

CARACTERIZACIÓN DE UN PULSO ELECTROMAGNÉTICO GENERADO POR UNA DESCARGA ELECTROSTÁTICA

Andrés Felipe González Gachetá

Universidad Pedagógica Nacional

Facultad de Ciencia y Tecnología

Departamento de Física

Bogotá D.C., Colombia

2018

CARACTERIZACIÓN DE UN PULSO ELECTROMAGNÉTICO GENERADO POR UNA DESCARGA ELECTROSTÁTICA

Andrés Felipe González Gachetá

Trabajo de grado presentado para optar al título de:
Licenciado en Física

Director:

José Francisco Malagón Sánchez

Codirector:

Marina Garzón Barrios

Línea de profundización: La actividad experimental para la enseñanza de la física

Universidad Pedagógica Nacional

Facultad de Ciencia y Tecnología

Departamento de Física


Bogotá D.C., Colombia

2018

Agradecimientos

Agradezco a mi familia quienes siempre me apoyaron incondicionalmente en cada etapa de mi vida. A mi madre Martha y mi padre Salvador quienes amo con todo mi corazón, y han depositado en mi la fortaleza y perseverancia para seguir adelante. A mis hermanos Miguel y Jennifer quienes siempre me han apoyado en cada decisión de mi vida, y sin su ayuda no lograría a estar ha donde he llegado.


A mis amigos y compañeros quienes siempre me han mostrado su interés y preocupación en este proceso, además de que han confiado con seguridad en mí en esta bonita etapa de mi vida. A mis maestros José Francisco Malagón Sánchez y Marina Garzón Barrios quienes siempre estuvieron atentos y dispuestos a apoyarme cuando más lo necesitaba, y a enseñarme nuevas formas de interpretar este vasto mundo.

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 1 de 6	

1. Información General	
Tipo de documento	Trabajo de Grado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Título del documento	Caracterización de un pulso electromagnético de generado por una descarga electroestática
Autor(es)	González Gachetá, Andrés Felipe
Director	Malagón Sánchez, José Francisco; Garzón Barrios, Marina
Publicación	Bogotá. Universidad Pedagógica Nacional, 2018, 57 p.
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional
Palabras Claves	PULSO ELECTROMAGNÉTICO; RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA; RADIO DE ACCIÓN; FRECUENCIA; CAMPO ELECTROMAGNÉTICO; DESCARGA ELECTROESTÁTICA

2. Descripción
<p>En este trabajo se estudia un pulso electromagnético generado por una descarga electroestática mediante la determinación del intervalo de frecuencias de la radiación electromagnética que es emitida durante este fenómeno, y el radio de acción que genera perturbaciones en los dispositivos las cuales son características de este fenómeno. Se debe a que las características por otras fuentes de origen del pulso, como las descargas electroestáticas, no suelen ser tratadas en los estudios de este particular fenómeno. De forma que se realiza una descripción general de este fenómeno que contribuya al diseño y construcción de un montaje experimental que permita la producción, detección de un pulso electromagnético generado por una descarga electromagnética.</p>

3. Fuentes
<p>Arribas, j. I. (2 de Junio de 2015). <i>Efectos producidos por la caída de un rayo</i>. Recuperado el 12 de Marzo de 2017, de https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_02_03/Proteccion_contra_descargas_atmosfericas/7/7.htm</p> <p>Bainbridge, K. T. (Mayo de 1976). Trinity. Los Alamos, New Mexico, EEUU: Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California.</p> <p>Cadavid, L. F. (2014). Caracterización espectral de un pulso electromagnético radiado por un rayo atmosferico (LEMP) mediante un Detector-Receptor de RF tipo SDR (Software-Defined Radio). Manizales, Caldas, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.</p> <p>Cassiolato, C. (s.f.). <i>EMI - Interferencia Electromagnética en instalaciones industriales y mucho más</i>. Obtenido de SMAR: http://www.smar.com/espanol/articulos-tecnicos/emi-interferencia-</p>

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	FORMATO
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE
Código: FOR020GIB	Versión: 01
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 2 de 6

electromagnetica-en-instalaciones-industriales-y-mucho-mas

CEMDAL. (6 de Noviembre de 2016). *Historia de las interferencias*. Recuperado el 18 de Octubre de 2017, de Consultoria de compatibilidad electromagnetica: <https://www.cemdal.com/2016/11/06/historia-de-las-interferencias-emi/>

Close, S., Colestock, P., Cox, L., Kelley, M., & Lee, N. (21 de Diciembre de 2010). Electromagnetic pulse generated by meteorid impacts on spacecraft. *Journal of Geophysical Research*, 115(A12328). doi:10.1029/2010JA015921

F. Martin, J., A. Nicotra, M., Leguizamon, C., & Galeasso, A. (Septiembre de 2016). Propuesta de recreacion de los experimentos de Hertz en el Laboratorio de Enseñanza de la Física. *Facultad de las Ciencias Exactas, Físicas, y Naturales, III(2)*. Obtenido de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFyN/article/viewFile/12044/15220>

Herraiz Saragacha, M., Rodriguez Caderot, G., Rodriguez Bouza, M., Rodriguez Bilbao, I., Sanchez Dulcet, F., Moreno Monge, B., . . . Escayo Menendez, J. (2014). Tormentas Geomagnéticas y evaluación de su impacto en las tecnologías e infraestructuras de España y Portugal. *Seguridad y medio ambiente*, 18-34.

i Arnau, L. F. (2012). *Introduccion a la compatibilidad electromagnetica*. Barcelona, España: UPC Departament d'Enginyeria Electronica.

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, I. (2015). *Riesgos debidos a la electricidad estática*. Madrid, España: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Obtenido de

<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FICHAS%20DE%20PUBLICACIONES/EN%20CATALOGO/SEGURIDAD/Riesgos%20debidos%20a%20la%20electricidad%20estatica.pdf>


Jiang, D. P., Li, J., Lu, S. L., Kuang, F., Lang, H. Y., Wang, Y. F., . . . Guo, G. Z. (Noviembre de 2012). Study of the relationship between electromagnetic pulses and rats Alzheimer's disease and its mechanism. *2012 6th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM)*, 322-324.

Leahy, J. S. (Julio de 2016). Experimental testing of a Van de Graaff generator as an Electromagnetic Pulse generator (N°AFIT-ENP-MS-16-S-075). *Experimental testing of a Van de Graaff generator as an Electromagnetic Pulse generator (N°AFIT-ENP-MS-16-S-075)*, 91. Ohio, Estado Unidos: AIR FORCE INSTITUTE OF TECHNOLOGY WRIGHT-PATTERSON AFB OH WRIGHT-PATTERSON AFB.

Lee, K. S. (Diciembre de 1980). EMP Interaction: Principles, Techniques and Reference Data (A Compleat concatenation of Technology from the EMP Interaction Notes). EMP Interaction 2-1. (No. DC-EH-1289). Albuquerque, New Mexico, Estados Unidos: DIKEWOOD.

Longmire, C. L. (Junio de 1986). Justification and Verification of High-Altitude EMP Theory, Part 1. Livermore, California, EEUU: Lawrence Livermore National Laboratory.

M. de Querioz, A. C. (02 de Julio de 2014). *Operation of thr Wimshurst machine*. Obtenido de

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	FORMATO
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE
Código: FOR020GIB	Versión: 01
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 3 de 6

Electrostatic machines: <http://www.coe.ufrj.br/~acmq/whyhow.html>

Maquina de Wimshurst. (s.f.). Recuperado el 29 de 01 de 2018, de Wikipedia:
https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina_de_Wimshurst

Nelson, D. B. (Julio de 1971). Effects of Nuclear EMP on AM Radio Broadcast Stations in the Emergency Broadcast System. . Oak Ridge, Tennessee, Estados Unidos: Oak Ridge National Laboratory.

Padilla Azúzar, D., & Garzon Barragan, I. (2008). El teléfono celular: una estrategia didáctica para la enseñanza del electromagnetismo. *Tecné, Episteme y Didaxis*(24), 103-112.

Paez, J. L. (10 de Mayo de 2010). *Efectos producidos por el impacto de un rayo en una instalacion.* Recuperado el 12 de Marzo de 2017, de <http://www.ealuro.com/ealgx/tormentas.htm>

Receptores de radio. (2008). 26-33. Las Palmas, España: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria . Obtenido de
https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7053/7053985/tema_2_2007_2008_b.pdf

Salom, E. V. (17 de Agosto de 2017). *¿Que es la humedad relativa del aire?* Obtenido de CienciaToday: <https://cienciatoday.com/la-humedad-relativa-del-aire/>

Shurenkov, V., & Pershenkov, V. (Diciembre de 2016). Electromagnetic pulse effects and damage mechanism on the semiconductor electronic. *Electronics and Energics*, 29(4), 621 - 629.
 doi:10.2298/FUEE1604621S

Villavicencio Torres, M., & Mendez Fragoso, R. (Junio de 2017). Enseñanza del electromagnetismo a través de aplicaciones experimentales. *Latin American Journal Physics Education*, 11(2).

4. Contenidos

Este trabajo queda repartido en los siguientes capítulos:

El pulso electromagnético


En este capítulo se hace una descripción general del pulso electromagnético que permita vincularlo con las descargas electrostáticas mediante un reconocimiento de las características generales que se han hecho en los estudios del pulso.

Hacia la detección del pulso

En este capítulo se caracteriza un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática a partir de una serie de experiencias que permitan la producción y detección de este pulso para establecer el intervalo de frecuencias de la radiación electromagnética emitida al igual que el radio de acción.

Reflexiones sobre el pulso electromagnético para la enseñanza y aprendizaje del electromagnetismo

En este capítulo se plantea como las experiencias para la caracterización de un pulso

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 4 de 6	

electromagnético generado por una descarga electrostática son pensadas en el proceso de enseñanza y aprendizaje para la generación de ideas sobre campo electromagnético y onda electromagnética.

5. Metodología

Se realiza inicialmente un reconocimiento de las características generales del pulso electromagnético mediante la revisión de los estudios ya realizados sobre este fenómeno, de manera tal que brindaran información para el diseño del montaje experimental que permitiera la producción y detección de un pulso generado por una descarga electrostática. Posteriormente se llevan a cabo una serie de experiencias con el uso de este montaje experimental que permita identificar o establecer las características particulares de este fenómeno. Para terminar, se plantea estas experiencias en el ámbito escolar como una estrategia para la enseñanza y aprendizaje del electromagnetismo.

6. Conclusiones


Las experiencias que se realizaron permitieron la caracterización (otorgar algunas características propias que lo diferencian de los demás fenómenos) de un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática producida por un generador Van de Graaff o una Máquina de Wimshurst, lo cual era el objetivo principal de este trabajo. Esto se fue posible mediante un meticuloso proceso de indagación, estructuración y organización que se llevó a cabo inicialmente con la revisión de los estudios ya realizados, lo cual permitió a que se llevará a cabo un proceso de planeación y ejecución de una serie de actividades experimentales.

La revisión cuidadosa del estado de arte de este fenómeno antes de realizar las experiencias permitió elaborar una descripción general del pulso electromagnético, cuya característica es la liberación de energía electromagnética originada por la variación intensa del campo electromagnético al entorno, que se manifiesta como corrientes eléctricas o radiación electromagnética; además esta energía permite una clasificación de este fenómeno según la intensidad de voltaje.

Otra de sus características es la duración de este fenómeno, puesto los tiempos para la realización de este suceso son fracciones de segundo. De modo que se piensa que cualquier evento que cumpla con estas características se considera como un pulso electromagnético, como es el caso de la descarga electrostática.

Además, esta revisión permitió establecer un intervalo de frecuencias en las que se podría detectar la radiación emitida por este fenómeno para las experiencias que se llevarían a cabo.

Las experiencias mostraron que un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática producida por un generador Van de Graaff o una Máquina de Wimshurst emite una radiación electromagnética entre el intervalo de frecuencias de 3 MHz hasta 23 MHz, y cuyo alcance de detección para esta radiación dependía del mecanismo de producción de la descarga. Esta radiación electromagnética posee las siguientes características:

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 5 de 6	


1. Es una combinación de varias ondas electromagnéticas con valores aleatorios de un intervalo de frecuencia determinado.
2. La cantidad de energía que transportan dichas ondas electromagnéticas dependen estrechamente de la cantidad de energía eléctrica que es producida por la descarga electrostática.
3. La potencia de la onda electromagnética es afectada por la disipación en el aire de la cantidad de energía que porta dicha onda mientras atraviesa este medio. Esta disipación es más efectiva y rápida cuando la onda posee más potencia, de modo que la distancia recorrida por esta onda sea menor.
4. Estas ondas electromagnéticas se propagan en todas las direcciones (omnidireccional) y tiene un radio de detección para este caso de 720 cm entre el intervalo de frecuencias entre 3 MHz y 19.5 MHz. Sin embargo, la distribución de energía en cada dirección no es uniforme.

Un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática producida por un generador Van de Graaff o una Máquina de Wimshurst posee un radio de acción que depende del campo electromagnético que es creado, el cual posee las siguientes características:

1. Es una gran variación de la cantidad de energía del campo electromagnético que se crea en un corto periodo de tiempo, de modo que, puede formar ondas electromagnéticas que portan una gran cantidad de energía en un intervalo de frecuencias, las cuales son capaces de provocar un efecto de resonancia en los aparatos eléctricos y electrónicos.
2. La energía de este campo electromagnético se disipa en grandes cantidades en las proximidades donde se generó la descarga, por ello no se produce perturbaciones en la funcionalidad normal de los aparatos eléctricos y electrónicos después de ciertas distancias, por lo que su radio de acción es de aproximadamente 75 cm.
3. Este campo electromagnético no distribuye de manera uniformemente la energía en su radio de acción, no obstante, este campo se propaga en todas las direcciones.

Las experiencias realizadas en este trabajo posibilitarían realizar una exploración a una primera parte en donde las producción y detección de efectos son pensados como una posibilidad para la enseñanza y aprendizaje de los conceptos de campo electromagnético y onda electromagnética, ya que en ellas pueden generar -en el docente y los estudiantes- ideas sobre dichos conceptos que favorecen a la comprensión de estos. Sumado a esto, estas experiencias requieren de montajes experimentales sencillos de hacer, y podrían ser más significativos a su entorno.

A modo personal, fue necesario reelaborar algunos conceptos de electromagnetismo, Puesto que las investigaciones y estudios en torno al pulso electromagnético son de un corte más práctico que teórico, en consecuencia, muchos de los conceptos y fenómenos relacionados con el pulso que se hacen referencia en estos textos son ambiguos y poco claros. De modo que, me fue esencial

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	FORMATO		
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE		
Código: FOR020GIB		Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012		Página 6 de 6	

realizar una reconstrucción de los conceptos de campo electromagnético y onda electromagnética para poder interpretar las ideas fundamentales de cada uno de estas investigaciones y estudios.

Sumado a esto, también me fue relevante el proceso que se realizó para la elaboración de las experiencias presentadas en este documento. Ya que, inicialmente debía indagar y conocer sobre las experiencias ya realizadas por otros autores que me permitieran generar ideas para el diseño de mi montaje experimental. También en esta parte, me fue importante reconocer que las condiciones ambientales son un factor decisivo al momento de realizar experiencias con descargas electrostáticas, cuestión que muchas veces no se explica cuando se llevan a cabo estas experiencias al salón de clases.

Por último, debo mencionar que a partir de este trabajo me ha suscitado nuevas inquietudes o cuestionamientos sobre este particular fenómeno, de modo que, invitó a que se continúe y se realice investigaciones sobre el pulso electromagnético.

Elaborado por:	González Gachetá, Andrés Felipe
Revisado por:	Malagón Sánchez, José Francisco; Garzón Barrios, Marina

Fecha de elaboración del Resumen:	23	07	2018
------------------------------------------	----	----	------

Contenido

Introducción	1
Capítulo 1. El Pulso Electromagnético	3
1.1 La aparición de un nuevo fenómeno	3
1.2 El pulso electromagnético y la interferencia electromagnética.....	5
1.3 Fuentes de origen de un pulso electromagnético	6
1.3.1 Impacto de meteoritos.	6
1.3.2 Rayos atmosféricos.....	6
1.3.3 Tormentas geomagnéticas.	8
1.3.4 Motores y líneas eléctricas.	8
1.3.5 Detonación nuclear.	8
1.4 Determinando las características generales de un pulso electromagnético.....	9
1.5 La clasificación de los pulsos electromagnéticos.....	11
1.5.1 Baja Intensidad.	11
1.5.2 Mediana intensidad.....	11
1.5.3 Alta intensidad.....	11
1.6 Sobre la radiación electromagnética de un pulso electromagnético	12
1.7 Relación entre la descarga electrostática y el pulso electromagnético.....	13
Capítulo 2. Hacia la detección de un pulso electromagnético	16
2.1 Antecedentes para el estudio de un pulso.....	16
2.2 Antecedentes para la generación de un pulso a partir de la descarga electrostática	17
2.3 El diseño y el montaje experimental: Estudio de un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática	18
2.3.1 Laboratorios utilizados.	19
2.3.2 Mecanismo de producción de la descarga electrostática.	20
2.3.3 El dispositivo de detección.	21
2.4 La humedad relativa: condición ambiental para la generación de descargas electrostáticas	23
2.5 Radiación emitida durante un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática.....	24
2.5.1 La primera detección del pulso emitido por la descarga.	24

2.5.2 Alcance de la radiación emitida.....	26
2.5.3 La detección y alcance de la radiación emitida por los otros aparatos.	28
2.5.4 Alcance máximo de la radiación emitida.	32
2.5.5 Direccionalidad de la radiación emitida.	33
2.6 Radio de acción de un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática .	40
Capítulo 3. Reflexiones sobre el pulso electromagnético para la enseñanza y aprendizaje del electromagnetismo	47
3.1 Experimentos para la enseñanza del electromagnetismo	47
3.2 El pulso electromagnético para la enseñanza y aprendizaje del electromagnetismo	51
3.3 La enseñanza de las ciencias y el pulso electromagnético	53
Conclusiones	55
Referencias.....	58
Anexos	61
Anexo 1	61
Compatibilidad e interferencia electromagnética.	61
Fuentes de EMI.....	61
Mecanismos de propagación de las EMI.	62
Anexo 2	63
Generador de Van de Graaff.....	63
Funcionamiento del generador de Van de Graaff.....	63
Anexo 3	64
Máquina de Wimshurst.....	64
Funcionamiento de la máquina de Wimshurst.	65

Introducción

Este trabajo consiste en el estudio de un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática mediante la determinación del intervalo de frecuencias de la radiación electromagnética que es emitida durante este fenómeno, y el radio de acción que genera perturbaciones en los dispositivos; las cuales son características de este fenómeno. Por ello el principal objetivo de este trabajo es:

Realizar un montaje experimental que permita la producción, detección y el estudio del intervalo de frecuencias y radio de acción de un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática.

Esto se debe a que la gran mayoría de los estudios del pulso electromagnético hacen referencia a estas características a partir de una sola fuente de origen: las detonaciones nucleares. De modo que se presentan estas características de forma general y ambigua para todas las fuentes de origen del pulso. De modo que, conocer que características particulares posee un pulso generado por una determinada fuente de origen resulta en un reto para quienes deseen estudiar este fenómeno.

Teniendo en cuenta que durante un pulso electromagnético se emite radiación electromagnética y se crea un radio de acción, consideré que es posible estudiar y determinar estas características a partir de un pulso que sea generado por una descarga electrostática, por ello inicialmente se formularon las siguientes preguntas: *¿Cuál es el intervalo de frecuencias en los que actúa un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática? ¿Cuál es el rango de acción de un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática?* De modo que es necesario:

Revisar los estudios e investigaciones relacionados con el pulso electromagnético que brinden información relevante para identificar y especificar las características ondulatorias y electromagnéticas de este fenómeno.

Diseñar y construir un montaje experimental que permita la producción de una descarga electrostática y detección de la radiación electromagnética emitida por ésta, con la finalidad de identificar las características propias del pulso electromagnético generado por una descarga.

Establecer criterios y elementos para la enseñanza de los conceptos de campo electromagnético y onda electromagnética mediante las experiencias para caracterizar un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática.

Lo anterior queda repartido en los capítulos 1, 2 y 3, de la siguiente forma:

1. *El pulso electromagnético*

En este capítulo se hace una descripción general del pulso electromagnético que permita vincularlo con las descargas electrostáticas mediante un reconocimiento de las características generales que se han hecho en los estudios del pulso.

2. *Hacia la detección del pulso*

En este capítulo se caracteriza un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática a partir de una serie de experiencias que permitan la producción y detección de este pulso para establecer el intervalo de frecuencias de la radiación electromagnética emitida al igual que el radio de acción.

3. *Reflexiones sobre el pulso electromagnético para la enseñanza y aprendizaje del electromagnetismo*

En este capítulo se plantea como las experiencias para la caracterización de un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática son pensadas en el proceso de enseñanza y aprendizaje para la generación de ideas sobre campo electromagnético y onda electromagnética.

Capítulo 1. El Pulso Electromagnético

En este capítulo se hace una descripción general del pulso electromagnético que permita vincularlo con las descargas electrostáticas, ya que, las primeras descripciones en los estudios de este fenómeno, que presentaré más adelante, son aludidas a un subproducto de las detonaciones nucleares. De modo que, las características por otras fuentes de origen del pulso no suelen ser tratadas o frecuentadas en otros estudios, como es el caso de las descargas electrostáticas.

Así que, se realiza un reconocimiento de las características generales del pulso electromagnético. Para llevar esto a cabo en primer lugar se hace necesario conocer los antecedentes del pulso, ya que, en ellos se explican el mecanismo de funcionamiento y las relaciones con el fenómeno de interferencia electromagnética. Luego se expone los mecanismos de producción o fuentes de origen que hasta la fecha generan un pulso, en donde se observa la existencia de una diversidad de fenómenos. Posteriormente se determinan las características generales de un pulso generado por diferentes fuentes de origen mediante los estudios que se han realizado en torno a este fenómeno, en donde mencionan que la radiación electromagnética que se emite en este fenómeno hace parte de estas características. Para finalizar se muestra como el pulso está relacionado con las descargas electrostáticas.

1.1 La aparición de un nuevo fenómeno

Antes de finalizar la segunda guerra mundial, el 16 de Julio de 1945, los Estados Unidos de América realizó la primera prueba nuclear en el estado de Nuevo México (EE. UU.), llamada la *Prueba Trinity*. Durante esta prueba, Enrico Fermi uno de los más reconocidos científicos del proyecto Manhattan -debido a que se destacaba tanto en la física teórica como experimental, como lo menciona Robert Wilson en *Trinity* (1976)- estimo que:

...una de las dificultades que se anticipaba era la de transmitir señales durante la explosión cuando se consideró que los rayos gamma de la reacción ionizarán el aire y otros materiales dentro de centenares de yardas. Fermi había calculado que la eliminación del gradiente del potencial eléctrico en la atmosfera sería equivalente a un gran rayo que golpea la vecindad. **Previendo de ello, todas las líneas de señales fueron completamente apantalladas o blindadas, en algunos casos por duplicado, pero a pesar de ello se perdieron muchos**

registros debido a falsas lecturas que paralizaron los equipos de grabación. Gran parte de la grabación se realizó fotográficamente en hormigón armado, refugios cubiertos de tierra ubicados a unos 110 m de la bomba. Los cables blindados profundamente enterrados llevaron las señales a los refugios. Incluso aquí la inmensa emisión de rayos gamma ennegreció las placas fotográficas, excepto donde las placas estaban rodeadas por gruesos escudos de plomo dentro de los refugios. (Bainbridge, 1976)¹

Lo que Enrico Fermi y sus colaboradores evidenciaron fue el descubrimiento de un nuevo fenómeno, al que nombraron **pulso electromagnético (PEM)**. Mientras que Gran Bretaña años después lo denominaba como “radioflash”.

Durante los siguientes años, los Estados Unidos de América y la extinta Unión Soviética dedicaron una parte de sus esfuerzos para la investigación de este fenómeno mediante los datos obtenidos de las detonaciones nucleares a nivel del mar y a grandes altitudes;² hasta que en 1963 se firmó el *Tratado de prohibición parcial de ensayos nucleares* por Estados Unidos de América, Unión Soviética y otros 118 países, que prohibía las pruebas de detonaciones de armas nucleares.

Las investigaciones realizadas por los Estados Unidos de América mostraron, como lo señala Conrad Longmire en *Justification and Verification of High-Altitude EMP Theory Part 1 (Justificación y verificación de un PEM [Pulso Electromagnético] de gran altitud Parte Teórica I)* (1986), que la emisión de rayos gamma debido a una detonación nuclear interactúa principalmente con los átomos del aire u otras partículas ocasionando un efecto Compton, efecto en el que hay una liberación de electrones siempre hacia adelante de forma tal que se produce un flujo de electrones en una misma dirección, en otras palabras, se produce una corriente eléctrica inducida por el aire cuya característica es la de poseer una intensidad muy alta. (Longmire, 1986) Este proceso sucede durante un breve periodo de tiempo después de la detonación, lo que causa que los aparatos eléctricos y electrónicos que estén en el **radio de acción** se sobrecarguen de modo

¹ Traducción libre del inglés Kenneth Bainbridge, *Trinity*, No. LA-6300-H, Los Alamos Scientific Lab., New Mexico (USA), 1976, p. 53.

² Se realizaron un total de 20 pruebas entre los años de 1955 y 1962. Las pruebas más relevantes fueron; *Starfish Prime* (EE. UU.) y *Proyecto K (K-3)* (URSS), las cuales demostraron el poder destructivo de un pulso electromagnético si se origina a grandes altitudes.

que las operaciones que estos equipos realizan son **interferidas temporalmente, pudiendo quedar totalmente inoperativas o destruidas.**

1.2 El pulso electromagnético y la interferencia electromagnética

Cabe mencionar que algunas investigaciones realizadas a inicios de los años 1930 ya revelaban la existencia del efecto de interferencia electromagnética, efecto similar al producido por un pulso que ocurre entre aparatos eléctricos. En aquella época se había incrementado el uso de los aparatos eléctricos principalmente para la navegación y comunicación, como radios y radares, y debido a esto se presentaban con más frecuencia irrupciones transitorias o periódicas cuando el equipo estaba en funcionamiento, por lo que se llegó a la conclusión de que son los mismos aparatos que interfieren unos con otros.

Durante la Primera Guerra Mundial se empezó a usar la radio a nivel militar y las **chispas de las bujías** de los motores provocaban interferencias en los vehículos militares. En la década de 1930 los motores eléctricos y los trenes eléctricos fueron la principal fuente de interferencias. Durante la Segunda Guerra Mundial se utilizaron intensamente los radares y las radios creando un sinfín de inconvenientes en las aeronaves debido a las interferencias. (CEMDAL, 2016)

A estos problemas de interferencia entre aparatos eléctricos se denominó **interferencia electromagnética** (Ver Anexo 1). No obstante, esta interferencia era relativamente fácil de resolver en aquel entonces, debido a la baja sofisticación que poseían los aparatos.

A medida que se hacía más frecuente la utilización de aparatos eléctricos y se empezaba a desarrollar y mejorar los aparatos electrónicos a mediados del siglo XX, se vio necesario conocer e investigar las **fuentes externas** que pudieran interferir con dichos aparatos, llegando a la conclusión de que existen diversos fenómenos naturales y artificiales -como descargas electrostáticas y rayos atmosféricos- capaces de causar interferencia mediante conducción, acoplamiento reactivo o **radiación**.

Así que, después que se prohibiera las pruebas de detonaciones nucleares, las investigaciones sobre interferencia electromagnética comenzaron a tener más relevancia para el

estudio del pulso electromagnético, ya que, algunos autores llegaron a la conclusión de que las **fuentes que causaban interferencia mediante radiación serían otro tipo de fuentes de origen de un pulso**. Esto permitió, que se empezara a desarrollar tecnología capaz de emular una fracción de un pulso generado por una detonación nuclear (simuladores)³ con base en las descargas electrostáticas.

La finalidad de los estudios del pulso electromagnético consistía inicialmente en comprender los mecanismos de producción de este fenómeno que permitió la generación de nuevas armas y mejorar la protección de aparatos eléctricos y electrónicos ante este fenómeno.

1.3 Fuentes de origen de un pulso electromagnético

Se puede llegar a reconocer las fuentes de origen o los mecanismos de producción de un pulso electromagnético.

1.3.1 Impacto de meteoritos.

La descarga de energía electromagnética resultante del impacto de un meteorito con una nave espacial o la ruptura explosiva de un meteorito que pasa a través de la atmósfera de la Tierra. Los impactos de meteoros en las naves espaciales causan daño mecánico, pero su efecto eléctrico en los sistemas de naves espaciales no está bien caracterizado. Varias anomalías de la nave anunciadas son sugestivas de un fallo eléctrico asociado con el impacto de meteoritos. (Close, Colestock, Cox, Kelley, & Lee, 2010)

1.3.2 Rayos atmosféricos.

Casi todas las descargas naturales de rayos se inician en el interior de las nubes y progresan en forma de árbol de diferentes ramas a tierra. En su trayectoria transportan corrientes eléctricas que pueden llegar como término medio de 30.000 amperios a valores superiores a 300.000 amperios durante millonésimas de segundo, con potenciales que sobrepasan los 15 millones de voltios y desprendiendo una energía térmica superior a los 8.000 grados. El rayo es la reacción eléctrica causada por la saturación de cargas

³ Véase Janis Klebers, y George Crowson, *Nuclear Electromagnetic Pulse Simulation by Dipole Antenna Array Techniques*, No. HDL-TM-72-9, HARRY DIAMOND LABS, Adelphi, Maryland, 1972. También *Survivability, Vulnerability, Test Operations Procedure (TOP) 01-2-620A High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Testing*, 2015.

electrostáticas que han sido generadas y acumuladas progresivamente en la nube durante la activación del fenómeno eléctrico de una tormenta.

Durante unas fracciones de segundo, la energía electrostática acumulada en la nube se convierte en una descarga de energía electromagnética (el relámpago visible y la interferencia de ruido), energía acústica (trueno) y calor.

En el primer instante, se generan cargas electrostáticas durante la formación del líder [rayo guía]. En el segundo instante, se producen pulsos electrostáticos (PES), que son transitorios, atmosféricos y aparecen [se detectan] en los equipos por la variación brusca del campo electrostático presente en la zona.

En el tercer instante, aparecen pulsos electromagnéticos (PEM). El contacto físico de la energía del rayo en el punto de contacto genera una chispa que se transforma en un pulso electromagnético que viaja por el aire. En el mismo instante el flujo de la corriente que circula por los conductores eléctricos de tierra hacia la toma de tierra genera un campo magnético proporcional a la intensidad de la corriente de descarga del rayo. La energía radiada por el pulso en el aire viaja a la velocidad de la luz induciendo por acoplamiento todo aquello que se encuentre a su paso referente a tierra. (Paez, 2010).

El pulso electromagnético, es el resultado de los campos electromagnéticos transitorios que se forman por el flujo de corriente, a través del canal de descarga del rayo. Después de que se establece el canal de descarga del rayo entre la nube y la tierra, llega a formarse un camino tan conductivo como un conductor eléctrico. La corriente de neutralización comienza a fluir rápidamente y produce un campo magnético en relación con la misma. Ya que estas corrientes de descarga crecen rápidamente y alcanzan corrientes pico de cientos de miles de amperios, los pulsos magnéticos que ellos crean pueden ser muy significativos. El voltaje inducido resultante (PEM) dentro de cualquier grupo donde existen varios cables que corren paralelamente, puede también ser muy significativo. (Arribas, 2015)

Este tipo de pulso electromagnético es conocido como LEMP (Lighting Electromagnetic Pulse)

1.3.3 Tormentas geomagnéticas.

Los campos eléctricos que se generan por las variaciones de campo magnético durante una tormenta geomagnética son capaces de inducir corrientes eléctricas en los sistemas conductores (cables eléctricos, conducciones metálicas, terrenos, etc.). Estas corrientes, llamadas genéricamente GICs (Geomagnetically Induced Currents), son muy peligrosas para las conducciones metálicas subterráneas, como tuberías de petróleo o gasoductos, y para los sistemas eléctricos. (Herraiz Saragacha, y otros, 2014)

1.3.4 Motores y líneas eléctricas.

Cualquier cambio brusco en el flujo de electricidad genera un pulso electromagnético, que produce una interferencia electromagnética radiada. Esta última puede generarse por chispa en los cepillos de motores, llave de circuitos de potencia, accionamientos de cargas inductivas y resistivas, accionamiento de relés, llaves, disyuntores, lámparas fluorescentes, calentadores, ignición automovilística, descargas atmosféricas o aún descargas electrostáticas entre personas y equipos. (Cassiolato, s.f.)

1.3.5 Detonación nuclear.

Durante el proceso de fisión nuclear un núcleo de un átomo que posee una masa muy grande se divide en dos o más núcleos de masas livianas, esto puede ocurrir cuando el núcleo inicial captura un neutrón. Sin embargo, la suma de estas masas es menor a la masa inicial por lo que esa cantidad faltante, según la ecuación de Einstein ($E = mc^2$), se convierte en energía. Esta última en formas de partículas beta, rayos X, iones positivos, neutrones y rayos gamma.

Durante una detonación de un arma nuclear, ocurre este proceso de fisión, pero no es controlado, debido a esto emiten una cantidad de 0,003 de su energía en rayos gamma. Estos son ondas electromagnéticas con una frecuencia entre 10^{20} y 10^{21} Hz, que viajan a la velocidad de la luz (3×10^8 m/s) y tienen una longitud de onda del orden de 10^{-10} cm. Estos al interactuar con los átomos se comportan más como partículas que ondas.

Cuando los rayos gamma interactúan con los átomos del aire su principal interacción es la dispersión Compton. En este proceso un rayo gamma colisiona con un electrón en el átomo del aire y sacándolo de éste. Cuando ocurre esto, parte de la energía del rayo gamma es transferida al electrón, el cual se dispersa en una nueva dirección (hacia

adelante nunca hacia atrás) y el rayo gamma en otra dirección con la particularidad de que su longitud de onda es mayor a la inicial. Así pues, un flujo dirigido de rayos gamma produciría una corriente eléctrica dirigida de electrones. Este proceso tiene una duración que va desde un nanosegundo hasta un milisegundo después de la detonación. (Longmire, 1986)⁴

A grandes altitudes el efecto aumenta debido a que esta corriente eléctrica interactúa con el campo magnético de la Tierra maximizando el radio de acción y la potencia del pulso.

Este tipo de pulso electromagnético es conocido como NEMP (Nuclear Electromagnetic Pulse), y si ocurre a grandes altitudes es conocido como HEMP (High-altitude Electromagnetic Pulse)

1.4 Determinando las características generales de un pulso electromagnético

Como se ha mencionado antes, a mediados del siglo pasado ya se tenían ideas claras sobre los mecanismos de producción de un pulso electromagnético cuya fuente de origen eran las detonaciones nucleares, no obstante, también se llegó a pensar que otras fuentes de origen generaban los mismos efectos de un pulso a menor escala. Por lo tanto, se tenían que establecer relaciones entre estas nuevas fuentes (otros fenómenos) con la detonación nuclear para que se pudiera determinar características generales de un pulso.

Sin embargo, en la actualidad son muy pocas las investigaciones que determinan dichas características para definir un pulso electromagnético, ya que, algunos autores establecen tales características dependiendo de la fuente de origen.

Para Nelson un pulso electromagnético consiste en un intenso campo eléctrico y magnético transitorio⁵ (Nelson, 1971), de modo que esta variación del campo electromagnético puede producir una corriente eléctrica (Longmire, 1986), o generar ondas electromagnéticas en un intervalo de frecuencia determinado a lo que se denomina comúnmente como la radiación

⁴ Traducción libre del inglés Conrad Longmire, Justification and Verification of High-Altitude EMP Theory, Part 1. Livermore, California, EEUU, Lawrence Livermore National Laboratory, 1986, pp. 5 – 6.

⁵ Traducción libre del inglés David Nelson Effects of Nuclear EMP on AM Radio Broadcast Stations in the Emergency Broadcast System. Oak Ridge National Laboratory, 1971, p. 1.

electromagnética. En otras palabras, esta variación intensa del campo electromagnético libera energía electromagnética al entorno en diferentes formas como **radiación electromagnética**.

Además, la duración de la variación intensa del campo electromagnético inicial también llamada como “risetime” (tiempo de subida) oscila entre tiempos inferiores a cien picosegundos hasta dos milisegundos (<100 ps – 2 ms). Pero la duración del todo el pulso electromagnético oscila entre tiempos mayores a un nanosegundo a tiempo mayores a cincuenta milisegundos (>1 ns – >>50 ms). (Shurenkov & Pershenkov, 2016).

Dado que esta emisión de energía ocurre en tiempos muy pequeños se suele mencionarla como un relativo corto **estallido de energía electromagnética**

La variación intensa del campo electromagnético puede causar un mal funcionamiento o daños de aparatos eléctricos y electrónicos (Nelson, 1971), dicho de otra manera, un pulso electromagnético puede ocasionar en estos aparatos **perturbaciones en sus funciones operativas**. Las diferentes formas en que este campo electromagnético libera energía al entorno, como la radiación electromagnética, penetra a través de la superficie exterior del equipo, propagándose en su interior o a lo largo de cables, y finalmente aparecen como corrientes eléctricas y voltajes en los componentes sensibles de los subsistemas electrónicos⁶ (Lee, 1980).

Esta perturbación actúa con más fuerza a distancias cercanas a la fuente de origen y decrece con la distancia. En consecuencia, estas perturbaciones dependen de la fuente de origen, como se mostrará más adelante.

Cabe señalar que otro de los efectos que se pueden lograr durante un pulso electromagnético es la ionización del aire, por lo que, no permite que las ondas electromagnéticas en un rango de frecuencias se puedan propagar.

Se concluye entonces, que un pulso electromagnético es un fenómeno donde se libera energía electromagnética al entorno en forma de un campo electromagnético, una radiación electromagnética o una corriente eléctrica durante un corto periodo de tiempo. Por esta razón, un pulso tiene la capacidad mediante diferentes mecanismos de interferir o perturbar con la funcionalidad normal de los aparatos eléctricos y electrónicos que se encuentren en el radio de acción.

⁶ Traducción libre del inglés K. Lee, EMP Interaction: Principles, Techniques and Reference Data (A Complete concatenation of Technology from the EMP Interaction Notes). EMP Interaction 2-1, No. DC-EH-1289, DIKEWOOD, Albuquerque (New Mexico), 1980, p. 1.

1.5 La clasificación de los pulsos electromagnéticos

Debido a la variedad de las fuentes de origen de un pulso electromagnético, se puede considerar que la cantidad de energía electromagnética liberada por cada fuente es distinta. Por eso, una manera sencilla para clasificar un pulso es mediante la cantidad de energía eléctrica (diferencia de potencial eléctrico) medida en voltios que se genera en la fuente de origen durante las fracciones de segundo iniciales, a esto se le denominara **intensidad de voltaje**.

En este documento se clasifica el pulso electromagnético conforme a la intensidad de la energía emitida, en:

1.5.1 Baja Intensidad.

En este grupo la potencia del estallido del pulso puede estar entre mil Voltios hasta cien mil Voltios (1 kV – 100 kV), por ello su radio de acción tiende a ser muy pequeño abarcando distancias que van desde un centímetro hasta a unos diez metros (0.01 m – 10 m). Este tipo de pulso generalmente perturba la funcionalidad normal de los aparatos eléctricos y electrónicos de manera temporal, pero si estos aparatos son muy sensibles o no presentan ninguna protección ante esta perturbación puede ocasionar daños irreversibles. A este grupo pertenecen las siguientes fuentes de origen: motores, líneas eléctricas, e impactos de meteoritos.

1.5.2 Mediana intensidad.

En este grupo la potencia del estallido del pulso puede ser superior a cien millones de Voltios (>100 MV), por ello su radio de acción tiende a abarcar distancias que van desde un metro hasta a unos 100 metros (1 m – 100 m). Este tipo de pulso produce con más frecuencia daños irreversibles a los aparatos eléctricos y electrónicos que no presentan ninguna protección ante la gran variación de energía electromagnética que se genera en este caso. A este grupo pertenecen los rayos atmosféricos.

1.5.3 Alta intensidad.

En este grupo la potencia del estallido del pulso puede ser superior a mil de millones de Voltios (>1 GV), por ello su radio de acción tiende abarcar enormes distancias que van desde mil kilómetros hasta dos mil kilómetros (1000 Km – 2000 Km). Este tipo de pulso produce daños irreversibles a los aparatos eléctricos y electrónicos. Además, que este tipo de

pulso puede ionizar el aire. A este grupo pertenecen las siguientes fuentes de origen: las detonaciones nucleares y las tormentas geomagnéticas.

1.6 Sobre la radiación electromagnética de un pulso electromagnético

A la radiación electromagnética emitida por un pulso electromagnético se le otorga características propias ondulatorias (longitud de onda, frecuencia, amplitud e intensidad), las cuales varían según su fuente de origen. Estas características ondulatorias son mencionadas por los autores Vladimir Shurenkok y Vyasheslav Pershenkov en el documento *Electromagnetic pulse effects and damage mechanism on the semiconductor electronics (Efectos de un pulso electromagnético y mecanismo de daños sobre los semiconductores electrónicos)* (2016) de la siguiente manera:

Está bien establecido ahora que un pulso electromagnético suficientemente intenso en el **rango de frecuencia de 200 MHz a 5 GHz** puede causar malestar o daño en los sistemas electrónicos. La razón para elegir este rango de frecuencias es que es ampliamente utilizado en radares, transmisiones de televisión, comunicaciones móviles, fuentes de microondas de alta potencia (HPM), etc. Este efecto inducido en un sistema electrónico se conoce comúnmente como irradiación electromagnética intencional o no intencional (EMI por sus siglas en inglés). Tal EMI podría ser irradiada o conducida.

Un pulso electromagnético, también llamado a veces una perturbación electromagnética transitoria, es una ráfaga corta de energía electromagnética. La **forma de onda del pulso electromagnético describe cómo su amplitud instantánea** (de intensidad de campo o corriente) cambia con el tiempo. Los pulsos reales tienden a ser bastante complicados, por lo que los modelos simplificados se usan a menudo en estudios teóricos y experimentales. Por lo general, dichos modelos abordan un pulso rectangular o "cuadrado"

Una forma de **clasificar el EMI** se basa en el contenido de **frecuencia de sus densidades espectrales como "banda estrecha" y "banda ancha"**. El espectro de frecuencia y la forma de onda del pulso están interrelacionados a través de la transformada de Fourier. Un pulso electromagnético típicamente contiene energía a muchas **frecuencias**

desde DC (cero Hz) hasta cierto límite superior dependiendo de la fuente. La brevedad del pulso significa que siempre se extenderá en un rango de frecuencias.

Los tipos de pulso electromagnético se dividen ampliamente en naturales, hechos por el hombre y armas. Hoy en día, es posible generar pulsos transitorios de banda ancha (WB) con gran amplitud y tiempos de subida muy cortos. Como campo electromagnético irradiado, estos pulsos tienen un efecto en la función de la electrónica moderna. La interferencia de microondas a menudo se considera que tiene un ancho de pulso que varía de varios a varios cientos de nanosegundos. (Shurenkov & Pershenkov, 2016)⁷

Además, esta radiación electromagnética es capaz de interactuar con dispositivos o aparatos sensibles a la recepción de las ondas electromagnéticas ubicados a distancias más alejadas del radio de acción de un pulso. Sin embargo, dicha radiación se distribuye en un amplio rango de frecuencias de manera aleatoria y tiene una corta duración, que por lo general es llamada **onda transitoria**.

1.7 Relación entre la descarga electrostática y el pulso electromagnético

Para establecer una relación entre las descargas electrostáticas con un pulso electromagnético, lo primero que hay que realizar es una descripción de este fenómeno, como se muestra a continuación:

Una descarga electrostática es un fenómeno que es producido de forma natural o artificial y solamente sucede cuando hay una diferencia de cargas eléctricas entre dos objetos separados a una distancia en la cual se encuentra comúnmente el aire. Estos objetos, por lo general llamados **electrodos**, presentan una diferencia de cargas eléctricas, es decir, en uno de ellos presenta más cargas eléctricas que el otro.

No obstante, es importante mencionar que las cargas eléctricas pueden ser denominadas negativas o positivas. En consecuencia, se puede entender que uno de los electrodos se encuentra más cargado eléctricamente positivo que el otro, o, uno de los electrodos se encuentra más cargado

⁷ Traducción libre del inglés Shurenkov & Pershenkov. Electromagnetic pulse effects and damage mechanism on the semiconductor electronic. Electronics and Energics, 2016, p. 622.

eléctricamente negativo que el otro -para este caso utilizaré esta última para referirme a la diferencia de cargas.

Cuando esta diferencia de cargas eléctricas es lo suficientemente grande para abrirse paso a través del aire desde uno de los electrodos al otro, se observa -en algunos casos- que un destello en forma de un hilo delgado une estos dos objetos **durante un breve periodo de tiempo**. Ese destello se puede definir como un flujo de cargas eléctricas negativas que circulan desde el electrodo más cargado eléctricamente negativo hasta el otro electrodo, a esto comúnmente se conoce como **descarga electrostática**.

Estas descargas pueden ser causadas de forma natural (rayos atmosféricos), o de forma artificial: intencional (generador Van de Graaff) o no intencional. Cada una de estas descargas produce una cantidad de energía eléctrica que oscila entre mil voltios hasta cien millones de voltios (<1kV – >100 MV). La descarga opera en las cercanías de los electrodos, solo ocurre entre los electrodos o cuando dos objetos se encuentran cercanos a éstos, las cargas eléctricas viajan solo en esa dirección.

Sin embargo, las experiencias de Heinrich Hertz entre los años de 1886 y 1888 mostraron que la descarga opera también a distancia. Durante estas experiencias Hertz demostró la existencia de las ondas electromagnéticas, las cuales habían sido predichas años antes por James Clerk Maxwell a partir de las formulaciones matemáticas de las teorías del electromagnetismo.

Para llevar a cabo esto, Hertz construyó un montaje que consistía en un circuito primario y un circuito secundario, en el que observó que se producían destellos entre los dos electrodos del circuito secundario ubicado a una considerable distancia del circuito primario donde se producía una serie de descargas electrostáticas. Esto le permitió a Hertz comprobar la existencia las ondas electromagnéticas, ya que, estas son las responsables de que el circuito secundario entrara en resonancia con el circuito primario.

Lo que quiere decir que **una descarga electrostática emitió ondas electromagnéticas** que pudieron ser detectadas por un dispositivo sensible a estas ondas. Paralelamente Hertz estimó que la frecuencia de dichas ondas que era de alrededor de **30 MHz**.

Por todo lo anterior, se puede decir que una descarga electrostática libera energía electromagnética al entorno en forma de radiación electromagnética (ondas electromagnéticas) en un corto periodo de tiempo, lo cual son características de un pulso electromagnético de modo que una descarga en una fuente que genera un pulso.

Como una descarga electrostática puede producir diferentes cantidades de energía eléctrica (desde <1 kV hasta >100 MV) de forma natural como artificial, considero por lo tanto que es una fuente de origen de un pulso electromagnético de baja o mediana intensidad. De manera que, el radio de acción de este pulso en el que ocasiona perturbaciones a aparatos eléctricos y electrónicos que se encuentren en el rango de un centímetro y hasta a unos 100 metros (0.01m – 100 m).

En resumen, las características generales de un pulso electromagnético se determinaron a partir de los estudios que se han hecho sobre este fenómeno. La primera de estas características es la liberación de energía electromagnética originada por la variación intensa del campo electromagnético que se manifiesta como corrientes eléctricas o radiación electromagnética; además esta energía permite una posible clasificación de este fenómeno. La segunda característica es la duración de este fenómeno puesto los tiempos para la realización de este suceso son fracciones de segundo.

De modo que se piensa que cualquier evento que cumpla con estas características se considera como un pulso electromagnético, como es el caso de la descarga electrostática.

Capítulo 2. Hacia la detección de un pulso electromagnético

En este capítulo se establecerá el intervalo de frecuencias y el radio de acción de un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática. En consecuencia, se mencionan las experiencias sobre la generación y detección de un pulso que han sido elaboradas para el estudio de este fenómeno, ya que, estas experiencias brindaron ideas para el diseño del montaje experimental que se realizó. Después se hace una descripción de los laboratorios, mecanismos de producción de la descarga y dispositivos de detección que se usaron durante las experiencias. Finalmente se describen las experiencias que se realizaron, además de presentar los resultados y elaborar ideas mediante el análisis de estos últimos.

2.1 Antecedentes para el estudio de un pulso

Como ya lo he mencionado, un pulso electromagnético puede ser generado por una descarga electrostática de forma natural o artificial, en la cual se emite radiación electromagnética. Ahora bien, si en una descarga se genera radiación electromagnética, entonces, esta debe poseer un intervalo de frecuencias determinado. Sin embargo, las investigaciones en torno a este intervalo de frecuencias son escasas o ambiguas. Por lo que, son muy pocos los estudios sobre esta radiación que permitirían caracterizar las descargas electrostáticas, y, por ende, a un pulso electromagnético generado por este.

Uno de estos estudios fue realizado por el Doctor en Ingeniería colombiano Luis Fernando Díaz Cadavid en el documento *Caracterización espectral de un pulso electromagnético radiado por un rayo atmosférico (LEMP) mediante un detector-receptor de Radio Frecuencia tipo SDR (Software-Defined Radio)* (2014). En esta investigación Cadavid determinó algunas propiedades ondulatorias de la radiación emitida por el pulso electromagnético generado por un rayo atmosférico. (Cadavid, 2014)

Para realizar esto Cadavid primero asumió que un rayo atmosférico es un emisor de radiofrecuencia⁸, la cual emite una señal que puede ser detectada por un dispositivo “sensible” (antena de recepción). A esta señal Cadavid le elaboró una modelación matemática.

⁸ Cadavid menciona que la radiofrecuencia es una porción del espectro electromagnético entre 30 kHz y 1 GHz.

Debido a que un rayo atmosférico es un evento esporádico, Cadavid primero diseñó y construyó dos dispositivos que simulan un pulso generado por un rayo atmosférico: (*Generador LEMP simulado (circuito RC) [GLEMP01]* y *Generador LEMP simulado (circuito RL) [GLEMP02]*). Posteriormente, con la modelación matemática que elaboró, diseñó y construyó un dispositivo que pueda detectar y registrar digitalmente la radiación emitida por un LEMP (*Detector-receptor de radio frecuencia tipo SDR [LEMPSA]*). Finalmente, puso en funcionamiento estos dispositivos para medir y analizar la señal emitida por un LEMP.

Después de haber realizado esto Cadavid determinó las siguientes propiedades de la radiación emitida por el pulso electromagnético generado por un rayo atmosférico: la señal emitida es aleatoria y transitoria entre un intervalo de frecuencias de mayor contenido energético de 0 Hz hasta 300 kHz, la duración de este evento es de 600 μ s.

2.2 Antecedentes para la generación de un pulso a partir de la descarga electrostática

Los mecanismos de generación de un pulso electromagnético que generalmente se utilizan para el estudio de este fenómeno, como lo realizó Cadavid, son simuladores. No obstante, existen otros mecanismos que permiten el estudio de tal fenómeno, en donde se destaca el realizado por el Teniente Coronel estadounidense John S. Leahy en el documento *Experimental testing of a Van de Graaff generator as an Electromagnetic Pulse generator (Prueba experimental de un generador Van de Graaff como un generador de Pulso Electromagnético)* (2016).



Imagen 1. Van de Graaff de los Laboratorios de Investigación de la Fuerza Aérea. Tomado de (Leahy, 2016).

GENERADOR VAN DE GRAAFF	
Ubicación	Laboratorios de Investigación de la Fuerza Aérea, Base de la Fuerza Aérea Wright-Patterson, Ohio
Altura con campana	95, 5 in (\approx 243 cm)
Diámetro de la campana	30 in (\approx 76 cm)
Diámetro de la esfera de descarga	17 in (\approx 43cm) / 30 in (\approx 76 cm)

Tabla 1. Especificaciones de Van de Graaff de los Laboratorios de Investigación de la Fuerza Aérea.

En esta investigación Leahy evaluó si un generador Van de Graaff se puede emplear para el estudio de un pulso electromagnético. Para ello analizó la variación de campo eléctrico que es ocasionada por el pulso generado por una descarga electrostática de mediana intensidad producida (por) en generador Van de Graaff en diferentes puntos alejados de la descarga.

Para medir esta variación Leahy utilizó los siguientes sensores de campo electromagnético: *D-dot Sensor (Prodyn AD-40E(R) SN 95)* y *D-dot Sensor BALUN (Prodyn BIB-105D SN 132)*. En las experiencias estos sensores se ubicaron a distancias y alturas aleatorias paralelas a la descarga, y se conectaban mediante cables apantallados o blindados a un osciloscopio que estaba lo suficientemente alejado para evitar falsas lecturas o medidas durante las experiencias.

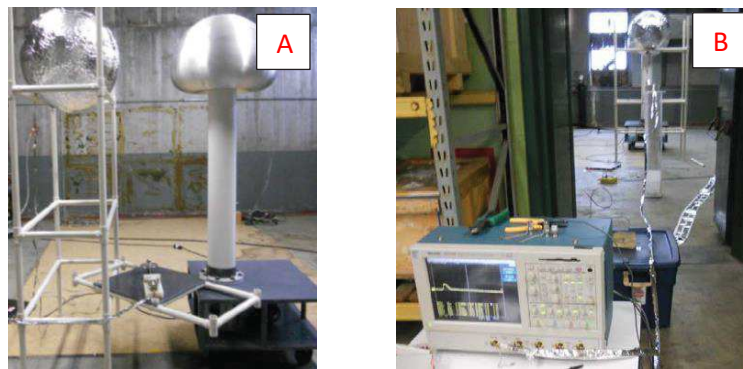


Imagen 2, 3. Ubicación de los sensores (A) y del osciloscopio (B). Tomado de (Leahy, 2016).

Tras realizar varias pruebas y analizar los datos obtenidos, Leahy concluye que un generador Van de Graaff puede ser usado como con mecanismo para el estudio de un pulso electromagnético, sin embargo, es necesario realizar ciertas modificaciones ambientales, a los equipos de medición, a las experiencias y al propio generador Van de Graaff, ya que, los datos experimentales no son consistentes con en el modelo teórico. Por ello el invita a realizar nuevas investigaciones en torno a este montaje experimental.

2.3 El diseño y el montaje experimental: Estudio de un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática

Tomando en consideración las ideas de Cadavid de que un pulso electromagnético puede ser detectado debido a la radiación que es emitida durante este fenómeno, me pregunté cuál sería el **intervalo de frecuencias de la radiación electromagnética emitida en un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática.**

En consecuencia, diseñé un montaje experimental con base en el montaje realizado por Leahy: quien utilizó un generador Van de Graaff como mecanismo para generar un pulso electromagnético, sin embargo, para la detección de este fenómeno se empleó -como lo menciona Cadavid- de un dispositivo sensible a la radiación electromagnética, en mi caso un receptor de radio, que se ubicaba en dirección paralela y a la misma altura de la descarga que se producía lo que permitió establecer un rango de frecuencias de la radiación emitida; utilicé también un aparato eléctrico o electrónico sensible a perturbase cuando interactuaba con un pulso, una calculadora electrónica; ya que uno de los efectos de un pulso es ocasionar perturbaciones operativas al aparato a cierta distancia.

Me pregunté, entonces, **cuánto es el radio de acción de un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática.**

Sumado a esto, no conforme con hacer uso del generador Van de Graaff como mecanismo para la producción de las descargas electrostáticas en el montaje, hice uso de una Máquina de Wimshurst.

Realicé este procedimiento con la finalidad de mostrar que sin importar en que mecanismo se produjera la descarga se producían los mismos efectos en los dispositivos. Esto se debe a que en ambos mecanismos se produce una cantidad similar de diferencia de potencial eléctrico o voltaje que se mantiene constante en cada descarga, entre cincuenta mil voltios y 70 mil voltios (50 kV – 70 kV) según las hojas de seguridad de cada aparato, por lo que considera que en estos mecanismos se producen descargas electrostáticas de baja intensidad.

2.3.1 Laboratorios utilizados.

Es relevante señalar los dos lugares o espacios de laboratorio donde me fue permitido construir el montaje experimental para esta investigación:

- el primero es el laboratorio de Física del colegio Roberto Velandia ubicado en el municipio de Mosquera (Cundinamarca), al cual denominare como **LAB1**.
- y el segundo son los salones del departamento de Física de la Universidad Pedagógica Nacional ubicada en Bogotá D.C., al cual denominare como **LAB2**.

Estos dos espacios están adecuados para hacer prácticas y tienen áreas aproximadas de 40 y 50 metros cuadrados.

2.3.2 Mecanismo de producción de la descarga electrostática.

Los mecanismos de producción de la descarga electrostática como se indicó anteriormente son el generador Van de Graaff y de la Máquina de Wimshurst, sin embargo, estos mecanismos en cada laboratorio contaban con especificaciones diferentes. A continuación, se detallará cada uno:

GENERADOR VAN DE GRAAFF		
<i>Ubicación</i>	LAB1	LAB2
<i>Marca</i>	EISCO Labs	PHYWE
<i>Modelo</i>	Cat No. PH0920A	
<i>Motor</i>	Driven 120 V/220V, 60 Hz	
<i>Altura con campana</i>	21 in (≈54 cm)	21 in (≈54 cm)
<i>Diámetro de la campana</i>	7 in (≈18 cm)	8 in (≈20 cm)
<i>Diámetro de la esfera de descarga</i>	4 in (≈10 cm)	3 in (≈8 cm)

Tabla 2. Especificaciones de los generadores Van de Graaff.

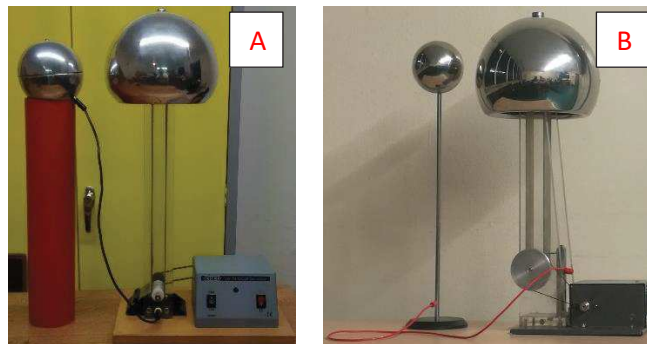


Imagen 4, 5. Generador Van de Graaff de LAB1 (A) y de LAB2 (B).



Imagen 6. Máquina de Wimshurst de LAB2.

MÁQUINA DE WIMSHURST	
<i>Ubicación</i>	LAB2
<i>Marca</i>	Didáctica Ltda
<i>Altura</i>	39 cm
<i>Diámetro de los discos</i>	30 cm
<i>Altura de las botellas de Leyden</i>	16 cm
<i>Diámetro de las botellas de Leyden</i>	3.5 cm

Tabla 3. Especificaciones de la Máquina de Wimshurst de LAB2.

2.3.3 El dispositivo de detección.

Cadavid señala que la radiación emitida por un pulso electromagnético generado por un rayo atmosférico ya había sido detectada por varios investigadores, y se encontraba entre **los intervalos de frecuencia de 20 KHz a 420 MHz** (ULF – UHF)⁹. Por lo que considere que un dispositivo sensible a la radiación electromagnética en el intervalo de frecuencias entre 300 KHz hasta 300 MHz puede ser utilizado en el montaje experimental.

2.3.3.1 Rango de frecuencias

Estas frecuencias se pueden clasificar de la siguiente forma:

- **Frecuencia media (MF, Medium Frequency) [300 KHz – 3000 KHz].**

También denominada Onda Media (OM), en este intervalo su principal uso es para el servicio de radiodifusión sonora terrestre en Amplitud Modulada (AM) [530 KHz – 3000 KHz].

- **Frecuencia alta (HF, High Frequency) [3 MHz – 30 MHz].**

También denominada Onda Corta o ShortWave (SW), en este intervalo se usa para los servicios de la radiodifusión y las comunicaciones gubernamentales, militares, radio-afición, y banda civil.

- **Frecuencia muy alta (VHF, Very High Frequency) [30 MHz – 300 MHz].**

Este intervalo es muy popular para su uso en varios servicios como radio móvil, comunicaciones marinas y aeronáuticas, y la radiodifusión sonora terrestre en Frecuencia Modulada (FM) [88 MHz – 108 MHz].

Así que un dispositivo que se ajustara a estas especificaciones, me permitía utilizarlo como un aparato de detección. Afortunadamente en el mercado hay una muy buena disposición y selección de estos dispositivos conocidos como **receptores de radio**, que permiten recibir ondas electromagnéticas en un rango de frecuencias AM, SW, y FM.

El receptor de radio que he utilizado se especifica en la siguiente tabla:

⁹ Véase en Luis Cadavid, *Caracterización espectral del pulso electromagnético radiado por el rayo atmosférico (LEMP) mediante un Detector-Receptor de RF tipo SDR (Software-Defined Radio)*, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas (Colombia), 2014, p. 47.

Receptor de radio	
Marca	CMiK
Modelo	MK-607B
Rango de frecuencias	AM [530 - 1600] kHz / SW [3 - 23] MHz / FM [88 - 108] MHz
Fuente de poder	DC 3V

Tabla 4. Especificaciones del receptor de radio.

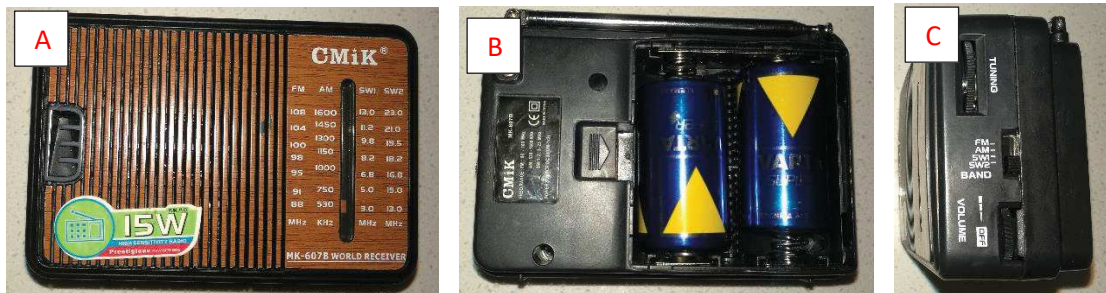


Imagen 7, 8, 9. Vista frontal (A), posterior frontal (B) y lateral derecho (C) del receptor de radio.

2.3.3.2 Funcionamiento del receptor de radio.

Básicamente un receptor debe recibir las ondas electromagnéticas de radio, convertirlas en corriente eléctrica y luego separar la información de otras componentes (portadora, ruido, otras emisiones, etc.). Se examinará a continuación las diferentes funciones que deben existir en un receptor de radio. Ante todo, debe haber una antena. Las antenas tienen muchos tipos de formas y tamaños dependiendo de la frecuencia a que se debe operar y de otros parámetros.

Dado que generalmente la antena recibe un gran número de emisiones es necesario seleccionar la frecuencia deseada. Esto se hace con el amplificador de radiofrecuencia (filtro paso banda sintonizable). La señal recibida suele ser de bajo nivel de potencia y debe ser amplificada antes de que llegue al demodulador, este es el motivo por el que el circuito sintonizado tiene cierta amplificación en la banda de paso. El amplificador sintonizable de radiofrecuencia puede ser realizado con varias etapas conectadas en cascada.

La información puede ahora ser detectada o en otras palabras puede ser demodulada. El tipo de demodulador dependerá de la técnica de modulación empleada. La señal resultante debe parecerse lo más posible a la moduladora del transmisor. La señal demodulada se amplifica con un amplificador de audio (si la señal es de fonía) hasta alcanzar un nivel de potencia suficiente para excitar a un altavoz. Esta descripción básica es válida no solo para receptores de AM sino

para todos los tipos de receptores de radio que usen otro tipo de modulación. (Receptores de radio, 2008)

2.4 La humedad relativa: condición ambiental para la generación de descargas electrostáticas

Cuando se trabaja con descargas electrostáticas se debe tener en cuenta la disipación o pérdida de cargas eléctricas, la cual depende de dos factores: la conductividad eléctrica de los materiales y la humedad relativa. Para este caso, no se considera como factor de disipación la conductividad eléctrica de los materiales, ya que, los electrodos de los aparatos están compuestos de los mismos materiales. Así que, el factor que se considera importante para las experiencias es la humedad relativa. A continuación, se presenta una breve descripción de este factor:

La humedad relativa se refiere a la cantidad de vapor de agua que hay en el ambiente en relación con la cantidad de vapor de agua que podría contener como máximo ese aire a una determinada temperatura. Por lo que normalmente se expresa en %. Cuando el aire no puede absorber más vapor de agua, este se condensa y se convierte en líquido.

Es importante entender esto anterior porque mucha gente interpreta la humedad relativa como la cantidad de agua o vapor de agua que está presente en el aire, si eso fuera así, cuando la humedad relativa estuviera cerca al 100%, querría decir que ese aire sólo es agua. En cambio, cuando la humedad relativa está en torno al 100% es cuando suele haber niebla. (Salom, 2017)

Teniendo claro que es la humedad relativa, hay que establecer su relación con las descargas electrostáticas, de la siguiente forma:

Cuando el aire tiene una humedad relativa elevada, las moléculas de agua se depositan en la superficie de los materiales y aumenta su conductividad eléctrica global, incluida su puesta a tierra, facilitando así la disipación de las cargas acumuladas. (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2015)

Es decir que, si la humedad relativa del aire es muy alta, la probabilidad de generar una descarga electrostática disminuye. Por ello, se suele recomendar que para un buen funcionamiento de los aparatos que generan descargas se realice en lugares donde la humedad relativa este entre 30% y 45%.

No obstante, los lugares donde se realizaron las experiencias presentaban una **humedad relativa entre 60% y 70%**, que es la humedad promedio de la sabana de Bogotá, por lo que inicialmente antes de iniciar con una experiencia se limpiaba con un papel o un paño seco la película de humedad que cubría los electrodos de los aparatos.

Asimismo, decidí utilizar distancias más cortas entre los electrodos cuando la humedad relativa era alta, ya que, entre menor era esa distancia más fácil era generar la descarga. Esto conlleva a que la acumulación de cargas en los electrodos disminuya, de modo que la descarga presente menos intensidad.

2.5 Radiación emitida durante un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática

2.5.1 La primera detección del pulso emitido por la descarga.

La primera experiencia se realizó en LAB1 en donde instale el generador Van De Graaff sobre una mesa de madera que se encontraba ubicada cerca de una de las paredes de este laboratorio. La esfera de descarga se colocó a una altura de 44 cm y a una distancia de la campana.

Para cada caso se revisó la humedad relativa con ayuda de un higrómetro antes de determinar a qué distancia se colocaría la esfera de descarga, ya que, como se mencionó previamente las condiciones del ambiente pueden alterar la intensidad de cada descarga, y en algunos casos no permite que suceda. En esta primera experiencia la humedad relativa se encontraba en %64, por lo que, la esfera se colocó a una distancia de 4 cm.

Seguidamente se ubicó el receptor de radio a la misma altura de la esfera y a una distancia de 30 cm en dirección paralela a la descarga. El montaje final se muestra en la siguiente imagen:



Imagen 10. Montaje experimental para la primera detección.

La razón de esta distancia se debe a que en pruebas previas en donde el receptor de radio se ubicaba en las proximidades de la campana o la esfera de descarga, se presentaron dos dificultades: la primera de estas fue que el receptor de radio no funcionaba de forma óptima. ya que, presentaba fuertes ruidos y chasquidos en cualquiera de las frecuencias sintonizadas antes de que se genera la descarga. Esto se debió a que, los elementos que componen el generador Van De Graaff generaban un campo eléctrico a su alrededor que interactuaba con la antena del receptor antes de que se produjera la descarga. La segunda dificultad que se presentó fue que en esta misma disposición la descarga no se hacía entre los electrodos y prefería dirigirse al receptor de radio. Por lo que, estas dificultades ocasionaban complicaciones para detección de la radiación emitida por la descarga.

Realizados estos preparativos, se puso en funcionamiento el generador Van De Graaff, se encendió el receptor de radio y se sintonizó en la frecuencia más baja que podía el dispositivo (530 kHz). De esta manera, si se escuchaba por el altavoz **cualquier distorsión¹⁰ en forma de chasquido o un ruido fuerte y grave diferente a la estática de radio¹¹** cuando la descarga ocurriera **significaba que la radiación electromagnética en ese valor de frecuencia fue detectada con el receptor de radio.** Si ocurría lo anterior se cambiada a una frecuencia más alta hasta que se pudiera escuchar solo la estática de radio, es decir, que no presentara ninguna distorsión. Los resultados son presentados en las siguientes tablas:

¹⁰ **Distorsión:** Deformación de imágenes, sonidos, señales, etc., producida en su transmisión o reproducción (2ª, definición de la Real Academia de la Lengua Española – vigésima tercera edición).

¹¹ Un ruido estridente que llena los espacios entre frecuencias que no pertenecen a emisoras de radio.

<i>Frecuencia</i> (KHz)	AM						
	530	750	1000	1150	1300	1450	1600
<i>Distorsión</i>	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla 5. Distorsión detectada en el rango de frecuencias AM.

<i>Frecuencia</i> (MHz)	SW												
	3.0	5.0	6.8	8.2	9.8	11.2	13.0	15.0	16.8	18.2	19.5	21.0	23.0
<i>Distorsión</i>	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla 6. Distorsión detectada en el rango de frecuencias SW.

<i>Frecuencia</i> (MHz)	FM						
	88	91	95	98	100	104	108
<i>Distorsión</i>	No	No	No	No	No	No	No

Tabla 7. Distorsión detectada en el rango de frecuencias FM.

Para mi asombro los resultados en las tablas 5, 6 y 7 muestran que la distorsión detectada por el receptor se encontraba en el intervalo de 530 KHz hasta 23 MHz y no alcanza frecuencias muy altas como 88 MHz, es decir, que **la radiación emitida por las descargas para este caso se localizaba en las frecuencias onda media y corta entre los intervalos:**

- Entre 530 KHz y 1600 KHz
- Entre 3 MHz y 23 MHz

Esto lleva a pensar que la razón por la que en un mismo punto se pueden detectar varias ondas electromagnéticas con diferente valor de frecuencia, se debe a que **la radiación que es emitida por una descarga electrostática es una combinación de ondas electromagnéticas con valores aleatorios de un intervalo de frecuencia**, que en este caso se encontrarían entre 530 kHz hasta 23 MHz. Esta característica, por tanto, también se le debe atribuir a un pulso electromagnético que genere esta descarga.

2.5.2 Alcance de la radiación emitida.

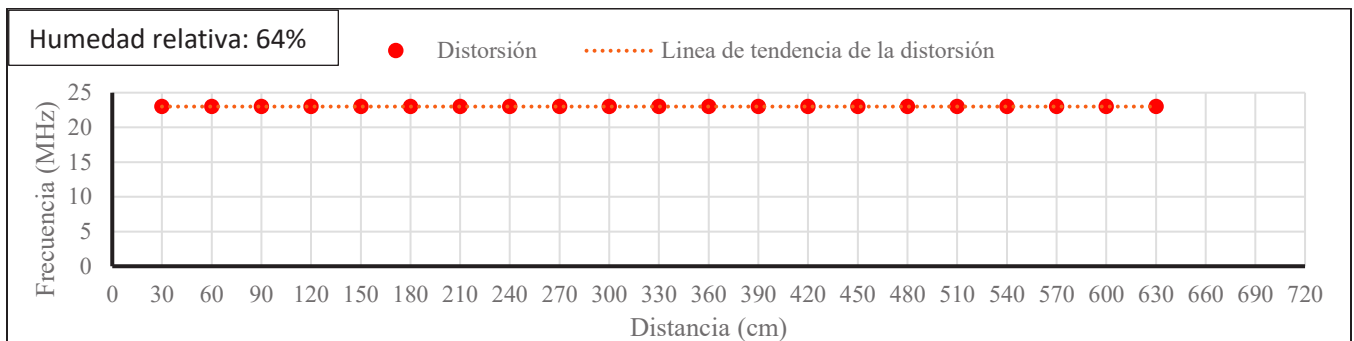
A partir de lo anterior, el siguiente paso era determinar cuánto es el alcance de esta radiación, ya que, cuando una onda electromagnética se propaga a través del aire, este medio hace que pierda o disipe la energía que porta a medida que avanza. En consecuencia, la radiación no

podría viajar muy lejos desde su fuente de emisión (descarga electrostática), de modo que, algunas frecuencias no pudieran ser detectadas por el receptor de radio a cierta distancia, se decide utilizar entonces dos valores de frecuencias:

- De 23 MHz
- De 3 MHz

Esta experiencia se volvió a realizar en LAB1, la distancia entre la esfera de descarga y la campana fue de 4 cm igual al montaje anterior, ya que, la humedad relativa no se modificó significativamente. El receptor de radio se ubicó a la misma altura y a una distancia inicial de 30 cm en dirección paralela a la descarga.

Una vez más realizados estos preparativos, se puso en funcionamiento el generador Van De Graaff, se encendió el receptor de radio y se sintonizó en la frecuencia más alta que se detectó la distorsión en el anterior experimento (23 MHz). Al igual que en la experiencia previa la manera de detectar la radiación emitida era escuchar por el altavoz cualquier distorsión que se produjera en la estática de radio durante la descarga, con la diferencia de que el receptor de radio se fue alejando 30 cm de la descarga si se detectaba la distorsión, hasta una distancia en la que se pudiera escuchar solo la estática de radio, es decir, que no presentara ninguna distorsión. Los resultados son presentados en la siguiente gráfica:



Gráfica 1. Distancia de detectabilidad de la distorsión producida por la radiación de 23 MHz emitida por la descarga electrostática del Generador Van de Graff de LAB1.

Los resultados en la gráfica 1 muestran que la distorsión detectada en la frecuencia de 23 MHz por el receptor llegaba hasta los 630 cm, es decir, que **radiación emitida por las descargas en una frecuencia de 23 MHz alcanzó una distancia máxima de 630 cm.**

2.5.3 La detección y alcance de la radiación emitida por los otros aparatos.

En estas experiencias se realizaron en LAB2, y se operó de manera similar a las experiencias anteriores. Así pues, en la primera de estas experiencias se instaló el generador Van De Graaff sobre una mesa de madera que se encontraba ubicada cerca de una de las paredes de este laboratorio, y la esfera de descarga se colocó a una altura de 44 cm y una distancia de 3,5 de la campana, debido a la humedad relativa que se encontraba en 69%. El receptor de radio se ubicó a la misma altura de la esfera y a una distancia de 30 cm en dirección paralela a la descarga. Esta disposición se muestra en la siguiente imagen:

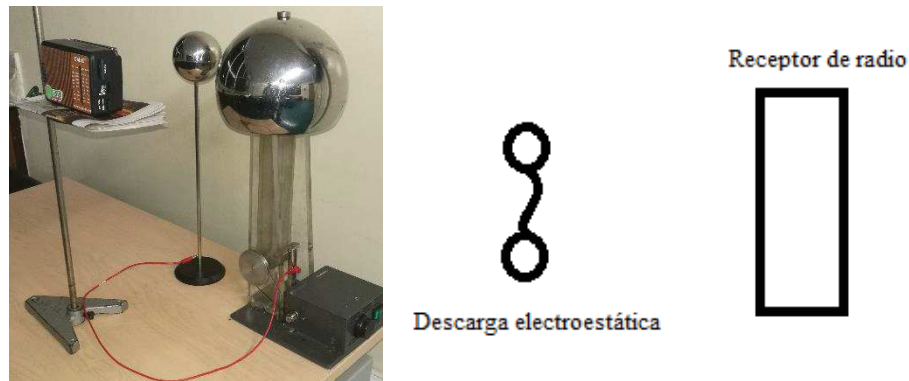


Imagen 11. Montaje experimental para la detección con el Van de Graaff de LAB2.

Una de las dificultades de trabajar en este laboratorio, era que se presentaban distorsiones en todo el intervalo de frecuencias AM (530 KHz a 1600 KHz). Ya que, cuando el receptor de radio se sintonizaba en cualquiera de estas frecuencias y se ubicaba en las regiones blancas del laboratorio representadas en la Ilustración 1, la distorsión era bastante fuerte que incluso no permitía que se escucharan las emisoras de radiodifusión que trabajan en este intervalo.



Ilustración 1. Representación de la distorsión en LAB2 en el intervalo de frecuencias AM.

En consecuencia, he decidido no utilizar este intervalo de frecuencias en esta experiencia, ya que, no sabría con certeza si la distorsión detectada por el receptor es ocasionada por descarga de modo que estos resultados no pudieran ser comparados con los que inicialmente se obtuvieron.

Se realizaron los mismos procedimientos hechos anteriormente para *la detección de la radiación*. Los resultados son presentados en las siguientes tablas:

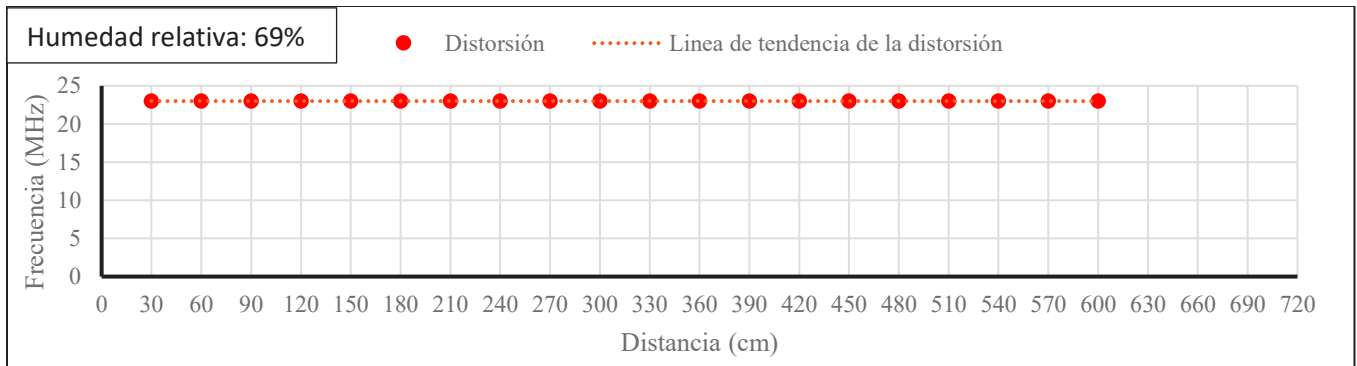
<i>Frecuencia</i> (MHz)	SW												
	3.0	5.0	6.8	8.2	9.8	11.2	13.0	15.0	16.8	18.2	19.5	21.0	23.0
<i>Distorsión</i>	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla 8. Distorsión detectada en el rango de frecuencias SW.

<i>Frecuencia</i> (MHz)	FM						
	88	91	95	98	100	104	108
<i>Distorsión</i>	No	No	No	No	No	No	No

Tabla 9. Distorsión detectada en el rango de frecuencias FM.

Con estos resultados, se toma para la experiencia del *alcance de radiación* la frecuencia más alta detectada que fue de 23 MHz, y se realizaron los mismos procedimientos. En la siguiente gráfica se muestran los resultados:



Gráfica 2. Distancia de detectabilidad de la distorsión producida por la radiación de 23 MHz emitidas por la descarga electrostática del Generador Van de Graff de LAB2.

Los resultados de estas tablas 8 y 9, y gráfica 2 muestran que la distorsión detectada por el receptor se encontraba en el intervalo de 530 KHz hasta 23 MHz, y no alcanzaba frecuencias muy altas como 88 MHz, y la distorsión detectada en la frecuencia de 23 MHz por el receptor llegaba hasta los 600 cm. Por lo que, estos resultados **revelan que la radiación emitida por el generador Van De Graaff de LAB2 se comporta de forma similar al Van De Graaff de LAB1.**

Para la última parte de estas experiencias, se reemplazó el generador Van De Graaff por la Máquina de Wimshurst en el montaje. Los electrodos se separan a una distancia de 3,5 cm, ya que, la humedad relativa estaba en 62%. El receptor de radio se ubicó a la misma altura de los electrodos, la cual es de 37,5 cm y a una distancia de 30 cm en dirección paralela a la descarga. Esta disposición se muestra en la siguiente:

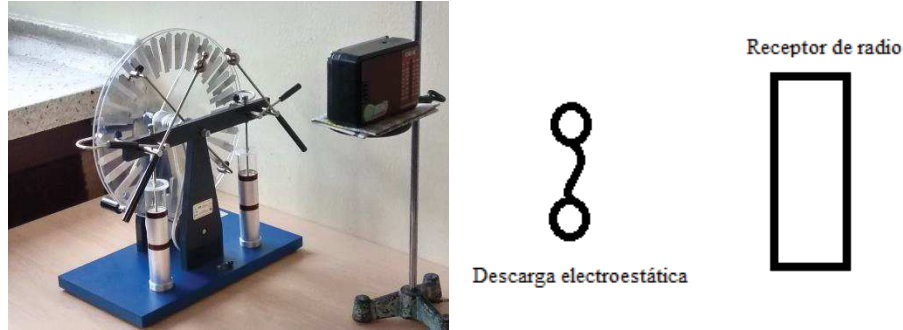


Imagen 12. Montaje experimental para la detección con la Máquina de Wimshurst de LAB2.

Se realizaron los mismos procedimientos hechos anteriormente para la detección de la radiación. Los resultados son presentados en las siguientes tablas:

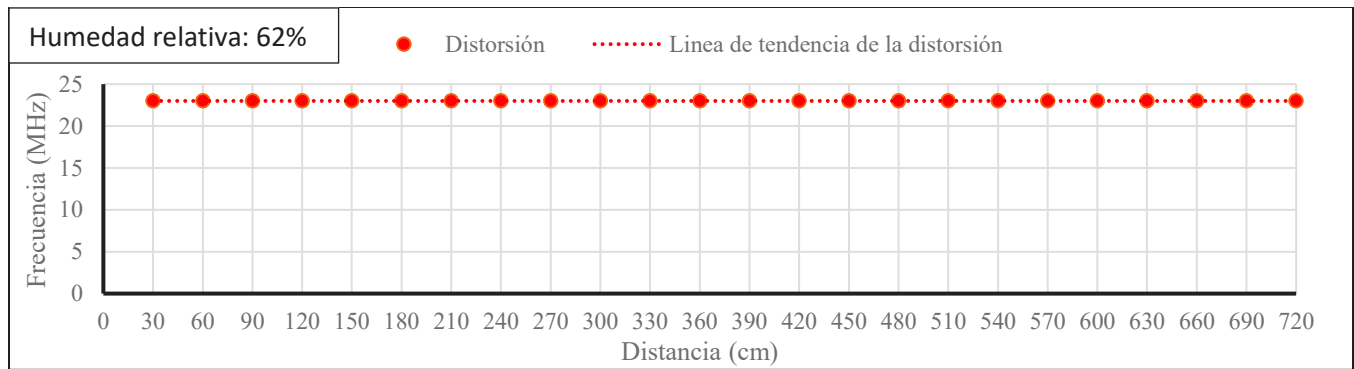
Frecuencia (MHz)	SW												
	3.0	5.0	6.8	8.2	9.8	11.2	13.0	15.0	16.8	18.2	19.5	21.0	23.0
Distorsión	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla 10. Distorsión detectada en el rango de frecuencias SW.

Frecuencia (MHz)	FM						
	88	91	95	98	100	104	108
Distorsión	No	No	No	No	No	No	No

Tabla 11. Distorsión detectada en el rango de frecuencias FM.

Con estos resultados, se toma para la experiencia del alcance de radiación la frecuencia más alta detectada que fue de 23 MHz, y se realizaron los mismos procedimientos. En la siguiente gráfica se muestran los resultados:



Gráfica 3. Distancia de detectabilidad de la distorsión producida por la radiación de 23 MHz emitidas por la descarga electrostática de la Máquina de Wimshurst de LAB2

Los resultados de estas tablas 10 y 11, y la gráfica 3 muestran que la distorsión detectada por el receptor se encontraba en el intervalo de 3 MHz hasta 23 MHz y no alcanza frecuencias muy altas como 88 MHz, y la distorsión detectada en la frecuencia de 23 MHz por el receptor llegaba hasta los 720 cm. Entonces se puede deducir que **el intervalo de frecuencias en la que es emitida la radiación en una descarga es similar en el generador Van De Graaff y la Máquina de Wimshurst.**

No obstante, la distorsión fue detectada a más distancia a 720 cm de la máquina de Wimshurst, que cuando se utilizó el generador Van De Graaff. La única explicación que puedo ofrecer ante este último suceso es que, aunque la distancia entre los electrodos (campana y esfera de descarga) en el generador Van De Graaff y la Máquina de Wimshurst es semejante y los demás parámetros se mantuvieron constantes en estas experiencias, la intensidad de la descarga en cada uno de estos mecanismos de producción es diferente, ya que, en cada uno de ellos se generan con regularidad diferentes cantidades de voltaje en cada descarga, por lo que se puede llegar a pensar que éste es el factor responsable de los alcances de la radiación emitida,.

De manera que **la cantidad de energía que transporta las ondas electromagnéticas dependen estrechamente de la cantidad de energía eléctrica que es producida por cada descarga electrostática.** De esta forma se explicaría por qué una onda electromagnética de 23 MHz producida por la descarga en la Máquina de Wimshurst pudo ser detectada a mayor distancia que una producida por un Generador Van de Graaff, ya que, en el primer mecanismo se producen voltajes más grandes que en el segundo y, por ende, la onda electromagnética porta más energía que le permite recorrer más distancia hasta que se disipe dicha energía en el aire.

Esta característica también se debe otorgar a un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática.

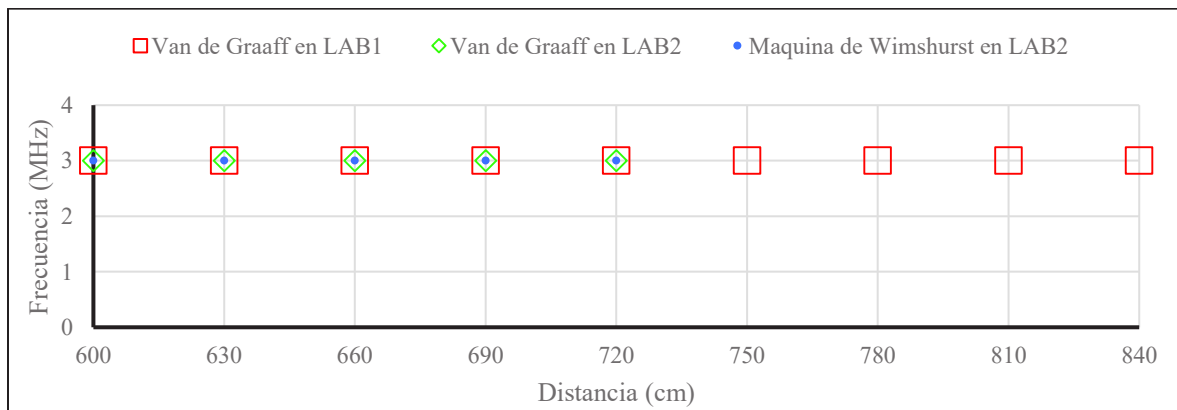
2.5.4 Alcance máximo de la radiación emitida.

Estas experiencias son similares a las realizadas en *el alcance de la radiación emitida*, pero en cambio se utilizó la mínima frecuencia común que fue detectada por el receptor de radio durante las anteriores experiencias, 3 MHz.

Se dispuso de manera similar a los anteriores montajes del generador Van De Graaff en LAB1 y LAB2, y la Máquina de Wimshurst en LAB2. La distancia entre los electrodos fue de la siguiente forma:

- Para el generador Van De Graaff en LAB1, 4 cm. Humedad relativa 66%.
- Para el generador Van De Graaff en LAB2, 3,5 cm. Humedad relativa 68%.
- Para la Máquina de Wimshurst en LAB2, 3,5 cm. Humedad relativa 70%.

El procedimiento se operó de la misma forma en que se venía trabajando para el *alcance de la radiación emitida*, pero se varia la frecuencia del receptor a 3 MHz. Los resultados son presentados en la siguiente gráfica:



Gráfica 4. Distancia de detectabilidad de la distorsión producida por la radiación de 3 MHz emitidas por la descarga electrostática de: Generador Van de Graff de LAB1 y LAB2; y Máquina de Wimshurst LAB2.

A partir de los resultados presentados en la gráfica 4 puedo apreciar que la distorsión detectada en la frecuencia de 3 MHz por el receptor de radio, en los tres 3 aparatos llegaba hasta los 720 cm. De modo que no pudo establecer un alcance máximo para la radiación emitida en el valor de frecuencia de 3 MHz.

Sin embargo, debo hacer la aclaración que esto no se debe a que la radiación emitida por el generador Van De Graaff y la Máquina de Wimshurst en LAB2 no pudiera ser detectada por el receptor a distancias superiores a los 720 cm, esto se debía a que no se podía desplazar más el receptor porque llegaba hasta la otra pared de laboratorio. Esta distancia era la más larga de LAB2 que precisamente es de 720 cm. Caso similar sucede con la radiación emitida por el generador Van De Graaff en LAB1, puesto la distancia más larga de LAB1 es precisamente 840 cm.

Es decir, que si se trasladan los montajes a un escenario con dimensiones más grandes posiblemente la detección en la frecuencia de 3 MHz podría darse inclusive a distancias superiores a los 8,5 m, por lo que, se concluye que **la radiación emitida por una descarga electrostática en una frecuencia corta muy baja puede alcanzar distancias de más de 840 cm.**

Esto lleva a pensar que **la potencia de la onda electromagnética generada por una descarga se ve afectada por la disipación en el aire de la cantidad de energía que porta dicha onda mientras atraviesa este medio. Esta disipación es más efectiva y rápida cuando la onda posee más potencia, de modo que la distancia recorrida por esta onda sea menor.** Como el valor de esta potencia depende estrechamente del valor de frecuencia, se dice entonces que entre más alto sea el valor de la frecuencia de la onda electromagnética menor será la distancia recorrerá dicha onda.

2.5.5 Direccionalidad de la radiación emitida.

Durante las experiencias anteriores, se hacía notar una particularidad al momento de detectar la radiación emitida por la descarga: la forma en cómo se estaba dispuesto el receptor de radio. Ya que, en algunos casos si el receptor se colocaba de cierta forma no detectaba ninguna distorsión, pero si colocaba en otra cierta forma si lo detectaba.

Al examinar el diseño de la antena para la recepción de las frecuencias AM y SW en el receptor de radio, se observa es que la antena es una barra de ferrita con embobinado el cual se encuentra posicionado de forma recta, como se puede apreciar en la siguiente imagen:



Imagen 13. Ubicación de la antena de las frecuencias AM y SW encerrada en rojo en el interior del receptor de radio.

De manera que, si se realiza un corte transversal a dicha antena queda un disco que se dispone en un plano del espacio, por lo que, la recepción de las frecuencias se hace en una sola dirección. Entonces, se puede disponer la antena de tres formas diferentes atendiendo principalmente a los planos del espacio como se muestra en las siguientes imágenes:



Imagen 14, 15, 16. Posición de la antena en forma A(A), forma B(B) y forma C(C).

Consecuentemente, también se observó que la ubicación del receptor de radio con respecto a la descarga también influía para la detección de la distorsión. Esto se debió a que, accidentalmente ubique el receptor de radio en dirección perpendicular a la descarga, y sucedió que en unas frecuencias que no eran detectadas en los experimentos anteriores, donde se ubicaba paralelamente a la descarga, en esta nueva ubicación si las detectaba.

Así que, en estas experiencias se realizaron los montajes ya conocidos, pero se fueron variando inicialmente la posición de la antena y seguidamente la ubicación del receptor de radio.

Para la primera experiencia se dispuso montajes del generador Van De Graaff en LAB1 y LAB2, y la Máquina de Wimshurst en LAB2. La distancia entre los electrodos fue de la siguiente forma:

- Para el generador Van De Graaff en LAB1, 3.5 cm. Humedad relativa 71%.
- Para el generador Van De Graaff en LAB2, 3.5 cm. Humedad relativa 69%.
- Para la Máquina de Wimshurst en LAB2, 3.5 cm. Humedad relativa 67%.

Seguidamente se dispuso el receptor de radio de seis maneras diferentes para cada generador Van De Graaff y Máquina de Wimshurst, como se observa en las siguientes imágenes:

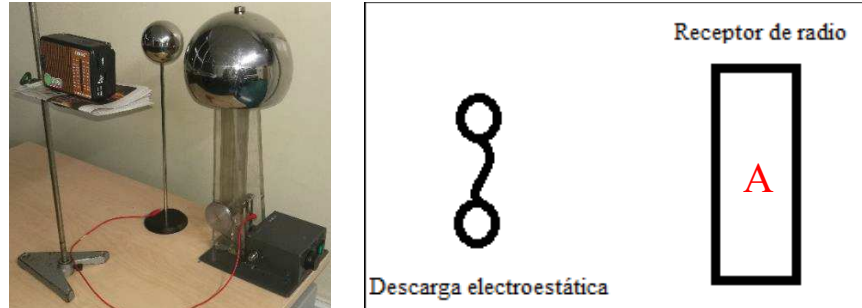


Imagen 17. Receptor de radio ubicado en dirección paralela a la descarga y la posición de la antena en la forma A.

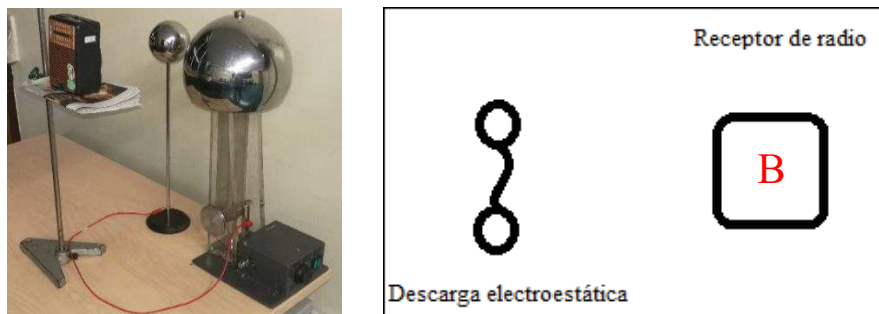


Imagen 18. Receptor de radio ubicado en dirección paralela a la descarga y la posición de la antena en la forma B.

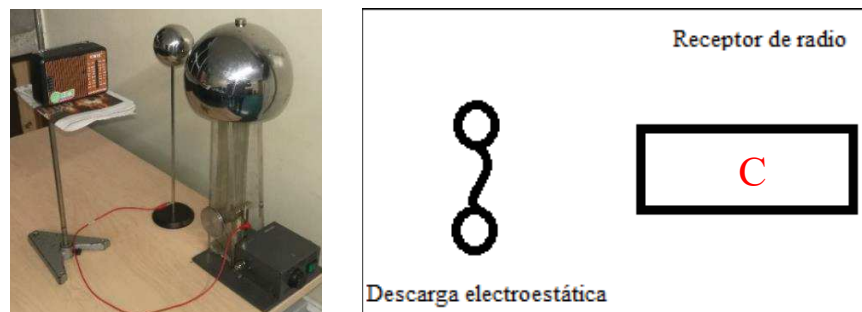


Imagen 19. Receptor de radio ubicado en dirección paralela a la descarga y la posición de la antena en la forma C.

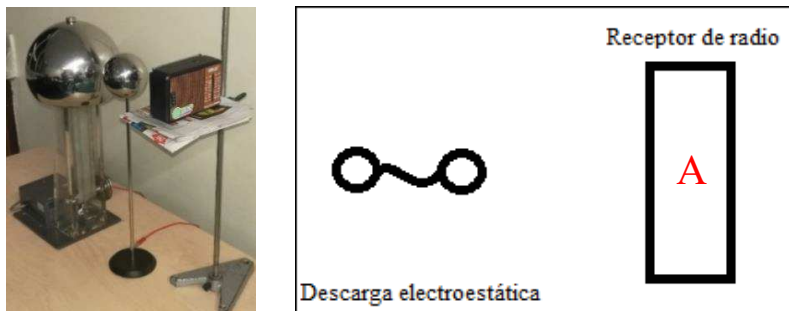


Imagen 20. Receptor de radio ubicado en dirección perpendicular a la descarga y la posición de la antena en la forma A.



Imagen 21. Receptor de radio ubicado en dirección perpendicular a la descarga y la posición de la antena en la forma B.

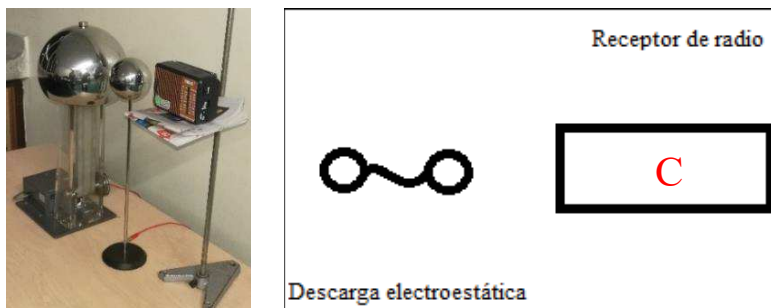
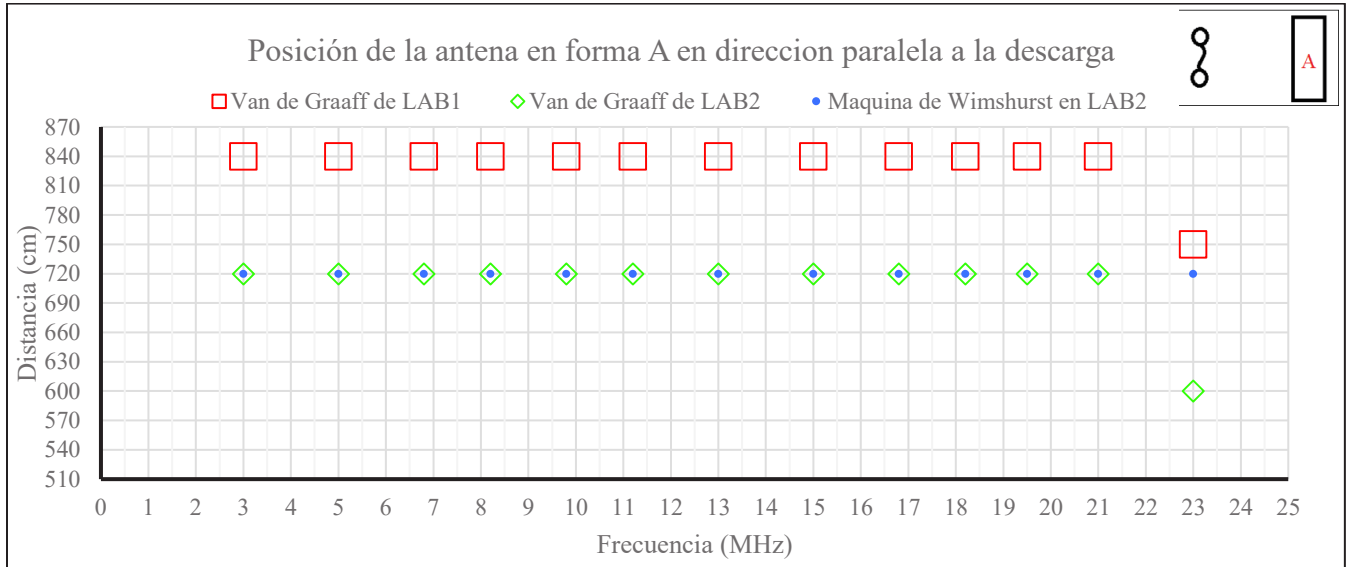


Imagen 22. Receptor de radio ubicado en dirección perpendicular a la descarga y la posición de la antena en la forma C.

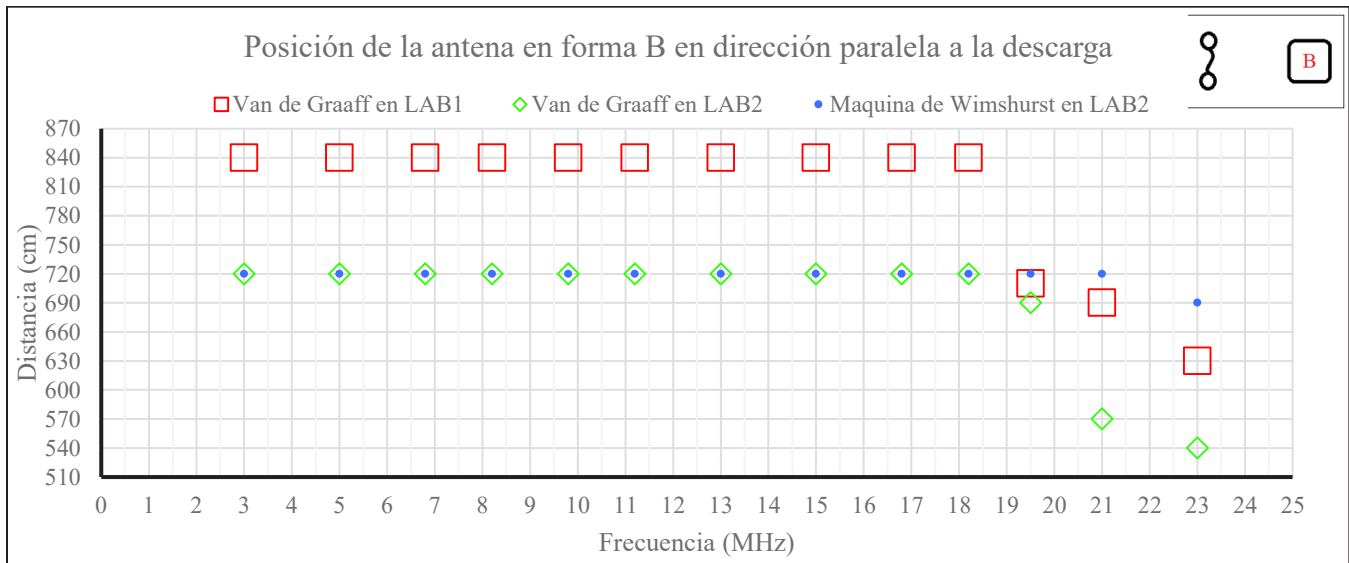
Se puso en funcionamiento los aparatos y se sintonizó en el receptor de radio en la frecuencia más alta detectada 23 MHz.

Cuando el receptor de radio detectaba la distorsión producida por la descarga se fue alejando 30 cm de la descarga, hasta una distancia en la que no se presentara distorsión. Cuando esto sucedió se cambiaba a una frecuencia más baja (<23MHz), en donde si se detectaba la distorsión se alejaba el receptor de la descarga otros 30 cm, hasta una distancia en la que no se presentara distorsión. Este procedimiento se repetía hasta que el receptor estuviera en la distancia

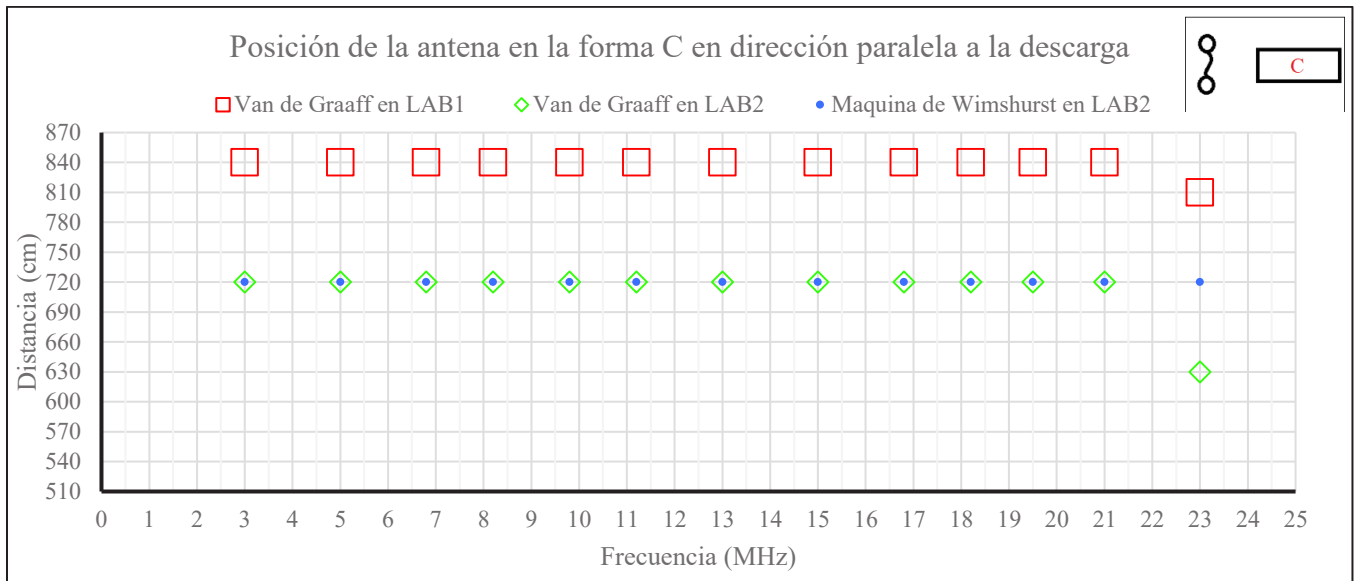
más larga que el laboratorio permitiera: 840 cm en LAB1 y 720 cm en LAB2. Los resultados se presentan en las siguientes gráficas:



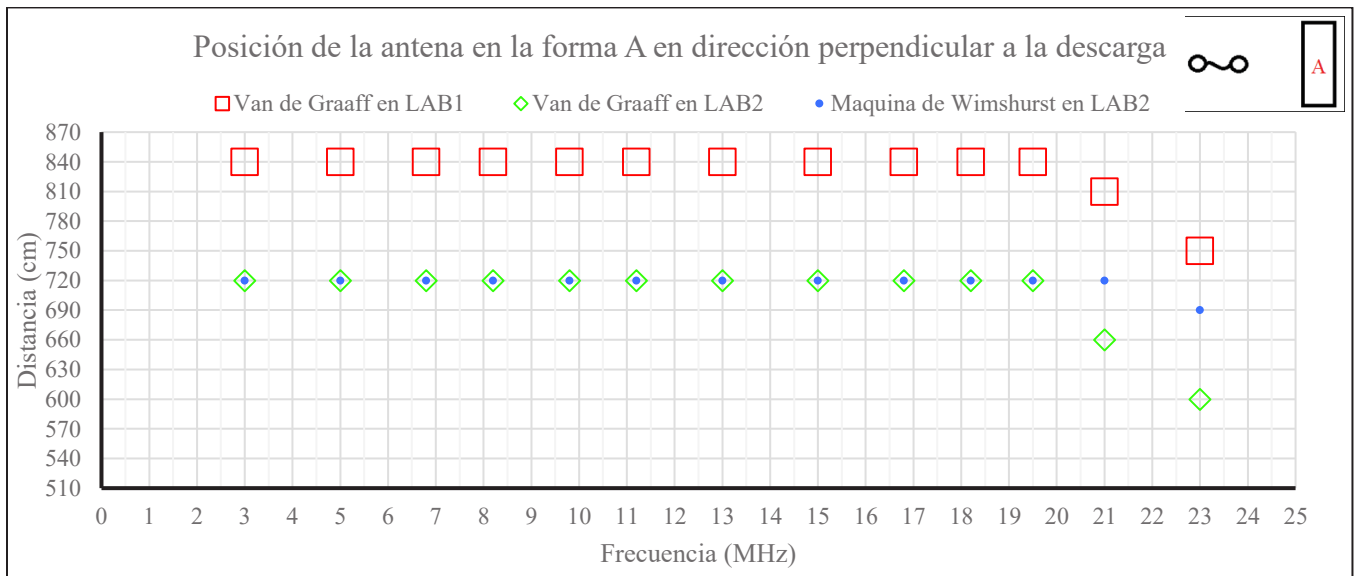
Gráfica 5. Distancias de detectabilidad de la distorsión en el intervalo de frecuencias SW cuando el receptor se ubicó en dirección paralela a la descarga y la posición de la antena en la forma A.



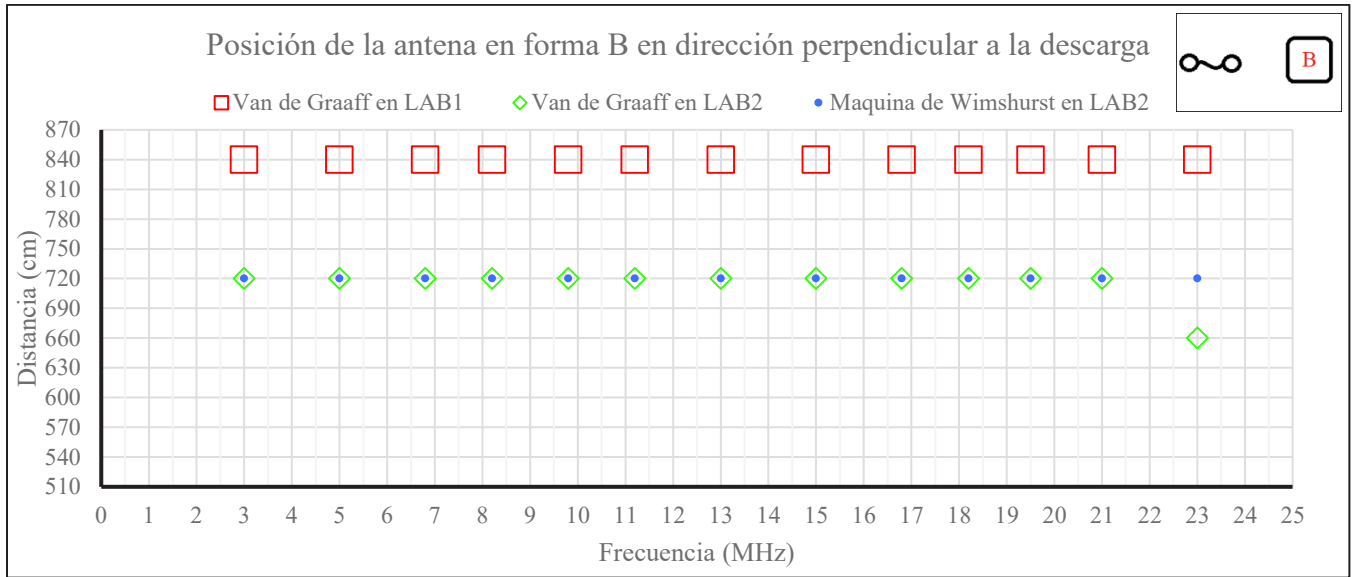
Gráfica 6. Distancias de detectabilidad de la distorsión en el intervalo de frecuencias SW cuando el receptor se ubicó en dirección paralela a la descarga y la posición de la antena en la forma B.



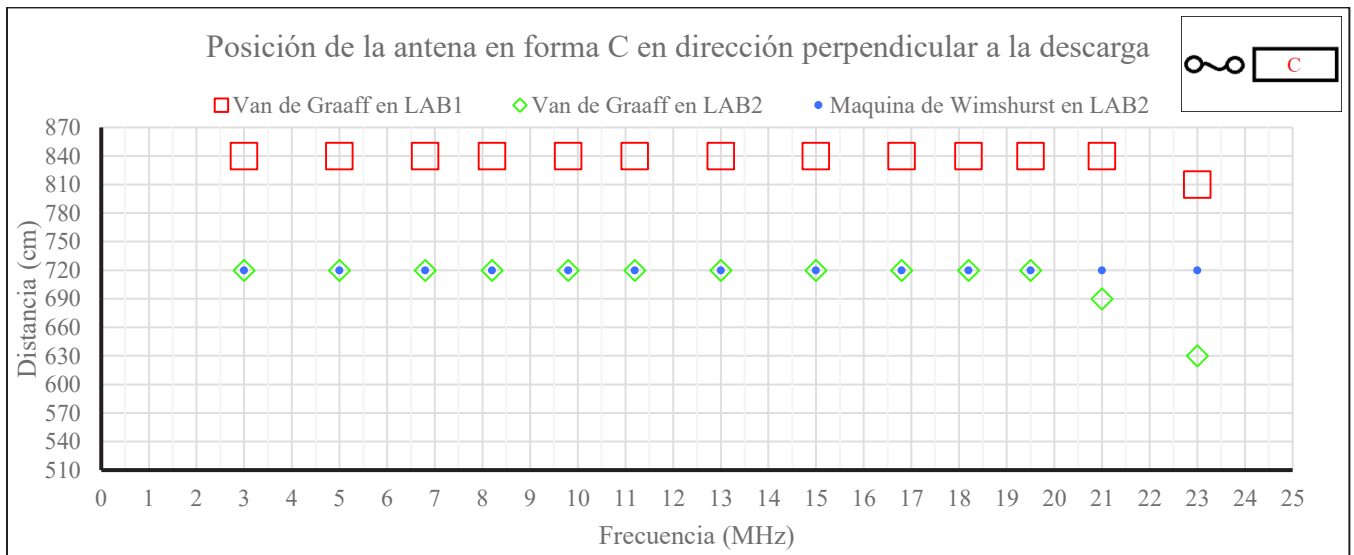
Gráfica 7. Distancias de detectabilidad de la distorsión en el intervalo de frecuencias SW cuando el receptor se ubicó en dirección paralela a la descarga y la posición de la antena en la forma C.



Gráfica 8. Distancias de detectabilidad de la distorsión en el intervalo de frecuencias SW cuando el receptor se ubicó en dirección perpendicular a la descarga y la posición de la antena en la forma A.



Gráfica 9. Distancias de detectabilidad de la distorsión en el intervalo de frecuencias SW cuando el receptor se ubicó en dirección perpendicular a la descarga y la posición de la antena en la forma B.



Gráfica 10. Distancias de detectabilidad de la distorsión en el intervalo de frecuencias SW cuando el receptor se ubicó en dirección perpendicular a la descarga y la posición de la antena en la forma C.

Los resultados en las gráficas 5, 6, 7, 8, 9 y 10 muestran que las distancias de detectabilidad de la distorsión dependían de la forma en la que se colocó el receptor de radio, así como se muestra a continuación:

Cuando se ubicaba el receptor paralelamente a la descarga:

- Si la antena se posicionaba de la forma C se detectaban a más distancia las distorsiones.
- Si la antena se posicionaba de forma B se detectaban a menos distancias las distorsiones.

Cuando se ubicaba el receptor perpendicularmente a la descarga:

- Si la antena se posicionaba de forma B se detectaban a más distancias las distorsiones.
- Si la antena se posicionaba de la forma A se detectaban a menos distancias las distorsiones.

Esto se debe a que el efecto de resonancia que era provocado en la antena del receptor de radio se producía mejor en algunas posiciones de la antena que otras. Por lo que se pudiera suponer que una de las razones de estos eventos sea **distribución de energía en algunas direcciones no es uniforme** en estas experiencias.

Se aprecia también, que **la radiación emitida por una descarga electrostática se propaga en todas las direcciones** (omnidireccional) y tiene un radio de detección de aproximadamente para este caso de 720 cm entre el intervalo de frecuencias entre 3 MHz y 19.5 MHz.

2.6 Radio de acción de un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática

Para estas experiencias he utilizado un dispositivo que pueda ser susceptible a la radiación electromagnética generada durante la descarga electrostática, de manera que el dispositivo presente perturbaciones en sus funciones operativas como reinicios que puedan ser observados.

Con este propósito, inicialmente hubo que examinar los tres dispositivos (una calculadora electrónica, un reloj digital de mano, y un cronometro digital) para conocer si estos eran sensibles a radiación electromagnética, por lo que, en esos dispositivos se buscaba que no contaran con el

logo de compatibilidad electromagnética (CEM)¹². No obstante, todos los dispositivos presentaban el logo CE.

Así que, posteriormente se sometieron los tres dispositivos a una prueba de funcionalidad en cercanías a una descarga. Esto se realizó de la siguiente manera: se colocaba un dispositivo, al cual previamente se le verificaba si funcionaba correctamente, a una distancia de menos de 30 cm de la descarga en cualquier ubicación. Cuando la descarga ocurriera se verificaba si seguía en funcionamiento o presentaba alguna alteración visible, como cambios en la indicación de la hora en el reloj y cronometro digital o de cantidades en la calculadora electrónica.

Tras haber realizado lo anterior, se observó que la calculadora electrónica era la única que presentaba alteraciones, ya que, cuando la descarga ocurría la pantalla que debía mostrar una cantidad fijada con anterioridad, volvía a mostrar el número cero. Dicho de otro modo, la calculadora reiniciaba sus funciones operativas con cada descarga. Así que, decidí utilizar esta calculadora como mi dispositivo para estas experiencias. La calculadora en cuestión se especifica a continuación:



Imagen 23. Calculadora electrónica.

Calculadora electrónica	
Marca	KADIO
Modelo	KD-100B
Fuente de poder	DC 1,5V

Tabla 12. Especificaciones de la calculadora electrónica.

¹² Este logo o marca certifica que presuntamente hay un correcto funcionamiento del producto ante una interferencia electromagnética y no genera una, varía según la entidad responsable de regulación de CEM en cada región que certificó el producto. En Colombia, hay dos principales logos son CE (Comunidad Europea) y FCC (Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos de América). Para ampliar esta información: PUCARA, *Guía de Compatibilidad Electromagnética (EMC)*, CYDET.

Las experiencias se realizaron en LAB1 y LAB2 en donde he colocado sobre una mesa de madera cerca de una de las paredes el generador Van De Graaff y la Máquina de Wimshurst de cada laboratorio. La distancia entre los electrodos se dispuso de la siguiente forma:

- Para el generador Van De Graaff en LAB1, 3.5 cm. Humedad relativa 68%.
- Para el generador Van De Graaff en LAB2, 3.5 cm. Humedad relativa 70%.
- Para la Máquina de Wimshurst en LAB2, 3.5 cm. Humedad relativa 71%.

Seguidamente se ubicó la calculadora en cuatro posiciones diferentes para determinar el radio de acción de los campos electromagnéticos generados por la descarga, como se observa en las siguientes imágenes:



Imagen 24. Calculadora ubicada a la misma altura en dirección paralela a la descarga.

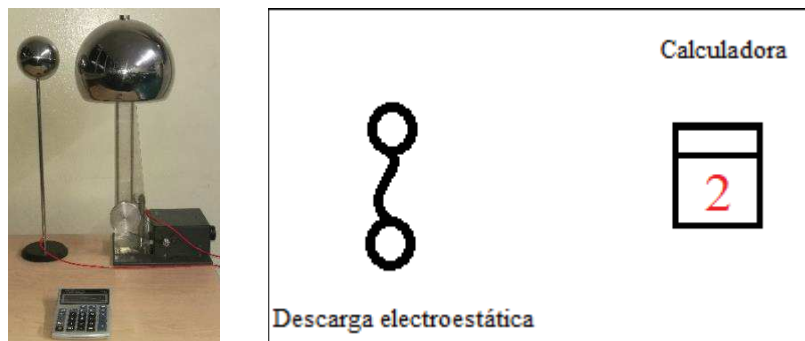


Imagen 25. Calculadora ubicada a la altura de la base en dirección paralela a la descarga.

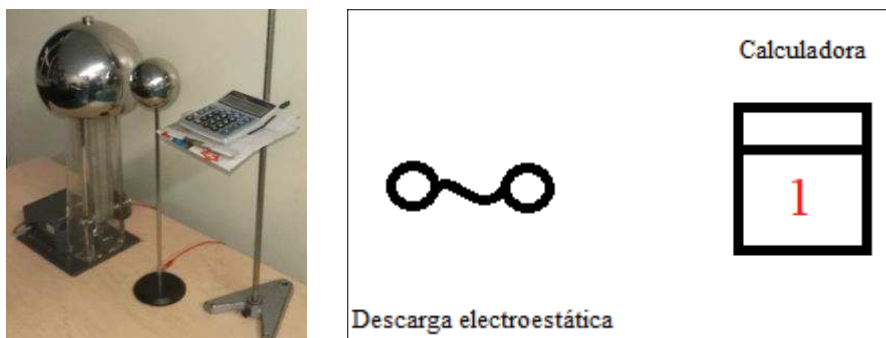


Imagen 26. Calculadora ubicada a la misma altura en dirección perpendicular a la descarga.

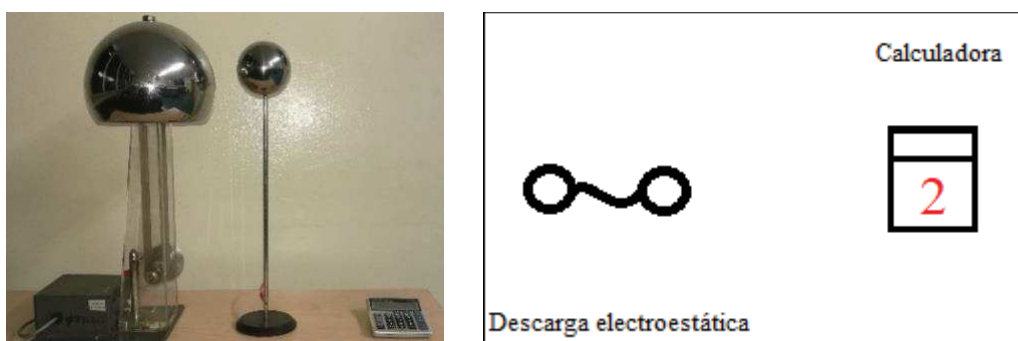
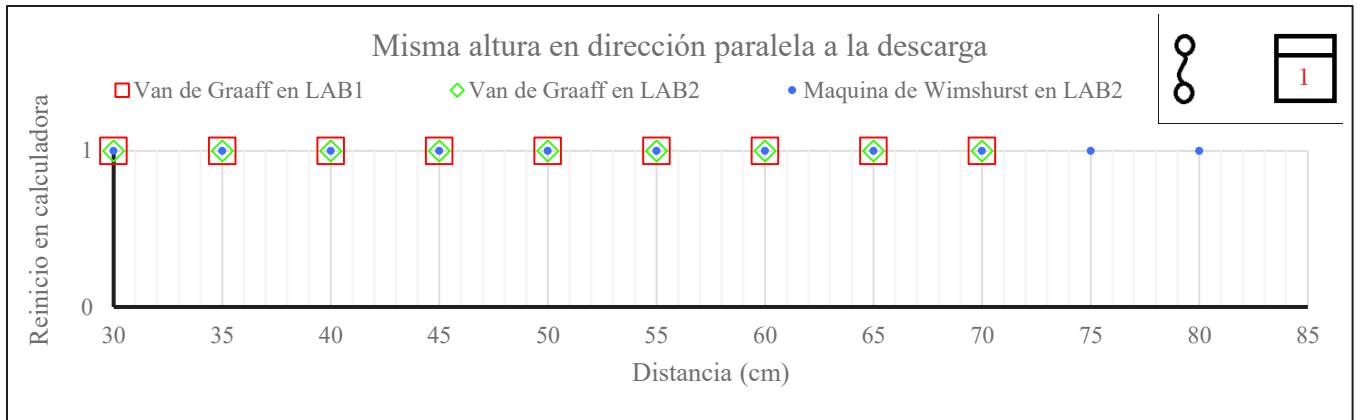


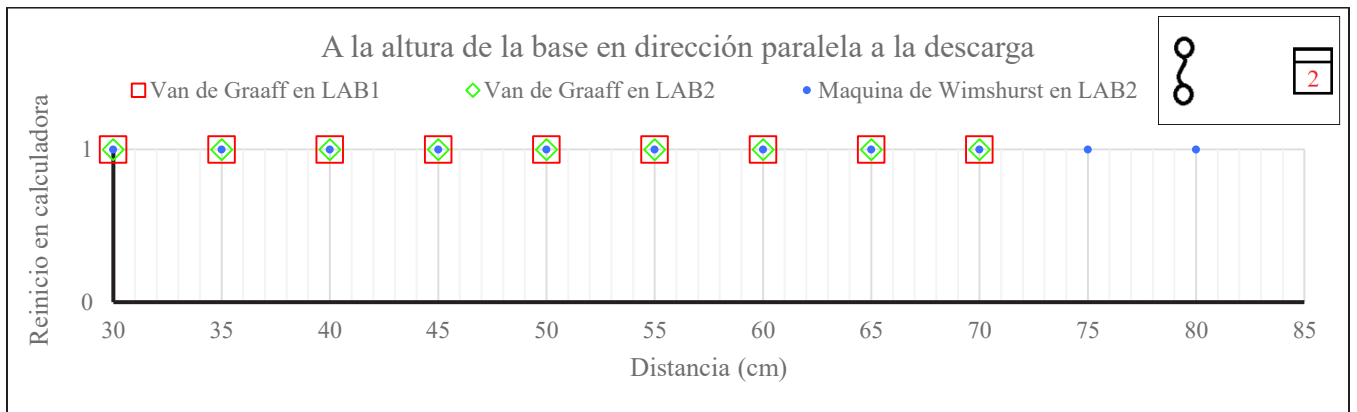
Imagen 27. Calculadora ubicada a la altura de la base en dirección perpendicular a la descarga.

Se puso en funcionamiento los aparatos y se fijaba una cantidad en la calculadora. Cuando ocurría una descarga se observaba la cantidad indicada en la pantalla, si se volvía a cero o se reiniciaba, la calculadora se alejaba 5 cm de la descarga hasta una distancia en donde la pantalla indicara la misma cantidad después de una descarga. Los resultados se presentan en las siguientes gráficas:

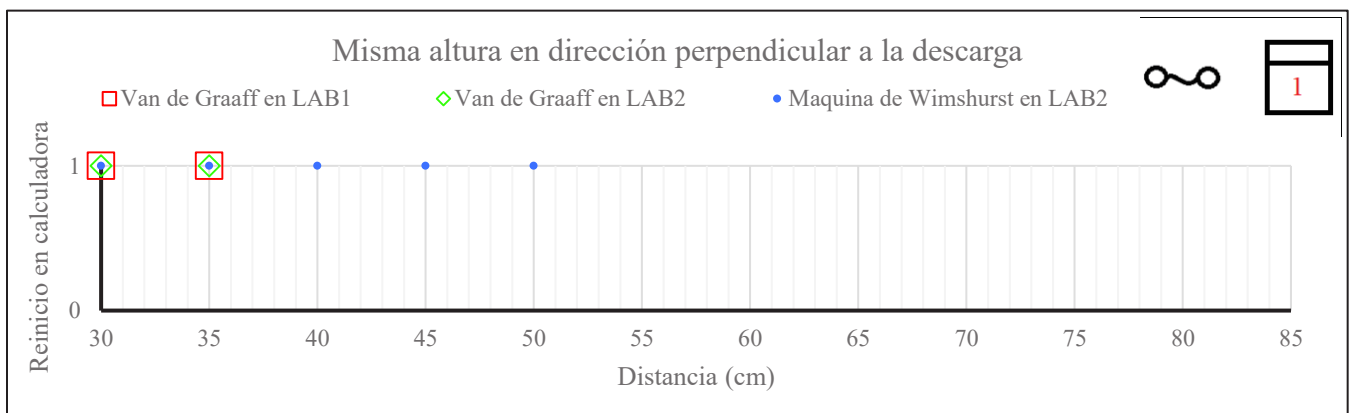
*El valor 1 en el eje ordenado en estas gráficas significa que se evidencio el reinicio.



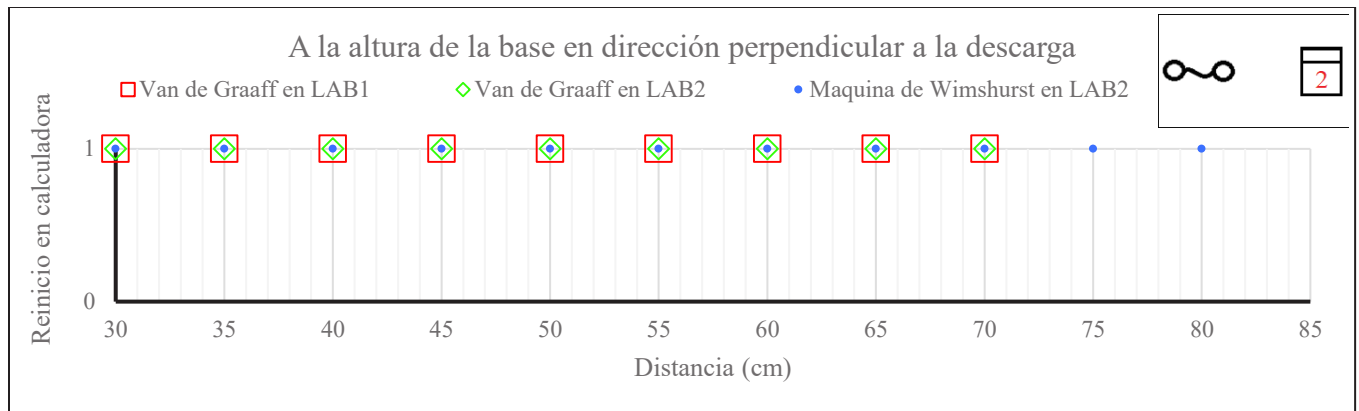
Gráfica 11. Distancias en las que se reinició la calculadora ubicada a la misma altura en dirección paralela a la descarga.



Gráfica 12. Distancias en las que se reinició la calculadora ubicada a la altura de la base en dirección paralela a la descarga.



Gráfica 13. Distancias en las que se reinició la calculadora ubicada a la misma altura en dirección perpendicular a la descarga.



Gráfica 14. Distancias en las que se reinició la calculadora ubicada a la altura de la base en dirección perpendicular a la descarga.

Los resultados en las gráficas 11, 12, 13 y 14 revelan que la calculadora reinicia sus funciones durante una descarga dependiendo de la ubicación de dicho aparato. Puesto que, si se ubicaba la calculadora a la misma altura y en dirección perpendicular a la descarga, este evento ocurría hasta a una distancia de media de 40 cm. Pero, si la calculadora se ubicaba en otro lugar diferente al anterior, esta distancia media aumentaba drásticamente hasta 75 cm.

Así que, se puede pensar que **el campo electromagnético generado por una descarga electrostática no distribuye de manera uniforme la energía en todas las direcciones**, sin embargo, este campo se propaga en todas las direcciones.

Esto último podría explicarse de la siguiente forma: como las cargas eléctricas presentes en la descarga viajan en una sola dirección como si se movieran por un conductor, el campo electromagnético que se genera solo lo hace alrededor de la descarga y no en la misma dirección en el que viajan las cargas, es decir en la perpendicular. No obstante, los resultados de las pruebas muestran la existencia de dicho campo en esa dirección.

Para resolver esta última parte del problema, cabe aclarar que las descargas electrostáticas no poseen una forma completamente recta, es decir, que las cargas eléctricas no se mueven en una misma dirección durante una descarga, sino que su movimiento es aleatorio. Esto último depende de la humedad relativa: si es muy alta, la descarga tiende a ser muy desorganizada que puede inclusive formar líneas curvas o zigzagueadas. Con esto esclarecido la razón de la existencia del campo electromagnético en la dirección perpendicular a la descarga se debería a la suma en el mismo sentido de todos los campos que se generan en cada punto de la descarga.

Para finalizar esta parte, estos eventos son debidos a que la gran variación de la cantidad de energía del campo electromagnético en un corto periodo de tiempo puede formar ondas electromagnéticas que portan una gran cantidad de energía en un intervalo de frecuencias que son capaces de provocar un efecto de resonancia a la calculadora electrónica. Este efecto de resonancia sobrecarga el circuito electrónico de la calculadora, que se manifiesta como un reinicio en sus funciones operativas.

Como se mencionó anteriormente la energía que porta la onda electromagnética se disipa en el aire mientras lo atraviesa, de modo que, la razón por la que la calculadora no presenta perturbaciones operativas después de cierta distancia se debe a que **la energía se disipa en grandes cantidades en proximidades donde se generó la descarga**. Esta energía también depende de la intensidad de voltaje producido por la descarga, por lo que si se aumenta este valor aumentara el radio de acción.

Como resultado de estas experiencias, se evidenció que la radiación electromagnética emitida por un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática se propagaba en todas las direcciones y pudo ser detectada en el intervalo de frecuencias de 530 kHz hasta 23 MHz.

La radiación electromagnética de este pulso es una combinación de varias ondas electromagnéticas, las cuales transportan una cierta cantidad de energía que se disipa en el aire haciendo que estas ondas realicen recorridos cortos. El radio de acción de este pulso interactúa uniformemente en todas las direcciones y depende de la cantidad de energía del campo electromagnético variable que es creado. El valor de esta energía depende estrechamente del mecanismo de producción de la descarga.

Capítulo 3. Reflexiones sobre el pulso electromagnético para la enseñanza y aprendizaje del electromagnetismo

En este capítulo se plantea como las experiencias para la caracterización de un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática son pensadas en el proceso de enseñanza y aprendizaje de electromagnetismo. Debido a que cuando se abordan conceptos de electromagnetismo en el salón de clase se pueden generar interpretaciones erróneas de dichos conceptos como campo electromagnético y onda electromagnética.

Así que se presentan las experiencias para la caracterización de un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática como una nueva manera para la generación de ideas sobre campo electromagnético y onda electromagnética. Inicialmente se señalan como las experiencias favorecen a la generación de ideas para la comprensión de los conceptos y se muestran algunas de las estrategias en donde son utilizadas. Consecuentemente se argumenta porque las experiencias que se llevaron a cabo en este trabajo pueden ser usadas como una estrategia para la comprensión de los conceptos de campo electromagnético y onda electromagnética. Por último, se realiza una reflexión sobre el papel del pulso en la enseñanza de las ciencias.

3.1 Experimentos para la enseñanza del electromagnetismo

Cuando un docente quiere abordar una temática del electromagnetismo se encuentra con una serie de dificultades para la enseñanza y aprendizaje de este, esto es indicado en el resumen de *Enseñanza del electromagnetismo a través de aplicaciones experimentales* (2017) de R. Méndez y M. Villavicencio, en donde mencionan:

La teoría electromagnética es una de las áreas de la física con mayor índice de reprobación en las asignaturas de Física que se imparten en el nivel medio superior y superior. En buena medida, esto se debe a que **el electromagnetismo se basa principalmente en conceptos abstractos y poco intuitivos** que resultan un reto de aprendizaje para los alumnos. Por lo general, con la intención de favorecer la comprensión de los conceptos, en los cursos teóricos, prácticos y teórico-prácticos, el docente presenta y analiza **los experimentos más representativos de algunos fenómenos electromagnéticos**. (Villavicencio Torres & Mendez Frago, 2017)

Muchas veces el docente recurre a reproducir las experiencias descritas en los libros de texto en donde la producción y detección de efectos son sometidas a análisis y representaciones puramente matemáticos que son insuficientes para elaborar una interpretación física del fenómeno.

En consecuencia, es necesario que, en el proceso de enseñanza y aprendizaje, las experiencias se encuentren vinculadas a las teorías cuando se abordan fenómenos en los que intervienen los campos electromagnéticos y ondas electromagnéticas, esto es posible mediante la producción y detección de efectos como estrategias que favorecen a hacer una interpretación física de los conceptos asociados a las experiencias.

Un ejemplo de estas estrategias es la reproducción de las experiencias realizadas por Heinrich Hertz entre los años de 1886 y 1888 sobre las ondas electromagnéticas para mostrar la producción, detección y fenómenos de propagación (reflexión, refracción, dispersión, difracción, interferencia, polarización) de las ondas electromagnéticas. De esta manera posibilita que los docentes mediante la producción y detección de ondas electromagnéticas puedan realizar descripciones y explicaciones a los fenómenos que se presentan durante estas experiencias, los cuales están relacionados con los conceptos de campo electromagnético y onda electromagnética, y cuya finalidad es la de favorecer la comprensión de estos últimos. Esto se ve reflejado en los trabajos de grado de la Universidad Pedagógica Nacional *Propuesta de aula desde el experimento de Heinrich Hertz para la construcción de ideas alrededor de la existencia de las ondas electromagnéticas* (2017) de Erikson Rodríguez Ortiz y *Propuesta fenomenológica para la enseñanza de las ondas electromagnéticas basado en los trabajos de Heinrich Hertz* (2012) de Angie Liseth Alfonso Romero.

En estas experiencias una bobina de inducción o de Ruhmkorff se conecta a dos cables que tienen la particularidad en cada uno de ellos de poseer en uno de los extremos un conductor metálico y en el otro extremo un electrodo, y están dispuestos de forma tal que los dos electrodos se encuentran separados por una pequeña distancia. Esto es denominado como el **circuito primario u oscilante**, cuando se pone en funcionamiento una serie de descargas eléctricas se producen entre los electrodos se producen. Asimismo, las descargas poseen la frecuencia natural del circuito oscilante, por lo que de esta forma se generan ondas electromagnéticas a una cierta frecuencia.

Para la detección de estas ondas es necesario un **circuito secundario** que este sintonizado con la frecuencia natural del circuito oscilante, este nuevo circuito puede ser una espira de cable conductor donde los extremos terminen en pequeños electrodos. Cuando el circuito oscilante produzca las descargas, las ondas electromagnéticas ocasionaran un efecto de resonancia en el circuito secundario de forma tal que se produzcan pequeñas descargas entre los electrodos de éste.

Otra estrategia similar es *Propuesta de recreación de los experimentos de Hertz en el laboratorio de enseñanza de la Física* (2016) de Javier Martin, Mariano Nicotra, Carlos Leguizamón y Ángel Galeasso, cuyo objetivo era recrear y poner a punto¹³ un montaje experimental similar al utilizado por Hertz durante sus experiencias con las ondas electromagnéticas con la finalidad de que pueda ser utilizado como un método para presentar las experiencias más representativas en la historia de la Física en el salón de clase. (F. Martin, A. Nicotra, Leguizamon, & Galeasso, 2016)

La reproducción y recreación de las experiencias realizadas por Hertz sobre las ondas electromagnéticas pueden llegar a generar y profundizar ideas sobre las ondas electromagnéticas, carga en movimiento, autoinductancia, la ley de Faraday y la ley de Ampere; ya que, estas resultan ser determinantes para la construcción de conocimiento sobre los conceptos de campo electromagnético, onda electromagnética y sus fenómenos de propagación.

Sin embargo, en este tipo de estrategias, las experiencias se encuentran desligadas de las aplicaciones que los estudiantes tienen a su alcance en la vida cotidiana o de sus implicaciones tecnológicas. (Villavicencio Torres & Mendez Fragosó, 2017)

Esto ha llevado a que diversos autores propongan nuevas estrategias para el proceso de enseñanza y aprendizaje del electromagnetismo mediante el empleo de aparatos eléctricos y electrónicos del uso común, puesto que, pueden resultar más significativos para los estudiantes, en la medida que en los últimos años la población se encuentra más familiarizada con estos aparatos que con los elementos proporcionados por un laboratorio. Esto se debe a que los elementos de laboratorio (aparatos, equipos y/o montajes) están diseñados para recrear fenómenos controlados de la naturaleza, pero que no son utilizados en el día a día de las personas, por lo que muchas veces los estudiantes llegarían a la conclusión de que **los fenómenos solamente se pueden producir con los elementos de un laboratorio.**

¹³ Una serie de actividades que se realizan para que el mecanismo funcione de manera óptima.

Por ejemplo, en el trabajo *El teléfono celular: una estrategia didáctica para la enseñanza del electromagnetismo* (2008) de Domingo Padilla e Isabel Garzón, se realizaron una serie de experiencias en las que se empleó el teléfono celular para evidenciar los fenómenos de reflexión, refracción y dispersión de las ondas electromagnéticas de modo que se llegara a pensar sobre el comportamiento similar de las ondas electromagnéticas con las ondas mecánicas. (Padilla Azúzar & Garzon Barragan, 2008)

Estos autores también señalan la dificultad de anteponer los formalismos matemáticos frente a las experiencias en el aprendizaje:

... Algunos proponen que se debe enseñar el formalismo matemático y acotejar los resultados a ciertos datos experimentales (Guisasola 1996). El inconveniente de esta propuesta reside en el hecho de que los estudiantes, en los niveles más altos donde se ven esos cursos, aún no tienen las destrezas matemáticas para lograrlo. Entonces éstos se quedan en la primera etapa del formalismo matemático con consecuencias desafortunadas: **los estudiantes terminan creyendo que la física es un cúmulo de fórmulas y reglas de cálculo**, en otras palabras, se crean falsas imágenes de las teorías físicas (Galili 1995 y Guisasola et al., 2008). Además, cada teoría física involucra algunos conceptos físicos básicos, un formalismo matemático y un conjunto de reglas de correspondencia que conecta los conceptos físicos con los objetos matemáticos que los representan (Ballentine, 2000)... Algunas veces esta conexión de conceptos físicos con objetos matemáticos es bastante obvia, sin embargo, en el caso del electromagnetismo, sin una debida preparación, no resulta tan fácil traducir los resultados formales en términos físicos (Guisasola, 2002 y Martín y Solbes, 2001). (Padilla Azúzar & Garzon Barragan, 2008)

Esta estrategia realizada por Padilla y Garzón posibilita a que se llegue a construir conocimiento mediante la detección de ondas electromagnéticas con el teléfono celular durante las experiencias, las cuales permiten evidenciar que las ondas electromagnéticas se comportan como ondas mecánicas durante los fenómenos de reflexión, refracción y dispersión. Pienso que cambiando el teléfono celular por otro aparato de uso común cuya funcionalidad sea la recepción de ondas electromagnéticas, como un receptor de radio, no modifica el propósito de esta estrategia.

3.2 El pulso electromagnético para la enseñanza y aprendizaje del electromagnetismo

Consideré que utilizando las experiencias que realicé para caracterizar un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática, pudieran ser usadas, en el proceso de enseñanza y aprendizaje, para favorecer la comprensión de los conceptos de campo electromagnético y onda electromagnética.

Consiste principalmente en generar un pulso electromagnético mediante una descarga electrostática producida por un generador Van de Graaff o una máquina de Wimshurst, y con la ayuda de un aparato de uso común realizar las experiencias descritas en el anterior capítulo sobre **la radiación electromagnética emitida y el radio de acción de un pulso electromagnético**. Con la finalidad de elaborar descripciones y explicaciones en torno a los fenómenos que ocurren en estas experiencias, que permiten generar ideas sobre campo electromagnético y onda electromagnética para determinar algunas características que estos poseen.

Estas ideas se muestran en la siguiente tabla junto a las ideas que se obtienen en las anteriores estrategias:

	Utilización de aparatos de uso común	Reproducción de las experiencias sobre las ondas electromagnéticas realizadas por Hertz	Experiencias sobre la caracterización un pulso electromagnético
Forma del campo electromagnético		X	X
Intensidad del campo electromagnético		X	X
Producción de ondas electromagnéticas		X	X
Acción contigua		X	X
Detección de ondas electromagnéticas	X	X	X
Autoinducción		X	
Efecto de resonancia	X	X	X
Direccionalidad de las ondas electromagnéticas	X	X	X

Potencia de las ondas electromagnéticas			X
Reflexión de las ondas electromagnéticas	X	X	No se sabe
Refracción de las ondas electromagnéticas	X	X	No se sabe
Difracción de las ondas electromagnéticas		X	No se sabe
Dispersión de las ondas electromagnéticas	X	X	No se sabe
Interferencia de las ondas electromagnéticas		X	No se sabe
Polarización de las ondas electromagnéticas		X	No se sabe

Tabla 13. Ideas que se pueden generar en cada estrategia.

Considero que es preciso señalar en cual experiencia sobre la caracterización de un pulso electromagnético permite generar estas ideas:

- *Forma e intensidad del campo electromagnético:* A partir de la experiencia sobre el radio de acción de un pulso electromagnético se pueden determinar las características de la forma e intensidad del campo electromagnético variable creado por el pulso.
- *Producción, detección y direccionalidad de las ondas electromagnéticas:* A partir de las experiencias sobre la radiación emitida por un pulso electromagnético se pueden reconocer los mecanismos de producción, propagación y detección de la radiación emitida por un pulso, además de que se puede determinar la forma y dirección de propagación de esta radiación.
- *Acción contigua y efecto de resonancia:* A partir de la experiencia sobre la radiación emitida y el radio de acción de un pulso electromagnético se puede analizar que se producen efectos en los aparatos de uso común que ocurren casi de forma inmediata a cierta distancia.

Debo mencionar que los fenómenos de propagación (reflexión, refracción, dispersión, difracción, interferencia, polarización) no fueron considerados como elementos de interés durante

la caracterización de un pulso, puesto que, el propósito de investigación era la producción y detección de ondas electromagnéticas durante este fenómeno. Es decir, que las ideas que se puedan suscitar sobre los fenómenos de propagación (hasta la fecha) no han sido tomados en cuenta para esta estrategia.

Además, cabe señalar que para la realización de estas experiencias los montajes son sencillos, en comparación con el complejo montaje para la reproducción de experiencias sobre las ondas electromagnéticas realizadas por Hertz. Además, en estas experiencias se utilizan aparatos de uso común que posibilitan que, como lo había señalado, sean más significativas.

3.3 La enseñanza de las ciencias y el pulso electromagnético

Pienso que es importante indicar que este fenómeno no ha sido muy relevante para la enseñanza y aprendizaje de las ciencias, pero que si lo ha sido para el desarrollo tecnológico de la humanidad desde del siglo anterior. Debido principalmente a que los estudios iniciales del pulso se realizaron en el ámbito militar, por lo que la información se mantenía restringida al público y solo las personas que conocían dicha información la utilizaron para realizar investigaciones en torno a los métodos de producción y protección del pulso.

Fue hasta finales de la década de los ochenta que esta información fue abierta al público, pero pocas personas con base en ella se han atrevido a realizar investigaciones en otras áreas de la ciencia como en la medicina. Esto es mostrado en *Study of the relationship between electromagnetic pulses and rats Alzheimer's disease and its mechanism* (Estudio de la relación entre pulsos electromagnéticos y la enfermedad de Alzheimer de las ratas y su mecanismo) (2013) de Da-Peng Jiang, Jing Li, Shelong-Long Xu, Fang Kuang, Hai-Yang Lang, Ya-Feng Wang, Guan-Zhou An y Guo-Zhen Guo en el que tiene como objetivo:

...aclarar la relación entre la exposición al pulso electromagnético y la incidencia de la enfermedad de Alzheimer en ratas y los posibles mecanismos moleculares, centrándose en el papel del estrés oxidativo como el puente. (Jiang, y otros, 2012)

Por todo lo anterior, considero que la construcción de conocimiento mediante la generación de ideas durante las experiencias sobre la caracterización de un pulso electromagnético generado

por una descarga electrostática producida por un generador Van de Graaff o una Máquina de Wimshurst favorece a la comprensión de los conceptos de campo electromagnético y onda electromagnética, de modo que, estas experiencias puedan ser usadas para el desarrollo de una estrategia para la enseñanza y aprendizaje de dichos conceptos. Lo anterior puede ser considerado como una exploración a una primera parte donde la producción y detección de los efectos del pulso electromagnético tienen una posibilidad de llevarse a salón de clase. Además de que los montajes experimentales son sencillos de hacer, y podrían ser más significativos.

Conclusiones

Las experiencias que se realizaron permitieron la caracterización (otorgar algunas características propias que lo diferencian de los demás fenómenos) de un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática producida por un generador Van de Graaff o una Máquina de Wimshurst, lo cual era el objetivo principal de este trabajo. Esto se fue posible mediante un meticuloso proceso de indagación, estructuración y organización que se llevó a cabo inicialmente con la revisión de los estudios ya realizados, lo cual posibilitó a que se llevará a cabo un proceso de planeación y ejecución de una serie de actividades experimentales.

La revisión cuidadosa del estado de arte de este fenómeno antes de realizar las experiencias permitió elaborar una descripción general del pulso electromagnético, cuya característica es la liberación de energía electromagnética originada por la variación intensa del campo electromagnético al entorno, que se manifiesta como corrientes eléctricas o radiación electromagnética; además esta energía permite una clasificación de este fenómeno según la intensidad de voltaje.

Otra de sus características es la duración de este fenómeno, puesto los tiempos para la realización de este suceso son fracciones de segundo. De modo que se piensa que cualquier evento que cumpla con estas características se considera como un pulso electromagnético, como es el caso de la descarga electrostática.

Además, esta revisión permitió establecer un intervalo de frecuencias en las que se podría detectar la radiación emitida por este fenómeno para las experiencias que se llevarían a cabo.

Las experiencias mostraron que un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática producida por un generador Van de Graaff o una Máquina de Wimshurst emite una radiación electromagnética entre el intervalo de frecuencias de 3 MHz hasta 23 MHz, y cuyo alcance de detección para esta radiación dependía del mecanismo de producción de la descarga. Esta radiación electromagnética posee las siguientes características:

1. Es una combinación de varias ondas electromagnéticas con valores aleatorios de un intervalo de frecuencia determinado.
2. La cantidad de energía que transportan dichas ondas electromagnéticas dependen estrechamente de la cantidad de energía eléctrica que es producida por la descarga electrostática.

3. La potencia de la onda electromagnética es afectada por la disipación en el aire de la cantidad de energía que porta dicha onda mientras atraviesa este medio. Esta disipación es más efectiva y rápida cuando la onda posee más potencia, de modo que la distancia recorrida por esta onda sea menor.
4. Estas ondas electromagnéticas se propagan en todas las direcciones (omnidireccional) y tiene un radio de detección para este caso de 720 cm entre el intervalo de frecuencias entre 3 MHz y 19.5 MHz. Sin embargo, la distribución de energía en cada dirección no es uniforme.

Un pulso electromagnético generado por una descarga electrostática producida por un generador Van de Graaff o una Máquina de Wimshurst posee un radio de acción que depende del campo electromagnético que es creado, el cual posee las siguientes características:

1. Es una gran variación de la cantidad de energía del campo electromagnético que se crea en un corto periodo de tiempo, de modo que, puede formar ondas electromagnéticas que portan una gran cantidad de energía en un intervalo de frecuencias, las cuales son capaces de provocar un efecto de resonancia en los aparatos eléctricos y electrónicos.
2. La energía de este campo electromagnético se disipa en grandes cantidades en las proximidades donde se generó la descarga, por ello no se produce perturbaciones en la funcionalidad normal de los aparatos eléctricos y electrónicos después de ciertas distancias, por lo que su radio de acción es de aproximadamente 75 cm.
3. Este campo electromagnético no distribuye de manera uniformemente la energía en su radio de acción, no obstante, este campo se propaga en todas las direcciones.

Las experiencias realizadas en este trabajo posibilitarían realizar una exploración a una primera parte en donde las producción y detección de efectos son pensados como una posibilidad para la enseñanza y aprendizaje de los conceptos de campo electromagnético y onda electromagnética, ya que en ellas pueden generar -en el docente y los estudiantes- ideas sobre dichos conceptos que favorecen a la comprensión de estos. Sumado a esto, estas experiencias requieren de montajes experimentales son sencillos de hacer, y podrían ser más significativos a su entorno.

A modo personal, fue necesario reelaborar algunos conceptos de electromagnetismo, Puesto que las investigaciones y estudios en torno al pulso electromagnético son de un corte más práctico que teórico, en consecuencia, muchos de los conceptos y fenómenos relacionados con el pulso que se hacen referencia en estos textos son ambiguos y poco claros. De modo que, me fue esencial realizar una reconstrucción de los conceptos de campo electromagnético y onda electromagnética para poder interpretar las ideas fundamentales de cada uno de estas investigaciones y estudios.

Sumado a esto, también me fue relevante el proceso que se realizó para la elaboración de las experiencias presentadas en este documento. Ya que, inicialmente debía indagar y conocer sobre las experiencias ya realizadas por otros autores que me permitieran generar ideas para el diseño de mi montaje experimental. También en esta parte, me fue importante reconocer que las condiciones ambientales son un factor decisivo al momento de realizar experiencias con descargas electrostáticas, cuestión que muchas veces no se explica cuando se llevan a cabo estas experiencias al salón de clases.

Por último, debo mencionar que a partir de este trabajo me ha suscitado nuevas inquietudes o cuestionamientos sobre este particular fenómeno, de modo que, invitó a que se continúe y se realice investigaciones sobre el pulso electromagnético.

Referencias

- Arribas, j. I. (2 de Junio de 2015). *Efectos producidos por la caída de un rayo*. Recuperado el 12 de Marzo de 2017, de https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_02_03/Proteccion_contra_des_cargas_atmosfericas/7/7.htm
- Bainbridge, K. T. (Mayo de 1976). Trinity. Los Alamos, New Mexico, EEUU: Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California.
- Cadavid, L. F. (2014). Caracterización espectral de un pulso electromagnético radiado por un rayo atmosférico (LEMP) mediante un Detector-Receptor de RF tipo SDR (Software-Defined Radio). Manizales, Caldas, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Cassiolato, C. (s.f.). *EMI - Interferencia Electromagnética en instalaciones industriales y mucho más*. Obtenido de SMAR: <http://www.smar.com/espanol/articulos-tecnicos/emi-interferencia-electromagnetica-en-instalaciones-industriales-y-mucho-mas>
- CEMDAL. (6 de Noviembre de 2016). *Historia de las interferencias*. Recuperado el 18 de Octubre de 2017, de Consultoria de compatibilidad electromagnetica: <https://www.cemdal.com/2016/11/06/historia-de-las-interferencias-emi/>
- Close, S., Colestock, P., Cox, L., Kelley, M., & Lee, N. (21 de Diciembre de 2010). Electromagnetic pulse generated by meteoroid impacts on spacecraft. *Journal of Geophysical Research*, 115(A12328). doi:10.1029/2010JA015921
- F. Martin, J., A. Nicotra, M., Leguizamon, C., & Galeasso, A. (Septiembre de 2016). Propuesta de recreación de los experimentos de Hertz en el Laboratorio de Enseñanza de la Física. *Facultad de las Ciencias Exactas, Físicas, y Naturales, III(2)*. Obtenido de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFyN/article/viewFile/12044/15220>
- Herraiz Saragacha, M., Rodriguez Caderot, G., Rodriguez Bouza, M., Rodriguez Bilbao, I., Sanchez Dulcet, F., Moreno Monge, B., . . . Escayo Menendez, J. (2014). Tormentas Geomagnéticas y evaluación de su impacto en las tecnologías e infraestructuras de España y Portugal. *Seguridad y medio ambiente*, 18-34.
- i Arnau, L. F. (2012). Introducción a la compatibilidad electromagnetica. Barcelona, España: UPC Departament d'Enginyeria Electronica.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, I. (2015). *Riesgos debidos a la electricidad estática*. Madrid, España: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Obtenido de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FICHAS%20DE%20PUBLIC>

ACIONES/EN%20CATALOGO/SEGURIDAD/Riesgos%20debidos%20a%20la%20electricidad%20estatica.pdf

- Jiang, D. P., Li, J., Lu, S. L., Kuang, F., Lang, H. Y., Wang, Y. F., . . . Guo, G. Z. (Noviembre de 2012). Study of the relationship between electromagnetic pulses and rats Alzheimer's disease and its mechanism. *2012 6th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM)*, 322-324.
- Leahy, J. S. (Julio de 2016). Experimental testing of a Van de Graaff generator as an Electromagnetic Pulse generator (N°AFIT-ENP-MS-16-S-075). *Experimental testing of a Van de Graaff generator as an Electromagnetic Pulse generator (N°AFIT-ENP-MS-16-S-075)*, 91. Ohio, Estado Unidos: AIR FORCE INSTITUTE OF TECHNOLOGY WRIGHT-PATTERSON AFB OH WRIGHT-PATTERSON AFB.
- Lee, K. S. (Diciembre de 1980). EMP Interaction: Principles, Techniques and Reference Data (A Compleat concatenation of Technology from the EMP Interaction Notes). EMP Interaction 2-1. (No. DC-EH-1289). Albuquerque, New Mexico, Estados Unidos: DIKEWOOD.
- Longmire, C. L. (Junio de 1986). Justification and Verification of High-Altitude EMP Theory, Part 1. Livermore, California, EEUU: Lawrence Livermore National Laboratory.
- M. de Querioz, A. C. (02 de Julio de 2014). *Operation of thr Wimshurst machine*. Obtenido de Electrostatic machines: <http://www.coe.ufrj.br/~acmq/whyhow.html>
- Máquina de Wimshurst*. (s.f.). Recuperado el 29 de 01 de 2018, de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina_de_Wimshurst
- Nelson, D. B. (Julio de 1971). Effects of Nuclear EMP on AM Radio Broadcast Stations in the Emergency Broadcast System. . Oak Ridge, Tennessee, Estados Unidos: Oak Ridge National Laboratory.
- Padilla Azúzar, D., & Garzon Barragan, I. (2008). El teléfono celular: una estrategia didáctica para la enseñanza del electromagnetismo. *Tecné, Episteme y Didaxis*(24), 103-112.
- Paez, J. L. (10 de Mayo de 2010). *Efectos producidos por el impacto de un rayo en una instalacion*. Recuperado el 12 de Marzo de 2017, de <http://www.ealuro.com/ealgx/tormentas.htm>
- Receptores de radio. (2008). 26-33. Las Palmas, España: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria . Obtenido de https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7053/7053985/tema_2_2007_2008_b.pdf
- Salom, E. V. (17 de Agosto de 2017). *¿Que es la humedad relativa del aire?* Obtenido de CienciaToday: <https://cienciatoday.com/la-humedad-relativa-del-aire/>

Shurenkov, V., & Pershenkov, V. (Diciembre de 2016). Electromagnetic pulse effects and damage mechanism on the semiconductor electronic. *Electronics and Energics*, 29(4), 621 - 629. doi:10.2298/FUEE1604621S

Villavicencio Torres, M., & Mendez Fragoso, R. (Junio de 2017). Enseñanza del electromagnetismo a través de aplicaciones experimentales. *Latin American Journal Physic Education*, 11(2).

Anexos

Anexo 1

Compatibilidad e interferencia electromagnética.

La **compatibilidad electromagnética** es la habilidad de un sistema de no causar interferencias electromagnéticas a otros equipos, pero al mismo tiempo ha de ser insensible a las emisiones que pueden causar otros sistemas.

Por otra parte, se puede definir una **interferencia electromagnética (EMI)** como la emisión de energía electromagnética que degrada o perjudica la calidad de una señal o el funcionamiento de un sistema.

En la figura 1 se representa el esquema básico de los elementos que intervienen en un problema de EMC. Hay que remarcar que solo se habla de interferencia siempre y cuando se provoque un mal funcionamiento en el receptor. (i Arnau, 2012)

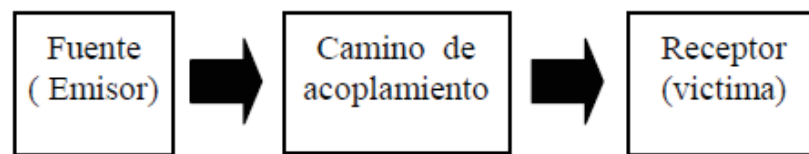


Figura 1. Elementos básicos de un problema de EMC tomado de (i Arnau, 2012).

Fuentes de EMI.

Existen dos tipos de fuentes de interferencias electromagnéticas, las que se pueden considerar como fuentes de EMIs naturales y fuentes de EMIs que aparecen debido a la acción del hombre.

Como fuentes de EMIs naturales se encuentran los relámpagos que pueden llegar a ofrecer descargas de hasta 10 KV o efectos solares que afectan a la ionosfera.

Como fuentes de EMIs debido a la acción del hombre se encuentran:

- Las descargas electrostáticas.
- Sistemas eléctricos y electrónicos.
- Elementos de telecomunicaciones.
- Pulsos electromagnéticos (explosión nuclear, corrientes de 10 KA.) (i Arnau, 2012)

Mecanismos de propagación de las EMI.

Según el medio de propagación (Fig. 2) que utilice la perturbación o interferencia electromagnética para perjudicar el funcionamiento de un equipo o la calidad de una señal, se puede establecer una clasificación de EMI como EMI conducidas, EMI de acoplamiento capacitivo o inductivo y EMI radiadas.

- Las EMI conducidas se propagan a través de cables ya sean de alimentación, señal o tierra, y su contenido frecuencial nunca superará los 30 MHz.
- Las EMI propagadas por acoplamiento capacitivo se producen por efecto de campo eléctrico. Su principal fuente son los puntos donde haya grandes variaciones de tensión respecto al tiempo.
- Las EMI propagadas por acoplamiento inductivo se producen por efecto de campo magnético. Su principal fuente son los bucles de intensidad que presentan grandes derivadas respecto al tiempo.
- Las EMI radiadas son debidas a la generación de ondas electromagnéticas. Se consideran radiadas y no acopladas cuando la distancia entre fuente y víctima es superior a la mitad de la longitud de onda de la interferencia. (i Arnau, 2012)

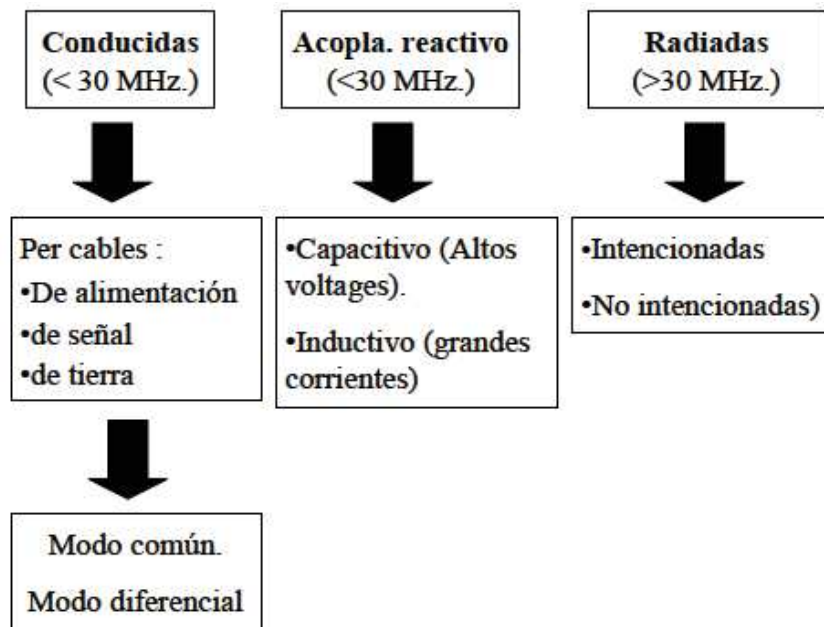


Figura 2. Tipos de propagación de las EMI tomado de (i Arnau, 2012).

Anexo 2

Generador de Van de Graaff



Imagen 28. Generador Van de Graaff.

El Generador Van De Graaff es básicamente una máquina electrostática que puede generar altos voltajes. Un Generador Van De Graaff típico consiste en una correa aislante que transporta carga eléctrica a una terminal. Las cargas que se envían en la correa se generan a través de un suministro de CC de alta tensión. Estas cargas se recogen en el interior de la terminal y se transfieren a su superficie externa.

Un generador Van De Graaff se puede utilizar para generar grandes cantidades de diferencia de potencial en el orden de unos 5 megavoltios. Generalmente utilizados para experimentos científicos, las cargas generadas se usan para acelerar partículas como iones. (Van de Graaff Generator, s.f.)

Funcionamiento del generador de Van de Graaff.

El generador Van De Graaff funciona simplemente según el principio de la electricidad estática. Toda la materia, como sabemos, está compuesta de átomos que además están constituidos por electrones, neutrones y protones. Los electrones llevan carga negativa mientras que los protones se consideran cargados positivamente. Cuando la cantidad de electrones y protones sigue siendo la misma, la materia se considera neutral a cargo. Una materia con carga negativa tiene más cantidad de electrones que protones, mientras que lo contrario es cierto para una materia con carga positiva. Los electrones pueden fluir de una materia a otra.

Cuando dos materiales se frotan entre sí, puede producirse un flujo de electrones en función de las propiedades triboeléctricas. Cuando se produce dicha transferencia, el material que pierde electrones se cargará positivamente y el que ganó electrones se carga negativamente. Básicamente, cómo se genera la electricidad estática.

Se requiere que el motor gire la correa a una velocidad constante alrededor de los dos rodillos. El rodillo inferior está construido de un material que tiene una propiedad triboeléctrica más fuerte. Ahora, cuando el motor comienza a girar la correa alrededor del rodillo inferior, los electrones se capturan desde la correa aislada al rodillo inferior. Lentamente, cada vez se concentra

más carga en el rodillo. Este fenómeno de concentración de carga resulta en repeler los electrones de las puntas del conjunto de cepillos. También comienza a atraer electrones de las moléculas de aire entre el rodillo inferior y el conjunto de cepillos. Debido a este fenómeno, las moléculas de aire con carga positiva se transportan en la correa alejándolas del rodillo con carga negativa. Por lo tanto, la correa se carga positivamente y se mueve hacia los rodillos superiores.

El rodillo superior está hecho o recubierto con un material que está más arriba en la serie triboeléctrica, como el nylon, por lo que trata de repeler la carga positiva en la correa. El cepillo superior está conectado directamente al interior del terminal o esfera de salida en un extremo y casi toca el rodillo superior y el cinturón en el otro. Los electrones en el pincel se sienten atraídos por las cargas positivas en el cinturón. Las partículas de aire se descomponen también y los electrones libres se mueven hacia la correa. La esfera absorbe toda la carga y el exceso de carga se extiende al exterior de la salida o esfera del terminal.

Es este simple efecto electrostático el que permite al generador Van De Graaff emitir voltajes muy altos continuamente. (Van de Graaff Generator, s.f.)

Anexo 3

Máquina de Wimshurst.



Imagen 29. Máquina de Wimshurst.

La máquina de Wimshurst es un generador electrostático de alto voltaje desarrollado entre 1880 y 1883 por el inventor británico James Wimshurst (1832 - 1903). Tiene un aspecto distintivo con dos grandes discos a contrarrotación (giran en sentidos opuestos) montados en un plano vertical, dos barras cruzadas con cepillos metálicos, y dos esferas de metal separadas por una distancia donde saltan las chispas. Se basa en el efecto triboeléctrico, en el que se acumulan cargas cuando dos materiales distintos se frotran entre sí.

Estas máquinas pertenecen a una clase de generadores que crean cargas eléctricas por inducción electrostática. En un principio las máquinas de esta categoría fueron desarrolladas por Wilhelm Holtz (1865 y 1867), Augusto Toepler (1865), y J. Robert Voss (1880). Las máquinas más antiguas son menos eficientes y exhiben una tendencia

imprevisible a cambiar de polaridad. La máquina de Wimshurst no tiene este defecto. (Máquina de Wimshurst, s.f.)

Funcionamiento de la máquina de Wimshurst.

La máquina Wimshurst es una "máquina de influencia", un generador electrostático que utiliza las cargas ya presentes para generar más cargas por inducción electrostática. No depende de la fricción para su funcionamiento. Tenga en cuenta que la máquina se carga con cada mitad de cada disco con una polaridad, con límites en las barras de neutralización. Las dos barras neutralizadoras se muestran flotantes, pero no hace ninguna diferencia en la operación si están conectadas a tierra. En la parte superior e inferior, las cargas son opuestas, y en los lados iguales. Con cualquier desequilibrio de carga inicial pequeño, la máquina caerá rápidamente en esta configuración.

Después de esto, cuando un sector toca una escobilla neutralizadora, se le atrae la carga, con una polaridad opuesta a las cargas en el otro disco, debido a la influencia del campo eléctrico generado por los sectores circundantes. Dado que hay varios sectores que inducen carga en un solo sector, se atrae más carga de la que está presente en cada uno de los sectores opuestos, siempre que los discos y sectores estén a una distancia suficientemente pequeña.

El efecto es que las cargas progresivamente más grandes se ven atraídas por los sectores neutralizados a medida que los discos giran, y los voltajes en todas las posiciones del sector fijo crecen exponencialmente. La acumulación se detiene cuando la densidad de carga en las superficies del sector crea un campo eléctrico lo suficientemente intenso como para causar una rotura en el aire, generalmente justo antes de que lleguen a los cepillos neutralizadores.

La máquina entonces opera generando una corriente constante en el circuito de salida, con una tensión máxima limitada por chispas a través del camino formado por una serie de sectores y una varilla neutralizadora, o por otras pérdidas en la estructura debido a aislamiento insuficiente.

Las chispas brillantes requieren una corriente intensa. La corriente se puede obtener almacenando la carga extraída de los discos giratorios en condensadores de alto voltaje (frascos de Leyden) conectados a través de los terminales de la máquina. El diseño clásico comprende dos jarras Leyden con los terminales aislados conectados uno a cada terminal, y los terminales externos interconectados. La chispa generalmente consiste en dos bolas metálicas conectadas por barras de metal a los colectores de carga. Se pueden obtener chispas significativamente más largas al agregar

una bola más pequeña unida al terminal positivo. Esto aumenta el campo eléctrico alrededor del terminal positivo, forzando a la ionización del aire a comenzar en el lado positivo del espacio, en lugar de en el lado negativo, como ocurre con un espacio simétrico. La ionización positiva forma una bonita estructura en forma de penacho (que se puede ver en la oscuridad) apuntando en dirección opuesta al terminal positivo, que se conecta fácilmente a la corona difusa que emite el terminal negativo. Cuando se establece la conexión, se produce una chispa, con los electrones que fluyen del terminal negativo al positivo. (M. de Querioz, 2014)