberá ser capaz de controlar los flujos de corriente que están entrando en la zona o estructura que se desea proteger, como pueden ser tuberías de agua y conductores o semiconductores que entren en el área a proteger. Para ello todos los semiconductores o conductores conectados a la zona o estructura a proteger, deberán tener una conexión a tierra. Si estos conductores o semiconductores no están conectados a tierra esto puede provocar que las corrientes de tierra fluyan por la superficie creando un campo magnético indeseado en la zona o estructura a proteger [15].

2.7.1 Blindaje

Para proteger la circuitería y los componentes de los efectos de campos magnéticos y eléctricos, se debe usar un protección especial, que cubrirá toda la zona o estructura a proteger. Aunque no protege completamente el área a proteger de los efectos de un campo eléctrico, si atenúa bastante su efecto. Generalmente se usan placas de acero para proteger zonas de la acción de los campos electromagnéticos. Para la proteger la zona o estructura de los efectos de un campo magnético es necesario cubrirlo mediante un escudo conductor eléctrico. De esta manera, cuando un pulso electromagnético, se genera un flujo magnético que poco a poco rodea el escudo, creando así una corriente y un voltaje en la superficie. Para proteger el interior del escudo es necesario reducir el nivel de esa intensidad y esa corriente. Esto es posible mediante la reflexión de los campos incidentes en el escudo y mediante la absorción de las corrientes residuales generadas por el campo electromagnético incidente.

La reflexión se realizará mediante barras de acero de refuerzo, un entrelazado de cables, o mediante una cobertura del área con placas de acero. Los campos eléctricos se reflejan más que los campos magnéticos debido a la diferencia de impedancias entre la impedancia del pulso y la baja impedancia de los metales. Aquello que no sea reflejado será absorbido por el metal.

La absorción es la principal forma de proteger o atenuar una zona o estructura contra los pulsos electromagnéticos. El campo incidente es fuertemente magnético, es decir, de baja impedancia. Es por ello que este no se reflejará, creando corrientes residuales y corrientes de Foucault en el escudo. La interacción entre las corrientes de Foucault y el escudo harán que estas se disipen en forma de calor.

Actualmente existen varias aproximaciones a la hora de hacer frente a la protección de instalaciones.

- La protección global de la estructura o zona a proteger.
- La protección parcial de un área debida a su vital importancia.
- La protección de equipos en concreto.

La elección de una aproximación u otra se basará en:

- La identificación de equipos/sistemas de misión crítica
- Fiabilidad
- Coste vs Efectividad
- Mantenimiento de la solución
- Flexibilidad.

La identificación de los equipos críticos es clave para determinar el tipo de aproximación que se quiera hacer. En caso de que existan muchos equipos vitales, una protección global de todos los equipos puede ser más eficiente. A día de hoy, muchas de las instalaciones no se han protegido ante este tipo de amenaza debido, principalmente, a que el coste para la protección ante radiaciones electromagnéticas es muy alto [6].

2.7.2 TEMPEST

Otra aproximación contra la amenaza de radiaciones electromagnéticas es mediante el estudio de las emanaciones comprometidas. Estas emanaciones comprometidas son señales que son radiadas no intencionalmente, es decir, aquellas radiaciones producidas por los equipos durante su funcionamiento, en ocasiones, radiando información comprometida. Generalmente se radian en forma de energía eléctrica o acústica. Mediante el estudio de las emanaciones, conseguiremos evitar las radiaciones no solo hacia fuera, si no también hacia dentro.

Cualquier circuito que funcione con una corriente variable en el tiempo emitirá señales electromagnéticas. Si estas señales guardan alguna relación con la información que se introduce en el equipos, estaríamos emitiendo información comprometida en muchos casos en regiones lejanas a las zonas de origen de las emisiones.

Dentro de esas fuentes de emanaciones podemos diferenciar dos tipos, las fuentes funcionales y las fuentes incidentales. Las fuentes funcionales son aquellas que están diseñadas con la función de radiar energía electromagnética. Este tipo de fuentes son, por ejemplo, osciladores, transistores de conmutación, generadores de señal, sincronizadores, amplificadores de línea y relés de línea. Las fuentes incidentales son aquellos dispositivos que no han sido diseñados con el propósito de emitir señales electromagnéticas. Estos son cualquier dispositivo que estando cerca de fuentes funcionales puede radiar energía electromagnética, por ejemplo, conmutadores electromecánicos o motores. Se entiende por lo tanto que las fuentes funcionales son más vulnerables ante la radiación incidente. El hecho de que, a día de hoy, cada vez se tienda más a la integración de circuitos, componentes y conductores, está provocando un aumento en la cantidad de emisiones indeseadas por parte de algunos equipos [6].

Se conocen dos maneras de propagación de estas señales comprometidas. El estudio de estas es bastante similar al estudio realizado de la forma de penetrar de los pulsos electromagnéticos. Anteriormente se dijo que los pulsos electromagnéticos podían entrar mediante corrientes de tierra o mediante los efectos de los campos magnéticos y eléctricos generados. Las emanaciones por radiación mostrarían aquellos elementos que peor protegidos están ante los efectos de los campos eléctricos y magnéticos, mientras que los elementos que muestren emanaciones por conducción serán aquellos vulnerables ante la acción de corrientes generadas por un pulso electromagnético [6].

La protección ideal para evitar la emanación de señales es el blindaje, no solo de todos los equipos, sino también realizando un blindaje global a la vez. Su elevado coste y complejidad hacen impracticable este tipo de protección. Actualmente, la protección más eficaz pasa por la protección por zonas [6].

La protección por zonas, o *zoning* en inglés, es utilizado cuando la región requiere diferentes niveles de protección. Esta aproximación a la protección define distintos tipos de zonas según su importancia en el cumplimiento de la misión, su vulnerabilidad, la amenaza a la que estén sometidas y su relación con el resto de equipos/instalaciones.

Mediante el sistema de protección zonal conseguiríamos evitar redundancias, consiguiendo así un ahorro considerable de los costes. Son aplicables tanto a equipos aislados, a estructuras, o a unidades enteras como puede ser un barco o un cuartel [6].

2.7.3 Protección ante pulsos electromagnéticos a bordo de barcos.

La protección de pulsos electromagnéticos a bordo de barcos es una tarea que puede parecer sencilla, ya que se puede caer en la idea errónea de que la construcción del barco mediante placas de metal evitarían la penetración de pulsos electromagnéticos a bordo. Por desgracia esto no es así, debido principalmente a los añadidos de la superestructura y el casco que un barco necesita para su funcionamiento habitual. Estas imperfecciones son antenas, cables, portalones, escotillas, etc. Por lo tanto, es importante la protección de estas imperfecciones para la protección del barco como un conjunto global, de nuevo, siguiendo la aproximación de protección por zonas [4].

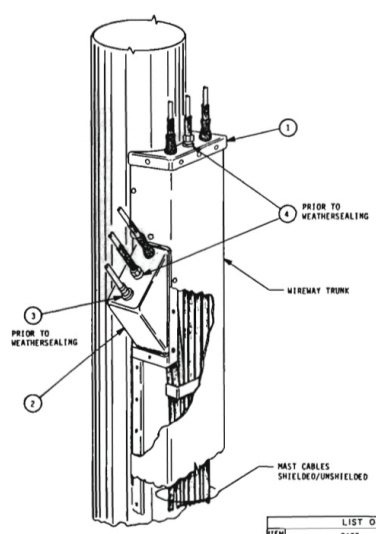


Ilustración 2.7-1 Blindaje de los cables exteriores a bordo de un barco [4]

En el libro “Shipboard Electromagnetics”, de Preston E. Law, Jr., se hace una clasificación de dos clases de sistemas, los fuertes y los débiles, *hard* y *soft* systems en inglés. Los sistemas fuertes son aquellos que están diseñados para funcionar con normalidad durante los efectos de un pulso electromagnético. Mientras que, los sistemas débiles son aquellos que no están diseñados para protegerse de los pulsos electromagnéticos. Por lo tanto para proteger aquellos sistemas débiles [4]:

- Se protegerá mediante una cobertura metálica que tenga cuantas menos salidas y resquicios posibles, del menor tamaño posible.
- Se cubrirán escotillas y portillos mediante una malla metálica.
- Se reducirán el número y la longitud de cables en todo el barco al mínimo posible.
- Se cubrirán aquellos cables expuestos mediante protectores de material conductor, que vayan desde un extremo del cable al otro.
- Se deberán reducir las corrientes residuales al mínimo, mediante unas buenas técnicas de toma de tierra.
- Se asilarán los elementos electrónicos vulnerables como los transistores o los cables pelados.
- Se intentará maximizar el uso de cables no conductores, como por ejemplo, cables de fibra-óptica, dado que estos sistemas son inmunes ante el efecto de pulsos electromagnético.
- Se priorizarán sistemas menos sensibles en circuitos electrónicos.
- Se usarán filtros de amplitud o circuitos que impidan el paso de pulsos electromagnéticos por conducción.

Como ya mencionamos, en los apartados anteriores, los mejores métodos para atenuar el pulso electromagnético son las técnicas de absorción y reflexión, *grounding and shielding* en inglés. En concreto, los cables no deberán de posibilitar el acceso de la energía del pulso electromagnético desde los puntos a la interperie hasta las entrañas del barco. Para ello la mejor manera de conseguirlo es cubriendo los cables que estén expuestos mediante una protección metálica. Esta protección metálica actuará como escudo, absorbiendo parte de la energía y transmitiéndola a tierra, a la vez reflejará la mayor parte de la energía. Es esencial que para atenuar el efecto de los pulsos electromagnéticos cada vez que un conjunto de cables transpase un mamparo o una cubierta la corriente de la protección se derive a la toma de tierra del buque [4].

Al igual que la protección de los cables, la protección de los circuitos es muy importante. Esta claro que la manera más sencilla de que la energía de un pulso electromagnético penetre en un circuito es mediante los dispositivos pensados especialmente para dicho cometido, es decir, mediante los distintos tipos de antenas, y especialmente aquellas que operen por debajo de los 100 MHz. Haciendo referencia a lo mencionado anteriormente se trataría de una penetración por la puerta delantera.

Para conseguir dicho objetivo, es necesario, derivar este pico de corriente a tierra, de forma que cuando cese el pulso electromagnético, los equipos protegidos sigan funcionando de forma normal. Hay que claro que en empleo de esta clase de dispositivos no debe de ninguna manera afectar a la eficiencia del sistema protegido. Estos sistemas se conocen como dispositivos de protección terminal, o *terminal protection devices* en inglés [4].

Los TPDs, suelen ser o bien limitadores de amplitud para limitar el acceso de altos niveles de corriente y voltaje, o bien filtros que niegan el acceso a dispositivos con una frecuencia indeseada. La mayoría de los limitadores son aislantes de alta impedancia, que se suelen instalar en paralelo con los sistemas de entrada o de salida. Están diseñados para que cuando el voltaje o la corriente sobrepase el límite determinado, el limitador se rompa haciendo que la resistencia del mismo sea mínima provocando que la corriente solo fluya a través. Una vez el pico de corriente o voltaje sea absorbido y el circuito vuelva a tener la corriente habitual el TPD vuelve a su estado original permitiendo el normal funcionamiento del circuito. Ejemplos de este tipo de TPD son varistores de metal-óxido, diodos semiconductores, y descargadores de tensión de gas o de arco eléctrico. Cabe añadir que los circuitos que funcionen con varistores y diodos deben de ser diseñados con muy baja capacitancia.

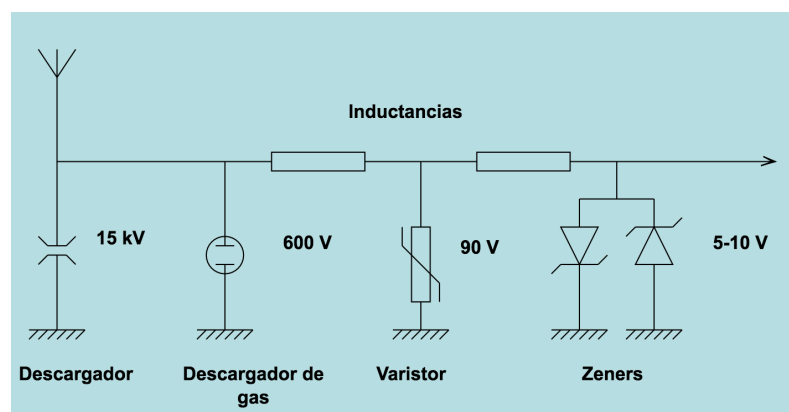


Ilustración 2.7-2 Los distintos TPDs y su voltaje máximo [6]

Los filtros de frecuencia están pensados para que solo entren en el sistema aquellas señales que se encuentren en el espectro deseado. De esta manera se previene que señales con frecuencias indeseadas entren en el sistema [4].

Otros métodos para lidiar con los pulsos electromagnéticos son los sistemas de tolerancia de transitorios, *transient-tolerant methods* en inglés. Estos métodos incluyen tres categorías: hardware, software, y procedimientos. Las técnicas de hardware evitan daños a los componentes y el mal funcionamiento del circuito, mientras que los métodos de software y procedimientos solo protegen

contra el mal funcionamiento del sistema. Estas técnicas de hardware incluyen interruptores, transformadores, relés, cierres, cortocircuitos, y sistemas de redundancia. Por otro lado, los métodos de software incluyen sistemas de detección de error y sistemas de corrección de errores para distinguir la aparición de un pulso electromagnético. Por último, los procedimientos consisten en el adiestramiento del personal en el barco para identificar y actuar en consecuencia ante la presencia de un pulso electromagnético [4].

Debido a la rapidez de los pulsos electromagnéticos, aparatos electromecánicos como interruptores, relés, y cortocircuitos, no son capaces de hacer frente a un ataque de forma eficiente. Es por ello que los descargadores de gas o de arco eléctrico, así como, los diodos semiconductores y los varistores son los dispositivos ideales para los barcos. Hay que destacar que los semiconductores son generadores potenciales de interferencias, es decir, que no deben de ser utilizados en terminales de antenas. Además los descargadores convencionales de arco eléctrico para pararrayos no son lo suficientemente rápidos para derivar un pulso electromagnético. Se puede decir que los mejores sistemas de protección de terminales ante los pulsos electromagnéticos son los descargadores de gas presurizado de arco eléctrico, especialmente diseñados para los tiempo de duración de los ataques. Las prestaciones de los TPDs dependen del tipo de gas, normalmente argón o hidrógeno a baja presión, la presión del gas, su temperatura, la forma de los puntos de donde se provoca el arco, la longitud del arco, el voltaje necesario para que el arco tenga lugar [4].

Destacar por último, que estos sistemas de protección son perfectamente aplicables a cualquier otra unidad que no sea un barco, ya sea, un cuartel, un equipo concreto, un campamento militar, etc. Se deberá partir siempre de la clasificación por zonas, seguido de unos correctos dispositivos de absorción y reflexión, siempre delimitados por los TPDs [4].

2.8 La protección ante pulsos electromagnéticos en la Armada.

En la actualidad, en la Armada se está empezando a tener en cuenta la amenaza de un ataque por pulsos electromagnéticos. Los mandos pertinentes de las Fuerzas Armadas, consultados durante la realización de este trabajo, han indicado que es un tema que a día de hoy, se encuentra en desarrollo. Este tipo de amenaza será probablemente la próxima gran amenaza de este siglo. El avance del desarrollo de los distintos dispositivos para generar un pulso electromagnético, las recientes órdenes ejecutivas por parte de las grandes potencias para protegerse ante este tipo de amenaza, el hecho de este tipo de arma no esta diseñada directamente para causar bajas en el enemigo, el enorme daño económico que puede causar a un país, el bajo coste que algunas de ellas tienen, y la escalada de la tensión de los últimos años, hacen que este tipo de ataques sean más probables en los años venideros.

Hoy en día, en la Armada, se tiene en cuenta la protección ante los rayos. Para ello se emplean sistemas de pararrayos, que como se ha dicho anteriormente, no son suficientemente rápidos para hacer frente a los tiempos de subida de los pulsos electromagnéticos. Sin embargo, algo para lo que la Armada está bastante más concienciada son mas emanaciones no deseadas. Las políticas TEMPEST aunque no directamente pueden ayudar a la detección de lugares por donde pueda penetrar un pulso [22].

Aunque al implementar medidas contras las señales TEMPEST, no estamos directamente atenuando la acción de un pulsos electromagnético, y las potencias de las señales TEMPEST no son comparables a las de los pulsos electromagnéticos. Suponen un buen punto de partida.

En las Fuerzas Armadas, el órgano encargado de la acreditación de que una unidad cumple con las políticas TEMPEST es el CNI. Esta acreditación se incluye dentro de las acreditaciones de seguridad que tiene un barco [23].

2.9 Efectos de los pulsos electromagnéticos en la salud

2.9.1 Definiciones

En este capítulo se hará un estudio del efecto que la radiación electromagnética tiene en el cuerpo humano. Haciendo un estudio según las distintas normas que rigen los trabajos en zonas donde la radiación electromagnética puede ser un factor de riesgo [24] [25].

El presente estudio se basa en la norma STNG 2345 (Ed.3), un acuerdo de estandarización OTAN, y el Real Decreto 299/2016 del 22 de Julio, donde se establecen los niveles seguros de exposición de los seres humanos ante la radiación electromagnética. Para el estudio de este proyecto trabajaré siempre con la norma más restrictiva y amplia de las dos.

El ámbito de aplicación mayor es el del Real decreto, que abarca frecuencias desde 0 a 300 GHz. Para poder explicar mejor los efectos de los cursos electromagnéticos en la salud dearrollaré primero una serie de definiciones:

- Los efectos biofísicos directos son aquellos causados directamente por la presencia de campos electromagnéticos. Estos se pueden clasificar en efectos térmicos, efectos no térmicos y corrientes en las extremidades.
 - Los efectos térmicos son aquellos provocados por la absorción de energía procedente de campos electromagnéticos.
 - Los efectos no térmicos son, por ejemplo, la estimulación de los músculos de los nervios o los órganos sensoriales, pudiendo estos ser perjudiciales para la salud física y mental de los trabajadores expuestos. Podrían llegar a provocar molestias temporales, alterar el conocimiento, u otras funciones cerebrales o musculares. En resumen, afectaría a la seguridad del proceso que se está realizando.
 - Las corrientes en las extremidades son las causadas por la presencia de un campo electromagnético o el contacto con un objeto conductor de un campo electromagnético.
- Los efectos biofísicos indirectos son aquellos causados por la presencia de un objeto en un campo electromagnético que pueda conllevar algún riesgo para salud y la seguridad. Éstos serían equipos y dispositivos médico-electrónicos, la proyección de objetos ferromagnéticos, la activación de dispositivos electro-explosivos, como por ejemplo detonadores, o incendios y explosiones resultantes de la inyección de materiales inflamables, así como, corrientes de contacto.
- En el caso de la publicación OTAN, se habla del *permissible exposure level, (PEL)*, mientras que en el caso del Real Decreto, se habla del valor límite de exposición VLE. En ambos casos, se hace una distinción entre los valores límites de exposición relacionados con efectos para la salud y los valores límites de exposición relacionados con efectos sensoriales.
 - Los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud son aquellos por encima de los cuales los trabajadores pueden sufrir efectos adversos para la salud como el calentamiento o estimulación de los tejidos nerviosos y musculares.
 - Los valores límite de exposición relacionados con efectos sensoriales son los valores por encima de los cuales los trabajadores pueden estar sometidos a transtornos transitorios de las percepciones sensoriales y a cambios en las funciones cerebrales.
- Los niveles de acción son aquellos niveles operativos establecidos para simplificar el cumplimiento de los valores límite, se distinguirá entre niveles de acción inferiores y niveles de acción superiores.
 - Los niveles de acción inferiores serán los relativos a los valores límite de exposición relacionados con efectos sensoriales, mientras que, los niveles de acción superiores serán aquellos debidos a los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud.

Tanto en el caso del Real decreto, como en el caso de la publicación OTAN, no se habla de los posibles efectos a largo plazo ni los riesgos derivados del contacto con conductores en tensión. Sin embargo, tras haber definido todos estos tipos de efectos, sí aclara en ambos casos que, solamente se tratarán los efectos biofísicos directos a corto plazo y la exposición a campos electromagnéticos.

Se considerará que se superan los niveles de acción cuando se estén superando los valores límites de exposición relacionados con los efectos para la salud o con los efectos sensoriales. En el caso de superar los niveles de acción, se deberán tomar las medidas necesarias para reducir la exposición hasta que se demuestre que no se superan los valores límite de exposición que puedan producir algún riesgo para la salud de los trabajadores afectados.

Por otro lado, se definen los valores físicos que van a caracterizar el campo electromagnético a estudiar. Estos parámetros son la intensidad de campo eléctrico (E), medido en voltios por metro (V/m) haciendo una diferencia entre el campo eléctrico ambiental y el campo eléctrico in situ, intensidad de campo magnético (H), expresado en amperios por metro (A/m), y por último, la densidad de flujo magnético o inducción magnética (B), expresado en teslas (T).

Tras caracterizar estos parámetros se definen los siguientes:

- Densidad de potencia: medida en vatios por metro cuadrado (W/m²).
- Corriente en las extremidades: como resultado del contrato del objeto en un campo electromagnético, expresada en amperios (A).
- Corriente de contacto: expresada en amperios (A), en el caso de que una persona esté en contacto con un objeto en un campo electromagnético, estas pueden producirse en forma de chispas con corrientes transitorias asociadas.
- Carga eléctrica: medida en culombios (C).
- Absorción específica de energía: es la energía absorbida por unidad de masa de tejido biológico expresada en julios por kilogramo (J/kg).
- Tasa de absorción específica: que es la cantidad de energía absorbida por masa de tejido corporal expresada en W/kg.

De las unidades aquí mencionadas, las únicas que pueden medirse directamente son intensidad de campo eléctrico, intensidad de campo magnético, densidad de flujo magnético, densidad de potencia, corriente de contacto y corriente en las extremidades.

A continuación en la tabla Tabla 2.9-1, se detallan, para los valores límite de exposición. En primer lugar, la densidad de flujo magnético de 0 a 1 Hz.

Tabla 2.9-1 Densidad de flujo magnético 0 Hz a 1 Hz [24]

VLE relacionados con efectos sensoriales

Condiciones de trabajo normales	2 T
Exposicion localizada en las extremidades	8T

VLE relacionados con efectos para la salud

Condiciones de trabajo controladas	8 T
------------------------------------	-----

A continuación en la Tabla 2.9-2, se exponen los valores límite de exposición relacionados con los efectos para la salud para el campo eléctrico in situ de 1 a 10 MHz. Los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud para un campo eléctrico in situ son los valores pico en el tiempo

espaciales del cuerpo entero de la persona expuesta. Estos son iguales a los valores cuadráticos medios multiplicados por la raíz cuadrada de dos para los campos sinusoidales.

Tabla 2.9-2 Valores límite de exposición relacionados con los efectos para salud para el campo eléctrico in situ de 1 a 10 MHz [24]

Intervalo de frecuencias	E (μV/m)
$1 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	1,1
$3 \text{ kHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$	$3,8 * 10^{-4} * f(\text{Hz})$

En la Tabla 2.9-3 se describen los valores límite de exposición relacionados con los efectos sensoriales por el campo eléctrico in situ de 1 a 400 Hz.

Tabla 2.9-3 Valores límite de exposición relacionados con los efectos sensoriales por el campo eléctrico in situ de 1 a 400 Hz [24]

Intervalo de frecuencias	E (μV/m)
$1 \text{ Hz} \leq f < 10 \text{ Hz}$	$0,7/f$
$10 \text{ Hz} \leq f < 25 \text{ Hz}$	0,07
$25 \text{ Hz} \leq f < 400 \text{ Hz}$	$0,0028 * f(\text{Hz})$

En la Tabla 2.9-4 se definen los niveles de acción para campos magnéticos estáticos:

Tabla 2.9-4 Niveles de acción para campos magnéticos estáticos [24]

Riesgos	NA (B)
Interferencias con dispositivos médicos activos implantados, por ejemplo, marcapasos cardíacos	0,5 mT
Riesgo de atracción y proyección de objetos en la proximidad de campos magnéticos intensos.(> 100 mT)	3 mT

Los niveles de acción para campos eléctricos de 1 Hz a 10 MHz se definen en la Tabla 2.9-5.

Tabla 2.9-5 Niveles de acción para campos eléctricos de 1 Hz a 10 MHz [24]

Intervalo de frecuencias	NA inferior (E) (V/m) RMS	NA superior (E) (V/m) RMS
$1 \text{ Hz} \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2 * 10^4$	$2 * 10^4$
$25 \text{ Hz} \leq f < 50 \text{ Hz}$	$5 * 10^5 / f$	$2 * 10^4$

$50 \text{ Hz} \leq f < 1,64 \text{ kHz}$	$5 * 10^5 / f$	$2 * 10^6 / f$
$1,64 \text{ kHz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$5 * 10^5 / f$	$6,1 * 10^2$
$3 \text{ kHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$	$1,7 * 10^2$	$6,1 * 10^2$

Los niveles de acción para el campo magnético se establecen en la Tabla 2.9-6.

Tabla 2.9-6 Niveles de acción para el campo magnético [24]

Intervalo de frecuencias	NA inferior (E) (V/m) RMS	NA superior (E) (V/m) RMS	NA para exposición de las extremidades a campo magnético localizado (μT) (RMS)
$1 \text{ Hz} \leq f < 8 \text{ Hz}$	$2 * 10^5 / f^2$	$3 * 10^5 / f$	$9 * 10^5 / f$
$8 \text{ Hz} \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2,5 * 10^4 / f$	$3 * 10^5 / f$	$9 * 10^5 / f$
$25 \text{ Hz} \leq f < 300 \text{ Hz}$	$5 * 10^3$	$3 * 10^5 / f$	$9 * 10^5 / f$
$300 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$3 * 10^5 / f$	$3 * 10^5 / f$	$9 * 10^5 / f$
$3 \text{ kHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$	$1 * 10^2$	$1 * 10^2$	$3 * 10^2$

Los niveles de acción para corrientes de contacto son definidos en la Tabla 2.9-7.

Tabla 2.9-7 Niveles de acción para corrientes de contacto [24]

Intervalo de frecuencias	NA (I) en estado estacionario (mA) (RMS)
<i>hasta 2,5 kHz</i>	1
$2,5 \text{ kHz} \leq f < 100 \text{ kHz}$	$0,4 * f(\text{kHz})$
$100 \text{ kHz} \leq f < 10 \text{ GHz}$	40

Después de definir los valores de acción para los efectos no técnicos, se establecen los valores límites de exposición para los efectos térmicos. En primer lugar, la Tabla 2.9-8 muestra los valores límites de exposición relacionados con efectos para la salud para campos electromagnéticos de 100 kHz A6 gigaherzios.

Tabla 2.9-8 Valores de exposición relacionados con efectos para la salud para campos electromagnéticos de 100 kHz a 6 GHz [24]

VLE relacionados con efectos para la salud	SAR promediado a cualquier periodo de seis minutos
--	--

VLE para el estrés térmico de cuerpo completo, expresado en SAR promediado para cuerpo entero	0,4 W/Kg
VLE para el estrés térmico de cabeza y tronco, expresado en SAR localizado en cabeza y tronco.	10 W/Kg
VLE para el estrés térmico en las extremidades, expresado en SAR, localizado en las extremidades.	20 W/Kg

En la Tabla 2.9-9, se exponen los valores límite de exposición relacionados con efectos sensoriales para campos electromagnéticos de 300 MHz a 6 GHz, estudiados en cantidad de 10 g.

Tabla 2.9-9 Valores límite de exposición relacionados con los efectos sensoriales para campos electromagnéticos de 300 MHz a 6 GHz [24]

Intervalo de frecuencias	Absorción específica de energía localizada (SA)
$0,3 \text{ Hz} \leq f < 6 \text{ GHz}$	10 mJ/kg

En la Tabla 2.9-10, se exponen los valores límite de exposición relacionados con los defectos para la salud para campos electromagnéticos de 6 a 300 gigahertzios, realizados en superficies de 20 cm².

Tabla 2.9-10 Valores límite de exposición relacionados con los efectos para la salud para campos electromagnéticos de 6 a 300 GHz [24]

Intervalo de frecuencias	Densidad de potencia (S)
$6 \text{ GHz} \leq f < 300 \text{ GHz}$	50 W/m^2

En la Tabla 2.9-11 se trata los niveles de acción, niveles de acción para campos eléctricos y magnéticos de 100 kHz a 300 GHz.

Tabla 2.9-11 Niveles de acción para campos eléctricos y magnéticos de 100kHz a 300 GHz [24]

Intervalo de frecuencias	NA de campo eléctrico (E) (V/m) RMS	NA de inducción magnético (B) (μT) RMS	NA (S) de densidad de potencia (W/m ²)
$100 \text{ kHz} \leq f < 1 \text{ MHz}$	$6,1 * 10^2$	$2 * 10^6 / f$	—
$1 \text{ MHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$	$6,1 * 10^8 / f$	$2 * 10^6 / f$	—
$10 \text{ MHz} \leq f < 400 \text{ MHz}$	61	0,2	—
$400 \text{ MHz} \leq f < 2 \text{ GHz}$	$3 * 10^{-3} * f^{1/2}$	$1 * 10^{-5} * f^{1/2}$	—
$2 \text{ GHz} \leq f < 6 \text{ GHz}$	$1,4 * 10^2$	$4,5 * 10^{-1}$	—
$6 \text{ GHz} \leq f < 300 \text{ GHz}$	$1,4 * 10^2$	$4,5 * 10^{-1}$	50

En la Tabla 2.9-12 se exponen los niveles de acción para corriente de contacto y corrientes inducidas en las extremidades.

Tabla 2.9-12 Niveles de acción para corrientes de contacto y corrientes inducidas en las extremidades [24]

Intervalo de frecuencias	NA (I) corrientes de contacto en estado estacionario (mA) RMS	NA (I) corrientes inducidas en extremidades (mA) RMS
$100\text{ kHz} \leq f < 10\text{ MHz}$	40	—
$10\text{ MHz} \leq f < 110\text{ MHz}$	40	100

2.10 Las armas de pulsos electromagnéticos y el Derecho Humanitario Internacional.

Una vez definidos los distintos tipos de armas basadas en la energía electromagnética y la amenaza actual, se procederá a realizar un análisis sobre la legitimidad del uso de las armas citadas, y su conformidad con el artículo 36 del Protocolo adicional I de 1977 del Convenio de Ginebra de 1949. Esto se realiza para que como reza la Declaración de San Petersburgo, de 1868, “*determinar los límites técnicos, en que las necesidades de la guerra deben detenerse ante las exigencias de la humanidad*”, en lo que a armas electromagnéticas se refiere [26].

2.10.1 Guía para el examen jurídico de las armas, los medios y los métodos de guerra nuevos.

Para ello, se empleará la Guía para el análisis jurídico de las armas, los medios y los métodos de guerra nuevos. El objetivo de la creación de esta guía es el cumplimiento del artículo 36 del Protocolo adicional I de 1977:

“Cuando una Alta Parte contratante estudie, desarrolle, adquiera o adopte una nueva arma, o nuevos medios o métodos de guerra, tendrá la obligación de determinar si su empleo, en ciertas condiciones o en todas las circunstancias, estaría prohibido por el presente Protocolo o por cualquier otra norma de derecho internacional aplicable a esta Alta Parte contratante.” [26]

Este artículo se aplica a todos los Estados, que cumplen fiel y responsablemente las obligaciones que tiene en virtud del derecho internacional. Debe asegurarse de que las armas, los medios y los métodos de guerra que adquiera no violen estas obligaciones. Se trata de un tema controvertido actualmente debido a la alta rapidez con la que el desarrollo tecnológico está promoviendo la aparición de nuevas tecnologías de armas.

Al no determinarse como debe realizar la licitud de armas, “implica obligatoriamente el establecimiento de procedimientos internos que permitan dilucidar este problema de legalidad, y que otras Partes contratantes puedan solicitar que se les informe al respecto”. Sin embargo pocos son los países que hayan desarrollado procedimientos para los exámenes de la licitud de armas. A día de hoy solo Australia, Bélgica, Estados Unidos, Holanda, Noruega, y Suecia, los habrían desarrollado [26].

Es aún más, en la XXVII Conferencia Internacional de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja, se insta a promover “ el intercambio de información y la transparencia en relación con esos mecanismos, procedimientos y evaluaciones.” Más tarde en 2001, durante la Segunda Conferencia de Examen de la Convención sobre Ciertas Armas Convencionales, los Estados Partes instan “ a los Estados que aún no lo han hecho a que realicen exámenes tal como dispone el artículo 36 del Protocolo adicional I a los Convenios de Ginebra 1949, a fin de determinar si las armas, los medios, y los métodos de guerra nuevos estarían prohibidos por el derecho internacional humanitario u otras normas del derecho internacional aplicable a ellos” [26].

Esto se refuerza a raíz de “un rápido avance tecnológico de las armas y con objeto de proteger a la población civil de los efectos indiscriminados de las armas y a los combatientes de los sufrimientos innecesarios y las armas prohibidas.”, haciendo un “ enfoque multidisciplinario, que incluye consideraciones de índole militar, jurídica, medioambiental, y sanitaria.”, y “ examinar con especial atención las armas, los medios y los métodos de guerra que causan efectos en la salud poco conocidos por el personal médico” [26].

El artículo 36 del Protocolo adicional I es aplicable “a nueva arma, nuevos medios o métodos de guerra”. El conjunto de armas o situaciones dentro de es muy amplio, abarca [26]:

- Las armas de todo tipo, sean antipersonal o antimaterial, “letales”, “no letales” o “menos letales”, y sistemas de armas.
- Las maneras en que han de usarse estas armas conforme a la doctrina militar, las tácticas, las reglas de enfrentamiento, los procedimientos de operación y las contramedidas.
- Todas las armas que hayan de ser adquiridas, sean armas fabricadas conforme a un proceso de investigación y desarrollo sobre la base de especificaciones militares, o armas en existencia.
- Un arma que un estado quiera adquirir por primera vez, sin que sea necesariamente nueva en un sentido técnico.
- Un arma existente que es modificada de tal manera que se altera su función, o un arma que ya ha sido sometida a examen jurídico, pero luego es modificada.
- Un arma existente cuando un Estado que se adhiere a un nuevo tratado internacional que puede afectar a la licitud del arma.

2.10.2 Marco jurídico: normas que han de aplicarse a las armas, los medios y los métodos de guerra nuevos.

Tras aclarar el rango de aplicación de las leyes, se realiza a continuación un recopilatorio cronológico de las prohibiciones o restricciones generales y específicas de las armas, los medios, y los métodos de guerra en el derecho humanitario internacional y en el derecho internacional consuetudinario [26].

Para ser más concreto a la hora de licitar los distintos tipos de armas que forman parte de las armas basadas en la energía electromagnética, solo mencionaré las las prohibiciones que afecten a las armas basadas en energía electromagnética. Estas son según su clasificación [26]:

- Prohibiciones o restricciones de armas específicas en el derecho internacional consuetudinario:
 - Queda prohibido el empleo de armas que estén de algún modo unidas o vinculadas a objetos o personas que gozan de una protección especial del derecho internacional humanitario o a objetos que pueden atraer a las personas civiles.
- Prohibiciones o restricciones generales relativas a las armas, los medios y los métodos de guerra, en el derecho internacional convencional:
 - Queda prohibido el empleo de armas, proyectiles, materias, y métodos de hacer la guerra de tal índole que causen males superfluos o sufrimientos innecesarios.

- Queda prohibido el empleo de métodos o medios de hacer la guerra que hayan sido concebidos para causar, o de los que quepa prever que causen, daños extensos, duraderos y graves al medio ambiente natural.
- Queda prohibido emplear métodos o medios de combate que no pueden dirigirse contra un objetivo militar concreto y que, por lo tanto, pueden alcanzar indistintamente a objetivos militares y a personas civiles o a bienes de carácter civil.
- Queda prohibido emplear métodos o medios de combate cuyos efectos no sea posible limitar conforme a objetivos militares y a personas civiles o a bienes de carácter civil.
- Quedan prohibidos los ataques, cuando sea de prever que causarán incidentalmente muertos y heridos entre la población civil, o daños a bienes de carácter civil, o ambas cosas, que serían excesivos en relación con la ventaja militar concreta y directa prevista (norma de proporcionalidad).
- Prohibiciones o restricciones generales relativas a las armas, los medios, y los métodos de guerra de conformidad con el derecho internacional consuetudinario:
 - Queda prohibido el empleo de medios y métodos de guerra de tal índole que causen males superfluos o sufrimientos innecesarios.
 - Queda prohibido el empleo de armas de tal índole que sus efectos sean indiscriminados. Se incluyen los medios de guerra que no pueden dirigirse contra un objetivo militar concreto y los medios de guerra cuyos efectos no sea posible limitar, tal como exige el DIH.
 - Queda prohibido lanzar un ataque cuando sea de prever que cause incidentalmente muertos y heridos entre la población civil, daños a bienes de carácter civil o ambas cosas, que sean excesivos en relación con la ventaja militar concreta y directa prevista.
- Prohibiciones o restricciones basadas en los principios de humanidad y los dictados de la conciencia pública (la cláusula Martens):
 - Se comprobará si el arma respeta los principios de humanidad y los dictados de la conciencia pública, tal como se hace referencia en la llamada “cláusula de Martens”, recogida en el artículo 1(2) del Protocolo adicional I de la siguiente manera:

“En los casos no previstos en el presente Protocolo o en otros acuerdos internacionales, las personas civiles y los combatientes quedan bajo la protección y el imperio de los principios del derecho de gentes derivados de los usos establecidos, de los principios de humanidad y de los dictados de la conciencia pública.”

2.11 Examen de la licitud de las armas basadas en la energía electromagnética.

Tras exponer el amplio rango de tipos de armas basadas en energía electromagnética y el marco legal que rige el examen de armas nuevas, junto con las características de las distintas clases de armas, y las maneras del protegerse ante ellas, se realizará a continuación un análisis de la licitud de las armas expuestas. Para ello, se seguirá el esquema empleado en la clasificación de este tipo de armas. Queda por descontado, que el pulso electromagnético natural queda fuera de este examen dado que se trata de algo no generado por medios humanos. También, cabe destacar que este documento se trata de un Trabajo de Fin de Grado y que cómo tal carece de carácter legal para ser empleado en contra del uso de las distintas armas basadas en energía electromagnética.

Para hacerlo, se tendrán en cuenta 5 aspectos del uso de armas, reflejados en el capítulo anterior, estos son [27]:

1. Prohibición de los ataques contra personas civiles o bienes de carácter civil.
2. Prohibición de los ataques indiscriminados, es decir, que dichos ataques provoquen daños contra un objetivo militar o uno civil sin ninguna distinción.

3. Prohibición de ataques en los que se ponga en riesgo la protección del medio ambiente natural.
4. Permisión de causar un daño a la población civil, durante un ataque legítimo contra un objetivo militar siempre y cuando, el impacto incidental sobre la población civil previsible no sea excesivo con respecto a la ventaja militar concreta y directa que se espera obtener.
5. Obligación de tomar las precauciones factibles en los ataques. Es decir, que los ataques se han de llevar con el cuidado constante de la población civil y los bienes de carácter civil.

Como se puede ver, este tipo de examen conlleva la delimitación entre los bienes de carácter civil y la población civil, y los objetivos militares, es por ello, que se aclarará cuales son los bienes de carácter civil, según el artículo 52.2 del Protocolo adicional I de 1977 . Estos se dividen en tres clases de bienes [28]:

- Los bienes indispensables para la supervivencia de la población civil. Queda prohibido atacar destruir, sustraer, o inutilizar bienes indispensables para la supervivencia de la población civil, sean estos los artículos alimenticios y las zonas agrícolas que los producen, las cosechas, el ganado, las instalaciones y reservas de agua potables, y las obras de riego, con la intención deliberada de privar de esos bienes, por su valor como medios para asegurar la subsistencia, a la población civil o a la parte adversa.
- Obras o instalaciones que contienen fuerzas peligrosas. Ya sean diques, presas, o centrales nucleares de energía eléctrica.
- Bienes culturales. Queda prohibido dañar los bienes culturales, y el Estado que los tenga bajo su poder deberá cumplir con los deberes de preservación de los mismos.

2.11.1 Nucleares

Por un lado, se tratarán las armas de pulsos electromagnéticos basadas en explosiones nucleares. En este aspecto, dos grupos quedan claramente diferenciados. Por un lado, las detonaciones de bombas nucleares por debajo de los 30 Km, en las que los resultados de las bombas electromagnéticas no son absorbidos por la atmósfera, causando daños devastadores a la vida humana. Por el otro lado, están las detonaciones por encima de los 30 Km, que se consideran detonaciones nucleares de gran altitud, en las cuales los daños más peligrosos para la vida humana directamente, quedarían absorbidos por la atmósfera. De esta manera, a la superficie terrestre solo llegarían los pulsos electromagnéticos, como ya se ha explicado en capítulos anteriores. Sin embargo, el ataque de este tipo de pulsos electromagnéticos no cumpliría con las normas mencionadas anteriormente:

Para simplificar la explicación, se hará con un número a las normas mencionadas anteriormente.

1. Aunque los daños sobre la vida humana no se llevarían a cabo directamente, si es verdad, que cualquier persona, que se encuentre realizando alguna clase de actividad mediante el uso de dispositivos eléctricos o electrónicos, podría sufrir daños. Véase:

- Personas que usen un marcapasos,
- Personas que se encuentren en servicios de transporte que dependan de la energía eléctrica para funcionar y carezcan de protección ante este tipo de amenaza, aviones, trenes, coche, barcos, etc.
- Personas que se encuentren en las inmedianaciones de cables que puedan transportar alta tensión debido a las corrientes de tierra, o los efectos de los campos eléctricos o magnéticos provocados por los pulsos.
- Personas que se encuentren en hospitales y dependan del uso de aparatos eléctricos para su supervivencia.

1. También se debe de hablar de que aunque la electricidad no está considerada como un bien de carácter civil, es considerada por muchos países como un derecho humano, debido a que para cumplir con los bienes de carácter civil, la electricidad es esencial. Ejemplo de ello son:

- El transporte de los alimentos desde el lugar donde se obtienen a los centros de distribución

- El acceso a dinero por parte de los bancos para poder mantener esos bienes
- El transporte del agua por sistemas de bombeo.
- El posible colapso de obras o instalaciones que contienen fuerzas peligrosas.
- La inutilización de todos aparatos eléctricos, que carezcan de protección, que se usen en la producción y/o conservación de esos bienes de carácter civil.

2. Se trataría de daños indiscriminados en los cuales no es posible distinguir entre objetivos militares o civiles. El amplio radio de acción de este pulso electromagnético, hace que estos no sean controlados.

4. Respecto a la norma de proporcionalidad, a día de hoy, pocas armas hay más potentes que un arma nuclear. Por lo tanto, este tipo de detonaciones solo estaría permitido si alguna de las partes involucradas en el conflicto, han usado este tipo de armas previamente, o han usado armas que causen un daño proporcional al provocado por las nucleares.

5. En este caso, como ya se ha expuesto en este trabajo, la sociedad actual no se encuentra protegida ante este tipo de amenaza. Es, por ello, impracticable realizar un ataque de este tipo sobre un objetivo militar sin causar daños sobre la población civil o los bienes de carácter civil.

Por todo lo mencionado, la Comisión Internacional de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja concluyen que: [27] “Es difícil imaginar cómo cualquier uso de armas nucleares podría ser compatible con las normas del derecho internacional humanitario, en particular con las disposiciones relativas a la distinción, la precaución y la proporcionalidad”.

2.11.2 No nucleares

Por otro lado, están las armas no nucleares, mencionadas anteriormente. Este tipo de armas, aunque causan efectos bastante similares a las detonaciones nucleares, tienen unos matices que hacen los efectos de las no nucleares diferentes, respecto al Derecho Internacional Humanitario [26]. Para evitar redundancias, se mencionarán las diferencias de estas, respecto de las normas mencionadas. Estas son [27]:

1. El hecho de que estas armas puedan ser programadas de manera que el pulso electromagnético solo afecte ciertas frecuencias y tenga un radio de acción determinado. Hace que se puedan detonar afectando solamente a objetivos militares.

2. Debido a que estas armas pueden ser programadas, no serían ataques indiscriminados, siempre que se limite el radio de acción de la misma a objetivos militares. Aún así, dentro de ese radio de acción, cualquier otro dispositivo que trabaje con una frecuencia dentro del ancho de banda del arma, quedaría inutilizado. Es por ello, que solo teniendo un buen conocimiento de las frecuencias utilizadas por los dispositivos militares y civiles se podrá realizar una clara discriminación entre objetivos militares y civiles. Como ya se ha mencionado anteriormente, esto es posible gracias al llamado Electronic Order of Battle, EOB, donde se detallan las bandas de frecuencia de trabajo de los dispositivos enemigos y amigos [12].

4. Este tipo de arma cumpliría con la norma de proporcionalidad debido a que se podrían realizar daños materiales grandes sin poner en riesgo las vidas humanas enemigas directamente. Al usar estas armas sobre un objetivo militar, otras instalaciones civiles que estén conectadas o relacionadas con este objetivo pueden sufrir daños debido a las corrientes inducidas [4]. Aún así, se podrían considerar daños colaterales dentro de las normas de proporcionalidad.

5. Como ya se ha mencionado anteriormente, solo aquellas armas debidamente programadas en frecuencia y radio de acción respecto al objetivo a abatir, cumplirían con las normas del Derecho Humanitario Internacional. En el uso de estas con amplios márgenes de frecuencia y grandes radios de acción, de forma indiscriminada, quedarían fuera del marco jurídico mencionado este trabajo.

Tras haber mostrado la conformidad de estas armas respecto ordenamiento jurídico, queda más claro aún que las armas, basadas en energía electromagnética, son la clase de armas que formarán la principal amenaza en un futuro cercano.

3 DESARROLLO DEL PROTOTIPO

3.1 Introducción

Una vez descrito el funcionamiento de los distintos modelos de armas basadas en la energía electromagnética, se decide construir un pequeño montaje para demostrar los daños a pequeña escala de las armas de pulsos electromagnéticos y para demostrar el daño que se puede provocar con materiales simples.

3.2 Montaje experimental

Como ya se ha visto en el estado del arte, las armas más eficaces consisten en sistemas complejos con un radio de acción muy grande y que pueden causar unos daños enormes. También se ha demostrado como es muy complicado el control de los equipos afectados, y en muchos casos pueden causar daños irreparables. Debido al peligro que se puede causar, no se va a construir una bomba nuclear, ni se va a realizar una detonación fuera de la atmósfera, ni se va a montar una FCG, una MHD, o una HPM. Tampoco se desea usar grandes potencias que puedan provocar grandes daños. Es por ello, que el montaje que se pretende diseñar es un pequeño circuito basado en un generador de pulsos de alto voltaje. Estos generadores se suelen emplear en experimentos de laboratorio, en las pistolas paralizantes de uso policial.

El montaje creará los pulsos mediante un generador de pulsos, que será alimentado por dos baterías de 3,5 V, de voltaje nominal, en serie. Una vez cargadas estas baterías tienen un voltaje de 3,7 V. Se considerará las baterías como si fueran de 3,7 V. A la salida del generador hay un arco eléctrico, que permitirá circular la corriente cuando la diferencia de potencial entre los dos extremos de cable sea suficiente para vencer la resistencia del aire, y lo hará durante un periodo de tiempo muy corto. Entonces la corriente saliente del generador circulará a través de una bobina de cobre. Esta bobina de cobre está diseñada para crear un campo magnético de que se concentra en el centro de la bobina.

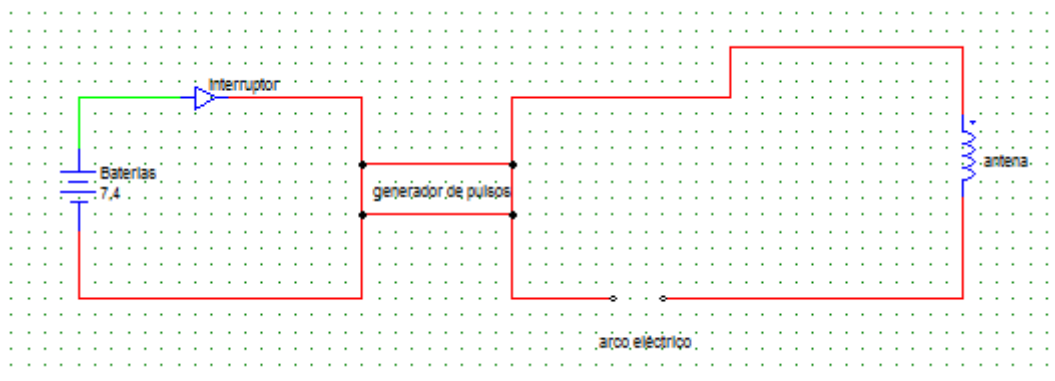


Ilustración 3.2-1 Circuito del montaje experimental, elaboración propia

3.3 Componentes

Los componentes que utilizaré para desarrollar el prototipo son los siguientes:

- Generador de alto voltaje.
- Cobre esmaltado.
- Reflector
- Caja metálica protectora del circuito
- Baterías recargables de 3,5 V.

3.3.1 Generador

El generador de pulsos de alto voltaje nos permitirá producir los altos voltajes necesarios. Se probarán dos modelos de generadores de pulsos, el primero será un generador de menor voltaje (40kV). Tras esto se comprobará la entrada y la salida de los dos modelos para realizar las pruebas con más seguridad.

Datos: generador de pulsos N°1:

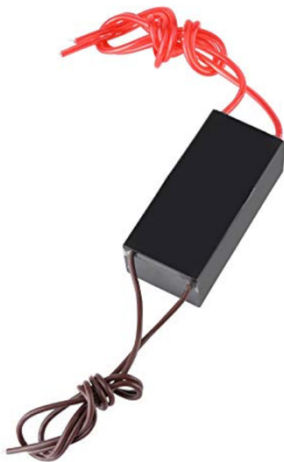


Especificaciones:

Voltaje de entrada: 3.6 V, 4.8 V, 6 V, 12 V DC
 Voltaje de salida: DC 3 kV ~ 11 kV
 Distancia del arco: 10 mm
 Corriente de trabajo: 1000 mA
 Diámetro del cable de entrada: 2 ± 0.03 mm
 Diámetro del cable de salida: 6.8 ± 0.03 mm (en vivo); 2.2 ± 0.03 mm (GND)
 Longitud del cable de entrada: 200 mm
 Longitud del cable de salida: 270 mm (GND); 380 mm (en vivo)
 Color del cable de entrada: Rojo (positivo), Blanco (negativo)

Ilustración 3.3-1 Generador N°1 y sus especificaciones [33]

Datos: generador de pulsos N°2:



Tamaño: los 70 * 30 * 24mm / 2.75 * 1.18 * 0.94 "
 Voltaje de entrada: 6V-12V DC
 Corriente de entrada: 0.5A-1A
 Longitud del cable de entrada: Aprox. 26cm / 10.23 "
 Tipo del alto voltaje: Pulso DC
 Voltaje de salida: Aproximadamente 60KV
 Corriente de salida: 0.5A-1A
 Longitud del cable de salida: Aprox. 48cm / 18.89 "
 Distancia de descarga del arco: 1.5cm / 0.59 "a 2cm / 0.78"
 Fuente de alimentación: Batería de Ni-Cd / Ni-mh, batería de plomo 6V o 12V

Ilustración 3.3-2 Generador N°2 y sus especificaciones [33]

Este es el elemento más complejo de todo el proyecto. Como se puede ver, en la ficha técnica poco se habla del funcionamiento interno de estos aparatos. Al desconocer el funcionamiento interno del generador, se investiga acerca de los posibles modelos de generadores de pulsos que existen. El modelo que más se parece al generador de pulsos es la bobina de Tesla.

3.3.1.1 Bobinas Tesla

Una bobina de Tesla esta compuesta de dos circuitos: uno primario y uno secundario, cada uno con sus respectivos condensadores. Las dos bobinas están conectadas mediante un arco eléctrico, que se genera entre dos electrodos. Este circuito está conectado a un transformador que alimenta el circuito primario.

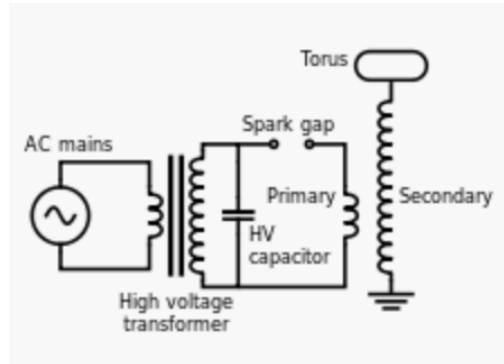


Ilustración 3.3-3 Circuito de un generador de alto voltaje basado en las bobinas Tesla [34].

El circuito primario necesita una alimentación de alto voltaje, esta puede ser suministrada mediante una alimentación común que a través de un transformador, generará una corriente de alto voltaje. La bobina y el condensador del circuito primario almacenan la energía. El condensador almacenará energía hasta el punto que esta sea capaz de romper la resistencia del aire y crear un arco eléctrico. Este fenómeno se llama *spark gap*. Al producirse el arco eléctrico el condensador se descarga a través del arco, induciendo corriente en el circuito secundario mediante la bobina de este circuito. Esta clase de circuito genera una corriente de alto voltaje con PRF en la banda de (30 kHz - 300 kHz).

Este tipo de generadores de alto voltaje se suele utilizar para crear grandes arcos eléctricos mediante el almacenamiento de la energía producida en un toroide en el circuito secundario. Este tipo de circuitos hoy en día se usan para sobretodo para demostraciones del arco eléctrico y para fines educativos. Sin embargo, lo que realmente nos interesa es el circuito interno que se emplea para transpasar energía entre el circuito primario y el secundario. Es lo que se intuye que puede ser el circuito de nuestro generador de pulsos [34].



Ilustración 3.3-4 Interior del Generador de Pulsos

Este tipo de generadores de alta tensión se plantea inicialmente como que sea uno de los circuitos internos de los generadores empleados. Al finalizar los experimentos, se abre uno de los generadores. Se puede comprobar que hay dos circuitos separados que solo se comunican con un arco eléctrico, exactamente como se ha explicado en el caso de una bobina Tesla. En la imagen se puede apreciar los dos circuitos separados y que están comunicados por el arco eléctrico. Por lo tanto, se asume el circuito de los generadores de Tesla como el circuito interno de nuestros generadores.

3.3.1 Arco eléctrico

Los arcos eléctricos son una pieza clave del proyecto. Los modelos de arco eléctrico son muy complicados y en muchos emplean sistemas matemáticos que son demasiado complicados [34]. Sin embargo se puede llegar a pequeñas conclusiones con la investigación realizada. Para que un arco eléctrico tenga lugar, la diferencia de potencial entre los dos puntos, donde se originan los pulsos, debe

ser lo suficientemente grande como para vencer la resistencia del aire. Una vez se produce el arco la diferencia de potencial se vuelve a reducir y por lo tanto desaparece el arco eléctrico de nuevo. Algunas de las conclusiones a las que se llega son las siguientes:

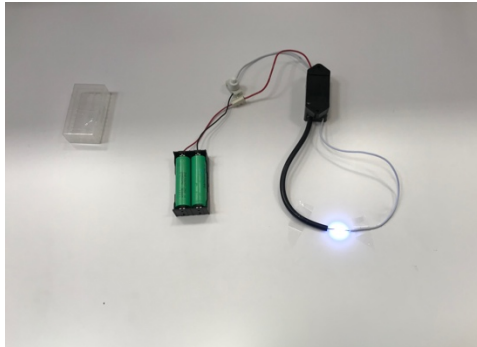


Ilustración 3.3-5 Medición de voltaje de salida, elaboración propia

Un arco eléctrico dependerá de las características del aire. En concreto, de cómo de ionizado esté el aire. Si el aire que se encuentre entre los extremos del arco está ionizado, la probabilidad de que el arco tenga lugar será mayor.

Otro factor a tener en cuenta es la distancia entre los extremos, cuanto mayor sea la distancia entre estos menor será la probabilidad de que tenga lugar el arco eléctrico. Se establece una relación entre la distancia entre los extremos y el voltaje intercambiado en los dos extremos, que parte de la siguiente ecuación [35]:

$$V(KV) = 3 * longitud(mm) + 1.3\sqrt{longitud(mm)}$$

Como la segunda parte de la fórmula es despreciable en comparación con la primera parte, se puede eliminar. Si se deja la primera parte de la fórmula con la longitud en cm, se obtiene:

$$V(KV) = 30 * longitud (cm)$$

Esta fórmula servirá, al igual que el divisor de tensión, para realizar las mediciones de la tensión generada por los distintos generadores. A raíz de uno de los experimentos realizados, en este trabajo, se podrá comprobar que esta fórmula se cumple, y que los valores nominales del generador, se cumplen, en algunos casos.

3.3.2 Bobina

La bobina será la encargada de conformar la antena y el campo magnético generado. El material utilizado para la realización de las antenas es alambre de cobre esmaltado. Se emplean dos calibres diferentes en la siguiente imagen se pueden la relación entre los calibres de los cables y los distintos grosores.

Conversion table - American Wire Gauge - mm. - mm ²					
AWG N°	Diam. mm.	Area mm ²	AWG N°	Diam. mm.	Area mm ²
1	7,350	42,400	16	1,290	1,3100
2	6,540	33,600	17	1,150	1,0400
3	5,830	26,700	18	1,024	0,8230
4	5,190	21,200	19	0,912	0,6530
5	4,620	16,800	20	0,812	0,5190
6	4,110	13,300	21	0,723	0,4120
7	3,670	10,600	22	0,644	0,3250
8	3,260	8,360	23	0,573	0,2590
9	2,910	6,620	24	0,511	0,2050
10	2,590	5,270	25	0,455	0,1630
11	2,300	4,150	26	0,405	0,1280
12	2,050	3,310	27	0,361	0,1020
13	1,830	2,630	28	0,321	0,0804
14	1,630	2,080	29	0,286	0,0646
15	1,450	1,650	30	0,255	0,0503

Ilustración 3.3-6 Calibres del cobre [37]

Los dos cables adquiridos para el diseño de las antenas son de calibre 20 ($D = 0,8 \text{ mm}$) y 26 ($D = 0,4 \text{ mm}$) [36].



Ilustración 3.3-7 Bobinas de cobre [33]

A continuación se explican las distintas maneras de en que la bobina afectará a la creación del campo y como se cuantifica la radiación electromagnética.

3.3.2.1 Irradiancia

La irradiancia es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. La irradiancia de un punto del espacio, se calcula a través del modulo del vector de Poynting. Se mide en W/m^2 .

3.3.2.2 Vector de Poynting

El vector de Poynting (S) es vector cuyo módulo representa la intensidad instantánea de energía electromagnética que fluye a través de una unidad de área perpendicular a la dirección de radiación electromagnética. Se expresa de la siguiente manera [37]:

$$S = \frac{E \times B}{\mu_0}$$

La explicación de esta expresión es la siguiente:

- En primer lugar, la potencia específica que es la cantidad energía por unidad de tiempo confinada en un volumen de forma paralelepípeda de área de base A y lado de longitud $c \cdot 1$ segundo, está expresado por espresado por:

$$P = U / \Delta t = u * L * A / (L/c) = u * A * c$$

Donde u es la cantidad de energía por volumen, y U es la energía total.

- La intensidad de potencia es la potencia específica por unidad de área expresada por:

$$I = P / A = u * c$$

- Por otro lado según las leyes de Maxwell de velocidad de la luz:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 * \mu_0}}$$

Donde ϵ_0 es la permitividad eléctrica en el vacío, y μ_0 es la permitividad magnética en el vacío. Toman los siguientes valores:

$$\mu_o = 4\pi * 10^{-7}$$

$$\varepsilon_o = 10^7/4\pi * c^2$$

- De gran importancia es también decir que los módulos de los campos eléctricos y magnéticos están relacionados por la siguiente expresión:

$$E = c * B$$

- También, hay que tener en cuenta las diferentes componente del campo electromagnético, por una parte, la energía específica debida al campo eléctrico y por otra parte, la energía eléctrica específica debida al campo magnético. Ambas expresadas de la siguiente manera:

$$u_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad y \quad u_m = \frac{B^2}{2\mu_o}$$

Si tomamos la ecuación de la velocidad de la luz y la sustituimos en la ecuación de la energía magnética específica llegaremos a la conclusión que:

$$u_m = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

- De esta manera podemos expresar la energía total de la siguiente manera:

$$u_t = u_m + u_e = \epsilon_0 E^2 = \frac{EB}{\mu_o c}$$

- Como hemos visto previamente en la expresión de la intensidad de energía:

$$I = u_t * c = \frac{EB}{\mu_o} = \frac{cB^2}{\mu_o}$$

Como podemos observar la intensidad de energía debida al campo magnético dependerá del medio en el que se transmite y la intensidad del campo magnético, que se desarrollará en el siguiente apartado [37].

3.3.2.3 Campo magnético

El campo magnético estará definido por la ley de Biot y Savart a través de una espira. Se utilizará el sistema de refencia expuesto en la imagen.

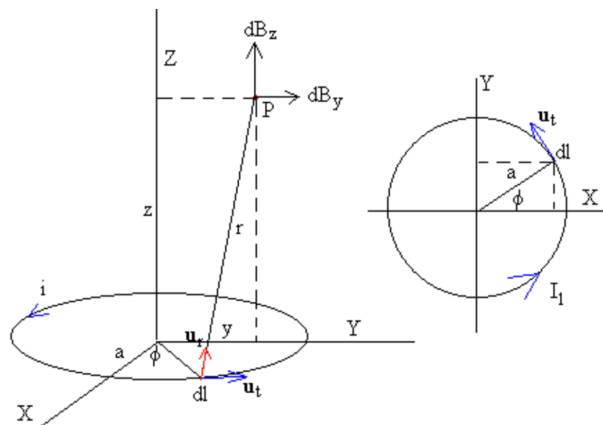


Ilustración 3.3-8 Sistema de referencia para prototipo [39].

Como se puede ver en la imagen se trata de calcular el campo producido por una bobina en un punto determinado que se sitúa en el plano XY. Para este caso concreto se trata de un punto alejado de la espira para lo cual se calculará la intensidad del campo magnético B según el documento fuente [38].

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$B_y = \frac{\mu_0 i R^2}{4r^3} \left(\frac{3yz}{r^2} \right)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 i R^2}{4r^3} \left(\frac{3z^2}{r^2} - 1 \right)$$

Para simplificar los cálculos y porque el componente Z es el que más interesa debido a la posibilidad de direccionar en campo, solo se tendrá en cuenta este componente. Esto quiere decir que la distancia r es igual a z . Por lo cual, el campo magnético en el eje Z para un punto alejado de la espira viene dado por la ecuación:

$$B_z = \frac{\mu_0 i R^2}{2z^3}$$

Donde z es la distancia desde el centro de la espira hasta el punto objetivo, R es el radio de la espira e I la corriente que circula a través de ella. Al usar una bobina en el dispositivo lo que se busca es el multiplicar el valor del campo por el número de vueltas, N , que se realicen con el alambre de cobre esmaltado. Por lo tanto, la ecuación del campo resultaría [38]:

$$B_z = \frac{N\mu_0 i R^2}{2z^3}$$

El valor final de la irradiancia será igual a:

$$I = \frac{cB^2}{\mu_0} = c \frac{N^2 \mu_0 i^2 R^4}{4z^6}$$

3.3.3 Interruptor

También se adquieren dos interruptores tipo pulsador vertical, como los mostrados en la imagen.



Ilustración 3.3-9 Modelo de interruptor empleado, elaboración propia

3.3.4 Caja protectora

Para focalizar la energía electromagnética en la dirección del objetivo, se utilizará un reflector plano, que servirá para que las líneas de campo se concentren en la dirección del objetivo. Y evitar que el operador del aparato pueda sufrir algún daño. Como ya se explicó en el Estado del Arte, los materiales metálicos conductores son buenos reflectores ante la radiación de los pulsos electromagnéticos.



Ilustración 3.3-10 Caja metálica usada como protección, elaboración propia

Para proteger el propio circuito de la emisión del campo electromagnético, se utilizará una caja metálica quedando fuera exclusivamente la bobina de cobre esmaltado y el arco eléctrico. Esta caja está hecha de hojalata, que es un producto laminado plano formado por una capa de acero cubierto por estaño. De esta manera se conseguirá que el circuito se vea lo menos afectado posible por el efecto del campo electromagnético, empleando la teoría explicada en el Estado del Arte.

La capacidad de protección de la caja vendrá dada por el grosor de la misma en relación con la profundidad de penetración del campo generado. Para que la protección sea eficaz, la profundidad de penetración deberá de ser menor que grosor de la caja, en este caso, 1,8 mm. Esta profundidad viene dada por la fórmula [39]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}}$$

En esta fórmula, δ expresa la profundidad de penetración en las paredes de la caja, ω es la velocidad angular de la onda, que es igual a 2π x frecuencia, σ es la conductividad del material, que en este caso es hojalata, es $1,68 \times 10^7 \Omega^{-1}m^{-1}$, μ_0 es la permitividad en el vacío, que es $4\pi \times 10^{-7}$. Como podemos ver, la profundidad de penetración será mayor para frecuencias bajas. Por lo tanto, como se podrá ver más adelante, tomaré la frecuencia de la máxima distancia de arco alcanzada. Esta frecuencia es 6,7 Hz, corresponde con una velocidad angular de 46,35 rad/s. Con estos datos obtendríamos una profundidad de penetración de:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi * 6,7 * \mu_0 \sigma}} = 0,045344 \text{ m}$$

Como se puede ver la distancia es más grande que el grosor de la caja. Por lo tanto para hacer efectiva la protección se envolverá todo el circuito con papel de aluminio. El fenómeno que explica porque los materiales conductores son buenos para proteger ante radiación electromagnética es la jaula de Faraday.

Se conoce como jaula de Faraday al efecto por el cual, el campo electromagnético en el interior de un conductor es nulo, anulando los efectos de los campos externos. Esto es debido a que el conductor que se encuentra en el interior de un campo electromagnético se polariza. De esta manera, los electrones del material de la jaula que en el caso de un conductor son libres se alejan de la zona de incidencia del campo. Al separarse, en el interior del conductor se crea un campo eléctrico de sentido contrario al del campo exterior. Por lo tanto, el campo en el interior del conductor es nulo [40].

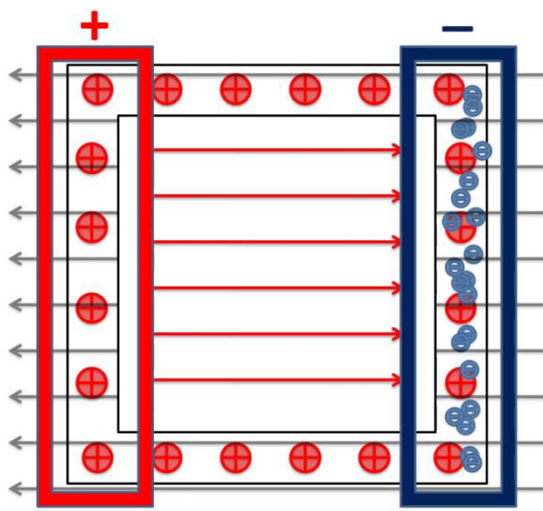


Ilustración 3.3-11 Jaula de Faraday [41]

3.3.5 Elementos de medición.

En este capítulo se explicarán cuales son aparatos de medida empleados durante los experimentos realizados.

3.3.5.1 Divisor de corriente

Para evitar daños durante los experimentos, el estudio de la salida del generador de pulsos de alto voltaje se realizará mediante dos métodos:

- Mediante la relación de distancia de arco y voltaje. De esta manera, no se pone en riesgo a nada ni a nadie.
- Mediante una sonda alto voltaje. Esta sonda consistirá en un conjunto de resistencias en serie que se emplean para reducir la potencia que circularía por el polímetro o el osciloscopio. De esta manera, se consigue que estos equipos no sufran.

Se ha intentado conseguir una sonda de alto voltaje mediante varias maneras: Arsenal de Ferrol, los buques que visitan la Escuela, núcleo de lanchas, Universidad de Vigo, entre otros. Finalmente, se ha decidido montar una sonda de alto voltaje de forma artesanal, utilizando el concepto de un divisor de tensión.

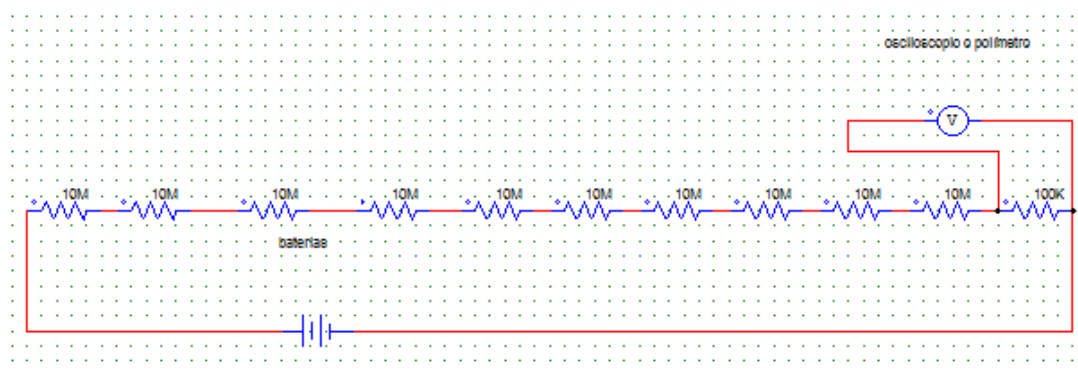


Ilustración 3.3-12 Circuito del divisor de tensión, elaboración propia

El divisor de tensión consiste una consecución de resistencias de alta resistencia seguidas de una resistencia de baja resistencia R_0 , que será donde se realicen las medidas. La medición de voltaje se verá marcada por la relación entre la resistencia total y la resistencia donde se vaya a medir de la siguiente manera [37]:

$$V_o = V_{circuito} * \frac{R_0}{R_{total}}$$

El divisor de tensión se realiza sobre una protoboard, se diseña para una relación ($R_0:R_{total} = 1:1000$). Para ello se usan 10 resistencias en serie de 10 megaohmios y una resistencia R_0 de 100 kilohmios.

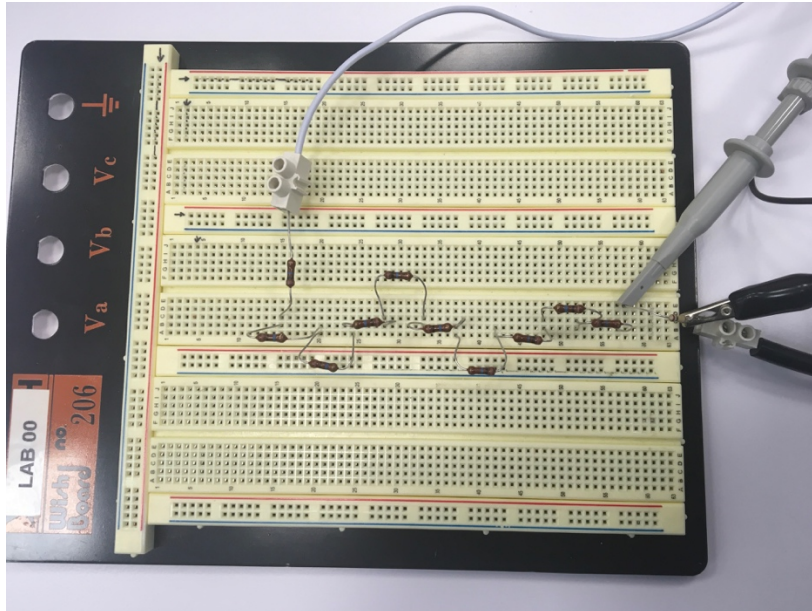


Ilustración 3.3-13 Divisor de tensión, elaboración propia

3.3.1 Uso del osciloscopio y del polímetro.

El osciloscopio es un aparato para la representación gráfica de señales eléctricas que pueden variar con el tiempo. El osciloscopio empleado es “Digital Storage oscilloscope DSO-X 2002A”.



Ilustración 3.3-14 Osciloscopio empleado, elaboración propia

Las restricciones de seguridad del osciloscopio son las siguientes [42]:

CAUTION

Maximum input voltage at analog inputs

CAT I 300 Vrms, 400 Vpk; transient overvoltage 1.6 kVpk

With 10073C 10:1 probe: CAT I 500 Vpk, CAT II 400 Vpk

With N2862A or N2863A 10:1 probe: 300 Vrms

Ilustración 3.3-15 Restricciones de seguridad [42]

Como se puede ver en las restricciones, el osciloscopio tiene un voltaje limitado de 300 Vrms (Root Mean Squared, la raíz cuadrada del valor medio de los cuadrados). Este voltaje nunca se alcanza. Cuando los valores leídos en el osciloscopio se acercan a este valor se reduce la longitud del arco. En cualquier caso, respetando este valor se está respetando el valor del sobrevoltaje transitorio de 1,6 kV de pico. Siguiendo estas precauciones no tuvieron problemas durante el experimento.

El polímetro es un instrumento que sirve para medir magnitudes eléctricas activas, como corrientes, potenciales, o resistencias, estas medidas pueden ser medidas de corriente continua o alterna. El modelo empleado es digital multimeter model MY64. Antes de conectar el osciloscopio, se emplea el polímetro para comprobar que los valores de seguridad del osciloscopio no se ven sobrepasados. También se emplea para la comprobación del buen funcionamiento de los interruptores y las conexiones de los distintos componentes.



Ilustración 3.3-16 Multímetro empleado, elaboración propia

Estas son las restricciones de seguridad [43]:

3. SPECIFICATIONS

Accuracies are $\pm$ (% reading + No. of digits)
Operating environment: $23 \pm 5^\circ\text{C}$, less than 75% R.H.

DC Voltage

Range	Accuracy	Resolution
200mV	$\pm(0.5\% \text{ of rdg} + 3d)$	100 μV
2V		1mV
20V		10mV
200V		100mV
1000V	$\pm(0.8\% \text{ of rdg} + 3d)$	1V

Input impedance: 10M ohm on all ranges.

Overload Protection: 1000V DC or peak AC on all ranges.

AC Voltage

Range	Accuracy	Resolution
2V	$\pm(0.8\% \text{ of rdg} + 3d)$	1mV
20V		10mV
200V		100mV
750V	$\pm(1.2\% \text{ of rdg} + 5d)$	1V

Input impedance: 10M Ω on all ranges

Frequency range: 40Hz to 400Hz.

Overload protection: 750V rms or 1000V peak continuous on ac ranges, except 200mV ac range (15 seconds maximum above 300V rms).

Indication: Average (rms of sine wave)

Δ Do not apply more than 1000V to the input, Indication is possible at higher voltages but there is danger of damaging the internal circuit.

5.2 AC Voltage Measurement

1. Connect the BLACK test lead to the COM jack and the RED test lead to V/ Ω jack.
2. Set the FUNCTION switch to the "V~" range to be used and connect the test leads across the source or load under measurement.

NOTE:

Δ Do not apply more than 750V rms to the input, indication is possible at higher voltages but there is danger of damaging the internal circuit.

5.1) DC Voltage Measurement

1. Connect the BLACK test lead to the COM jack and the RED test lead to the V/ Ω jack.
2. Set the FUNCTION switch to the "V—" range to be used and connect the test leads across the source or load under measurement.
The polarity of the RED lead connection will be indicated at the same time as the voltage.

NOTE:

Ilustración 3.3-17 Restricciones de seguridad del multímetro [43]

4 PRUEBAS Y VALIDACIÓN

4.1 Seguridad personal y de equipos

Para la seguridad del personal que se encuentre trabajando con este montaje se emplean una serie de medidas. Estas son:

- Empleo de guantes de latex para el manejo del circuito para que en caso de que estos debido al error humano descarguen energía estemos protegidos.
- Empleo de utensilios cuyos mangos que están en contacto directo con los guantes, tienen un mango hecho un material aislante que impida que estos descarguen corriente sobre los guantes.
- Aviso a todos los presentes cerca del circuito que el circuito está en funcionamiento y cuando este no lo está se desconectarán las baterías de alimentación.
- Fijar los electrodos del arco eléctrico a la mesa para evitar que se puedan mover y realizar alguna descarga sobre alguien.

Por la seguridad de los equipos se toman las siguientes medidas.

- Uso del polímetro para comprobación del buen estado de todas las conexiones.
- Se realizarán primero las mediciones con los arcos de menor longitud y se irá aumentando poco a poco el voltaje de salida del generador.
- Se utilizará primero el multímetro para medir el voltaje, y comprobar que no está cerca del valor de 300 Vrms.
- En caso de que el voltaje de salida se acerque mucho al voltaje límite de 300 Vrms del osciloscopio, se reducirá la longitud de arco, para los experimentos en los que se use el divisor de tensión, y se aumentará la distancia a la antena, para los experimentos de relación voltaje-distancia a la antena.

4.2 Medición de la intensidad del generador.

Para la medición de la corriente, se usará la pinza amperimétrica. La pinza amperimétrica es un aparato de medida de corriente eléctrica que a diferencia de un amperímetro clásico, no implica tener que abrir el circuito en el cual se quiere medir. Se basa en la medición del campo magnético generado por una corriente variable a través de un conductor. El modelo de pinza amperimétrica empleado es:



Ilustración 4.2-1 Pinza amperimétrica, elaboración propia

Se realizan mediciones de la corriente en los cables de la salida del generador. Para la realización de las medidas se monta el circuito de manera que las baterías estén conectadas al interruptor y al generador de impulsos. A la salida del generador de pulsos, se acopla el arco eléctrico. Por uno de los electrodos, se coloca la pinza amperimétrica. Este circuito se puede ver en la imagen.

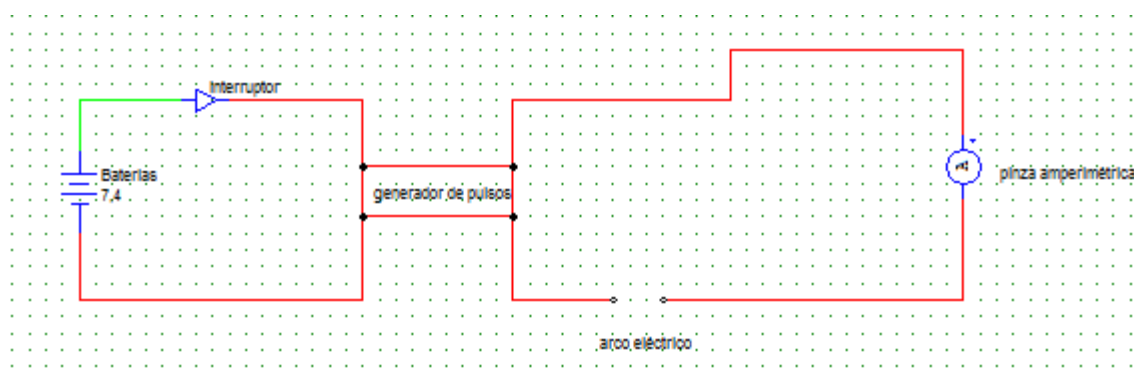


Ilustración 4.2-2 Circuito de la medición de la intensidad, elaboración propia

En ambos casos, las 5 primeras medidas se realizan con la distancia de arco máximo, y las 5 últimas con la distancia de arco corta, como podemos ver no se aprecian diferencias. En la siguiente imagen se muestra el circuito empleado para realizar las mediciones.

Las mediciones son las siguientes:

Intensidad de la salida del Generador N°1 (A)	Intensidad de la salida del Generador N°2 (A)
0,44	0,37
0,29	0,46
0,34	0,43
0,42	0,42
0,37	0,44
0,47	0,43
0,38	0,35
0,45	0,32
0,35	0,42
0,41	0,28

Tabla 4.2-1 Medición de la corriente de salida de los generadores

Como se puede observar los valores de intensidad de los dos generadores en ningún momento supera la intensidad nominal de salida aportada por el fabricante. La pinza amperimétrica, por su modo de operar, no es capaz de medir la corriente de manera continuada, y trabaja mejor con señales periódicas. Debido a esto, las intensidades obtenidas no se corresponden, en ningún caso, con a la intensidad máxima que pueda generar el generador. Debido a esto y tras ver que en ningún momento supera la intensidad nominal, se validan los valores aportados por el fabricante. En ambos casos 0,5 A.

4.3 Medición de la frecuencia de salida del generador

Para la medición de la frecuencia de salida del generador de pulsos, se monta el siguiente circuito. Se conecta el generador de pulsos al divisor de corriente sin un arco eléctrico, poniendo la sonda del osciloscopio en R_0 , el circuito se puede ver en la siguiente imagen.

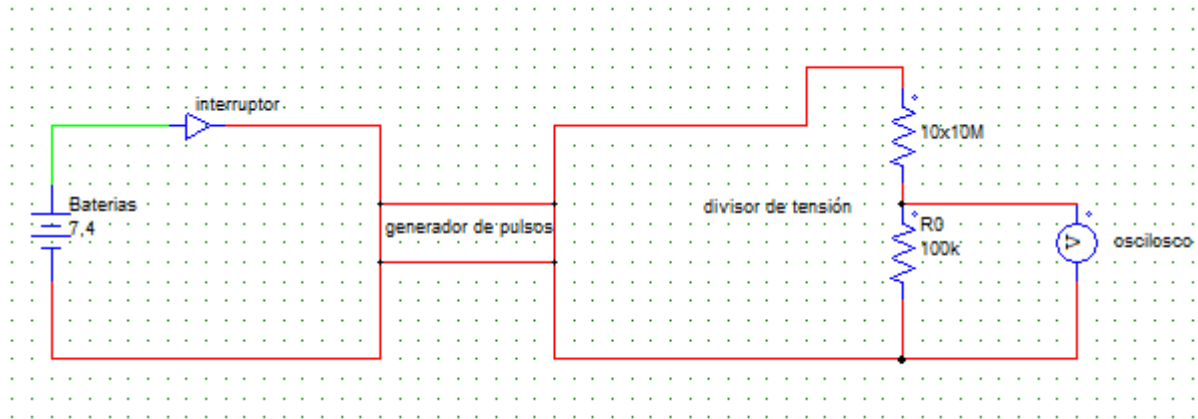


Ilustración 4.3-1 Circuito para la medición de la frecuencia del generador, elaboración propia

El resultado de la medición es el que puede ver en la imagen. Como se puede ver, la duración del periodo de la onda es de 27 microsegundos, que equivale a una frecuencia de 37 kHz, que coincide con la banda de LF.

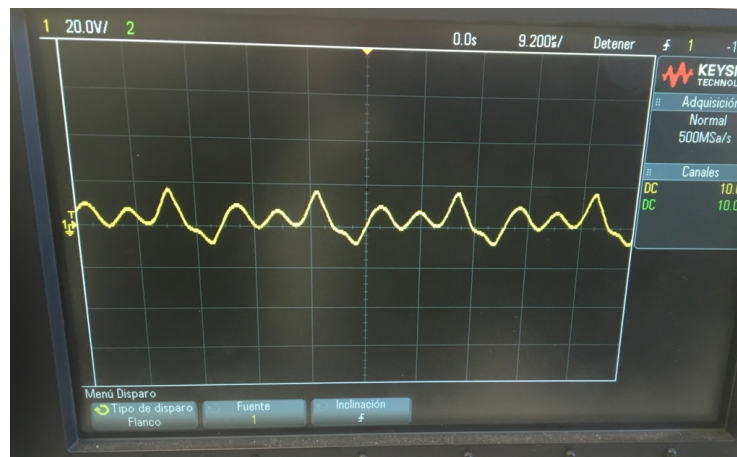


Ilustración 4.3-2 Salida del generador sin nada conectado, elaboración propia

El hecho de que la frecuencia de salida del generador de pulsos coincide con la banda de 30 kHz a 300 kHz, nos puede acercar a afirmar que se puede tratar de un generador de pulsos basado en el circuito de la bobina de Tesla.

4.4 Medición del voltaje de los generadores mediante el divisor de corriente.

Una manera de medir el voltaje generado es mediante el empleo del divisor de tensión. Para el generador de tensión de salida nominal máxima, del orden de 40 KV, se diseña un divisor de corriente para un valor aproximado de reducción de 1000:1. Para ello, se emplean diez resistencias de 10 MΩ y una resistencia de 100kΩ, con las que se consigue una relación de:

$$\text{relación de reducción} = \frac{R_0}{R_0 + R_t} = \frac{100K}{100K + 10 * 10M} = \frac{1}{1001}$$

Esta relación la podemos aproximar a 1:1000, mediante esta relación podremos calcular el voltaje de salida del generador de pulsos, midiendo con el osciloscopio en la resistencia R_0 . Para este

experimento se utiliza el siguiente circuito. Se conectan las baterías con el interruptor al generador de pulsos. En la salida de pulsos se dispone el arco eléctrico, en paralelo se conecta la antena y el divisor de tensión. Las mediciones se realizarán primero con el polímetro, y tras ver que es seguro, se realizan con el osciloscopio. El circuito utilizado se puede ver en la siguiente imagen.

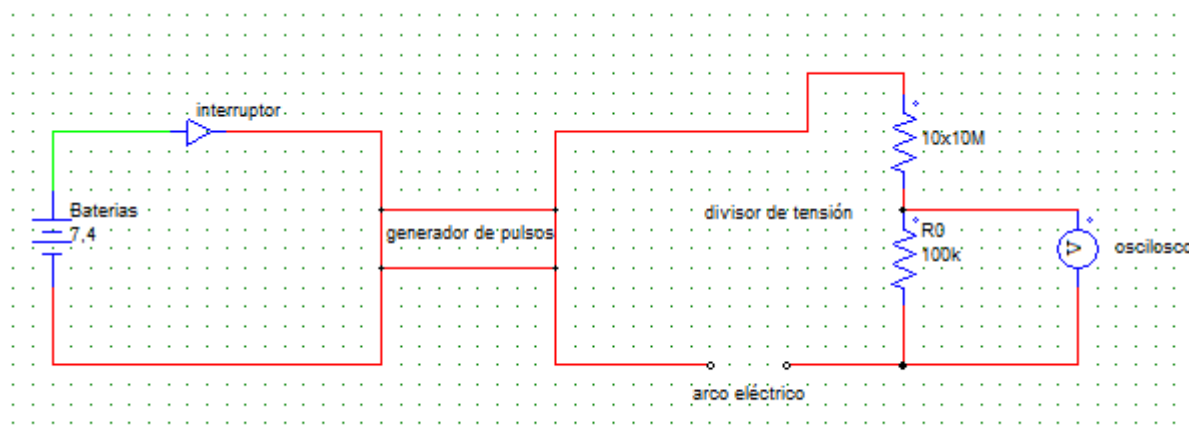


Ilustración 4.4-1 Circuito para medición de la frecuencia según longitud de arco

Una vez montado el circuito del divisor de tensión, se arranca el dispositivo y se hacen 10 mediciones del voltaje la resistencia R_0 . Se dispone el arco para la distancia máxima posible para demostrar que el voltaje nominal máximo coincide con el medido. La longitud máxima de arco del generador N°1 es 1,3 cm. Estas son las mediciones obtenidas:

Lectura del generador N°1 osciloscopio (voltios)	Voltaje del generador calculado (KV)
43,3	43,3
43,4	43,3
43,5	43,3
43,3	43,3
43,6	43,3
43,5	43,3
43,4	43,3
43,4	43,3
43,4	43,3
43,5	43,3

Tabla 4.4-1 Comprobación de la salida del generador N°1

Como se puede ver los valores del generador N°1 coinciden aproximadamente con sus valores nominales mostrados inicialmente. Es por ello que se puede validar este método de medir el voltaje de salida del generador de pulsos.

4.5 Medición del voltaje de los generadores mediante la distancia del arco.

Para la realización de esta prueba, se usará la teoría empleada en el apartado 3.3.1, donde se establece una relación entre la separación de los electrodos entre los que se genera el arco eléctrico y el voltaje generado. Para la medición del voltaje, se pinta mediante un lápiz, sobre la mesa, una escala milimétrica. Sobre la escala milimétrica se coloca uno de los electrodos en el 0 de la escala, el otro se desplazará a la distancia deseada. La distancia máxima a la que se produzcan los pulsos nos indicará la distancia a la que se produce el voltaje máximo. Se empleará el mismo circuito que en el caso anterior pero en este caso, se tomarán medidas a distintas longitudes de arco y se medirá con el polímetro solo.

Primero se medirán los valores del generador N°1, por ser de menor voltaje por seguridad.

Mediciones de distancia del generador N°1:

Distancia de arco máxima de generador N°1 (cm)	Voltaje calculado (KV)	Lectura del polímetro (V)
1,3	39	43,3
1	30	28,5
0,7	21	22,1
0,5	15	15,5
0,2	6	7,1

Tabla 4.5-1 Voltaje de Generador N°1

Mediciones de distancia del generador N°2:

Distancia de arco máxima de generador N°2 (cm)	Voltaje calculado (KV)	Lectura del polímetro (V)
5,6	168	162
5	146	147
4,5	137	135
4	118	120
3,5	106	107
3	92	93,5
2,5	74	72,8
2	60	61,4

1,5	48	47,2
1	32	33,2
0,5	16	16,7

Tabla 4.5-2 Voltaje del Generador N°2

Como se puede comprobar el valor de los voltajes obtenidos cumplen aproximadamente con los voltajes calculados, por lo tanto se puede validar la ecuación del arco eléctrico. También se demuestra que cuanto mayor sea la longitud del arco mayor será el voltaje utilizado. En la siguiente imagen, se muestran las longitudes máximas obtenidas con los dos generadores: 1,3 cm, el generador N°1; y 5,6 cm, el generador N°2. Estas distancias corresponden a un voltaje calculado de 39kV, y 162 kV respectivamente.

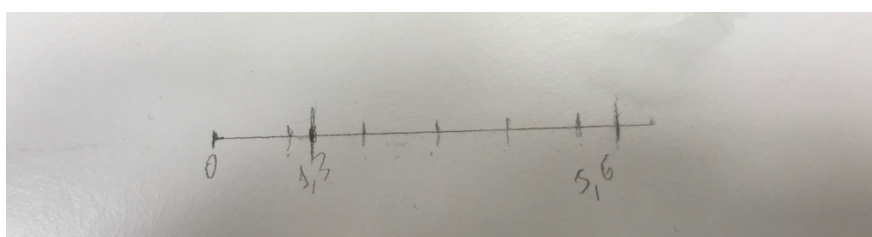


Ilustración 4.5-1 Comparación de los dos generadores, elaboración propia

4.6 Caracterización del pulso

Para caracterizar el pulso, se usará el osciloscopio, a la distancia del circuito empleada en el anterior, para medir los tiempos de subida y bajada del pulso y así poder caracterizar el mismo. Teniendo esta información se podrá caracterizar el ancho de banda del dispositivo, conociendo la duración del pulso τ , se podrá aproximar el ancho de banda B:

$$B \approx \frac{1}{\tau} [37]$$



Ilustración 4.6-1 Pulso generado a 25 cm, elaboración propia

Como se puede apreciar en la imagen el pulso tiene una duración de 10 microsegundos, que daría un ancho de banda de alrededor de 100 KHz. Saber el ancho de banda nos aporta información sobre la extensión de frecuencias donde se concentra la mayor parte de la potencia de la señal. Un ancho de banda muy corto, supondría pulsos para equipos a una frecuencia concreta. Mientras que un amplio ancho de banda permitiría inutilizar un mayor equipos que trabajen a frecuencias diferentes.

4.7 Medición de la frecuencia del pulsos según distancia del arco.

En este experimento se pretende encontrar una relación entre la frecuencia con la que tienen lugar los pulsos y la longitud de arco. Las medidas se realizarán a una distancia constante de la antena. La distancia a la cual se encuentre de la antena deberá ser tal que no genere una potencia por encima del

umbral del osciloscopio, en este caso 35 cm. Para cada distancia de arco, se realizarán varias medidas de la frecuencia con los pulsos que se generan. Tras realizar las medidas, se intentará establecer una relación entre ambas. El circuito empleado consistirá en el generador de pulsos alimentado por las baterías y controlado por el interruptor, con el arco eléctrico, sin la antena. El circuito empleado es el que se puede ver en la imagen.

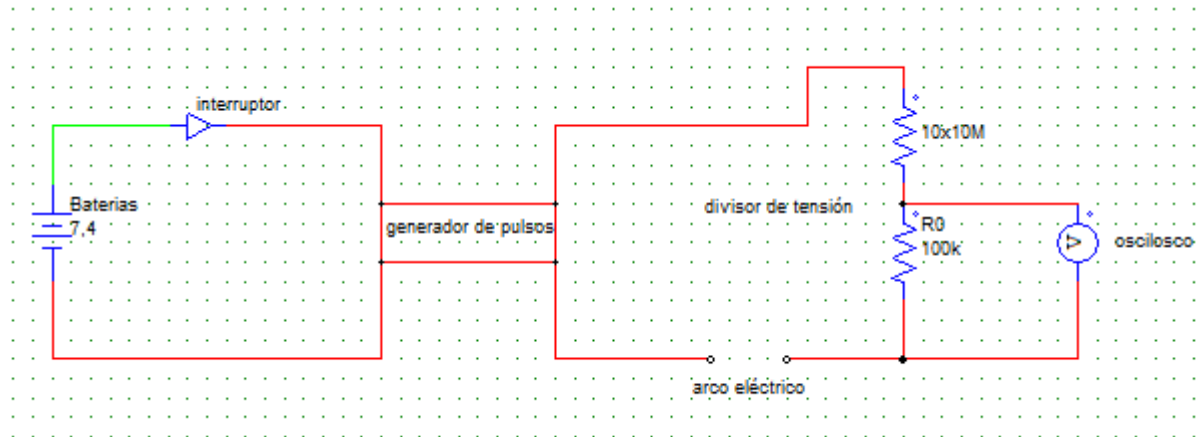


Ilustración 4.7-1 Circuito para la medición de la frecuencia según la longitud de arco

Una vez determinada esta relación, se podrá configurar el dispositivo para transmitir a una frecuencia concreta. De esta manera, obtendríamos un pulso para un grupo específico de dispositivos. Como ya se explicó previamente, utilizando la frecuencia a la que trabajan los dispositivos es como más daños causaremos al objetivo.



Ilustración 4.7-2 Medición de la frecuencia de los pulsos, elaboración propia

Se realizan 10 mediciones de frecuencia cada distancia, como se indicó previamente. Se toma como distancia máxima 1,33 cm y se va reduciendo poco a poco. Estas son las medidas realizadas:

Lectura del generador Nº1	Lectura del generador Nº1	Lectura del generador Nº1	Lectura del generador Nº1	Lectura del generador Nº1
(1,3 cm)	(1 cm)	(0,7 cm)	(0,5 cm)	(0,2 cm)
Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
6,7	17,2	34,4	71,3	125,4
6,8	17,3	34,5	72,3	126,3

7,1	17,4	34,7	71,7	127,5
6,5	17,2	34,2	72,4	125,2
6,7	17,4	34,4	72,4	125,4
6,7	17,2	34,5	72,1	126,7
6,8	17,3	34,6	71,8	125,4
6,8	17,4	34,7	71,5	125,7
6,7	17,3	34,8	71,7	126,8
6,7	17,3	34,5	71,6	125,7

Tabla 4.7-1 Relación frecuencia-distancia de arco del generador N°1

Como se puede observar, la frecuencia guarda una relación clara con la distancia de arco, de esta manera podríamos aproximar la distancia de arco necesaria para conseguir inutilizar un equipo concreto. En este caso concreto lo podemos ver en el siguiente gráfico:

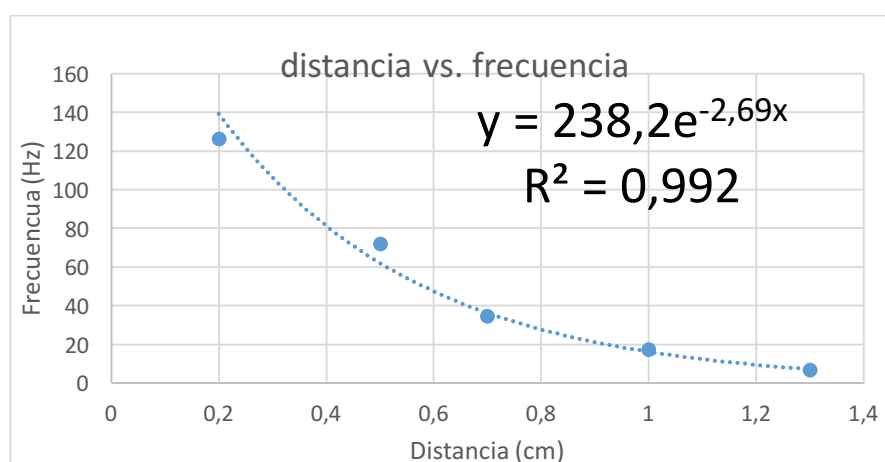


Ilustración 4.7-3 Gráfica de relacion frecuencia vs. distancia, elaboración propia

Se puede apreciar como podríamos asociar incluso con una fórmula de predicción, una aproximación de la frecuencia en función de la distancia del arco. Por supuesto, este experimento obvia las condiciones del aire, que rodea el arco. El hecho de que podamos aproximar la distancia necesaria para obtener una frecuencia es muy útil. Supongamos que conozcamos de forma previa que nuestro objetivo es un dispositivo eléctrico que trabaje a 50 Hz, gracias a esta tabla podremos, emitir pulsos en esa frecuencia y transmitírselo a ese aparato en concreto.

Después, de los valores obtenidos con el generador N°1, se toman medidas en el generador N°2, como ya se ha hecho antes, se tomarán medidas desde la distancia máxima de 5,6 cm.

Para el caso del Generador N°2:

Lectura del generador Nº2 (5,6 cm) Hz	Lectura del generador Nº2 (4,5 cm) Hz	Lectura del generador Nº2 (3 cm) Hz	Lectura del generador Nº2 (1,5cm) Hz	Lectura del generador Nº2 (0,5 cm) Hz
6,8	20,3	45,5	74,5	173,6
6,8	21,4	46,7	71,3	176,3
7,8	20,6	44,3	71,8	174,5
7,9	20,2	44,8	72,1	172,6
7,3	21,6	45,4	74,1	175,8
7,2	20,9	44,7	73,8	176,1
6,4	21,7	45,8	72,6	174,5
6,7	21,3	46,3	73,3	173,5
7,2	20,7	45,2	74,6	175,2
7,7	21,5	46,2	72,4	173,4

Tabla 4.7-2 Relación de frecuencia-distancia de arco del generador Nº2

Como podemos ver, de nuevo se produce una relación distancia-arco. Esta vez al reducir la distancia de arco, aumenta la frecuencia, pero lo hace de manera mucho menos estable. Aun así se puede comprobar que la distancia de arco, sí influye en la frecuencia del pulso. Como se puede comprobar en el gráfico, la relación de arco es muy parecida al caso anterior.

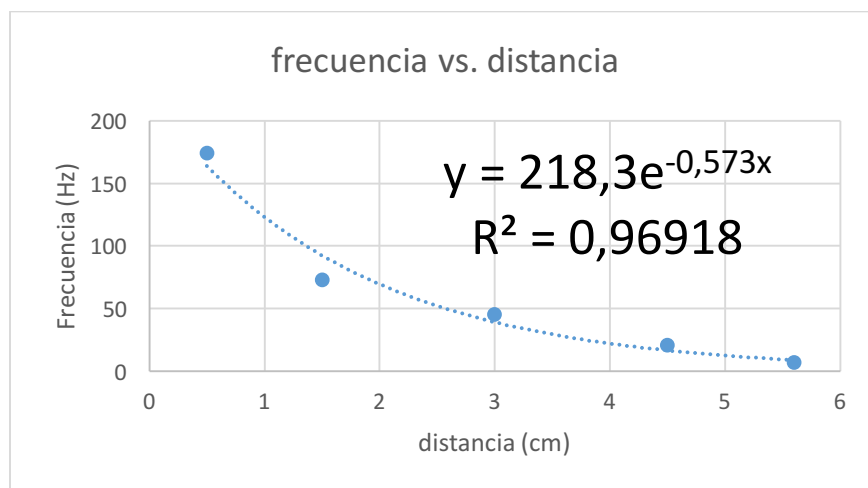


Ilustración 4.7-4 Gráfica de relación frecuencia vs. distancia, elaboración propia

4.8 Medición de voltaje en el osciloscopio en función de la distancia.

Se realiza ahora una prueba para comprobar el voltaje en función de la distancia a la antena para una longitud de arco constante. Para comprobarlo, se utiliza un soporte para mantener la sonda a la distancia correcta. Se comienza con las mayores distancia y después se va aumentando poco a poco. Esta prueba solo se realiza con el generador Nº2 porque es el que mayor voltaje genera y por tanto mayor rango de

distancia se puede alcanzar y a mejores conclusiones podremos llegar. Se emplea una longitud de arco constante de 5 cm, y se comienza con una distancia de 50 cm a la antena y se va reduciendo de 5 en 5 cm. Se emplea el mismo circuito que en el caso anterior.

Distancia (cm)	Voltaje pico experimentado (V)
10	212
15	182
20	135
25	103
30	82
35	58
40	49
45	33
50	15

Tabla 4.8-1 Relación de la distancia-voltaje de pico

Como se puede comprobar se cumple que el voltaje inducido desciende conforme disminuye la distancia a la antena. Aunque no coincide con las fórmulas propuestas en el apartado 3.3.2.3, debido a la complicada manera de comprobar la polarización del receptor del osciloscopio. También se han obviado las inducciones mutuas y las impedancias.

4.9 Prueba final

Para la comprobación de que finalmente somos capaces de inutilizar pequeños aparatos electrónicos se realizarán dos pruebas para comprobar la destrucción de una calculadora. Se emplea una calculadora del tipo CASIO fx-82MS, una calculadora sencilla.

Se realizará primero una prueba con la pantalla mirando hacia la antena y otra con la pantalla dando la espalda a la antena. Se someterá a la calculadora a pulsos a las distancias que se plantean en el último experimento.

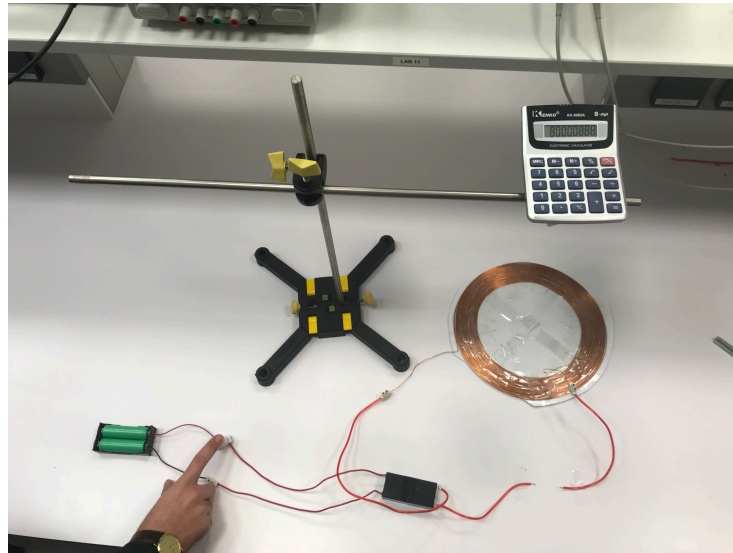


Ilustración 4.9-1 Montaje del experimento final, elaboración propia

Se realiza primero la prueba con la pantalla de la calculadora mirando hacia arriba. Estos son los resultados obtenidos:

Distancia (cm)	Observaciones
50	-
45	-
40	-
35	-
30	-
25	-
20	Mal funcionamiento
15	Reinicio de la calculadora
10	Reinicio de la calculadora

Tabla 4.9-1 Evolución de la calculadora boca-arriba según distancia

Se realiza ahora la prueba con la pantalla de la calculadora mirando hacia abajo. Estos son los resultados obtenidos.

Distancia (cm)	Observaciones
50	-
45	-
40	-

35	-
30	-
25	Mal funcionamiento
20	Reinicio de la calculadora
15	Calculadora inutilizada
10	-

Tabla 4.9-2 Evolución de la calculadora boca-abajo según distancia

Como podemos ver en este experimento, al poner la calculadora mirando hacia abajo podemos llegar incluso a inutilizar la misma, esto será posible debido a que probablemente tenga los componentes más sensibles en la lado de la pantalla.

Tras realizar este experimento, podemos decir se consigue el objetivo final de construir un dispositivo capaz de inutilizar pequeños aparatos eléctricos. Queda por tanto comprobado que el daño que pueden causar estos dispositivos baratos, es bastante grande. En muchos casos estos dispositivos pueden ser empleados de forma muy discreta escondidos en cajas.

5 CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

5.1 Introducción.

Este trabajo ha sido concebido con el fin de dar a conocer al lector el EMP, más concretamente sobre el marco jurídico, las armas, los efectos, la amenaza y la protección ante un pulso electromagnético. Tras la realización del trabajo se llega a las siguientes conclusiones, expuestas a continuación:

El marco jurídico de estas armas está marcado por el Protocolo adicional I de 1977 del Convenio de Ginebra de 1949, que marca las prohibiciones sobre el empleo de armas, y prepara el camino para la licitud de las armas que aún no han sido examinadas. De estos convenios se puede sustraer que el empleo de armas nucleares está fuera de la legalidad según estos convenios, y que el empleo de las modernas armas EMP que evitan las detonaciones nucleares, sí está dentro de la legalidad. Más específicamente, estarán dentro del marco jurídico siempre que se empleen contra objetivos militares concretos y que en todo momento se eviten los daños colaterales. También se deberá ser previsor para evitar estos daños indeseados, y en caso de que se produzcan deberán de ser proporcionales al daño causado por enemigo previamente y de sus capacidades de protegerse.

Las armas EMP tienen un amplio abanico de versiones, desde pequeños montajes como el diseñado en este proyecto hasta las super avanzadas armas EMP magneto-hidrodinámicas, pasando por las baratas pero eficaces *Vircator*. Estas últimas son a día de hoy las más rentables económicamente y militarmente. Además son las que mejor cumplen con la legislación vigente.

Como se puede ver a lo largo del proyecto, los efectos de las armas EMP están destinados a negar las capacidades del enemigo, sin causar daños humanos directamente. Estos fenómenos varían mucho desde la inutilización de pequeños aparatos electromagnéticos a la paralización eléctrica del continente norteamericano. Es por ello, que en este trabajo se urge a la implementación de medidas destinadas a proteger, no tanto a objetivos militares pero sobre todo a la población civil y los bienes de carácter civil, que son los que nos hacen vulnerables ante esta amenaza. El hecho de que se deje una fragata sin electricidad no es nada comparado con la paralización de *Wall Street* o con la parada de hospitales o aviones en vuelo.

Los avances en estos sistemas nos podrían permitir dejar misiles sin sistema de guiado, dejar a un país sin servicios satelitales o sin electricidad directamente, poseer un escudo antimisiles que funcione sin explosiones y reduzca los daños colaterales, evitar la recogida de información comprometida, o tener la capacidad de frenar a lanchas o vehículos terrestres, reduciendo así la amenaza asimétrica.

Cabe además destacar que este trabajo se realiza en un momento en el que las principales potencias nucleares, han roto sus acuerdos de control y están volviendo a armarse nuclearmente. También los avances en el campo de misiles intercontinentales, como es el caso de Corea del Norte que en los últimos años ha aumentado exponencialmente su capacidad armentística, hacen que las armas EMP, sean una manera más barata de hacer frente a la amenaza de los misiles intercontinentales.

Además para la comprobación de los efectos de los pulsos electromagnéticos se ha diseñado un pequeño montaje experimental, basado en un generador de pulsos. Con la realización de este montaje, se llega las siguientes conclusiones:

- Los generadores empleados están basados en bobinas de Tesla, al los que les han retirado el toroide. Esto se descubre al ver la frecuencia de la salida de los generadores sin antena.
- Se cumple la relación de voltaje y distancia al realizar la prueba.
- Se consigue encontrar una relación entre la distancia de arco y la frecuencia calculada.

- Se realizan los experimentos sin inutilizar ningún aparato del laboratorio y sin causar ningún daño a los operarios del montaje.

5.2 Futuras aplicaciones de las armas EMP

En este capítulo, se busca hacer una enumeración de las distintas aplicaciones del uso de los pulsos electromagnéticos. A día de hoy, es bastante complicado saber hasta donde puede llegar el empleo de este tipo de tecnología que, después de todo lo investigado, aún está por explotar. Aunque es cierto, que con lo que ya hay en el mercado, se podría hacer mucho más de lo que se está haciendo.

Algunas de las aplicaciones, las cuales he descubierto a lo largo de este proyecto, son las siguientes:

5.2.1 Sistema antimisiles

En el día de hoy, muchas son las potencias mundiales que ya poseen misiles intercontinentales. Esto quiere decir que son capaces de lanzar misiles alrededor de todo el mundo, en muchos casos con misiles que salen de la atmósfera. Las siguientes imágenes, muestran el máximo alcance de los misiles que poseen otras fuerzas mundiales, ya sean misiles lanzados desde tierra o desde submarinos [40].

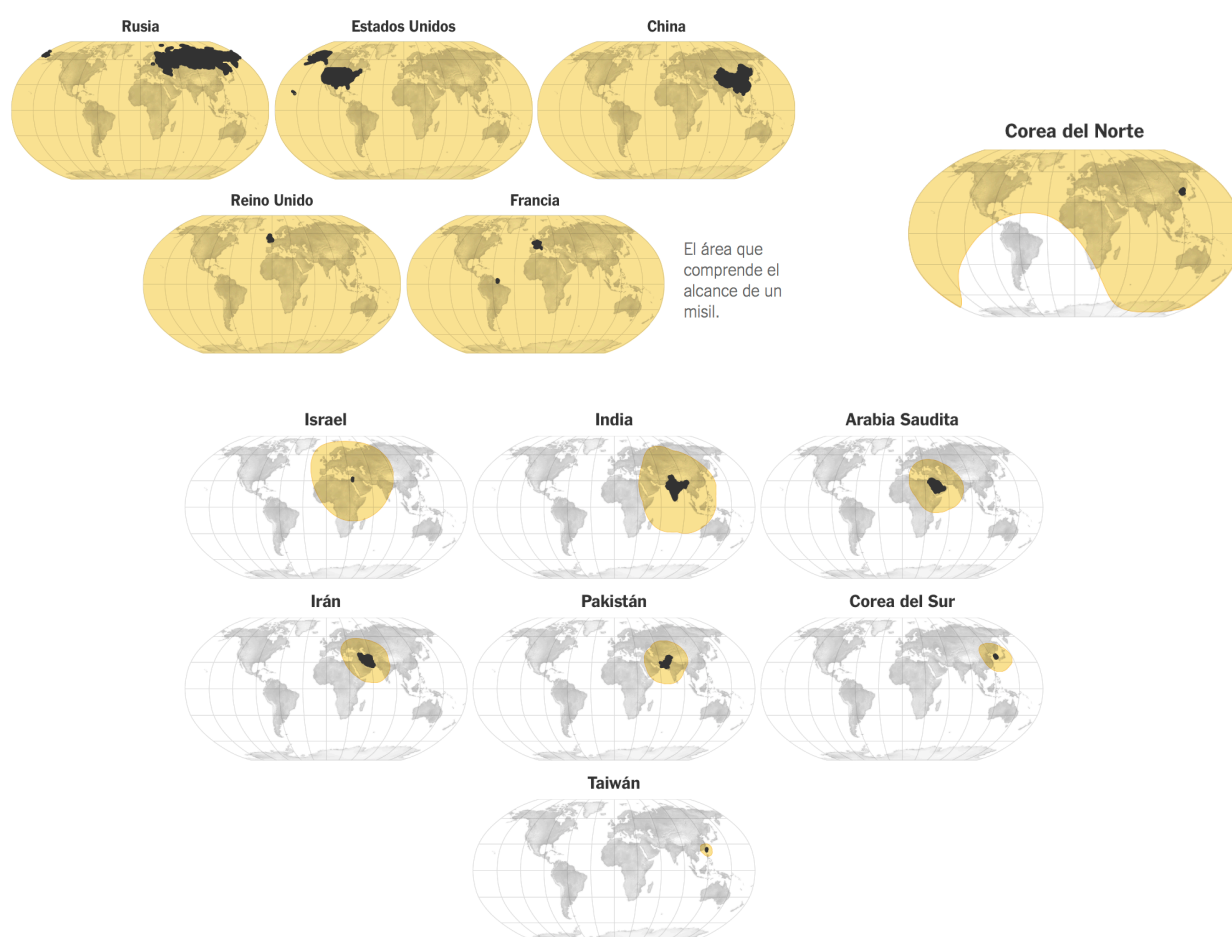


Ilustración 5.2-1 Países que tienen misiles intercontinentales y los alcances que tienen, incluyendo los lanzados por submarinos [40]

Como se puede apreciar en las imágenes, la capacidad armentística de los países del mundo actual ha crecido notoriamente. Es por ello que es necesario crear un sistema de escudo antimisiles propio, es decir, que no dependamos de las decisiones de un país ajeno a nuestros intereses para defendernos. Sí

bien es cierto que las capacidades económicas para lograrlo son enormes, aunando fuerzas con otros países con las mismas intenciones que nosotros podemos lograrlo.

Una de las posibilidades de defensa más económicas que tenemos es el empleo de dispositivos EMP lanzados en las proximidades del misil para desactivar el sistema de guiado del mismo, y en muchos pudiendo desactivar la espoleta que activa el explosivo dentro del mismo. Al tratarse, de misiles intercontinentales en muchos casos, estos atraviesan la atmósfera sería en ese momento el mejor momento para detenerlos dado que la atmósfera absorbería la mayoría de los efectos de estos misiles. Evitando así males mayores.

5.2.2 Ataques a satélites

A día de hoy, el avance tecnológico ha permitido que haya aproximadamente 2300 satélites orbitando en funcionamiento. Estos satélites pueden ser controlados por organizaciones, empresas, gobiernos, y personas particulares. Según el Tratado de Espacio Exterior, de 1967, cada país tiene control reglamentario de los lanzamientos de satélites para evitar la interferencia e impedir las colisiones. Sin embargo, la UNOOSA, la oficina de Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Exterior, la encargada de coordinar el derecho espacial en el mundo.

Las funciones de estas constelaciones satelitales, son las de sostener los sistemas de comunicación, sistemas de inteligencia global, sistemas de navegación y posicionamiento, como GPS, GLONASS, o el futuro Galileo, sistemas de meteorología, sistemas de observación de la tierra para fines científicos, entre otros. Como se puede observar a día de hoy, las agrupaciones de satélites, forman parte de nuestro día a día [41].

La posibilidad de desplegar un sistema de ataque a estos satélites, es bastante real, como ya se pudo ver en el apartado acerca de bombas nucleares fuera de la atmósfera. Gracias al empleo de dispositivos EMP, no sería necesario el empleo de bombas nucleares, bastaría con ser capaces de elevar un arma EMP hasta la posición del satélite que se quiere inutilizar. A día de hoy existe una agrupación de observatorios que colabora con la UNOOSA para el seguimiento y localización de estos. El Real Observatorio de Armada, es uno de ellos [41].

Aunque es verdad que ha día de hoy ya existen otros sistemas como los misiles de largo alcance de combustible sólido, que serían capaces de operar a las alturas de estos satélites. El empleo de armas EMP reduciría la posibilidad de daños colaterales. Debido a que se podría configurar dicha arma para que afectase lo más mínimo al resto de satélites próximos.

5.2.3 Sistemas de seguridad automática

A día de hoy, la defensa antimisil, se divide en dos partes esenciales:

- *Softkill*, es el conjunto de medidas destinadas a engañar al misil sobre nuestra posición y evitar que nos alcance.
- *Hardkill*, es el conjunto de medidas destinadas a la destrucción del misil o la reducción de sus capacidades.

Se podría montar un sistema de armas EMP para la destrucción del sistema interno de un misil, esto podría ser, sistema de guiado, sistema de sustentación en vuelo, sistema de control del misil, y sistema de activación de la carga explosiva. De esta manera el misil se convertiría en trozo de metal en vuelo.

Este sistema, basado en el empleo de armas de pulsos electromagnéticos, evitaría que los misiles fuerán destruidos, evitando explosiones innecesarias. Usando este método reduciríamos el número de daños colaterales.

En el escenario de un combate naval, los dispositivos EMP, supondrían un procedimiento más que permitiría reducir la probabilidad de alcance por misiles. Supongamos, que un misil se aproxima a un buque y este posee protección anti-EMP. El buque activaría el dispositivo lanzando un pulso

electromagnético que sería capaz de inutilizar el sistema de guiado del misil, evitando que el mismo siguiera la trayectoria del buque objetivo. Reduciendo así las probabilidades de impacto por el misil.

5.2.4 Equipos de defensa individual

Todos hemos visto la cantidad de información comprometida que se obtiene mediante el uso de teléfonos móviles y cámaras. Esta información, en muchos casos, no se sonea con el consentimiento de los presentes en el vídeo o imagen. Es por ello, que en muchos casos, se podrían usar dispositivos EMP para la desactivación temporal de aquellos aparatos empleados para grabar o hacer vídeos, respetando así el derecho de los participantes, de la acción que se quiera documentar, a la privacidad.

Este tipo de aparatos, también podría ser empleado por la policía, en aeropuertos o en los momentos posteriores a atentados, para prevenir que los ciudadanos difundan imágenes de las cuales puedan obtener un rédito. En muchos casos, estas imágenes son bastante crueles, y aparece aquí la principal de las paradojas, por qué la persona que está documentando el momento, no para la cámara o la grabadora y se detiene a ayudar.

5.2.5 Detención de vehículos

Imaginen estar en el estrecho de Gibraltar, y que durante las muchas guardias que se realizan al día, se localiza una lancha de narcotraficantes o una lancha de tráfico de personas. Esta lancha está preparada para navegar a velocidades mucho más altas que los buques que poseen, en la actualidad, los cuerpos de seguridad del Estado. Es por ello, que se hace muy complicada, la detención de los pilotos de estas lanchas.

Una posible solución a estos problemas es la utilización de dispositivos EMP para inutilizar el motor de estas embarcaciones. De esta manera sería más sencillo detener a los delincuentes. Una vez inutilizada la embarcación, es mucho más sencillo detener a los delincuentes.

No solamente estaríamos hablando de vehículos navales, estos también pueden incluir vehículos terrestres, por ejemplo la detención de vehículos, en la entrada a bases militares. Como bien saben, en este último mes, se produjo el asalto de dos coches bomba, a la entrada de la base maliense española. Este ataque fue repelido por la rápida y ágil maniobra del centinela que se encontraba de guardia, abatiendo uno de los vehículos, que se aproximaba a la entrada de la base, cargado de explosivos, a gran velocidad.

Ahora supongan que la base posee un dispositivo de EMP capaz de detener vehículos. Toda la maniobra de los centinelas, quedaría reducida a la activación del dispositivo, y la inmediata detención de los vehículos. Realizando así una detención más segura e eficaz [42].

5.2.6 Avances en el campo de la protección ante pulsos electromagnéticos

Aunque cuatro páginas de este trabajo hablan de la protección ante este tipo de amenaza, a la hora de hacer frente a esta amenaza, mucho se tiene que hacer aún. Los avances en este campo son lentos, y el coste de la aplicación de los mismos es enorme. Por ejemplo, el coste de la protección de un buque, debería incluir, en el exterior, la cobertura de toda la red eléctrica mediante láminas de un material metálico conductor. En el interior, los sistemas que puedan funcionar mediante fibra óptica deben de hacerlo. Todas las entradas y salidas bajo la protección del material conductor, deben de estar protegidas mediante los TPDs mencionados en los apartados anteriores. Aparte el barco debe poseer un sistema de tomas de tierra lo suficientemente fuerte como para absorber el pulso electromagnético [43].

Como se puede ver la implantación de este tipo de sistemas de protección no es barato, y requiere de un estudio del barco bastante profundo. Es por ello, que a día de hoy pocas son las unidades protegidas ante este tipo de amenaza, globalmente. Por lo tanto, se debería de hacer una inversión en este tipo de tecnologías para aumentar la aplicación de estas, aumentar la producción de los elementos que constituyen la protección anti-EMP, y gracias a ello, reducir el coste de la misma.

Mediante la investigación en este tema se debería hacer también un estudio sobre alternativas con el mismo objetivo que permitiesen descubrir alternativas más baratas y fiables. La protección ante este tipo de amenaza no debe de ser solamente para el ámbito militar, aunque sea donde sea más probable la aplicación de estos sistemas, sino que precisamente debe de ser igual o mayor aún en las infraestructuras civiles puesto que son estas las que nos hacen vulnerables. Son además, donde más daño económicamente se produciría. Por lo tanto, si queremos ser menos vulnerables al impacto de los pulsos electromagnéticos tanto en la sociedad civil como en la militar, deberemos de estar mejor protegidos ante esta amenaza.

5.3 Grado de cumplimiento de los objetivos.

Una vez analizado lo conseguido, se comparará con los objetivos propuestos en el comienzo del trabajo.

- Demostrar la vulnerabilidad de unidades y buques ante los pulsos electromagnéticos.
 - Acotar la amenaza actual.
 - Estudiar los efectos de los pulsos electromagnéticos sobre la salud.
 - Estudiar los procesos de generación de pulsos electromagnéticos.
 - Caracterizar este tipo de armas según el Derecho Humanitario Internacional.

Todos los objetivos se han cumplido. Se realiza un acotado de la amenaza actual relativa a los posibles enfrentamientos, y al rearme de los distintos países. Se enumeran los rangos que suponen un peligro para la vida humana. Se estudian los distintos modelos de generación de pulsos que existen. Finalmente tras haber estudiado esto se encuadran dentro del marco jurídico del Derecho Humanitario Internacional.

- Estudiar los métodos de protección ante este tipo de amenaza.
 - Conocer los tipos protección ante pulsos electromagnéticos.
 - Proponer mejores sistemas de protección ante ataques de pulsos electromagnéticos.
 - Proponer un balance entre la protección de los equipos y su posible efecto sobre las capacidades del equipo.

Consideraría que todos los objetivos se han cumplido, pero diría que quizás se podría haber hecho una mejor explicación de cómo la protección puede llevar a una reducción de la eficacia o sensibilidad de los equipos protegidos. En el caso de la antena de un radar, si esta se protege en exceso, puede afectar a la sensibilidad de la misma.

- Crear un pequeño montaje experimental de arma basada en el pulso electromagnético.
 - Diseñar teóricamente el prototipo.
 - Estudiar los efectos que pueda tener en la salud y en dispositivos electrónicos.
 - Estudiar previamente los riesgos en el trabajo con los pulsos electromagnéticos.
 - Montar del prototipo.
 - Realizar un ensayo sobre un objetivo concreto.

Como ya se sabe, el diseño teórico del circuito no ha sido posible dado que se desconoce el funcionamiento interno de los generadores, sin embargo ha investigado para caracterizar la salida del generador. También se describe, al abrir uno de ellos, que posee un arco eléctrico y que la frecuencia de trabajo del generador coincide con la de una bobina de Tesla. Se puede concluir que el modelo de generador empleado es un generador de alto voltaje basado en una bobina Tesla. El resto de objetivos de este apartado, sí se han cumplido.

En conclusión, se podría decir que este trabajo ha cumplido con los objetivos planteados inicialmente, y en algunos casos ha sobrepasado las expectativas, como se explicará en los siguientes párrafos, antes de finalizar este trabajo, querría decir algo.

5.4 Líneas futuras

En este capítulo se describirá lo que se hubiera hecho en este proyecto si se hubiese tenido más tiempo y se expondrán algunas líneas de desarrollo para ayudar a los alumnos de las futuras promociones que deseen seguir este proyecto.

En primer lugar, para todo aquel que desee continuar este trabajo, les recomendaría trabajar en los siguientes líneas:

- Investigar mucho más sobre la protección de los barcos, ante el pulso electromagnético. Más concretamente, en el caso concreto de la Armada. También se debería estudiar mejor las técnicas de protección TEMPEST. Incluyendo las distintas acreditaciones de seguridad en la Armada y lo que implican en las políticas TEMPEST.
- Establecer una mejor imagen de la amenaza de los pulsos, dado está constantemente cambiando. Incluyendo las armas que posee en la actualidad cada país.
- Realizar mayor número de ensayos con el generador de pulsos, sobre todo, en lo relacionado con la caracterización del pulso en sí.
- Realizar el prototipo de construcción de un FCG, evitando la destrucción del tubo interior. Este se podría simular de alguna otra manera, como provocando el cortocircuito con un interruptor.
- Validar el examen de legalidad de estas armas con una autoridad en el campo del Derecho Humanitario Internacional.
- Realizar distintos experimentos en el campo de la protección de los dispositivos, utilizando distintos materiales, distintos grosores de protección, o distintas formas.
- Profundizar en la protección de las personas que trabajen con pulsos electromagnéticos.
- Construir un generador de pulsos propio, de manera que en todo momento se conozca el funcionamiento del mismo. Así, se evitaría el empleo de material del cual se desconoce su funcionamiento.
- Medir el campo radiado por la bobina, utilizando el material disponible en la universidad de Vigo. Esto permitiría describir mejor el comportamiento de la salida de la bobina.
- Finalmente, de las cosas más importantes de este trabajo, ponerse en contacto con los altos mandos de la Armada y autoridades expertas en el campo de las armas EMP, desde el primer momento. De esta manera, se conseguiría información de calidad desde el minuto uno.

Personalmente, si se hubiera dispuesto de más tiempo:

- Se habría contactado con INTA, INDRA y NAVANTIA desde el principio. Esto le habría aportado mucho más prestigio al TFG.
- Se habrían realizado distintos experimentos para tratar de caracterizar mejor el pulso.
- Se habría empezado por los experimentos y no por el Estado del Arte. Así, el Estado del Arte se habría realizado a la vez que se realizan los experimentos.
- Se habría montado otro modelo de arma, utilizando los condensadores Maxwell de alta capacitancia y una bobina.

Aunque esto no se hayan realizado, no se considera el trabajo por fallido, debido al trabajo de investigación y de experimentación se llega a las siguientes conclusiones.

5.5 Despedida.

Tras haber terminado este trabajo, querría acabar con dos citas. La primera es de un escritor de renombre, Aaron Sorkin, que escribió los guiones de *“A few good men”*, *“The West Wing”*, o libros como *“To kill a Mockingbird”*, dice lo siguiente:

“El término de “el más necio” es un término económico, es una cabeza de turco. Para que los demás podamos beneficiarnos en la bolsa, necesitamos a alguien más necio. Alguien que compre caro y venda barato. Mucha gente se lleva toda la vida evitando ser el más necio; se le dan los trabajos más complicados, nos peleamos por su sitio cuando la tormenta ha pasado. El más necio es alguien con la mezcla perfecta entre ego y autoengaño para creer que puede triunfar donde otros han perecido. Todos los grandes hechos de la humanidad fueron hechos por los más necios.”

Cuando me embarqué en este proyecto, en ningún momento pensé que fuese a realizar el trabajo que después he llegado a realizar. En ningún momento pensé que me llegarían a solicitar el trabajo cuando acabase de numerosos destinos de las Fuerzas Armadas. En ningún momento pensé que este trabajo le fuese a servir a alguien más que no fuese a mí para salir de la ENM. En ningún momento pensé que este trabajo fuese a retratar el peligro que puedan causar estas armas. Pero al final, todo esto llegó a ocurrir.

Para ponerle el broche final a este trabajo, termino con una cita de Mahatma Gandhi:

“El futuro depende de lo que vayas a hacer hoy.”

Con esta cita, quiero conseguir que aquellos con la capacidad de decisión en el tema del que trata mi proyecto puedan tomar la decisión de liderar en la investigación de las armas EMP. Es un campo aún por explotar y está creciendo, poco a poco. Es el momento de subirse a la ola y liderarla, para poder marcar la diferencia.

El Alférez de Fragata Andrés Pintos Carrillo, les agradece su tiempo dedicado en leer este trabajo.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Diccionario de la Real Academia Española.
- [2] Colin R. Miller, Major, USAF, Center for Strategy and Technology, «Electromagnetic Pulse Threats in 2010,» 2010.
- [3] C. Ghosh, EMP Weapons Strategic Analysis, 2008.
- [4] J. Preston E. Law, Shipboard Electronics, 1987.
- [5] J. I. C. Torres, «El Impulso electromagnético y las Armas de Radiofrecuencia: Vulneraciones de las Sociedades Avanzadas,» 2010.
- [6] A. V. Castro, «Pulso electromagnético y TEMPEST,» 2007.
- [7] J. Garamone, «Russian aircraft flies near US Navy Ship in Black Sea,» 2014.
- [8] RIANOVOSTI, «Russian Su-24 paralyzes American destroyer,» 2014.
- [9] G. P. Aranda, Interviewee, *La protección ante la amenaza de un pulso electromagnético*. [Entrevista]. Enero 2019.
- [10] C. t. A. t. t. t. U. S. f. E. P. (. Attack, «Assessing the threat from EMP Attack,» 2018.
- [11] AENOR, «UNE-EN 61000-2-9, Compatibilidad electromagnética; Parte 2: Entorno; Sección 9: Descripción del entorno IEMN-GA; Perturbaciones Radiadas; Norma básica CEM».
- [12] T. A. M. P. Castellano, «El pulso electromagnético usado como arma,» 2010.
- [13] TN Porto, Escuela de Especialidades Antonio Escaño, «El impulso electromagnético (EMP),» 2010.
- [14] AENOR , «UNE-EN 62305-1 Protección contra el rayo; Parte 1: Principios Generales».
- [15] M. 6. Support Engineering Branch 1842 Electronics Engineering Group EEG Richards-Gebaur AFB, Electromagnetic pulse Handbook for Air Force Communication Service., 1976.
- [16] National Geographic, «los bombardeos de Hiroshima y Nagasaki,» 29 octubre 2018.
- [17] A. Meza, «¿En qué consiste el tratado de armas nucleares firmado por EEUU y la antigua Unión Soviética?,» *France24*, 6 diciembre 2018.
- [18] President Donald Trump, «Strengthening the cybersecurity of federal networks and critical infrastructure,» 2018.
- [19] Engineering and Technology History Wiki, «Vircator,» 2006.
- [20] Harris, William Howstuffworks, «how rail guns work,» *howstuffworks*, 2 Marzo 2016.
- [21] A. Sanjeed, «Electromagnetics: How to make a powerful DIY coilgun,» 17 noviembre 2018.
- [22] L. F. S. Álvarez, Interviewee, *Protección de la armada española ante la amenaza de los pulsos electromagnéticos*. [Entrevista]. noviembre 2018.

- [23] T. J. M. P. Álvarez, *documentación de las clases de Comunicaciones III*, 2018.
- [24] Boletín Oficial del Estado , «Real Decreto 299/2016, de 22 de Julio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos,» 2016.
- [25] NATO Standardization Agency NSA, «Evaluation and control of personnel exposure to radio frequency fields,» 2003.
- [26] Comité Internacional de la Cruz Roja y la Media Luna Roja, «Guía para el examen jurídico de las armas, los medios, y los métodos de guerra nuevos,» 2017.
- [27] Comité Internacional de la Cruz Roja y la Media Luna Roja, «Armas Nucleares y Derecho Internacional Humanitario,» 2008.
- [28] Convenios de Ginebra, «Protocolo I adicional a los Convenios de Ginebra de 1949,» 1949.
- [29] Amazon, «Amazon,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.amazon.es>.
- [30] Kelly Dickerson, LiveScience, «Wireless Electricity, how the Tesla coil works?».
- [31] J. Andrea, «The electric arc as a circuit component,» 2015.
- [32] Steven Dufresne, Hackaday, «Measuring high voltage in milimeters,» 2016.
- [33] Worten, *Calibre de los alambres de cobre*, 2008.
- [34] P. A. P. -. G. MOSCA, Física para la ciencia y la tecnología 5ª Edición, Reverté.
- [35] Universidad del País Vasco, «La espira,» 2006.
- [36] Universidad de Cantabria, «Ondas electromagnéticas conceptos básicos,» 2018.
- [37] Univerdad del País Vasco , «Jaula de Faraday,» 2007.
- [38] Agilent Technologies, «Agilent InfiniiVision 2000 X-Series Oscilloscopes User's Guide,» 2011.
- [39] ATP instrumentation, «Digital multimeter operation manual model: MY-64,» 2004.
- [40] K. C. Sergio Peçanha, «Los países que pueden lanzar un misil a todo el mundo y los que podrían hacerlo pronto,» *NY Times*, 2018.
- [41] A. Llorente, «¿cuántos satélites hay orbitando la tierra y cómo es posible que no choquen?,» *bbc*, 2 Diciembre 2018.
- [42] A. V. Castro, Interviewee, *Empleo de las Armas EMP*. [Entrevista]. Febrero 2018.
- [43] L. F. S. Álvarez, Interviewee, *La protección contra los EMP en los barcos*. [Entrevista]. Febrero 2019.

