



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

Trabajo de Fin de Grado

FÍSICA DE PELÍCULA DESCARGAS ELÉCTRICAS Y SUS EFECTOS

Grado en Física

Autor:

Patricia Martín Sánchez

Tutores:

Ana Cristina López Cabeceira

Ismael Barba García

Resumen

En el mundo cinematográfico, se da en ocasiones el caso de que las películas no están bien documentadas, que no han contratado asesores científicos o bien, que algunos detalles no se corresponden con la realidad de acuerdo con las leyes de la física. Esto puede ocurrir porque algunos directores se centran tanto en la espectacularidad de las escenas y de los poderes y peleas, que es posible que dejen de lado el realismo.

El objetivo de este TFG es observar y analizar ciertas escenas de diferentes películas y series para comprobar su viabilidad. Dentro del amplio abanico de efectos físicos presentes en películas se han escogido las descargas eléctricas, por su espectacularidad e impactantes resultados.

En este trabajo se estudian tanto las tormentas imposibles (como las que producen superhéroes como *Thor* o Tormenta (Storm) de los *X-Men*), los descargas que se generan de forma natural (pudiendo ocasionar alguna muerte como en *A dos metros bajo tierra* o permitiendo al protagonista salvarse como le pasa a Doc en *Regreso al Futuro*), y los descargas generados artificialmente por instrumentos como las Bobinas de Tesla (utilizadas como trucos de magia en *El truco final*). También se estudian algunos métodos de prevención de estos descargas como la Jaula de Faraday o los efectos que producen estas descargas en el cuerpo humano, y se aplica en el estudio de las diferentes escenas.

Este trabajo consta de una base teórica inicial que desarrolla todos los conceptos físicos necesarios y realiza una recopilación bibliográfica de los conceptos necesarios y una parte práctica donde se estudian las diferentes escenas que se han escogido. El trabajo incluye también un Anexo de varias películas que se estudiaron inicialmente, aunque finalmente no han aparecido en la versión final.

Una vez realizado el trabajo, se puede concluir al final que, de las seis escenas analizadas, y suponiendo ciertas licencias creativas o imaginarias de los directores, en cuatro de ellas se ha encontrado una justificación física. Esto demuestra que o bien el trabajo de los asesores no es el que debería en algunas ocasiones, o bien no se les hace caso o quizá, en ciertas películas, no dispongan de ellos.

ATENCIÓN: Este trabajo incluye varios códigos QR que enlazan con las escenas que se están analizando. Para leerlos, utilice su teléfono móvil.

Abstract

In the film world, it sometimes happens that films are not well-documented, that they have not hired scientific advisors or that some details do not correspond to reality according to the laws of physics. This can happen because some directors focus so much on the spectacularity of the scenes and the powers and fights, that it is possible that they leave aside the realism.

The objective of this Final Project is to observe and analyze certain scenes from different movies and series to check their viability. Within the wide range of physical effects present in films, electric discharges have been chosen for their spectacularity and impressive results.

In this work we study both the impossible storms (as those that produce superheroes such as Thor or Storm), the discharges that are generated naturally (being able to cause some death) as in “Six Feet Under” or allowing the protagonist to save himself as Doc does in “Back to the Future”), and discharges artificially generated by instruments such as Tesla Coils (used as magic tricks in “The Prestige”). Some methods of preventing these discharges are also studied, such as the Faraday Cage or the effects that these discharges produce in the human body, and it is applied in the study of the different scenes.

This work consists of an initial theoretical base that develops all the necessary physical concepts and performs a bibliographic compilation of the necessary concepts and a practical part where the different scenes that have been chosen are studied. The work also includes an Annex of several films that were initially studied, although they have not finally appeared in the final version.

Once the work is done, it can be concluded at the end that, assuming certain creative or imaginary licenses of the directors, four out of the six analyzed scenes could be possible. This shows that the work of the advisors is sometimes not as good as it should be.

WARNING: This work includes several QR codes that link to the scenes that are being analyzed. In order to read them, use your mobile phone.

Índice general

Resumen	3
Abstract	5
Lista de figuras	10
Lista de tablas	11
Agradecimientos	13
1. Introducción	15
1.1. Objetivo y estructura del trabajo	15
2. Principios generales	17
2.1. Métodos de descarga	17
2.1.1. Electricidad estática	17
2.1.2. Fenómenos atmosféricos	20
2.1.3. Alta tensión	21
2.2. Métodos de protección	22
2.2.1. Jaula de Faraday	22
2.2.2. Pararrayos	24
3. Efectos de las descargas en el cuerpo humano	29
4. Tormentas	37
4.1. Base teórica	38
4.1.1. Formación de tormentas	38
4.1.2. Clasificación y formación de rayos	46
4.1.3. Efectos relativos a los rayos	52
4.2. Análisis de las escenas	53
4.2.1. Escena 01: X-Men	54
4.2.2. Escena 02: Thor	59
4.2.3. Escena 03: A dos metros bajo tierra	64
4.2.4. Escena 04: Regreso al futuro	70
5. Bobina de Tesla	73
5.1. Base teórica	73
5.1.1. Principios básicos	73
5.1.2. Funcionamiento de una Bobina de Tesla	77
5.1.3. Componentes principales de una Bobina de Tesla	80
5.1.4. Formulación teórica	81
5.2. Análisis de las escenas	84
5.2.1. Escena 05: El Truco Final	84
5.2.2. Escena 06: El Aprendiz de Brujo	88
6. Conclusiones	91
Bibliografía	93
Anexo I: Películas restantes	95

Índice de figuras

2.1. Ejemplos de descargas eléctricas en películas	17
2.2. Electrificación por contacto	19
2.3. Fenómeno de inducción [11]	20
2.4. Jaula de Faraday en la película El Aprendiz de Brujo	23
2.5. Pararrayos de Franklin [10]	26
2.6. Pararrayos piezoeléctrico [10]	26
2.7. Pararrayos modo Jaula [10]	27
3.1. Valor de la impedancia interna en función de la trayectoria [11]	31
3.2. Valores de la impedancia total del cuerpo humano [11]	32
3.3. Zonas de efectos de la relación tiempo/corriente alterna [11]	33
3.4. Zonas de efectos de la relación tiempo/corriente continua [11]	34
3.5. Ciclo del corazón, vulnerabilidad y relación con la tensión [11]	35
3.6. Gráfica de la corriente en función del tiempo cuando cae un rayo [25]	36
4.1. Mapa de impacto de rayos [10]	37
4.2. Diagrama oblicuo T, log (P) [17]	39
4.3. Isobaras [17]	39
4.4. Isotermas [17]	40
4.5. Adiabática seca [17]	40
4.6. Adiabática saturada [17]	41
4.7. Diagrama T, log (P) para Palma de Mallorca [23]	41
4.8. Escala de Beaufort	42
4.9. Diagrama para ascenso de una masa de aire seca [23]	43
4.10. Diagrama para ascenso de una masa de aire seca	44
4.11. Diagrama para ascenso de una masa de aire humedo	45
4.12. Diagrama real para ascenso de una masa de aire humedo [23]	46
4.13. Tipos de cizalladura	47
4.14. Supercélula (Foto por Daniel Revilla)	47
4.15. Rayos nube-tierra (Fotos por Daniel Revilla)	49
4.16. Rayos nube-nube (Foto por Daniel Revilla)	50
4.17. Distribución de cargas en la nube	50
4.18. Formación de un rayo negativo [24]	51
4.19. Parámetros característicos de los rayos [25]	52
4.20. Diferencia de potencial que puede producir un rayo [12]	53
4.21. Diferencia de potencial en función de la distancia [12]	53
4.22. Cartel de la película X-Men	54
4.23. Mutantes de la Escuela de Charles Xavier. Tormenta en el centro	54
4.24. Creación de una tormenta, 3 imágenes de la película en un intervalo de 2s. “X2: United”	55
4.25. Hipótesis del calentamiento del aire. “Días del futuro pasado”	56
4.26. Tormenta usando sus poderes en el interior de un avión. “X2: United”	57
4.27. Tormenta levitando gracias a las corrientes ascendentes. “X-Men”	57
4.28. Poster de las películas principales de Thor	59
4.29. Personajes recurrente en las películas de Thor	59
4.30. Escena de Thor Ragnarok: Creación de rayos desde el propio cuerpo	60
4.31. Thor con su Mjolnir	60
4.32. Analogía con un condensador	61
4.33. Rayo en un avión	62
4.34. Mjolnir	63

4.35. Escena de Avengers Infinity War: Cambio del martillo por un hacha con el mango de madera, parte del cuerpo de Groot	63
4.36. Logo “A dos metros bajo tierra”	64
4.37. Reparto de “A dos metros bajo tierra”	64
4.38. Escena de ¿Puedo salir ahora?	65
4.39. Posibles descargas a un paraguas	66
4.40. Distintas intensidades de descargas en funcion de la frecuencia y la intensidad [25]	67
4.41. Resistencia de un objeto respecto a la energía disipada por efecto Joule [25]	67
4.42. Pulsos de cada rayo: Bajo(rojo), Típico(azul), Alto(verde) y Extremo(naranja)	68
4.43. Portadas de la trilogía <i>Regreso al Futuro I, II y III</i>	70
4.44. Reparto principal de las películas	70
4.45. Escena de Regreso al futuro	71
4.46. Esquema de asociación en paralelo de Doc y el cable	72
5.1. Representación de la impedancia en el espacio complejo	75
5.2. Circuito LC en serie	76
5.3. Relación velocidad angular resonante - corriente	77
5.4. Esquema de una Bobina de Tesla	77
5.5. Carga del condensador primario	78
5.6. Oscilaciones entre el circuito primario y secundario	78
5.7. Representación de la amplitud de las ondas a lo largo del tiempo para las bobinas primaria y secundaria. Proceso de 3 rebotes	79
5.8. Decaimiento del circuito secundario	79
5.9. Cartel de la película El Truco Final	84
5.10. Escena del protagonista con Nikola Tesla	84
5.11. Máquina que fabrica Nikola Tesla	85
5.12. Presentación de inventos	85
5.13. Jaula de Faraday que usa	86
5.14. Esquema de una Jaula de Faraday imperfecta	87
5.15. Cartel de la película El Aprendiz de Brujo	88
5.16. Escena de la película El Aprendiz de Brujo donde se ve una Jaula de Faraday y varias Bobinas de Tesla	89

Índice de tablas

2.1. Serie triboeléctrica	18
2.2. Coeficiente 1 [9]	25
2.3. Coeficiente 2 [9]	25
2.4. Coeficiente 3 [9]	25
2.5. Coeficiente 4 [8]	25
2.6. Coeficiente 5 [8]	25
3.1. Diferentes efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo [13]	30
3.2. Comparación corriente continua con corriente alterna [13]	35
4.1. Rayos que caen en función de la geografía [12]	49
4.2. Diferentes energías (en TJ) dependiendo del tipo de nube y la altura a la que se encuentra	62
5.1. Impedancia de cada componente	75

Agradecimientos

Después de años de esfuerzo y mucho trabajo duro, se puede ver el final de este ciclo con la escritura de este trabajo. El Grado en Física para mí ha sido un trabajo de superación, de ponerme a prueba, de muchos disgustos, pero también victorias, como lo es el conocimiento del mundo que nos rodea, y no hay mayor satisfacción que el poder mirar atrás y darte cuenta de todo lo aprendido pese a todo lo sufrido.

Debido a lo ambicioso que era el trabajo, había campos algo desconocidos para mí, como el de la meteorología y la creación de las tormentas. Sin ello no podía explicar las películas que se habían escogido como parte del trabajo. Gracias a Víctor Manuel González, uno de los dos administradores del foro de meteorología www.foro.tiempo.com y miembro de la asociación de meteorología ACAMET, conseguí entender y aprender sobre la formación y desarrollo de tormentas, y sin todas esas tardes dedicadas a explicaciones, resolución de dudas y correcciones, esto no habría sido posible. También le quiero agradecer por llevarme junto a él, a Sergio Javier González y Daniel Revilla a las cazas de las últimas tormentas que han tenido lugar estos meses. Las explicaciones magistrales y los documentos gráficos que pude obtener esos días han formado parte de este trabajo. Por otra parte, me alegro un montón por ellos, ya que consiguieron salir en el canal 7 de Radio Televisión de Castilla y León mostrando vídeos e imágenes tomadas en una de las cazas a las que fuimos. Por otro lado, gracias al foro de meteorología, que me han proporcionado las imágenes que necesitaba y resuelto alguna duda.

Dar las gracias también a todos mis compañeros que me han seguido durante toda esta etapa, y que finalmente se han convertido en mi segunda familia. Las tardes dedicadas a hablar sobre películas, discusiones y miles de ideas que salieron de ahí han dado forma a este trabajo, gracias también por todas las imágenes, vídeos y artículos interesantes que me han mandado, que aunque alguno no sirviera mucho, me conseguían sacar una sonrisa. En especial, gracias a José Luis Martín, Gabriel Pérez, Marcos Herreras y Mario Rabanillo, pues aquella noche aparecieron las ideas claves para este trabajo.

Hacer mención especial a Mario Rabanillo, Arquitecto, pues me ha proporcionado gran parte del material usado para la redacción de este trabajo, tanto bibliografía como imágenes y gráficas. Por todo el ánimo, apoyo y la tranquilidad cuando algo salía mal.

Gracias también a mis padres, por darme ese empujón que necesitaba para entrar en la carrera que siempre quise pero que en el momento de la verdad, tanto miedo me dio seleccionar. Por no dejarme tirar la toalla y ayudarme en todo lo que estaba en su mano. Por todo el apoyo que aunque ellos no lo sepan, siempre he agradecido mucho.

Y por último, pero no por ello menos importante, gracias a mis tutores, Ana Cris e Ismael por ayudarme con este trabajo. Desde la elección de la temática, a la búsqueda de ejemplos, criba de documentos, por resolverme todas las dudas, y sobre todo, por todo el tiempo empleado para que esto pudiera hacerse real.

Capítulo 1

Introducción

Los rayos son un fenómeno de descarga eléctrica que a todo el mundo atrae y llama la atención: ya sea por su belleza o por lo aterradores que pueden llegar a ser. Todos los días, nos encontramos en nuestra vida diaria descargas eléctricas, aunque generalmente no nos damos cuenta, salvo en momentos muy puntuales como puede ser cuando recibimos un calambre provocado por un aparato eléctrico o vemos un gran destello en el firmamento.

Si nos paramos a pensarlo, en las películas más espectaculares nos encontramos estas descargas y, aunque en muchas ocasiones estas películas cuentan con asesores que se encargan de mantener la credibilidad de lo que ocurre en pantalla, es posible que nos surjan algunas dudas sobre ciertas escenas que nos llevan a pensar si eso en realidad podría suceder o no.

Está claro que los superhéroes y los superpoderes no existen, pero eso no quita para que los productores de las grandes superproducciones quieran hacer sus películas tan creíbles que nos hagan imaginar que estos fenómenos podrían ocurrir algún día. Sin embargo, hay muchos directores que se centran tanto en la espectacularidad de las escenas y de los poderes, peleas que están representando, que es posible que dejen de lado la veracidad científica.

1.1. Objetivo y estructura del trabajo

Con estas bases, este trabajo analizará diferentes tipos de fenómenos de descargas eléctricas, para poder aplicarlos al estudio de ciertas escenas de películas escogidas y dar sentido a las posibles dudas que pudieran surgir sobre las mismas.

En primer lugar plantearemos cuáles son los principios generales que llevan a estos fenómenos y en los cuales se basan. Debido a que las descargas eléctricas es un campo muy amplio, este trabajo se centrará únicamente en las relacionadas con las películas escogidas. Los aspectos que se introduzcan en este capítulo se desarrollarán completamente en los apartados oportunos. Además, se expondrán los diferentes mecanismos usados para la protección de las mismas.

A continuación, se hará una breve reseña de los efectos que tienen las descargas eléctricas en las personas. Los aspectos a tratar serán cual es la intensidad máxima que el cuerpo humano puede soportar y cuáles serían letales, además de los recorridos que puede tener un rayo por el cuerpo humano.

El desarrollo principal de este trabajo consistirá en el estudio de diferentes formas de descargas eléctricas acompañadas del análisis de varias escenas de películas y se comparará con la física subyacente. Además del estudio de las descargas en estas escenas, el trabajo tratará también el estudio de alguno de los métodos que se han creado a lo largo de la historia para protegernos de éste fenómeno meteorológico, que por desgracia aún no podemos controlar pero hemos conseguido aprender a minimizar sus efectos.

Capítulo 2

Principios generales

En este apartado se estudiarán, de entre todos los existentes, los métodos de descargas ligados a las escenas escogidas. Además, como parte del estudio, el análisis de los métodos de protección más comunes también formará parte del mismo.

2.1. Métodos de descarga

Las descargas pueden aparecer de múltiples formas. Estas pueden ocurrir debidas a fenómenos como la **inducción electromagnética**, como se puede apreciar en la serie “*Impact*”; o quizá en el vacío mediante un campo de ruptura, como en “*El planeta de los simios*” o simplemente puede haber riesgo de electrocución cuando en una azucarera apilan más de un número determinado de sacos.



Figura 2.1: Ejemplos de descargas eléctricas en películas

Las formas en las cuales aparecen las descargas son muy amplias y este trabajo se centrará únicamente en la descarga electrostática, presente en las tormentas y fenómenos meteorológicos, además de las descargas debidas a la alta tensión.

2.1.1. Electricidad estática

A lo largo de la historia se ha estudiado mucho el origen de la electricidad estática hasta que finalmente se ha llegado a una teoría con una aceptación general. La teoría habla de cómo los electrones se emiten desde superficies sólidas cuando se alcanza energía suficiente, ya sea energía térmica, fotoeléctrica, electromagnética... (ya que se tiene que conseguir una energía determinada para poder arrancar un electrón de una superficie de un material determinado). A esta energía se la llama **función trabajo** y depende del material. La función trabajo es menor en los materiales conductores y mayor en los aislantes. Además disminuye con la temperatura [1].

Todo esto se recoge en el **efecto triboeléctrico** que se basa en la electronegatividad de los materiales, es decir, la capacidad de los átomos para perder o capturar electrones. Va a depender de la función trabajo de cada material, y además, dentro de un mismo material, la función trabajo también será diferente dependiendo de las condiciones de temperatura, rugosidad, etc. presente en cada material. La electrificación será más fuerte cuando la diferencia entre las funciones trabajo sea elevada, sin embargo, si las funciones trabajo son muy parecidas, la

transferencia de carga apenas será notoria [1].

	Mayor carga positiva
	+
16	Aire
15	Pien humana
14	Cuero
13	Piel de conejo
12	Vidrio
11	Cuarzo
10	Mica
9	Cabello humano
8	Nylon
7	Lana
6	Plomo
5	Piel de gato
4	Seda
3	Aluminio
2	Papel (con pequeña carga positiva)
1	Algodón (sin carga)
0	0
-1	Acero (sin carga)
-2	Madera (poca carga negativa)
-3	Polimetilmetacrilato
-4	Ámbar
-5	Lacre
-6	Acrílico(polímero)
-7	Poliestireno
-8	Globo de goma
-9	Resinas
-10	Goma dura
-11	Niquel, cobre
-12	Azufre
-13	Bronce, Plata
-14	Oro, Platino
-15	Acetato, Rayón
-16	Goma sintética
	-
	Mayor carga negativa

Tabla 2.1: Serie triboeléctrica

En la tabla 2.1 aparece una serie triboeléctrica, la cual muestra la electronegatividad de cada material en su carácter de donante o receptor de electrones. Se define como una lista de materiales dispuestos tal que, cualquier material se va a cargar positivamente después del contacto con cualquier otro colocado por debajo de él. Esta serie es orientativa, ya que como se ha comentado anteriormente, la electronegatividad va a depender de muchos factores. Las desviaciones al comportamiento esperado pueden darse debido a impurezas o quizá a roces asimétricos.

La electricidad estática se puede obtener por contacto, frotamiento o inducción.

→ *Contacto:*

Cuando se colocan dos materiales diferentes en contacto directo, hay un paso de electrones de una superficie a otra. La cantidad de transferencia viene marcada por la diferencia entre las funciones trabajo de los distintos materiales. En este proceso, el material con menor función trabajo actúa como material **donante**, y cede los electrones al material **receptor** (con una función trabajo más alta). En ese momento, se produce una superficie cargada positivamente y otra negativamente. El proceso dura hasta que hay

equilibrio (en el caso de que se deje evolucionar) o el punto en el que se separan las dos superficies [1].

En el caso de que las dos superficies se dejan en contacto, el proceso de cese de electrones finaliza cuando la diferencia de potencial entre las dos superficies es igual al desequilibrio entre los potenciales de las dos funciones trabajo. Esto se puede apreciar perfectamente en la figura 2.2:

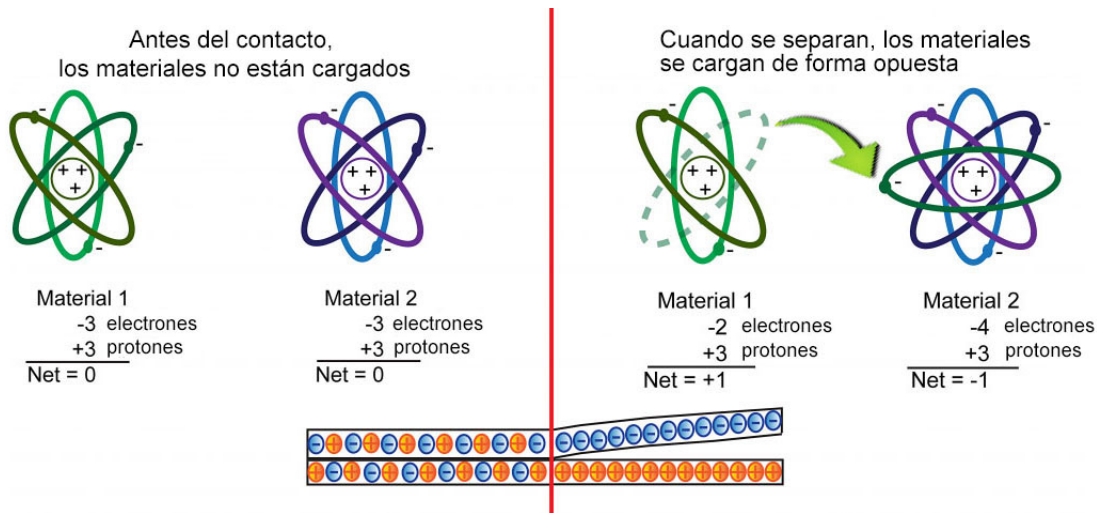


Figura 2.2: Electrificación por contacto

Esta forma de electrificación sólo va a depender del contacto entre las superficies.

→ *Fricción:*

Se produce cuando se frota una superficie con otra. Según Lüttgens y Wilson [1], el término electrificación por fricción ha estado en uso durante muchos años con la implicación de que es un proceso diferente de la electrificación por contacto. Sin embargo, gracias a ellos se sabe que la fricción en sí no influye en el proceso de electrificación. Básicamente, todo lo que hace es causar un aumento en el área de contacto entre las superficies. A pesar de esto, el término triboelectrificación todavía se usa para describir fenómenos que en realidad son de carga de contacto.

Estas dos formas de electrificación requieren de contacto: hay que juntar las dos superficies para obtenerla. Normalmente, cuando las dos superficies de contacto se separan, la carga neta en cada lado disminuye. Estos factores son, la resistividad de superficie (al separar las dos áreas, en los últimos puntos de contacto las cargas van a neutralizarse. Esto depende de la resistencia del camino que tomen las cargas para llegar a ese punto, que dependerá de la velocidad de separación y de la resistencia del material, y las descargas de gas (cuando se alcanzan unos 3MV/m al separarlas, se produce una descarga en la que se pierde parte de la carga almacenada).

→ *Inducción:*

Éste fenómeno aparece en un cuerpo cuando se produce una separación de cargas debido a un campo eléctrico. Cuando un cuerpo cargado se acerca a otro, eléctricamente neutro, éste inducirá en la superficie más cercana a él, una carga opuesta. En ese momento se ha producido una redistribución de las cargas de tal forma que en la parte cercana al cuerpo tiene una carga con un signo y en el lado opuesto, se tiene la carga contraria.

En la imagen 2.3 se presenta el ejemplo de una persona, aislada del suelo, que se acerca a una superficie cargada, en este caso, un rodillo cargado positivamente. La persona pasa por debajo de dicho rodillo, induciéndose una carga negativa en la cabeza mientras que en las piernas tendríamos una carga negativa. Cuando esta persona entre en contacto con una toma a tierra, la carga negativa se irá por ella, quedando

cargada positivamente. En el momento que se encuentre con otro cuerpo eléctricamente neutro, se producirá una diferencia de potencial y con él, una descarga.

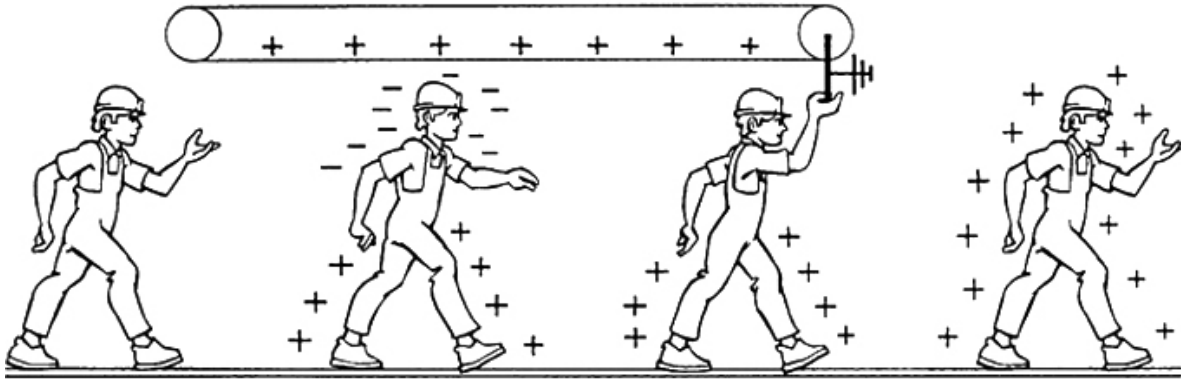


Figura 2.3: Fenómeno de inducción [11]

2.1.2. Fenómenos atmosféricos

Existen tres teorías por las cuales la electrificación de las nubes se lleva a cabo, aunque experimentalmente, se han mostrado evidencias únicamente de una de ellas. En este apartado se desarrollarán todas las teorías, y se explicará cual se ha escogido como referencia. Por un lado, está la **teoría convectiva**, la cual sugiere que la nube atrapa iones de la atmósfera y que las partículas que tienen carga se separan por la diferencia de velocidad de caída. Por otro lado están la **teoría precipitativa**. Esta explica cómo las partículas de una nube adquieren carga por la interacción de sus partículas. Esta teoría se separa en dos mecanismos: el *inductivo*, por el que las partículas están en presencia de un campo eléctrico y el *no inductivo*, donde no es necesario un campo eléctrico para que las partículas intercambien carga [2].

Teoría convectiva

Fue propuesta por G. Grenet en 1947 y fue ganando importancia gracias a B. Vonnegut. Se basa en que la fuente de iones positivos están situados en el suelo y se transportan por las corrientes ascendentes hasta lo alto de las nubes, donde atraen a iones de signo contrario de la atmósfera, que se pegan a las partículas de nuestra nube y se ven arrastrados hacia la base de la nube por las corrientes descendentes. En ese momento, se almacena una carga negativa, que hace que se generen más iones positivos en el suelo, provocando una realimentación del sistema.

Desde la propuesta de la teoría, numerosos investigadores han llevado a cabo experimentos demostrando que esto no se puede dar. J.H. Helsdon Jr *et al.* demostraron en 2002 que el mecanismo no es viable para la electrificación de las nubes. En el experimento que hicieron en 2002 usando un modelo tridimensional de una nube de tormenta obtuvieron unos resultados que mostraban una estructura débil y desordenada en la fase de maduración de la tormenta y en el momento de la disipación.

Teoría precipitativa inductiva

El mecanismo de esta teoría fue propuesto por Elster y Geitel en 1913. La teoría supone un campo eléctrico entre la base superior de la nube, cargada positivamente, y la zona negativa principal de la misma. Una partícula que cae desde lo alto de la nube, adquiere una polarización positiva en su parte inferior y una negativa en la superior de esta partícula. Si en el momento de la caída, choca con una partícula de menor tamaño por la parte inferior, la partícula con la que ha chocado se llevará parte de la carga inferior que tiene la partícula polarizada (positiva). La partícula de menor tamaño seguirá su movimiento de subida hasta lo alto de la nube, cargada ahora positivamente, depositando la carga en lo alto de la nube, mientras que la partícula mayor, ha quedado con una carga neta negativa. Esta continuará su camino hasta la zona con carga negativa, provocando un mecanismo de realimentación.

Inicialmente esta teoría era para gotas de agua, pero posteriormente, lo ampliaron para partículas de hielo. Analicemos las posibles combinaciones de partículas, las cuales presentan importantes limitaciones:

- Agua-agua: Cuando dos gotas de agua chocan, generalmente se unen para continuar el trayecto en vez de

rebotar.

- Agua-hielo: Cuando una gota de agua sobreenfriada choca con un granizo o trozo de hielo, es más probable que esta se congele a que rebote. De hecho, A.N. Aufdermaur y D.A. Johnson demostraron en 1972 que 1 de cada 100 gotas de agua que chocan contra granizo, rebotan. Esto hace que la posibilidad de transmisión de carga disminuya notoriamente.
- Hielo-hielo: Aunque en algunos experimentos se observó que en este caso si que se producía el intercambio de carga, en los años siguientes, investigadores demostraron que la carga predicha era mucho mayor que la que en realidad se daba.

Con todo esto, se demostró que esta teoría no explicaba correctamente la electrificación en las tormentas.

Teoría precipitativa no inductiva

Desde la aparición de esta teoría, diferentes investigadores han estudiado y realizado experimentos para comprobar si esta teoría se sostiene o, al igual que las anteriormente nombradas, existen evidencias suficientes para refutarla. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran que hay transferencia de carga en el momento de colisión del granizo con los cristales de hielo, en presencia de gotas de agua sobreenfriadas y sin campo eléctrico. La cantidad de carga va a depender de muchos factores, como la temperatura, contenido de agua líquida, los tamaños de las gotas en la nube, del tamaño de los cristales de hielo y de la velocidad de impacto entre granizo y los cristales de hielo.

Ya que esta teoría tiene evidencias de ser la correcta, se explicará en la subsección 4.1.2 Formación de rayos.

2.1.3. Alta tensión

Según la Comisión Electrotécnica Internacional, se llama alta tensión a aquellos sistemas eléctricos que trabajan por encima de los 1000V en corrientes alternas, y de 1500V en corrientes continuas. El uso de altas tensiones tiene muchas aplicaciones; estas instalaciones son vitales para transportar grandes cantidades de energía sin importar la distancia, ya que al aumentar el voltaje, se disminuye la intensidad, manteniéndose la potencia.

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$$

$$V_2 \gg V_1 \Rightarrow I_1 \ll I_2$$

Como las pérdidas de energía dependen de la intensidad de la corriente, así como la sección del conductor, es un sistema más eficiente por lo que se usa como vehículo de la energía desde los centros de producción eléctrica hasta los puntos de consumo. Esto es lo que permitió que la propuesta de corriente alterna de Tesla superara a las redes de distribución de corriente continua de Thomas Edison, que tenían la desventaja de necesitar generadores cada pocas manzanas.

Por último, pueden ser utilizadas también para la prueba de fenómenos físicos que necesitan de estos valores de tensión tan elevados, como sistemas de rayos X.

La alta tensión puede darse para cualquier frecuencia de red eléctrica, desde los 50Hz que llegan a las viviendas, hasta varios miles de Herzios; e incluso en corriente continua, como se ha mencionado anteriormente. La variación de la tensión eléctrica, en la búsqueda de esa alta tensión, se lleva a cabo mediante el uso de transformadores en corriente alterna.

Para poder entender los principios de funcionamiento de un transformador, es necesario explicar primero el fenómeno físico de la inducción. Una de las ecuaciones de Maxwell, la ley de Ampere, nos dice que la corriente que fluye a través de un cable genera un campo magnético a su alrededor. Otra de las ecuaciones de Maxwell, la ley de inducción de Faraday, nos dice que, por el contrario, si es el campo magnético el que cambia en el tiempo, este inducirá un voltaje a través del cable proporcional a la velocidad de cambio del campo magnético. Este es el principio básico en el que se basan estos elementos.

Un transformador consiste en dos bobinas de alambre enrolladas cada una alrededor de un núcleo, que suele ser de hierro blando o ferrita. Cuando una corriente alterna se produce en la primera bobina, se establece un campo magnético oscilante en su núcleo. Esto induce una corriente oscilante en la segunda secundaria. Como el voltaje, en términos de fuerza electromotriz inducida, en cada bobina es el mismo, el voltaje total en las bobinas es proporcional al número de vueltas. Si la bobina secundaria posee un número mayor de vueltas de cable que la primaria, aumenta el voltaje en la misma proporción.

La obtención de altas tensiones con frecuencias eléctricas muy elevadas se consigue mediante el uso de Bobinas de Tesla. Una Bobina de Tesla es un instrumento capaz de generar señales de alta tensión a partir de la tensión de red mediante el uso de dos bobinas que están acopladas magnéticamente y funcionan en resonancia. El fenómeno de la resonancia es el que permite que se alcancen unos valores de amplificación superiores a los que se consiguen con los transformadores explicados hasta ahora.

Para que este fenómeno ocurra, las bobinas se conectan en serie cada una a un condensador, constituyendo lo que se conoce como un sistema LC, y funcionando a través del proceso que se explicará en el apartado 5.1.2 Funcionamiento de una Bobina de Tesla.

La formación de unos voltajes tan elevados, y su concentración en un único elemento dentro de la bobina, el toroide, ubicado en su parte superior, provoca que estos instrumentos despidan grandes rayos que se asemejan a los producidos por las tormentas, por lo que han sido en ocasiones utilizados para producir estos efectos en películas y teatro.

2.2. Métodos de protección

La protección frente a las descargas eléctricas es de suma importancia ya que estas pueden causar efectos devastadores, tanto para las personas como para el resto de objetos. En este trabajo, se estudiará el concepto de Jaula de Faraday y cómo puede emplearse para la protección frente a las descargas, y los pararrayos, que protegen los edificios frente a los rayos procedentes de una tormenta.

2.2.1. Jaula de Faraday

La búsqueda de documentos que contuvieran algo relacionado con la Jaula de Faraday de cara a los tratamientos matemáticos o aspectos físicos, más allá de lo que ocurre dentro de los conductores, ha entrañado grandes problemas, por lo que solo se conoce un tratamiento cualitativo. Según Chapman, S. J., Hewett, D. P. and Trefethen, L. N. [5]:

*“One would imagine that there must a standard mathematical analysis of electrostatic or electromagnetic screening to be found in physics and engineering textbooks, or at least in more specialized monographs or in the journal literature. It seems that this is not so. There may be an analysis known to a specialized community somewhere, but we have consulted with enough people on this subject to be confident that no such treatment is widely known.”*¹

La Jaula de Faraday es una medida de protección a las descargas eléctricas amplímanete conocida. Esta fue observada por Michael Faraday y en 1836 realizó un experimento con un cubo mallado de algo más de 3 metros y medio con el que demostró que, cuando se envuelve un objeto en un medio conductor, la carga va a residir sólo en la superficie, mientras que el objeto interior no se va a ver afectado por ella. El principio fundamental en el que se basó el experimento es que en el interior de un conductor en **equilibrio electrostático** el campo eléctrico es nulo, y esta es la base de la llamada Jaula de Faraday.

¹Uno imaginaria que debería haber un análisis matemático estándar de la investigación electrostática o electromagnética que se encontrará en los libros de textos de física y de ingeniería, o por lo menos en monografías más especializadas o en revistas. Parece ser que esto no es así. Puede haber un análisis conocido por una comunidad especializada en algún lugar, pero hemos consultado con suficientes personas en este sujeto a estar seguros de que existe ningún tratamiento de este tipo que sea ampliamente conocido (Traducido por la autora).



Figura 2.4: Jaula de Faraday en la película El Aprendiz de Brujo

El artículo [5] demuestra matemáticamente que la protección de una Jaula de Faraday aumenta a medida que el espaciamiento entre los barrotos de la jaula disminuye, además de depender del espesor del blindaje. Otro descubrimiento importante de este mismo artículo es que una de las personas que más desarrolló este fenómeno fue Richard Feynman, el cual demostró que la protección que ofrecía la Jaula de Faraday era exponencial respecto al distanciamiento de los barrotos, pero es un tratamiento erróneo según la investigación más reciente.

La Jaula de Faraday puede ser una cobertura continua de material conductor, o simplemente una malla reticulada de dicho material. Según el principio explicado en el párrafo superior, esta distribuye las cargas eléctricas del material con el que esta formada de tal manera que cancelan los efectos del campo eléctrico en el interior de la misma.

Puede utilizarse para proteger personas o equipamientos ante descargas repentinas, como puede ser la de un rayo ya que no permite que nada pase al interior. En nuestra vida cotidiana podemos ver sus efectos en los ascensores, que impiden que recibamos llamadas en su interior; cuando envolvemos una radio en papel de aluminio, que deja de sonar; aunque su principal aplicación es la protección de equipamiento electrónico sensible de ondas de radio externas o para el bloqueo de la emisión de estas ondas. Un último ejemplo que nos podemos encontrar en cualquier casa es el microondas: al introducir nuestro teléfono móvil dentro, la rejilla de la puerta del aparato no permite salir las microondas, pero si la luz, cuya longitud de onda es mucho más corta, por lo que podemos ver en el interior, pero no disponemos de cobertura de red ni podemos recibir llamadas.

Como ya se ha indicado, un conductor en equilibrio electrostático, en el cual las cargas pueden moverse libremente. Si el campo eléctrico no es nulo, las cargas libres se aceleran por la acción del campo, yendo las positivas en el mismo sentido del campo, mientras que las negativas van en el contrario. Esto genera un campo eléctrico que se opone al inicial, por lo que el campo eléctrico total debe estar en equilibrio.

Otra forma más sencilla de ver este fenómeno es que si hemos supuesto un conductor en equilibrio electrostático, cuando tiene un campo eléctrico en el interior, las cargas libres se aceleran. Aquí encontramos una situación en desequilibrio electrostático (ya que las cargas se mueven). Esto obliga a que el campo en el interior tenga que ser nulo. El hecho de que el campo eléctrico en el interior es nulo implica que las cargas únicamente pueden encontrarse en la superficie, proporcionando un aislamiento eléctrico en el interior del conductor de las posibles afecciones exteriores.

Este fenómeno tiene otra serie de implicaciones: por ejemplo, si el conductor tiene una densidad de carga, la carga estará distribuida en la superficie del conductor, pero no en el interior. Además, si el conductor tiene una forma irregular, la carga va a tender a acumularse en las zonas de mayor curvatura. Esto es lo que rige el *efecto puntas*, que es una propiedad que consiste en que los lugares con mayor densidad superficial de carga eléctrica de un conductor cargado son sus partes puntiagudas. Este efecto fue ya observado por Benjamin Franklin en 1755 [4], pero Franklin solo llegó a intuir que cuando los objetos eran más puntiagudos atraían las descargas (su trabajo era sobre todo cualitativo), sin embargo, Faraday hizo un estudio más exhaustivo y dio con la explicación...

2.2.2. Pararrayos

Un pararrayos es un dispositivo que se ubica en lo alto de los edificios y que se encarga de dirigir los rayos a través de un cable hasta la tierra, de tal manera que se disipen en el terreno y no produzcan desperfectos en el edificio o sus habitantes.

El pararrayos fue inventado por Benjamin Franklin en 1749, quien lo desarrolló y patentó para su uso residencial en 1753 y finalmente en 1760 presentó un modelo más fiable [6]. Simultáneamente se dieron dos casos que presentan características similares y que hacen que la originalidad acerca del primer pararrayos aun sea un misterio:

En la ciudad rusa de Nevyansk se construyó 28 años antes una iglesia en cuyo techo se ubicó una esfera metálica rodeada de puntas y conectadas por cables que rodeaba toda la torre hasta el suelo. Lo intrincado de esta solución hace dudar que la protección frente a los rayos fuera su función.

De la que sí que se tiene constancia de que se diseñara para tal propósito fue un pararrayos que se cree que diseñó el monje Prokop Divis en 1754 que consistía en una barra anclada a tierra y con la que esperaba disminuir los impactos de rayos sobre su iglesia. Pese a que se inventaron y se empezaron a usar en el siglo XVIII, no es hasta el 1916, de mano de Nikola Tesla, cuando se desarrolla la teoría de por qué funciona un pararrayos [7].

El principio de un pararrayos es que al producirse una tormenta, existe una diferencia de carga entre la base de la nube (carga negativa) y el suelo (carga positiva). Debido a la forma afilada del pararrayos, por acción del efecto punta, es capaz de ionizar el aire que lo rodea, y atraer las partículas de aire de la nube cargadas negativamente.

El pararrayos, además, produce una compensación del potencial eléctrico, neutralizando en parte la carga y reduciendo la diferencia de potencial nube-tierra hasta valores por debajo de 10000V y previniendo daños mayores en su entorno. Si se produjera un rayo, ofrecería el camino con menor resistencia para el rayo hacia el suelo.

Los pararrayos se colocan en los edificios según la normativa de edificación CTE-DB-SU-8, la cual indica cuando es necesario colocar estos dispositivos. La instalación de un pararrayos es necesaria en los siguientes supuestos [8] [9] :

- Cuando en su interior se manipulen sustancias tóxicas, radioactivas, altamente inflamables o explosivas;
- cuando la altura del edificio sea superior a 43 m;
- cuando la frecuencia esperada de impacto calculada sea superior al riesgo admisible, según establece el Código Técnico de la Edificación.

Para ello se definen los siguientes conceptos:

- N_e : Será la frecuencia esperada de impactos por año (impactos/año).
- N_a : Riesgo admisible (impactos/año).
- N_g : Densidad de impactos sobre el terreno. Es un dato conocido (impactos/año $\cdot m^2$).
- A_e : Superficie de captura equivalente del edificio aislado en m^2 . Es decir, una superficie imaginaria creada añadiendo alrededor del perímetro del edificio (a nivel del suelo) una distancia equivalente a 3 veces su altura (m_2).

La expresión por la cual se guía la frecuencia de impactos es:

$$N_e = N_g \cdot A_e \cdot C_1 \cdot 10^{-6}$$

con C_1 coeficiente dependiente de dónde esté situado el edificio. Este coeficiente se guía por la siguiente tabla:

Situación del edificio	C_1
Próximo a otros edificios o árboles de la misma altura o más altos	0.5
Rodeado de otros edificios más bajos	0.75
Aislado	1
Aislado sobre una colina o promontorio	2

Tabla 2.2: Coeficiente 1 [9]

Con todo esto, será necesario colocar un pararrayos cuando:

$$N_e > 5N_a$$

donde el riesgo admisible vendrá dado por la expresión:

$$N_a = \frac{5,5}{C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5} \cdot 10^{-3}$$

Análogamente, los coeficientes, vienen tabulados según las siguientes tablas 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6:

Tipo de construcción C_2		cubierta		
		metálica	hormigón	madera
estructura	metálica	0,5	1	2
	hormigón	1	1	1,25
	madera	2	2,5	3

Tabla 2.3: Coeficiente 2 [9]

Contenido del edificio	C_3
Edificio con contenido inflamable	3
Otros contenidos	1

Tabla 2.4: Coeficiente 3 [9]

Uso del edificio	C_4
Edificios no ocupados normalmente	0.5
Usos Pública Concurrencia, Sanitario, Comercial, Docente	3
Resto de edificios	1

Tabla 2.5: Coeficiente 4 [8]

Necesidad de la continuidad en las actividades	C_5
Edificios cuyo deterioro pueda interrumpir un servicio imprescindible (hospitales, bomberos...) o pueda ocasionar un impacto ambiental grave	2
Resto de edificios	1

Tabla 2.6: Coeficiente 5 [8]

Existen dos tipos fundamentales de pararrayos; pararrayos de puntas y pararrayos reticulares o de Jaula de Faraday [10]:

Pararrayos de puntas o Franklin:

Un pararrayos de puntas consiste en una única barra de material conductor de 2 a 4 metros de alto (generalmente acero galvanizado con punta de wolframio para poder resistir el calor inicial de rayo), conectado por un único cable a la tierra, y que ofrece una protección cónica del edificio desde su punto más alto. La punta

puede ser única o se puede hablar de una matriz de puntas para conseguir un área de protección mayor. De la base del pararrayos partirán una o dos conexiones a tierra mediante unos conductores de cobre de sección 50mm^2 , sujetos al edificio por una grapas. La base del conductor es necesaria protegerla con acero galvanizado. Este pararrayos se puede apreciar en la figura 2.5.

Estos pararrayos suelen usarse en edificios con poca superficie de planta y sin límite de altura. Si la superficie fuera grande, habría que colocar varios.

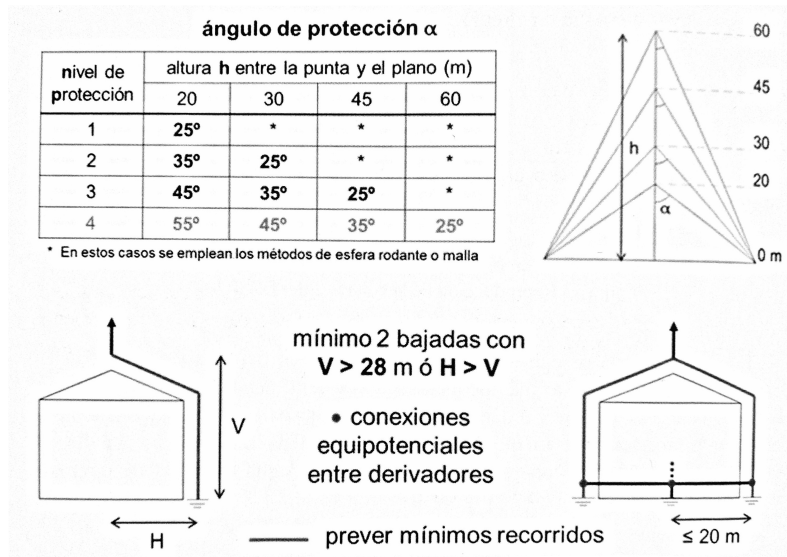


Figura 2.5: Pararrayos de Franklin [10]

Este tipo de pararrayos ofrece una compensación de potencia baja y sólo es efectivo en zonas de bajo riesgo. Hay otros modelos que ofrecen una mayor eficacia si el riesgo es más elevado:

- Los pararrayos radioactivos incluyen en su punta una pequeña cantidad de isotopo radioactivo que ioniza el aire alrededor y aumenta la diferencia de potencial entre la nube y el pararrayos. Estos ahora mismo están prohibidos su uso.
- Los pararrayos piezoeléctricos (esquema en figura 2.6) se aprovechan de su capacidad para generar cargas eléctricas a partir de cambios en la presión externa (aprovechando las rachas de viento y de la propia tormenta) para electrificarse e ionizar igualmente el aire alrededor, de forma natural y proporcional al aparato eléctrico de la tormenta. Es la alternativa al pararrayos radioactivo, que fue prohibido por la NTE-IPP (Normas Técnicas de Edificación de Instalaciones de protección pararrayos). El pararrayos reduce la resistencia del aire alrededor de él y generando así una vía sencilla para la descarga. El método de protección es el mismo que el de Franklin, con la única diferencia de que este, al ionizar el aire, comienza a lanzar un chisporroteo para liberar la carga que se produce en el piezoeléctrico, produciendo la disminución de la resistencia. Este tipo de pararrayos previenen de los cambios de polaridad entre la nube de tormenta y el suelo, pero el problema que tienen es que funcionan con un “retardo”, ya que necesitan un ambiente tormentoso para empezar a funcionar. En el caso de que cayera un rayo, aunque no funcionaran como pararrayos piezoeléctrico, puede funcionar de la misma forma que el de Franklin.

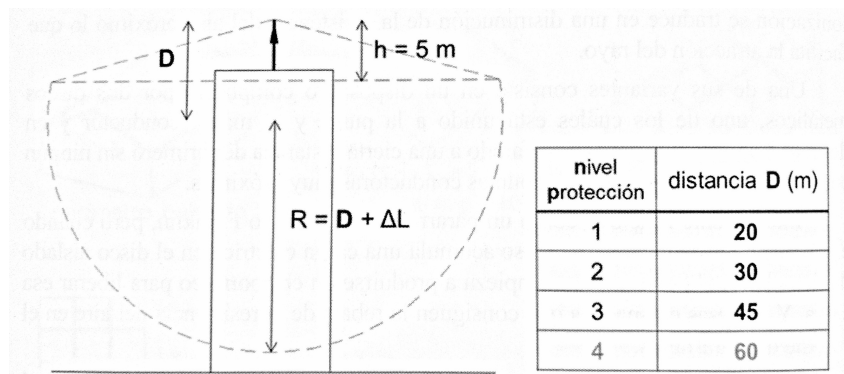


Figura 2.6: Pararrayos piezoeléctrico [10]

- Los pararrayos de corona solar incluyen en su punta un elemento eléctrico que genera iones continuamente, y son la alternativa legal a los pararrayos radioactivos.

Pararrayos reticulares:

Los pararrayos reticulares basan su funcionamiento en rodear el edificio de una jaula de materiales conductores conectados a tierra, así, en el caso de que el rayo impactara con el edificio, se toparía antes con un conductor que llevaría la descarga a tierra (figura 2.7. Se puede usar en cualquier tipo de edificio, pero son los que se usan para edificios de gran tamaño. Suelen ser más complejos y caros. Su funcionamiento es el mismo que el de una Jaula de Faraday.

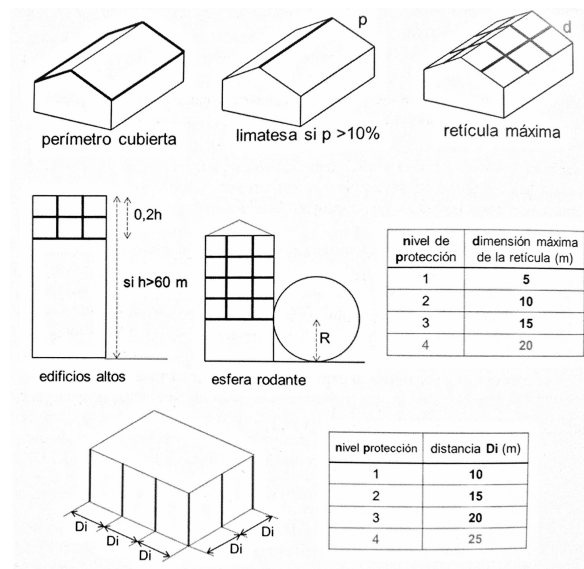


Figura 2.7: Pararrayos modo Jaula [10]

Además de estas medidas protectoras externas, existen unas medidas internas a los edificios para prevenir descargas eléctricas, como puede ser la red de tierra, como protección a los sistemas electrónicos. Para prevenir las instalaciones eléctricas lo que se hace es unir la estructura metálica del edificio, la parte metálica de la instalación, los conductores externos y el sistema externo de protección con conductores de equipotencialidad. Esto se hace para no existan diferencias de potencial entre dos puntos de edificio y que una persona pueda tocarlas o pueda conectarse un equipo sin llevarse una descarga.

Capítulo 3

Efectos de las descargas en el cuerpo humano

Una descarga eléctrica sobre el cuerpo humano puede producir multitud de reacciones fisiológicas, desde una simple contracción muscular, hasta la fibrilación, incluyendo quemaduras,... Además de estos efectos, la descarga producida por ejemplo por un rayo es capaz de provocar estragos añadidos como incendios, roturas,..., que pueden suponer un peligro para las personas igualmente.

Para que se produzca un “choque eléctrico”, y la corriente eléctrica circule por una persona, tienen que darse las siguientes circunstancias:

- Que exista una diferencia de potencial entre dos puntos de cuerpo.
- Que se establezca un circuito cerrado entre los dos puntos del cuerpo.
- Que el elemento que une esos dos puntos del cuerpo sea conductor.

El choque eléctrico, además de ser producido por la acción de un rayo, puede establecerse de muchas formas; bien de manera directa, tocando partes de instalaciones desprotegidas, o a través del contacto con elementos de una instalación que normalmente no están en tensión, como las carcasas de electrodomésticos, si no están bien colocadas. Los efectos que un rayo va a producir sobre el cuerpo humano no van a depender de la tensión de la corriente, sino de su intensidad. Además, la duración, o el camino que tome por el cuerpo, condicionarán su gravedad. En la siguiente tabla adjunta (tabla 3.1), se muestran los efectos de diferentes intensidades sobre el cuerpo humano:

En general, para valores usuales de corriente, los efectos son los siguientes:

- $> 0,5mA$: Se producen contracciones musculares.
- $> 10mA$: Se produce tetanización muscular.
- $> 25mA$: El diafragma se contrae y aparecen dificultades respiratorias.
- $> 80mA$: Se produce fibrilación ventricular.
- $> 50mA/mm^2$: Se producen quemaduras en esa parte del cuerpo.

Sin embargo, como ya se ha dicho, la duración del contacto y el camino que tome por el cuerpo, determinarán la gravedad del suceso: **para valores por debajo de los 150 milisegundos no hay riesgos, siempre que la intensidad no supere los 30mA**

Dentro del cuerpo humano, además de la piel, cada uno de los órganos internos ofrecerá un a resistencia, caracterizada por una impedancia, al paso de la corriente. Podemos distinguir varios términos: Z_i , impedancia interna del cuerpo; Z_{p1} y Z_{p2} , impedancia de la piel a la entrada y a la salida; y Z_t , impedancia total.

La impedancia interna del cuerpo depende de la trayectoria que siga la corriente dentro del mismo. Según la UNE 20572, y para tener unos valores de referencia, los valores de impedancia entre las diferentes partes del cuerpo y una mano (tomando como referencia la impedancia entre la mano derecha y la izquierda) son:

INTENSIDAD EFICAZ (mA) en corriente alterna a 50 Hz	DURACIÓN DEL CONTACTO	EFECTO FISIOLÓGICO
0 a 3	No influye	Umbral de percepción, no existe riesgo de electrocución
3 a 15	No influye	Imposibilidad de soltarse, variable hasta la tetanización
15 a 25	Minutos	Límite de la tolerancia, dificultad respiratoria, aumento de la presión arterial, contracciones de extremidades
25 a 50	Segundos	Fuerte tetanización, alteraciones cardiacas, incoscienza, fibrilación ventricular
50 a 5000 (5 A)	Se diferencian dos posibilidades: Si dura menos de un ciclo cardiaco o si dura más de un ciclo cardiaco	En el caso de que dure menos de un ciclo cardiaco existe un choque fuerte, pero no se produce fibrilación ventricular. En caso de que dure más de un ciclo, hay fibrilación ventricular, inicio de electrocución y marcas visibles en la piel
Superior a 5000 (5 A)	Dos casos: menor a un ciclo cardiaco o mayor a un ciclo	Cuando es menor a un ciclo hay fibrilación ventricular. El comienzo de la electrocución depende de la fase del ciclo cardiaco, incoscienza y marcas visibles en la piel, pero cuando es mayor se dará paro cardiaco reversible, quemaduras, incoscienza, marcas visibles en la piel

Tabla 3.1: Diferentes efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo [13]

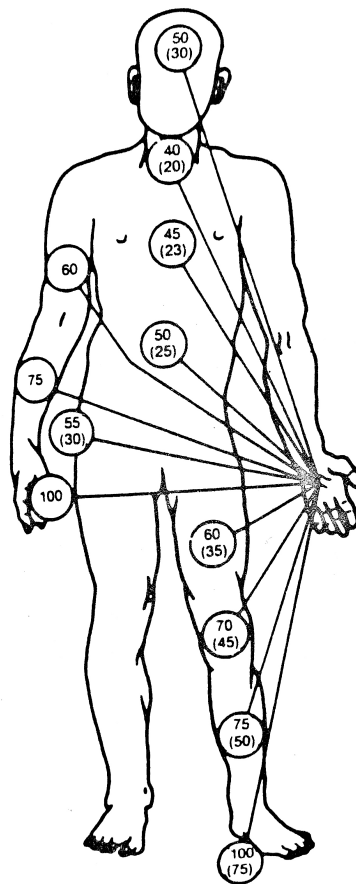


Figura 3.1: Valor de la impedancia interna en función de la trayectoria [11]

Entre paréntesis, en la figura 3.1 se encuentra el porcentaje de la impedancia del cuerpo humano para el trayecto relativo con la relación entre las manos. La cifra sin paréntesis es el valor desde una mano hasta el órgano seleccionado.

La impedancia de la piel depende de muchos factores, como el voltaje, la superficie de contacto, . . . , pero su valor decrece según aumenta la corriente.

De acuerdo con ambos conceptos, tanto la impedancia de la piel como la interna, es posible aproximar unos valores de impedancia totales del cuerpo humano, para corrientes “mano-mano” o “mano-piel”, como se relaciona en la figura 3.2:

La corriente siempre seguirá el camino dentro del cuerpo que menor resistencia le ofrezca. La mayor peligrosidad ocurre cuando el rayo atraviesa la caja torácica o la cabeza, porque es donde se encuentran los órganos más sensibles.

El tiempo de paso de la corriente por el cuerpo humano se relaciona de manera directa con los daños que pueda causar en las personas. El tiempo máximo que puede una persona soportar el paso de la corriente sin sufrir daños se le llama “umbral absoluto de tiempo”, y según los estudios está directamente influido por la fibrilación ventricular.

Para intensidades por debajo de los 30 mA, este fenómeno no llega a producirse, sin embargo, para corrientes superiores, el tiempo que dure el choque eléctrico a dicha intensidad determinará si este se produce, como se reproduce en la figura ??:

La descarga producida por un rayo, no puede asemejarse directamente a los efectos explicados hasta el momento, ya que la polaridad de la misma es continua, desde la nube hacia el suelo, y no alterna. Es posible establecer equivalencias entre los efectos que se producen bajo corriente continua y alterna:

- La intensidad de corriente continua es equivalente a 3,75 veces una corriente alterna de la misma intensidad.

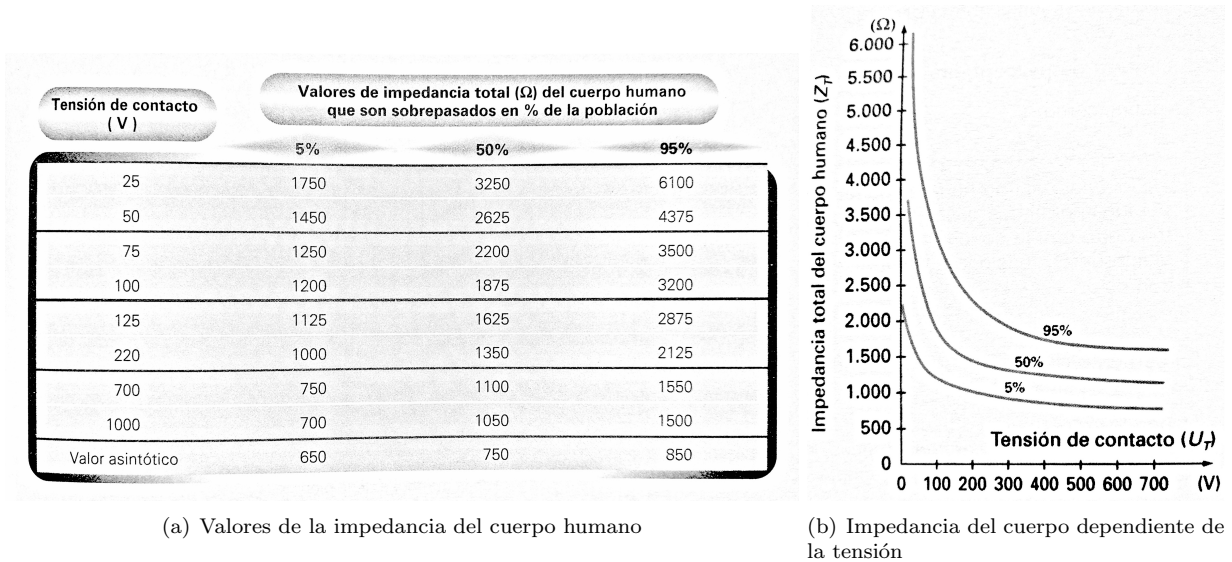


Figura 3.2: Valores de la impedancia total del cuerpo humano [11]

- El umbral de percepción se ubica en 2 mA.
- No existe un umbral de no soltar para intensidades inferiores a 300 mA.
- El umbral de fibrilación ventricular depende del sentido de la corriente en el cuerpo humano: ascendente o descendente. Para un rayo (circulación descendente), y para duraciones inferiores a 200 ms, el umbral es similar que si fuera corriente alterna. Para duraciones superiores a 200 ms, no es posible cuantificarlo, aunque se sabe que es mucho mayor.
- Por encima de 300 mA, es frecuente que provoque estados de inconsciencia.

Estas relaciones aparecen finalmente resumidas en la UNE 20572, tanto para corriente continua como para alterna, como indican las figuras 3.3 y 3.4 siguientes:

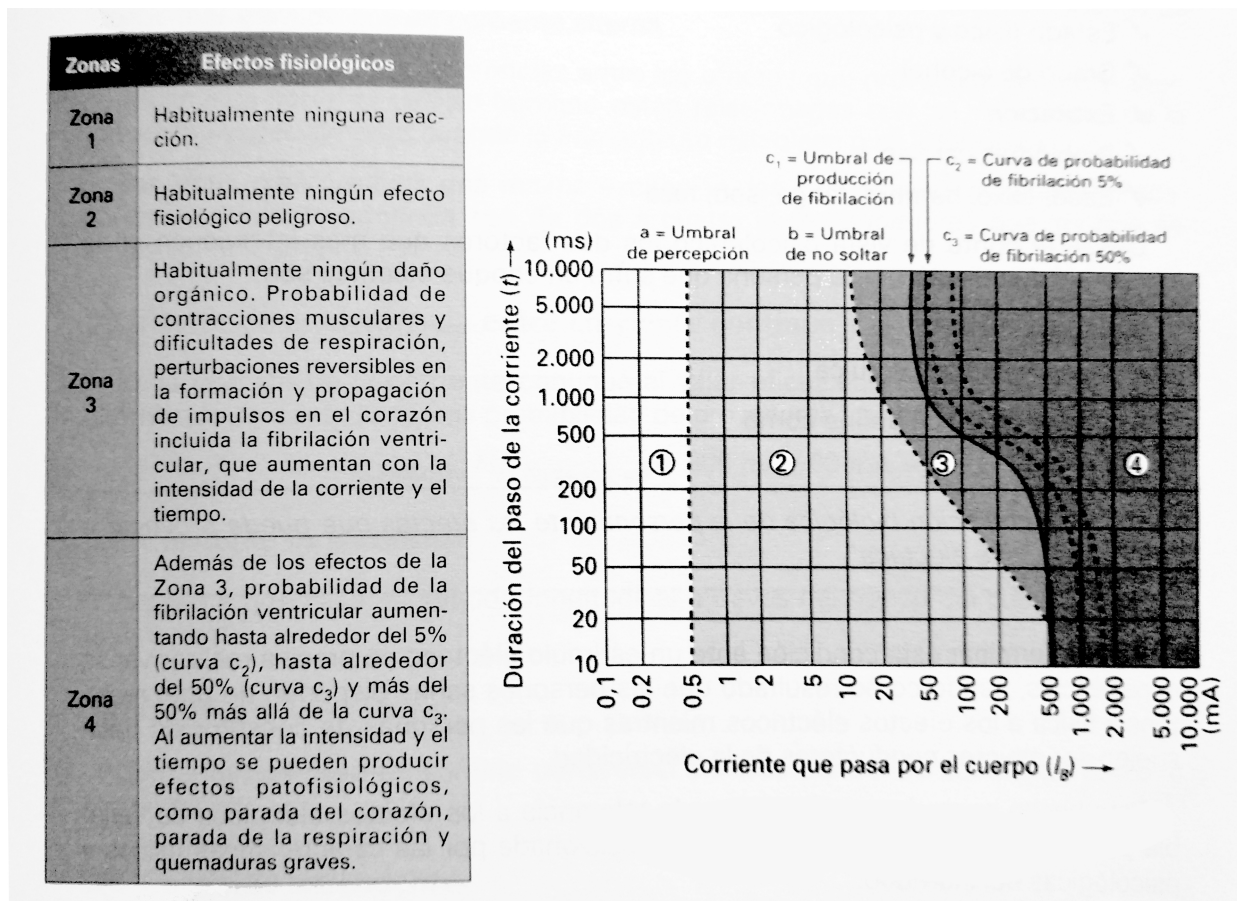


Figura 3.3: Zonas de efectos de la relación tiempo/corriente alterna [11]

Se debe tener en cuenta, que para lo que nosotros nos atañe, un rayo tiene un ancho de banda entre los 0 Hz y 1MHz [12]).

A continuación, se definen los diferentes umbrales en los cuales, el cuerpo humano va a sentir los efectos de una descarga eléctrica en mayor o menor medida:

Umbral de percepción:

Se define como la corriente mínima que debe atravesar a una persona para que perciba una sensación. Para ello, debe sentir una sensación de cosquilleo, pero no dolorosa ni desagradable. Normalmente en corriente alterna, para una frecuencia entre 50-60 Hz suele ser de unos 1,1 mA, mientras que en corriente continua está en 5,2 mA, pero estos valores dependerán de la propia persona.

Umbral de no soltar:

Valor mínimo de la corriente para que una persona que sostenga un electrodo no pueda soltarlo. Para los mismos valores de la frecuencia anteriormente nombrados, para una corriente alterna este umbral se sitúa en 16 mA pero en continua en 76 mA.

La UNE 20-572-92 toma los anteriores valores como, que el umbral de percepción está situado a 0,5 mA y el de no soltar en 10 mA, sin tener en cuenta cuál sea el tiempo.

Umbral de contracción muscular:

Es el que va a generar una contracción violenta de los músculos extensores o contractores, despidiendo a la persona bruscamente del elemento con el que esté en contacto o dejándola pegada.

Si la persona se queda pegada, va a ser incapaz de soltarse por ella misma hasta que se corte la circulación de la corriente. De hecho, si los músculos que se contraen son los respiratorios, se puede producir asfixia.

Cuando la intensidad es superior a la del “Umbral de no soltar”, los efectos que se producen de manera

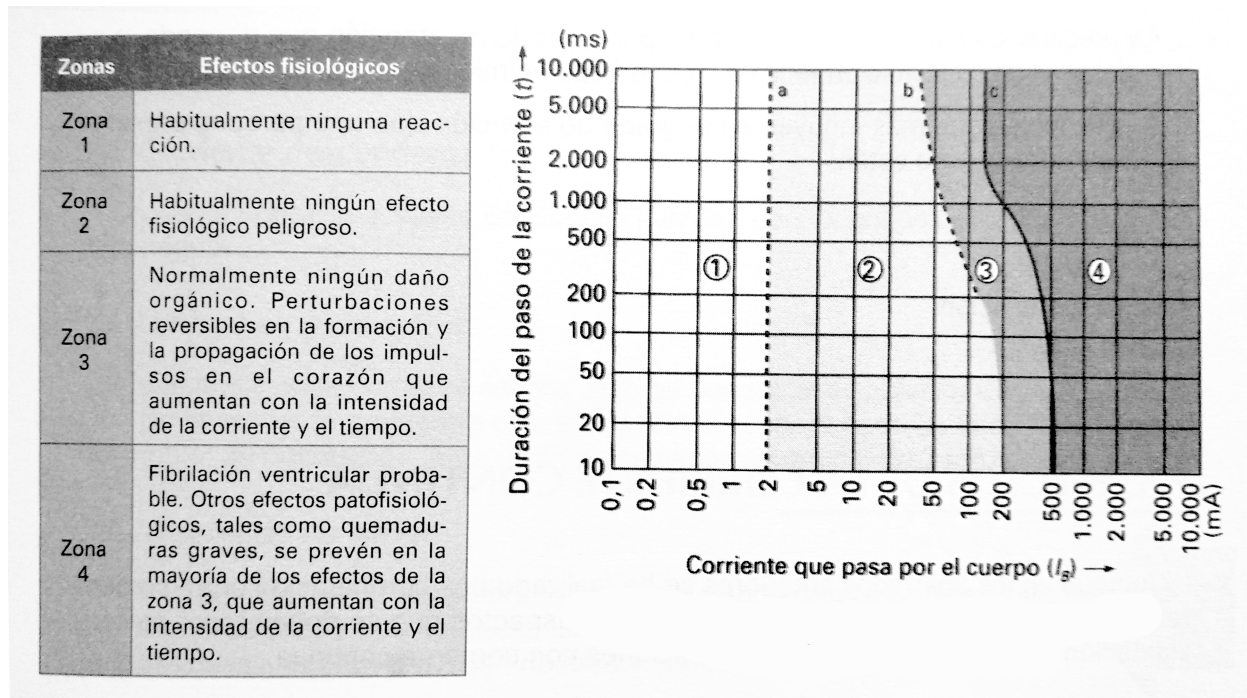


Figura 3.4: Zonas de efectos de la relación tiempo/corriente continua [11]

sucesiva son:

Dificultad respiratoria, fibrilación ventricular, parada cardíaca, inhibición respiratoria, daño nervioso mortal, quemaduras graves, pérdida de conocimiento, muerte.

Umbral de fibrilación ventricular:

Se trata del valor mínimo de corriente que provoca fibrilación ventricular. La fibrilación ventricular se entiende como la acción del músculo cardíaco que provoca una contracción no coordinada y suprime inmediatamente la actividad fisiológica del corazón. Hay determinadas situaciones donde la fibrilación ventricular es irreversible.

Cuando se habla de este término, es crucial el valor de la corriente y el tiempo que está circulando. La duración de un ciclo cardíaco dura 0,75s, el cual se puede apreciar a continuación en la figura 3.5.

Si la descarga se produce dentro de la fase crítica, se produce la fibrilación. Para que una descarga entre dentro de esa fase crítica, tiene que durar al menos un 20 % del periodo del corazón (unos 0.15s). En se puede ver cómo afectaría a un diagrama cardíaco una fibrilación ventricular y la relación que esta tendría con la tensión arterial.

La fibrilación va a depender de la persona (estado físico, edad...) además de las condiciones eléctricas (duración, recorrido...). Este umbral va a decrecer en corrientes alternas de 50-60Hz si la duración es más de un ciclo, pero en caso de que la duración sea menor a 0.1s, solo se producirá fibrilación para corrientes mayores de 500mA. Para corrientes superiores, el choque se producirá durante el periodo vulnerable. Pero si a esa intensidad superior, se le aumenta el tiempo (superior a un ciclo cardíaco) la parada puede ser reversible.

En esta imagen se puede apreciar cuándo se puede producir la fibrilación en función de la intensidad y el tiempo.

Por encima de los 4A, se produce otro umbral diferente, *Umbral depresivo del sistema nervioso*, en el cual se encuentra en un estado de muerte temporal, ya que afecta a las funciones del sistema nervioso y sus efectos duran una vez ha dejado de pasar corriente.

Se procede a hacer ahora una comparación entre efectos de alta y baja tensión por un lado, y entre corriente continua y alterna por otro.

- Baja tensión: Provoca muerte por fibrilación ventricular.
- Alta tensión: La muerte se produce por destrucción de órganos o por asfixia (debido al bloqueo del sistema nervioso).

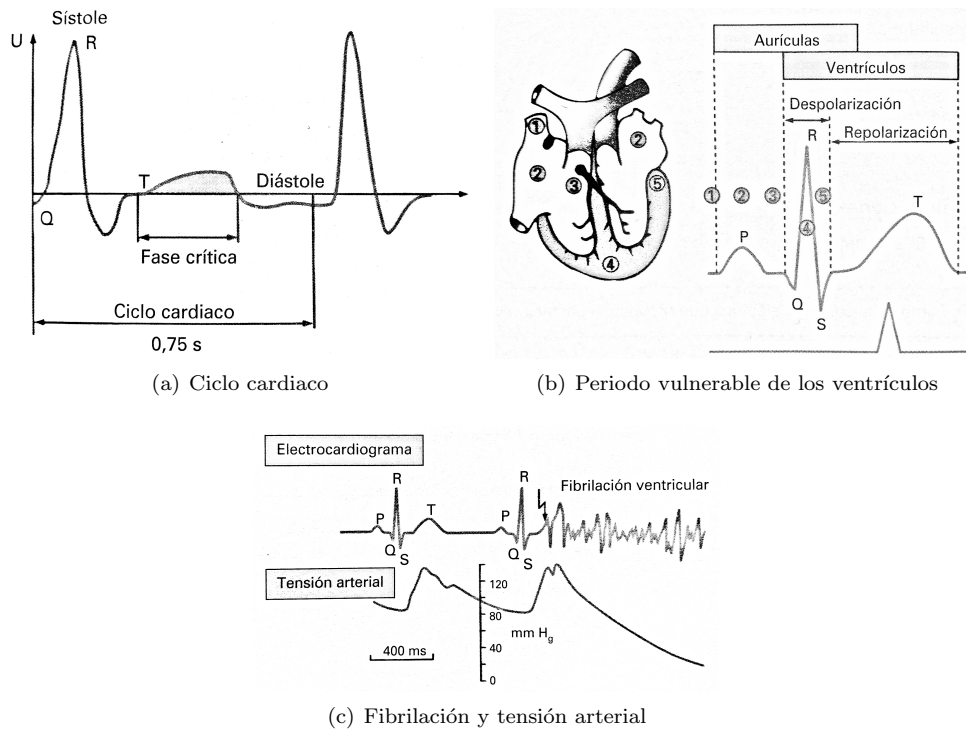


Figura 3.5: Ciclo del corazón, vulnerabilidad y relación con la tensión [11]

Por otro lado, la comparación entre corriente alterna y continua se ven en la siguiente tabla 3.2:

Efectos sobre el cuerpo humano	c.a. (mA)	c.c (mA)
Ligera sensación en la mano	0,4	1
Umbral de percepción	1,1	5,2
Choque doloroso y desagradable, sin pérdida de control muscular	9	62
Umbral de corriente límite de control muscular	16	76
Contracción muscular	23	90
Umbral de corrientes peligrosas, fibrilación	80	200
Umbral depresivo	4000	-

Tabla 3.2: Comparación corriente continua con corriente alterna [13]

Finalmente, se quiere añadir en este capítulo la siguiente gráfica, la cual representa la intensidad de pico de un rayo en función del tiempo.

En ella se puede apreciar cómo en un tiempo determinado, la intensidad del rayo es máxima, sin embargo, más allá de este instante no va a tener apenas importancia.

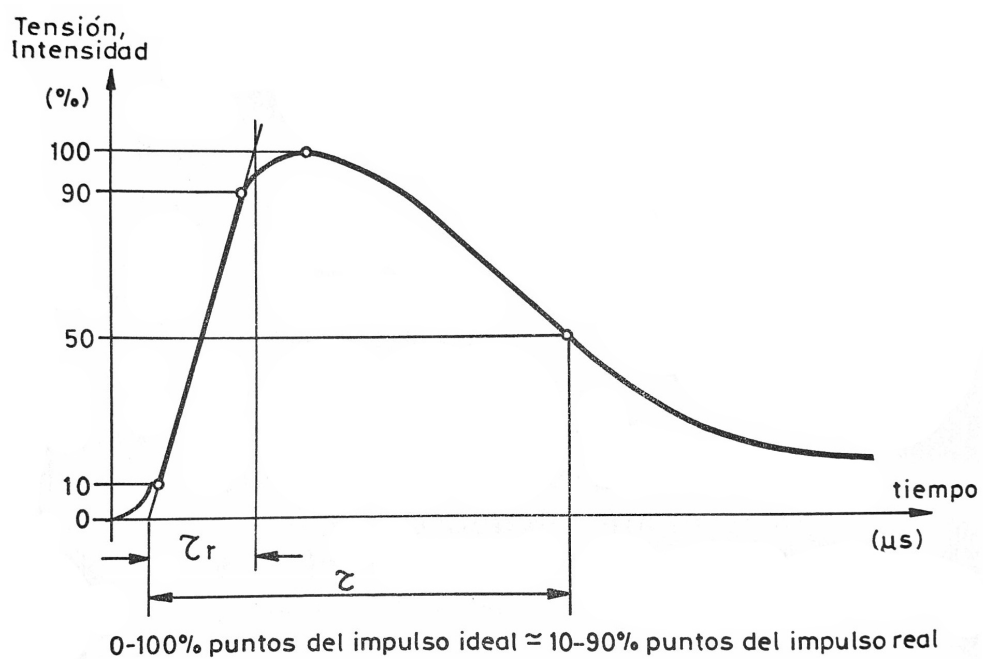


Figura 3.6: Gráfica de la corriente en función del tiempo cuando cae un rayo [25]

Capítulo 4

Tormentas

Las tormentas son un fenómeno meteorológico espectacular, presente en todo momento en nuestro planeta; y es que se estima que en cada momento están ocurriendo simultáneamente unas 2000 tormentas que presentan actividad eléctrica. De hecho, según el Instituto Nacional de Meteorología, entre los años 1992 y 1995, se registraron en España 1.615.217 descargas o impactos de rayos [12]. Se puede ver gráficamente en la imagen 4.1.

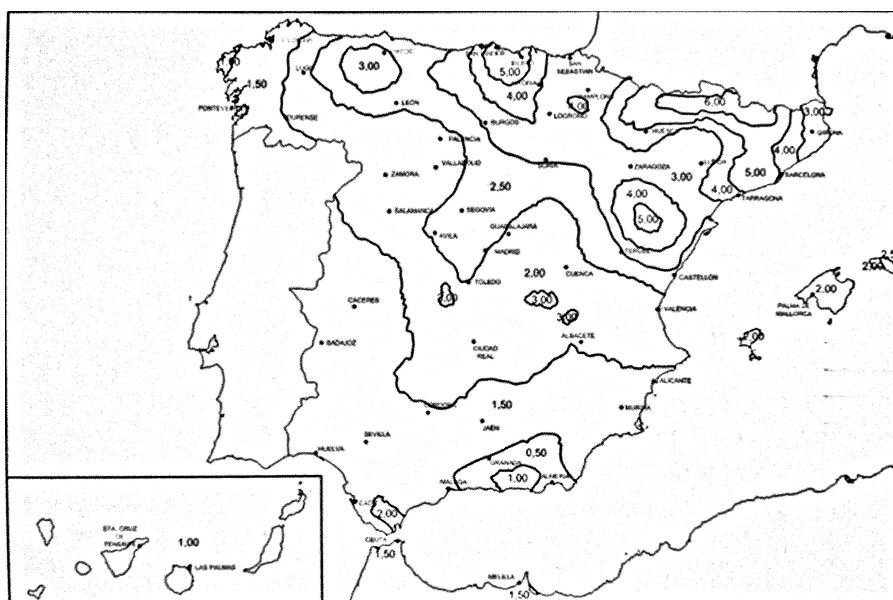


Figura 4.1: Mapa de impacto de rayos [10]

El primer estudio acerca de este fenómeno corresponde a Benjamin Franklin en 1752. Franklin comenzó a interesarse por los fenómenos eléctricos en 1747, lo que le llevó a preguntarse por las tormentas, si éstas contenían electricidad y lo que ocurría dentro de las nubes [6]. Por ello, en 1752 realizó un experimento formado por una cometa con un esqueleto metálico. Ésta estaba atada a un hilo de seda por el que él había supuesto que iba a recoger la electricidad, cargándose con la estructura metálica de la cometa, y llegando finalmente a una llave situada en la parte inferior del hilo. Si el experimento salía bien, entonces la llave acabaría cargada, confirmando la electricidad en las tormentas [14].

El experimento salió como esperaba, y desde ese momento las tormentas han continuado siendo estudiadas. No tanta suerte tuvo Richmann, que intentó recrear el mismo experimento, causándole la muerte [15]. Desde estos inicios, los métodos para detectar y estudiar las tormentas han mejorado considerablemente, aunque, lamentablemente este fenómeno no está muy documentado debido a que la física que hay detrás de estas descargas es muy amplia.

Franklin, además, dedicó parte de su vida a trabajar acerca de la electricidad: explicó los conceptos de electricidad positiva, negativa y conductor eléctrico, se dio cuenta del efecto puntas en los cuerpos y enunció el principio de conservación de la carga. La mayor parte de estas ideas todavía permanecen en la actualidad.

En este capítulo se desea entender y comprender cómo se forma una tormenta, qué mecanismos hacen falta, las magnitudes que pueden llegar a alcanzar, las múltiples descargas que se producen y los tipos que puede haber. Finalmente, se hará un estudio de las escenas escogidas para éste fenómeno y se analizará los efectos de los rayos en las personas.

4.1. Base teórica

Las tormentas son un proceso por el cuál el sistema atmosférico en desequilibrio se vuelve estable. Cuando se está formando una tormenta, la atmósfera tiene un exceso de energía potencial que las tormentas absorben y con el que equilibran el sistema. Es decir, en una atmósfera en desequilibrio e inestable, la tormenta es el mecanismo por el cual el sistema pasa a estar en equilibrio.

Antes de comenzar a hablar de cómo se forma una tormenta se van a exponer unas definiciones que se usarán más adelante como vocabulario en el texto [16].

- **Humedad relativa:** Se mide en tanto por ciento y es una relación entre la cantidad de vapor de agua en un volumen de aire respecto de la cantidad de vapor que habría si ese aire alcanzara el punto de saturación.
- **Espesor de un estrato:** Diferencia entre dos alturas geopotenciales (es una altura expresada en metros geopotenciales en vez de geométricos, ya que esta tiene en cuenta la aceleración de la gravedad. Aunque normalmente coinciden, no tienen por qué hacerlo).
- **Nivel de condensación convectivo (NCC) o (CCL):** Altura a la que una masa de aire suficientemente calentada asciende adiabáticamente hasta el punto de la saturación.
- **Energía potencial convectiva (CAPE):** Es la energía potencial almacenada en una parcela de aire que se eleva una cierta distancia verticalmente a través de la atmósfera.
- **Nivel de libre convección (FCL):** Es la altura a partir de la cual una parcela de aire alcanza el punto de inestabilidad al empezar a ser más cálida que su entorno y asciende libremente.
- **Parámetro de inhibición convectiva (CIN):** Es la energía que se opone a que una parcela de aire alcance el nivel de libre convección.

4.1.1. Formación de tormentas

Para que una tormenta tenga lugar y se empiece a formar, tienen que darse una serie de condiciones. En caso de que alguna de éstas no se dieran, la tormenta se desvanecería. La energía, la humedad y un mecanismo de disparo son esenciales. A continuación se va a profundizar sobre las condiciones anteriormente nombradas, desglosando cada una de ellas:

Energía

La energía es un parámetro que ya existe dentro del sistema; una atmósfera con energía posee un gradiente de temperaturas y con ello, un desequilibrio. Para ver mejor estos parámetros, se usan los llamados diagramas oblicuos.

En un diagrama oblicuo T, log (P) encontramos representada en el eje izquierdo la presión en una **escala logarítmica**. En algunas ocasiones, al lado de las diferentes presiones, aparecen unos números a la derecha del eje vertical izquierdo del diagrama que representan la altura a las cuales se encuentran esas presiones. En otras ocasiones, esta altura la encontramos situada en el eje vertical derecho del diagrama. En el eje inferior del diagrama está presente una escala de temperatura. Por lo general, a la derecha de todo el diagrama, es usual encontrarse unos pequeños símbolos que marcan la dirección y la intensidad del viento en función de la altura como se ve en la figura 4.2.

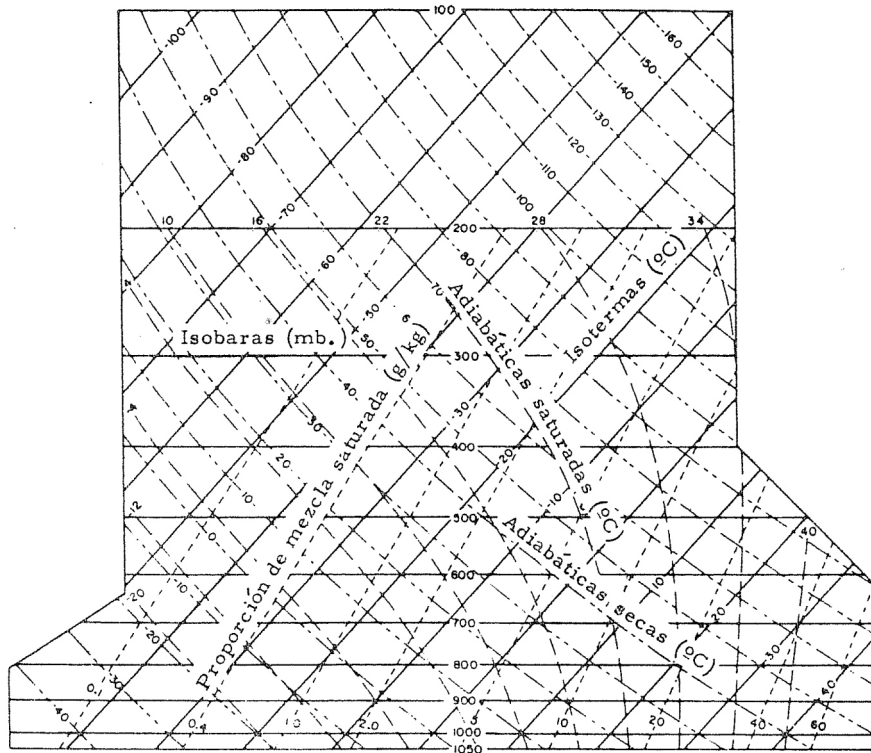


Figura 4.2: Diagrama oblicuo T, log (P) [17]

Como se puede apreciar es un diagrama que contiene mucha información. Veamos qué es cada uno de estos trazos [18]:

- **ISOBARAS:**

Son las líneas horizontales y marcan las zonas que tienen la misma presión (figura 4.3). Estas franjas atraviesan toda la gráfica, por eso la altura a la que se sitúan las isobaras en algunas ocasiones aparecen al lado del propio valor de la isobara o a la derecha, cuando alcanza el final del diagrama. La presión se representa de forma descendente (es decir, a medida que ascendemos en el eje vertical, la presión disminuye), haciendo que la separación entre dos puntos sea cada vez más grande. Lo normal es colocar datos cuyo intervalo sean 100 mbar (milibares), pero en esas ocasiones, no es raro introducir algún valor intermedio haciendo la separación proporcional.

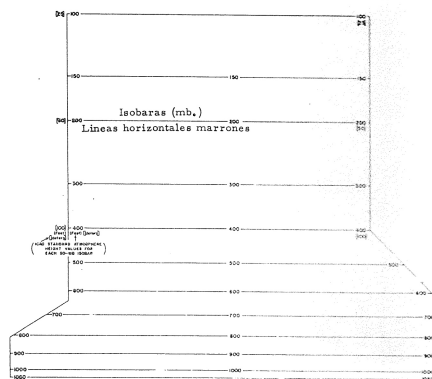


Figura 4.3: Isobaras [17]

- **ISOTERMAS:**

Indican los puntos que tienen la misma temperatura a medida que aumentamos la altura (o disminuimos la presión). Son líneas rectas que van desde las diferentes temperaturas marcadas (aparecen los grados

de 5 en 5, pero las rectas únicamente se dibujan cada 10 grados) hasta llegar a la parte superior derecha (figura 4.4).

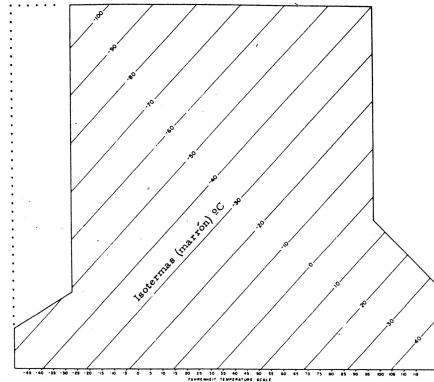


Figura 4.4: Isotermas [17]

■ *ADIABÁTICAS SECAS:*

Una adiabática seca indica cómo varía la temperatura de una masa de aire seco cuando asciende o desciende adiabáticamente (figura 4.5). Serán líneas curvas continuas que comienzan en la parte inferior derecha y terminan en la superior izquierda. Además, la distancia entre las adiabáticas disminuye a medida que su valor aumenta.

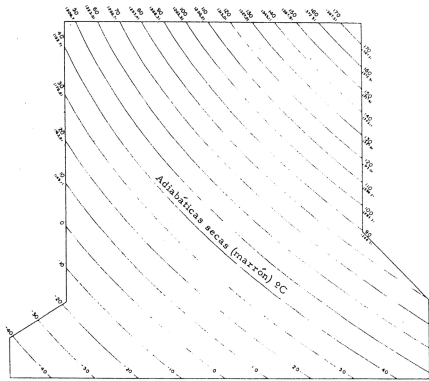


Figura 4.5: Adiabática seca [17]

■ *ADIABÁTICAS SATURADAS*

Por último nos encontramos con las adiabáticas saturadas, las cuales representan cómo varía la temperatura de una masa de aire saturada al ascender o descender de forma pseudo-adiabática, marcando su trayectoria. Estas están marcadas por un trazo continuo y algo curvo, desde la parte inferior derecha hasta la superior izquierda, aunque estas, a diferencia de las adiabáticas secas, tienen un trazo más vertical (figura 4.6).

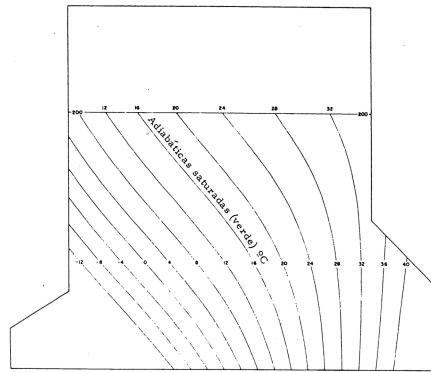


Figura 4.6: Adiabática saturada [17]

En la práctica, estos diagramas sirven para ver cómo está la atmósfera en ese momento. Para usarlo, se lanza un globo sonda con un termómetro, el cual va a ir dibujando una curva, señalando la temperatura a la que está la atmósfera dependiendo de la altura a la que este se encuentre en ese momento. Este globo, además llevará otro dispositivo. Este segundo elemento, un higrómetro, lo que hace es coger los datos de la humedad relativa en el aire y va a ir dibujando una segunda curva, esta vez más a la izquierda, la cual representa la temperatura de saturación del agua, es decir, a qué temperatura el aire que está a esa altura (o presión), comenzaría a condensar.

A la hora de ver qué tiempo hace, se analizan estas figuras y, además, se pueden hacer sondeos virtuales mediante modelos meteorológicos. Estos son los más utilizados para predecir el tiempo.

Pongamos en práctica estos conceptos sobre un diagrama concreto:

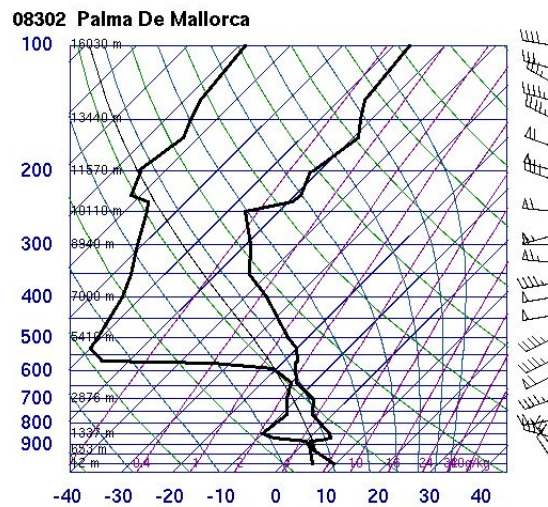


Figura 4.7: Diagrama T, log (P) para Palma de Mallorca [23]

Cuando se realiza un sondeo, éste empieza con la temperatura en la superficie, y al ir aumentando la altura, va trazando el sondeo, anotando la temperatura (trazo derecho) y la temperatura del punto de rocío (trazo izquierdo). La línea de la derecha nos indica cómo se encuentra la atmósfera en ese momento, mientras que la de la izquierda nos muestra cómo se encuentran las capas de la atmósfera o qué capas nos encontramos. Es posible que la atmósfera esté estratificada (a capas, y que éstas sean diferentes entre sí). En ese caso se vería reflejado en la curva de la temperatura del punto de rocío, en la cual, si la capa es seca, el punto de rocío se desplaza más hacia la izquierda (ya que tiene menos agua en su interior y necesita menos temperatura para que ésta empiece a condensar), mientras que si se encuentra con una capa húmeda, va a tender hacia la derecha, al encuentro de la temperatura.

En el diagrama mostrado, se puede apreciar como entre los 2876m y aproximadamente los 5000m hay una capa de aire seco, pues el trazo de la izquierda se desplaza muy bruscamente hacia la izquierda. También se puede ver entre los 653 m y los 1337 m.

Además, en el eje vertical derecho, aparecen las flechas ya mencionadas anteriormente que indican la intensidad y la dirección del viento en función de la altura [19]. La intensidad del viento está tabulada en la escala de Beaufort [20].

Cífra	Nombre	Símbolo	Velocidad en			Efectos del viento en alta mar
			nudos	m/s	km/h	
0	calma		1	0 - 0,2	1	Mar como un espejo
1	ventolina		1 - 3	0,3 - 1,5	1 - 5	Rizos como escamas de pescado, pero sin espuma
2	flojito		4 - 6	1,6 - 3,3	6 - 11	Pequeñas olas, crestas de apariencia vítrea, sin romperse
3	flojo		7 - 10	3,4 - 5,4	12 - 19	Pequeñas olas, crestas rompientes, espuma de aspecto vítreo aislados vellones de espuma
4	bonancible-moderado		11 - 16	5,5 - 7,9	20 - 28	Pequeñas olas creciendo, cabrilleo numeroso y frecuente de las olas
5	fresquito		17 - 21	8,0 - 10,7	29 - 38	Olas medianas alargadas, cabrilleo (con salpicaduras)
6	fresco		22 - 27	10,8 - 13,8	39 - 49	Se forman olas grandes, crestas de espuma blanca (salpicaduras frecuentes)
7	frescachón		28 - 33	13,9 - 17,1	50 - 61	El mar crece; la espuma blanca que proviene de las olas es arrastrada por el viento
8	temporal		34 - 40	17,2 - 20,7	62 - 74	Olas de altura media y más alargadas, del borde superior de sus crestas comienzan a destacarse torbellinos de salpicaduras
9	temporal fuerte		41 - 47	20,8 - 24,4	75 - 88	Grandes olas, espesas estelas de espuma a lo largo del viento, las crestas de las olas se rompen en rollos, las salpicaduras pueden reducir la visibilidad
10	temporal duro		48 - 55	24,5 - 28,4	89 - 102	Olas muy grandes con largas crestas en penachos, la espuma se aglomera en grandes bancos y es llevada por el viento en espesas estelas blancas en conjunto la superficie esta blanca, la visibilidad esta reducida
11	temporal muy duro		56 - 63	28,5 - 32,6	103 - 117	Olas de altura excepcional, (pueden perderse de vista tras ellas barcos de tonelaje pequeño y medio), mar cubierta de espuma, la visibilidad esta reducida
12	temporal huracanado		más de 64	más de 32,7	más de 118	Aire lleno de espuma, salpicaduras, mar cubierto de espuma visibilidad muy reducida

Figura 4.8: Escala de Beaufort

Es momento ahora de saber cómo estos diagramas sirven para estudiar una tormenta. Para ello, usaremos como modelo uno de los vistos anteriormente, el de Barcelona (figura 4.9).

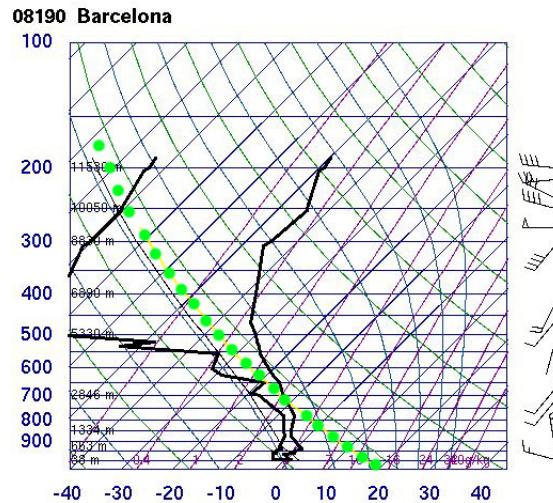


Figura 4.9: Diagrama para ascenso de una masa de aire seco [23]

Supongamos una masa de aire seco situada en la superficie terrestre (0m) que tiene una temperatura $T=20^{\circ}\text{C}$ (en el caso de la figura anterior). Como el aire está seco (no hay saturación en él), sufrirá una expansión adiabática e irá ascendiendo siguiendo la adiabática seca que parte desde el punto del eje horizontal $T=20^{\circ}\text{C}$, que se encuentra dibujada mediante un trazo punteado verde (como no hay adiabática seca para $T=20^{\circ}\text{C}$ se dibuja paralela al resto de adiabáticas secas).

Si miramos el diagrama, al partir desde $T=20^{\circ}\text{C}$ y seguir la adiabática seca, se llega a un punto donde la adiabática corta al trazado de la atmósfera, en este caso, situado a algo menos de 2846m, correspondiente a una presión de 700 milibares. Paramos en ese punto y observamos lo que ha ocurrido hasta entonces. El trazado de la masa de aire está más a la derecha que la de la atmósfera, eso quiere decir que está más caliente, ya que recordemos que en el eje horizontal se sitúan el comienzo de las diferentes isotermas. Esto quiere decir que la masa de aire, por estar más caliente, será menos densa que el aire que le rodea (la atmósfera) y ascenderá debido a una expansión adiabática seca hasta el punto donde se cruzan. En ese punto, la atmósfera pasa a estar a la derecha del trazado verde, indicando que a partir de ese punto, el aire más caliente es el de la propia atmósfera, y por tanto, es menos denso. En ese punto, la masa de aire que ascendía por ser menos densa que la atmósfera, alcanzaría su punto máximo, pues pasa a ser más densa.

Cuando la atmósfera está más fría que la propia masa de aire y le permite ascender (en otras palabras, cuando el trazo de la atmósfera está a la izquierda de la masa de aire), se dice que tenemos inestabilidad. En el caso de que la atmósfera esté más caliente (la masa de aire ahora estaría a la izquierda) y no permite que el aire ascienda, se denomina estabilidad. Una parcela de aire, siempre que la atmósfera esté más fría que ésta, ascenderá hasta que se encuentre un punto de inestabilidad. Este punto puede ser un lugar donde la atmósfera esté más caliente, o en días de tormenta, cuando llega a la estratosfera, ya que esta siempre es estable.

Sea un sondeo imaginario, como el de la figura siguiente:

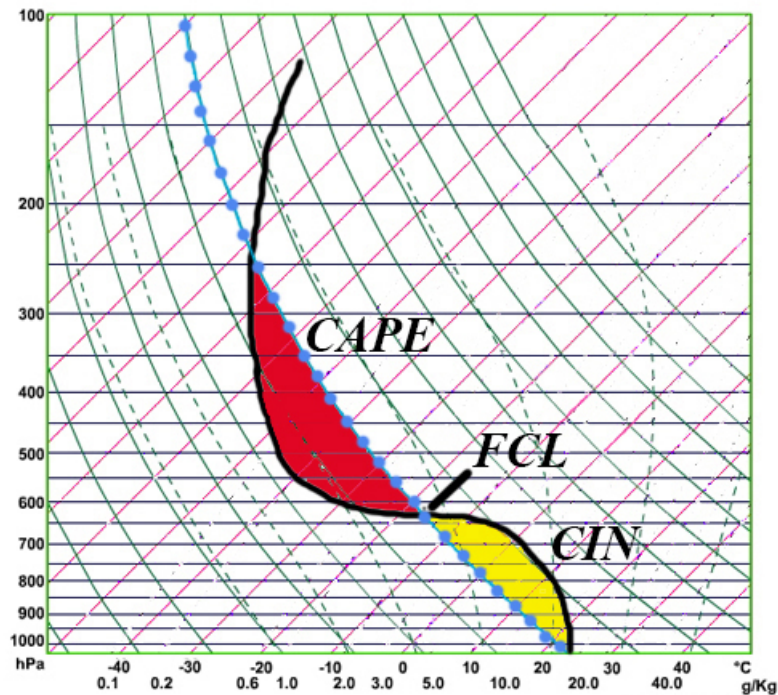


Figura 4.10: Diagrama para ascenso de una masa de aire seca

Con lo explicado anteriormente, se puede llegar a apreciar a simple vista que el área amarilla representa una zona de estabilidad, pues la masa de aire, dibujado con un trazo discontinuo en azul, está más a la izquierda que el trazo de la atmósfera (dibujado con una línea continua en negro). Si avanzamos por la adiabática, aparece el nivel de libre convección (aparece cuando se cruzan las dos líneas y comienza la inestabilidad) y después hay un trozo de inestabilidad (zona roja).

Si integráramos el área entre las curvas, el área amarillo sería el CIN o inhibición convectiva, que básicamente es la energía que se opone a que la parcela de aire ascienda, y el área rojo el CAPE. Por sí sola, la masa de aire no va a conseguir llegar al punto de FCL. Para conseguir llegar a ese punto, es necesaria un mecanismo de disparo.

Condiciones de disparo

Son mecanismos que se dan en la superficie terrestre o en bajas capas de la atmósfera que obligan a subir a la burbuja de aire hasta el nivel de libre convección. Cuando hay CIN, estos procesos son esenciales para que la masa de aire ascienda y se pueda formar una tormenta, alcanzando la inestabilidad. Los diferentes mecanismos de disparo son:

- *Los sistemas montañosos*: En una atmósfera estable, cuando una burbuja de aire intente ascender, se va a quedar atrapada debido a su gran densidad respecto a la del aire que le rodea. En su movimiento, el aire puede toparse con una montaña, que, al seguir su trayectoria, le haga subir hasta una altura lo suficientemente alta como para sobrepasar el nivel de libre convección y así, comenzar a subir.
- *El Sol*: Este puede calentar el aire de la superficie lo suficiente para que la adiabática que se deba subir no sea la inicial, sino una más caliente, pudiéndose evitar el CIN. El propio calentamiento va a crear una convección cerca del suelo (burbujas que suben y bajan continuamente), provocando que el aire sea inestable desde un principio, pudiéndose generar la tormenta.

Este mecanismo de disparo cambia el diagrama dando facilidad a la inestabilidad y por tanto tormentas. El Sol como mecanismo de disparo es el más habitual y efectivo.

- *Forzamiento dinámico*: Se trata de dos vientos o masas de aire en capas muy bajas que avanzan en direcciones diferentes y se encuentran, obligando al aire a subir. Es importante que las dos masas de aire converjan para que el aire ascienda hasta el nivel de libre convección, en caso contrario, no se daría el mecanismo de disparo.

Es muy importante que esto se de en capas bajas de la atmósfera, ya que si ocurriera en capas altas, esto no permitiría el paso del aire. En dichas capas, lo ideal sería la divergencia, facilitando así el paso del aire ascendente. Esto es importante cuando la tormenta está formándose o ya está formada.

Humedad

La condición de la humedad va a aportar en gran medida la energía al sistema, debido sobre todo al calor latente del paso de agua en estado de vapor a agua líquida por la condensación.

Al incorporar la humedad en la atmósfera, hay que tener en cuenta la humedad relativa (la que nos dice cuánta cantidad de agua tiene en aire) y está íntimamente relacionada con el **punto de rocío**. El punto de rocío depende de la humedad que tenga el aire (cuanto más alto es el punto de rocío, más cantidad de agua puede almacenar el aire, y viceversa). Este punto es en el que la saturación del aire es del 100% y a partir del cual empieza a haber condensación. A este punto también se le puede llamar punto de condensación.

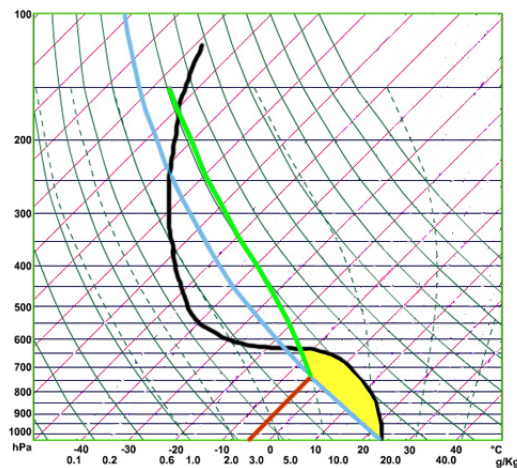


Figura 4.11: Diagrama para ascenso de una masa de aire húmedo

Se ha recuperado el diagrama anterior para una atmósfera con humedad (figura 4.11). Al igual que antes, para conocer cómo sería la estabilidad, se traza una adiabática seca por la cual la masa de aire asciende hasta encontrarse con la isoterma de la temperatura de rocío. A partir de ese punto (nivel de condensación) se seguirá la adiabática húmeda que pase por ahí, paralela al resto de adiabáticas húmedas. Después de esa altura, la masa de aire, ahora húmedo, continuará ascendiendo, pero siguiendo la adiabática húmeda que pase por ese lugar (se ha hecho coincidir ese punto con la adiabática húmeda de 10). En este momento se ha creado una nube.

Esta nube, a medida que asciende va condensando cada vez más agua a la vez que va regulando su temperatura, oponiéndose al enfriamiento. Este enfriamiento, más lento que el de una masa de aire seco, provoca un aumento notable de la energía potencial (basta con observar cómo el área que ahora encierran las curvas ha aumentado considerablemente), aumentando la CAPE. En parte, esto se debe a que las adiabáticas húmedas son más verticales, por lo que la atmósfera se enfría más rápidamente que esa parcela de aire creando más estabilidades. Además, se debe de tener en cuenta el cambio de fase comentado al principio. Cuando un cuerpo cambia de fase, se desprende energía según $Q = m \cdot L$, donde Q es la energía en forma de calor que entra en juego durante el cambio de estado, m la masa del elemento que cambia de fase y L es el calor latente. La energía que se desprende durante este cambio de fase, se acumula en la burbuja de aire, y esto es lo que provoca el lento enfriamiento de esta parcela.

Se muestra a continuación un diagrama real de esta situación (figura 4.12):

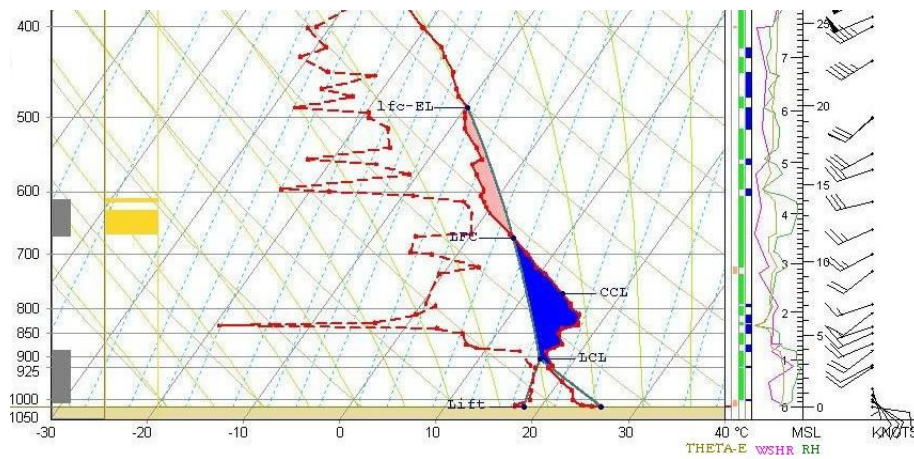


Figura 4.12: Diagrama real para ascenso de una masa de aire humedo [23]

En la imagen se puede apreciar en un trazo discontinuo la curva perteneciente a la temperatura de rocío. La curva de la derecha, en un trazo continuo rojo, es el temperatura de la atmósfera. Partiremos de la parte baja para analizar la situación. El área azul se trata de una zona estable, pero si continuamos subiendo, se aprecia una zona de estabilidad (área rosa). También se puede apreciar bien el nivel de condensación, el nivel de condensación convectivo así como el nivel de libre convección.

4.1.2. Clasificación y formación de rayos

Una vez formada la tormenta, existen mecanismos que favorecen a que ésta se desarrolle e incluso tome más intensidad.

Cizalladura

La cizalladura, se define como la variación de la velocidad y/o dirección del viento con respecto a la altitud. Es decir, se trata de una corriente de aire que va a favorecer la formación de las tormentas. Existen diferentes tipos de cizalladura.

A medida que una tormenta se forma, se crean unas corrientes ascendentes de aire, llamadas cizalladuras verticales, que llegan hasta lo más alto de la tormenta, donde ésta adquiere la energía del aire que sube y es expulsado, apareciendo una corriente descendente, formada por el aire usado, que está más frío y con menos contenido en humedad y energía, ya que el agua se ha ido condensando o bien, se ha perdido en forma de precipitación. Esta masa de aire ya no contribuye al desarrollo de la tormenta y por eso, cuando una tormenta se desprende de mucho aire usado en el mismo lugar, no deja espacio para el aire nuevo, cálido y con energía, perdiendo fuerza e incluso disolviéndose.

Por lo general, las cizalladuras van a provocar que el aire se deposite en otro sitio, dejando paso al aire cálido, y favoreciendo así a la formación de las tormentas, manteniéndolas vivas y eficientes.

En la figura de las cizalladuras 4.13 nos encontramos los diversos tipos que existen, además de la dirección en la que sopla el viento, según la brújula que hay al lado. En la primera columna aparece la cizalladura unidimensional, la cual al aumentar la altura, aumenta también la velocidad del viento. En el medio, aparecen las cizalladuras horaria y antihoraria, debido al giro de las capas del aire. En estas cizalladuras, a medida que aumentamos la altura, la dirección del viento cambia. Estas situaciones no suelen darse por separado, si no que lo usual es encontrarse con una cizalladura que, a medida que avanzamos en la altura, también lo hace la intensidad del viento y además, la dirección en la que sopla, que también es variable.

Es importante puntualizar que la cizalladura no va a aportar energía a la tormenta, si no que la va a hacer más eficiente.

Además de todo esto, la intensidad de las tormentas también es interesante para la creación de rayos. Para que una tormenta sea más fuerte, ésta debe estar organizada. Aquí entra en juego el término de cizalladura, el cuál marcará cuánto de organizada estará la tormenta, y con ello, la intensidad de la misma.

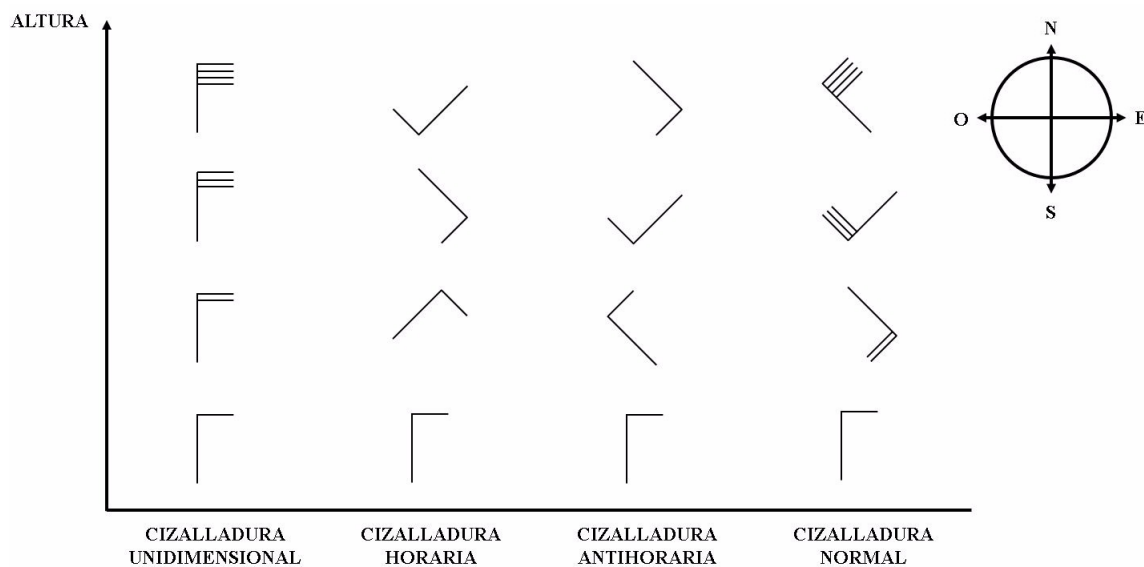


Figura 4.13: Tipos de cizalladura

Las tormentas se clasifican de dos formas: tormentas organizadas (las que tienen cizalladuras que ayudan mucho a organizarse la tormenta) y las no organizadas o convectivas (se basan en movimientos de masas de aires que suben y bajan, pero sin organización). Una tormenta organizada es mucho más fuerte, las descargas son más grandes y dura más que una convectiva, que suelen durar una o dos horas únicamente con descargas moderadas.

Un ejemplo de tormenta organizada y eficiente es la **supercélula**. En este tipo de tormentas se puede apreciar claramente las corrientes ascendentes y descendentes, a parte de la rotación. Esta tormenta estaría inclinada debido a la cizalladura unidimensional, provocando que el aire se expulse lejos, además de que giraría a causa de una cizalladura giratoria. Es casi la tormenta más organizada que se puede tener, por lo que es muy raro que se forme.



Figura 4.14: Supercélula (Foto por Daniel Revilla)

Existen ciertas nubes que no tienen actividad eléctrica. Estas son las que no tienen corrientes verticales de ascenso ni zonas de mezclas de fase. De hecho, puede haber nubes que alcancen los 15 km sin tener descargas eléctricas, por ejemplo las calientes oceánicas tropicales. [2]

Para que se produzcan rayos en una tormenta, esta tiene que estar ya desarrollada. Para ello, la nube tiene

que tener variaciones de temperatura muy grandes y zonas con mezclas de fases: en el extremo superior de la nube, tiene que superar el punto de congelación, y para eso, es necesario que la nube sea grande, ya que el extremo inferior estará aproximadamente a la misma temperatura que la superficie terrestre, debido a su proximidad.

Normalmente, una tormenta suele tener su extremo inferior a una distancia de entre 1 o 2 km sobre la superficie terrestre, y, como se ha mencionado antes, estará a una temperatura entre 10 y 20°C. En una nube, el agua está en forma de vapor y a medida que la temperatura disminuye según aumenta la altura, el vapor de agua se condensa hasta que llegue a un punto donde el agua esté en estado sólido. Ese punto será cuando se alcance la temperatura de 0°C. Esa altura está aproximadamente comprendida entre los 4-5 km, pero no es suficiente para generar cristales de hielo. Éstos aparecerán cuando se eleven unos 2-3 km sobre la isoterma de 0°C y alcancen los -30 o -40°C, aunque las tormentas, sus capas altas están alrededor de los -50 o -60°C a los 10-15km.

Aquí entra en juego la *teoría precipitativa no inductiva*. Como se ha comentado anteriormente en la sección 2.1.1, esta teoría se basa en la transferencia de carga entre los cristales de hielo y el granizo cuando se produce una colisión, en ausencia de campo eléctrico pero en presencia de agua sobreenfriada.

La estructura de una nube de tormenta se basa en una carga tripolar clásica. Esto aparecerá cuando haya una temperatura de inversión, y esta indica que, para temperaturas mayores a la temperatura de inversión, el granizo tendrá una carga positiva, mientras que si es más pequeña, la carga será negativa. Por tanto, se diferencian dos zonas: por encima de la temperatura de inversión y por debajo de la temperatura de inversión.

Por encima de la temperatura de inversión:

En esta zona, donde la temperatura es más pequeña que la anteriormente indicada, los cristales de hielo quedan cargados positivamente después del choque con el granizo, dejando a este cargado negativamente. Acto seguido, el hielo es transportado a la parte alta de la nube por las corrientes de convección. Éstos serán depositados allí, dejando una zona positiva, mientras que el granizo desciende, ya que no puede contrarrestar la fuerza gravitatoria, contribuyendo así, a la zona negativa principal.

Por debajo de la temperatura de inversión:

En este caso, el granizo tiene carga positiva, la temperatura es más alta, por tanto, la altura a la que estamos es menor. Cuando un granizo cae desde la parte superior, estará cargado negativamente. En este punto, cuando choque con los cristales de hielo (con carga negativa en esta zona) se descargarán. Cuando el granizo caiga, debido a las sucesivas colisiones con los trozos de hielo se irán descargando. Cuando el aire ascendente lleve a los trozos de hielo estos van a aportar la carga negativa a la zona de carga negativa principal.

La forma por la cual hay transferencia de carga entre los cristales de hielo y el granizo se explica mediante el efecto triboeléctrico, visto en la sección 2.1.1.

El caso que estamos estudiando en las nubes, si solamente existieran cristales de hielo o gotas de agua este efecto no se produciría, ya que estos materiales están en la misma zona de la serie triboeléctrica. Sin embargo, tal como se ha expresado anteriormente, este fenómeno puede existir gracias al área de contacto, rugosidad, impurezas, humedad, y temperatura entre otras.

Con todo esto, podemos concluir que el graupel (gotas de agua comenzando a cristalizar) es muy importante a la hora de conseguir la actividad eléctrica en la nube, ya que se trata de un material diferente.

Por lo general, la atmósfera es interte eléctricamente, es decir, generalmente se comporta como un aislante. Pero a causa de las radiaciones procedentes de fuera de la atmósfera como por ejemplo, la radiación solar o la cósmica, se va a ionizar la última capa atmosférica (ionosfera), transformándola en una capa conductora. Esto mismo ocurre con la superficie terrestre, que por estar cubierta de agua, tiene iones diluidos, facilitando la conducción. Esto hace que la tierra tenga forma de un condensador eléctrico esférico, con dos superficies conductoras y un dieléctrico en medio [24], tratándose de otro método de separación de cargas en la nube.

Clasificación de rayos

Existen diferentes formas de clasificar los rayos.

■ *Según el entorno en el que se producen*

- **Descendente:** El rayo va desde la nube hacia el suelo. Esto suele ocurrir frecuente en terrenos llanos y en zonas con un clima cálido.
- **Ascendente:** En este caso, el rayo parte del suelo y se abre paso hasta llegar a la nube. Este tipo de rayos suele ser bastante más destructivo que el descendente y se suele dar en lugares con irregularidades (prominencias importantes en el relieve) o zonas montañosas.

- Según la carga que mueven:

- Positivos: Son la menor parte de los rayos. Son muy intensos y peligrosos. Van desde la parte superior de la nube (o de la inferior, pero muy raramente) hasta tierra, por tanto tienen mucha energía (ya que tienen que atravesar muchísima más longitud. En el caso de un rayo ascendente, lo harían desde tierra hasta las mismas zonas de la nube.
- Negativos: Son los rayos más frecuentes ya que constituyen aproximadamente el 90 % de los rayos. Se producen desde la parte negativa de la nube hasta la tierra. Para los ascendentes, comenzarían en tierra e irían a la zona negativa.

	Rayo negativo	Rayo positivo
Marítima	31 kA	53-61 kA
Litoral		47 kA
Mesetaria	23 kA	54 kA
Montañosa		57 kA

Tabla 4.1: Rayos que caen en función de la geografía [12]

Por supuesto, fuera de la clasificación, todos los rayos se pueden clasificar como una combinación de todas las anteriores. Los rayos más peligrosos son los positivos ascendentes, pero también son los menos comunes (forman el 1 %) mientras que los más comunes son los negativos descendentes, que se estima que son el 95 %, siendo los menos peligrosos.

Por otro lado, existe una clasificación más específica. Ya hemos visto que existen los rayos negativos y positivos dependiendo de la potencia y de qué parte de la nube vengan. Ahora se hará una clasificación en función de los extremos que se producen.

- Nube-nube: Se producen entre dos zonas de la nube más o menos cercanas donde existe una diferencia de potencial importante. Esas zonas estarán muy cargadas y en ese rayo pretenden perder energía y conseguir estabilidad. Suelen darse entre una zona negativa y una zona positiva próxima. Es posible que en una de estas descargas, al liberar energía se enlacen más descargas entre nubes, obteniendo un rayo más largo, ya que al descargar la energía, el potencial baja, e igual aparece una diferencia de potencial con una zona cercana y se produce una descarga en cadena.
- Nube-tierra: Son los que comúnmente llamamos rayos. Los que caen de la tierra a la nube, mucho más destructivos, pues son en los cuales nos vemos afectados.

Aquí a su vez, podríamos hacer una subdivisión, pues, como hemos visto anteriormente, los rayos nube-tierra pueden ser positivos o negativos, por ello:

- Nube-tierra positivos
- Nube-tierra negativos



(a) Rayo negativo

(b) Rayo positivo

Figura 4.15: Rayos nube-tierra (Fotos por Daniel Revilla)



Figura 4.16: Rayos nube-nube (Foto por Daniel Revilla)

Formación de rayos

Una vez formada la nube de tormenta, y visto cómo se genera la carga eléctrica dentro de estas nubes, veamos la estructura eléctrica que estas adoptan y, posteriormente, cómo se genera el rayo.

Como se ha comentado anteriormente, en la parte superior estarán los cristales de hielo, que estarán cargados positivamente. Por otro lado, en la zona central, se encuentra la zona negativa, donde la mayor parte de la carga la tendrá el agua sobreenfriada y el graupel (microgotas de agua sobreenfriada que se mantienen en estado líquido pese a estar en temperaturas bajo cero, pero que son capaces de pasar a sólido al contacto con una superficie sólida). Por último, en la zona baja, habrá un pequeño lugar formado por la carga positiva, formando un tripolo eléctrico. Esto va a provocar un campo eléctrico variable en el interior de la nube, por un lado entre la zona central y la parte de arriba, y por otro, entre la negativa y la zona positiva inferior. En la imagen 4.17 se puede ver la forma tripolar. Cabe destacar que, una nube de tormenta tiene un tripolo eléctrico, pero la carga positiva inferior es tan débil que no se suele tener en cuenta.

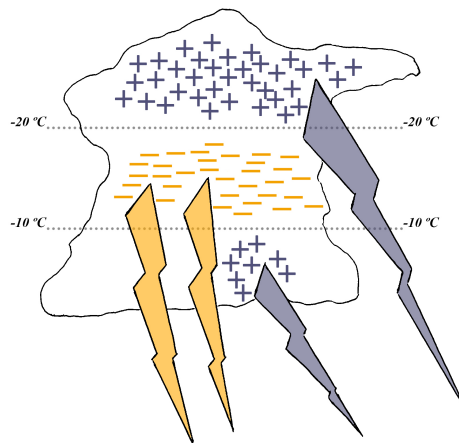


Figura 4.17: Distribución de cargas en la nube

Cuando la energía almacenada supera el umbral máximo que puede soportar la nube, comienzan las descargas eléctricas. Este mecanismo ocurre para volver a establecer el equilibrio del sistema.

En cuanto a la formación de cada uno de los rayos nombrados anteriormente, ya se ha explicado cómo se forma un rayo nube-nube, así que quedaría ver cómo se forma el nube-tierra.

A continuación se puede ver en la figura 4.18 la formación de un rayo negativo descendente. Se describirá el proceso por el cual el rayo negativo tiene lugar, ya que el positivo tiene el mismo procedimiento, con la única diferencia de que surge desde la parte alta de la nube.

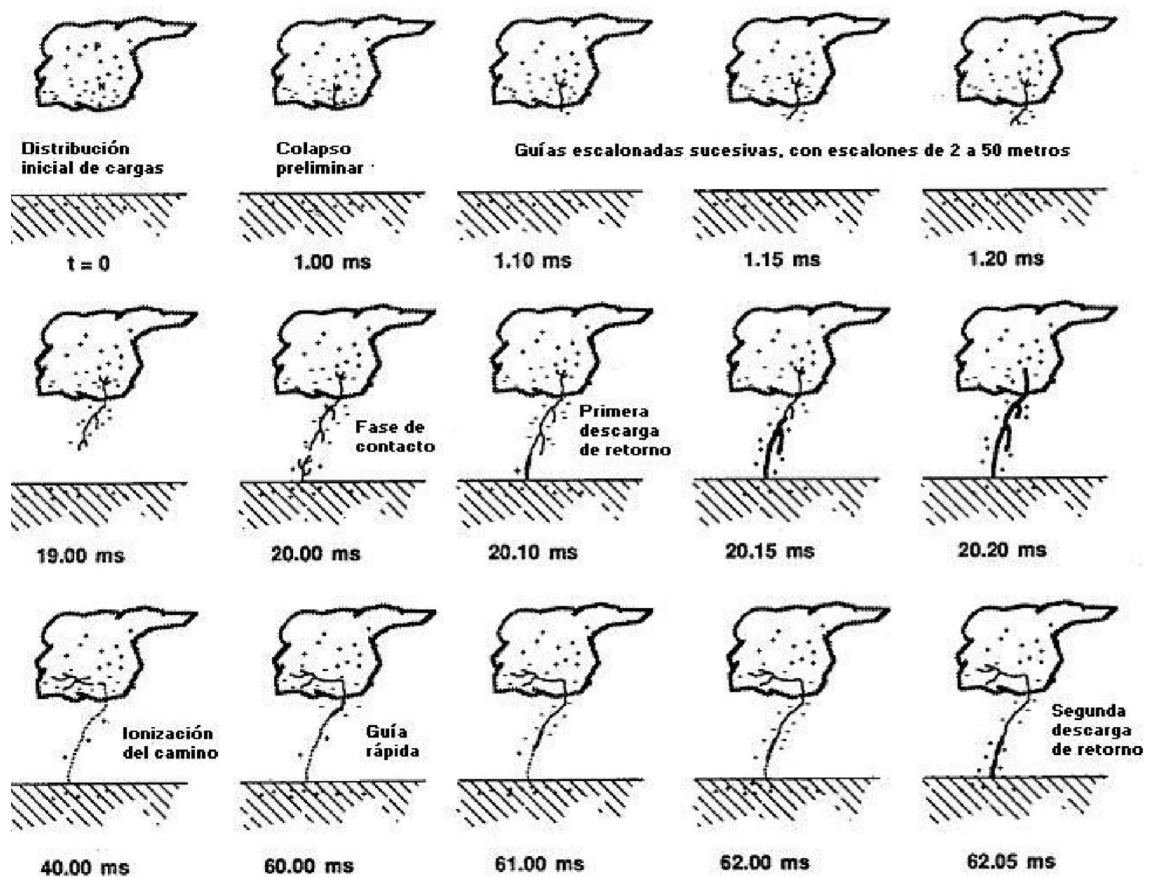


Figura 4.18: Formación de un rayo negativo [24]

Debajo de cada imagen se puede apreciar el tiempo que ha pasado desde el comienzo del proceso hasta que esa fase de la descarga ha tomado lugar.

Cuando una descarga atmosférica tiene lugar, aproximadamente un 25 % de la energía se disipa mediante una onda acústica llamada trueno, mientras que el 75 % restante se disipará en forma de calor, pudiendo alcanzar unos 30.000 °C. Gracias a las altas temperaturas que el proceso alcanza, es posible ver la luz que desprende la descarga.

Para explicar la formación de un rayo negativo, distinguiremos 4 fases:

Primeramente se prepara el camino del rayo mediante un canal de baja intensidad (en torno a 1 kA). El resultado será una guía escalonada formada por impulsos sucesivos a tramos que oscilarán entre longitudes de 2 y 50m con una mínima resistencia. En una segunda fase, se forma un canal de plasma ionizado de unos cuantos centímetros de diámetro. Este canal une zonas con altas diferencias de potencial (pueden llegar hasta unos 10^7 voltios). El canal va a llegar hasta a unos 300m del suelo, ya que en ese momento las "sondas de conexión" (puntos donde la carga es máxima a nivel del suelo) se van alzando desde el suelo al encuentro del canal. Comienza a haber algunas chispas.

En tercer lugar tendríamos la llamada fase de contacto, donde aparece un arco eléctrico muy luminoso, produciéndose la "descarga de retorno" (de intensidad máxima, del orden de 40kA). Es el intercambio de carga entre el condensador nube-tierra. Cuando pasa la corriente por la guía, el canal se va a calentar por efecto Joule, llegando hasta los 20.000K, que con la interacción con los gases se producen ondas de choque (truenos) debidas a la expansión adiabática del aire.

Finalmente se producen los sucesivos rayos, que van ya por el canal abierto que tiene menor resistencia, descargado así el condensador.

Las descargas no son controladas, como se ha mencionado en el apartado 2.2, sin embargo nosotros les proporcionamos una guía de sonda, empleada gracias al efecto puntas en los pararrayos. Pero cuando la descarga tiene lugar, irá por el lugar que le ofrezca menos resistencia y sea el camino más sencillo. Se producirán múltiples descargas sucesivas que no podemos apreciar puesto que las descargas se producen en unas pocas décimas de

segundo.

4.1.3. Efectos relativos a los rayos

Durante una tormenta eléctrica, el espectáculo que ofrecen los rayos es abrumador, y para algunas personas, el sentarse en una ladera y observar ese espectáculo natural es un gran placer. Pero para otra parte de la población, los rayos son sólo un efecto negativo más de una tormenta, que puede ocasionarles, además de tener que soportar las intensas lluvias, que se queden sin luz, que los aparatos electrónicos dejen de funcionar o incluso, la muerte, si se encuentran en el sitio equivocado en el momento erróneo.

Los efectos más importantes que pueden producir los rayos son: **térmicos**, que debido al efecto Joule puede provocar incendios o incluso en los puntos de impacto de los rayos puede fundir el material, **deflagración**, pues parte de la onda expansiva se va a transformar en una onda sonora (trueno), pero parte se transformará en una onda de presión que puede llegar a romper ventanas hasta en un radio de unos 10km, **elevación del potencial del suelo**, **efectos electrodinámicos**, ya que las corrientes que produce un rayo creará unas fuerzas en los cables eléctricos, observando roturas o deformaciones de los mismos y, por último, **sobretensiones inducidas**, basadas en la interacción de la radiación electromagnética producida por el canal que ha formado el rayo con líneas de telefonía y eléctricas apareciendo averías o incluso destrucción de aparatos electrónicos, o **sobretensiones conducidas**, cuando un rayo impacta sobre líneas aéreas de telefonía, eléctricas o de datos, aparece una onda en ambas direcciones de la propia línea, que puede llegar a propagarse varios kilómetros y además producir la destrucción de ésta.

A continuación, en la imagen 4.19 se muestra una tabla con los parámetros característicos de los rayos que típicamente caen en las columnas de 90, 50, 10% y el máximo observado, marcando la peligrosidad de los mismos (bajo, medio, alto o extremo).

Parámetro	90% (bajo)	50% (típico)	10% (alto)	Máximo observado (extremo)
Corriente de pico	2 a 8 kA	10 a 25 kA	40 a 60 kA	230 kA
Velocidad de ascenso de la corriente (di/dt)	2 kA/ μ s	8 kA/ μ s	25 kA/ μ s	50 kA/ μ s
Duración total del rayo	0,01 a 0,1 s	0,1 a 0,3 s	0,5 a 0,7 s	1,5 s
Duración de un simple impulso o descarga	0,1 a 0,6 ms	0,5 a 3 ms	20 a 100 ms	400 ms
Intervalo de tiempo entre impulsos	5 a 10 ms	30 a 40 ms	80 a 130 ms	500 ms
Intervalo de tiempo entre el principio y la mitad del valor de pico en el lado de caída	10 a 25 μ s	28 a 42 μ s	52 a 100 μ s	Más de 120 μ s
Tiempo hasta el valor de pico	0,3 a 2 μ s	1 a 4 μ s	5 a 7 μ s	10 μ s
Número de impulsos o descargas en un rayo individual	1 a 2	2 a 4	5 a 11	34

Figura 4.19: Parámetros característicos de los rayos [25]

Otro punto importante a tener en cuenta es la sobretensión debida al aumento del potencial de tierra. Cuando un rayo cae en un lugar determinado, los efectos que éste produzca van a depender de la corriente que transporte. Por eso se muestra a continuación la figura 4.20, que para poder entender mejor, se ilustra un dibujo en el esquema 4.21.

Diferencia de potencial en V, kV o MV							
X en metros (distancia axial)							
Distancia D en metros	10	20	30	50	70	100	200
10	796 K	1,06 M	1,19 M	1,33 M	1,39 M	1,45 M	1,52 M
15	424 K	606 K	707 K	816 K	874 K	923 K	987 K
20	265 K	398 K	477 K	568 K	619 K	663 K	723 K
30	133 K	212 K	265 K	332 K	371 K	408 K	461 K
40	79,6 K	133 K	171 K	221 K	253 K	284 K	332 K
50	53,1 K	91,9 K	119 K	159 K	186 K	212 K	255 K
70	28,4 K	50,5 K	68,2 K	94,7 K	114 K	134 K	168 K
100	10,5 K	26,5 K	36,7 K	53,1 K	65,5 K	79,6 K	106 K
150	6,6 K	12,5 K	17,7 K	26,5 K	33,8 K	42,4 K	60,6 K
200	3,8 K	7,2 K	10,4 K	15,9 K	20,6 K	26,5 K	39,8 K
300	1,7 K	3,3 K	4,8 K	7,6 K	10,0 K	13,3 K	21,2 K
400	970	1,9 K	2,8 K	4,4 K	5,9 K	8,0 K	13,3 K
500	624	1,2 K	1,8 K	2,9 K	3,9 K	5,3 K	9,1 K
700	320	632	934	1,5 K	2,1 K	2,8 K	5,1 K
1 km	158	312	464	758	1,0 K	1,4 K	2,7 K
2 km	40	79	118	194	269	379	723
3 km	18	35	53	87	121	171	332
5 km	6	13	19	32	44	62	122
10 km	2	3	5	8	11	16	31

Figura 4.20: Diferencia de potencial que puede producir un rayo [12]

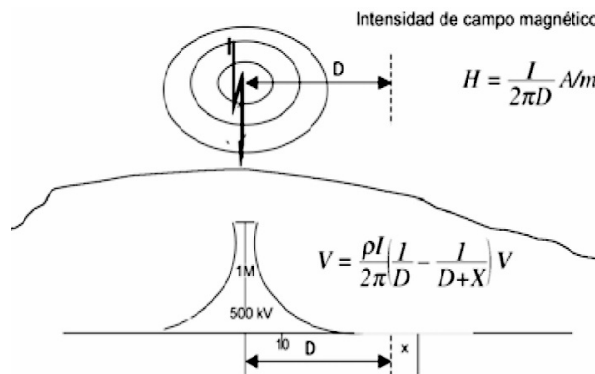


Figura 4.21: Diferencia de potencial en función de la distancia [12]

En estas dos imágenes lo que se puede apreciar es una tabla de la diferencia de potencial que habría entre los puntos D y D+X. La distancia D en la tabla está representada en la primera columna de la izquierda, mientras que en la parte superior, a la derecha de D nos encontramos unos valores que son los correspondientes a X. La distancia que hay desde donde cae el rayo hasta donde se empieza a medir esta diferencia de potencial es D, mientras que X es la distancia a la cual se encuentra el otro punto de medida.

4.2. Análisis de las escenas

Una vez comprendida la teoría relativa a la creación de tormentas, formación de rayos y los métodos que favorecen a estos procesos, se procede a analizar las escenas escogidas a esta temática.

4.2.1. Escena 01: X-Men



Figura 4.22: Cartel de la película X-Men

En una realidad alternativa, la evolución de la especie humana ha llevado a la aparición de una serie de personas que nacen con poderes insospechados: los mutantes. Éstos, sin embargo, no son bien vistos por la sociedad, la cual reclama mayor protección y seguridad, por lo que los mutantes viven marginados y escondiéndose.

La película supuso el primer acercamiento del cine a los mutantes que ya residían en los comics de la editorial Marvel y para ello contó con unos espectaculares efectos especiales, una potente historia, una buena fotografía y un reparto con mucha cara conocida, para poder narrar con garra y tensión toda la vorágine fantástica que mueve a esta épica y adrenalínica batalla. Por ello, tiene el privilegio de ser una de las mejores adaptaciones existentes por la vía cómic-cine.



Figura 4.23: Mutantes de la Escuela de Charles Xavier. Tormenta en el centro

El Dr. Xavier (Sir Patrick Stewart) es un mutante benévolo, que acoge en su escuela a jóvenes mutantes desamparados, para educarlos y enseñarles el respeto hacia los demás y la tolerancia entre todos. Pero, además, debe detener a su antiguo amigo, ahora enemigo íntimo, el famoso Magneto (Sir Ian McKellen), que está del lado de las armas, con las miras puestas en golpear a la especie humana, intentando autoproclamarse Dios de la Humanidad, al buscar la reconversión a mutante de toda persona en el planeta.

Junto al Dr. Xavier, otros mutantes le ayudarán a detener a Magneto y los suyos. De entre todos ellos, una mutante llamada Tormenta (Hally Berry) tiene el poder de controlar los fenómenos meteorológicos. Es capaz de generar tormentas de la nada con rayos y fuertes vendavales. Este análisis quiere comprender cómo Tormenta puede generar esos fenómenos.

Conocemos que para que una tormenta tenga lugar, la atmósfera tiene que ser inestable, es decir, tiene que permitir que una masa de aire parta de la superficie y sufra una expansión adiabática, subiendo gracias a que está más caliente que el aire que está a su alrededor (posee menor densidad).

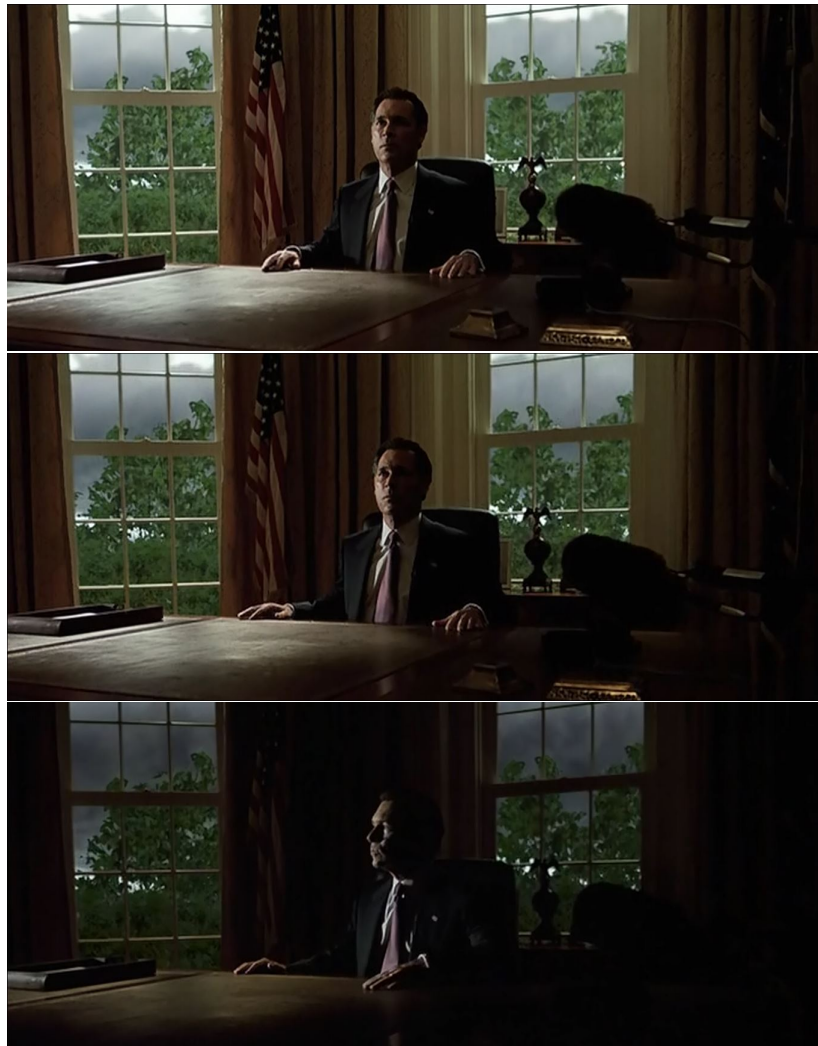


Figura 4.24: Creación de una tormenta, 3 imágenes de la película en un intervalo de 2s. “X2: United”

En el vídeo que se esconde en el código QR se puede apreciar como en apenas unos pocos segundos, Tormenta crea una. La formación de una tormenta lleva su tiempo, y no es posible que se tarde lo que ocurre en esa película.

Recordemos los requisitos necesarios para que se forme la tormenta: es necesario tener energía, humedad y una condición de disparo. Asumimos que toda masa de aire, en mayor o menor medida, va a contener una cierta humedad.

Como se ha visto anteriormente, la energía potencial convectiva (CAPE) dependerá del estado de la atmósfera en ese momento y de la temperatura de la masa de aire.

De los 3 requisitos que se tienen que dar para que se forme una tormenta, está claro, que la energía no la puede controlar como tal, pues no se puede alterar el estado inicial de la atmósfera en esos momentos. Por el mismo motivo, a la humedad del aire tampoco puede aportar mucho, aunque podría darse el caso de que ayudara a saturar el aire. Por tanto, se podría decir que lo único que puede controlar Tormenta en sí podrían ser las condiciones de disparo.

Volviendo atrás, vimos que las condiciones de disparo son:

- **Las montañas**, el viento choca con una y se ve obligado a subir.
- **El forzamiento dinámico**, donde dos masas de aires que se desplazan en sentidos diferentes, se encuentran.
- **El sol**, que calienta la superficie terrestre y la capa de aire inferior asciende.

Está claro que una persona no puede mover montañas (a menos que sea Superman o Hulk, y dudo que puedan mover objetos tan masivos). Así que lo único que quedaría, por descarte, sería que Tormenta pudiera dominar las dos condiciones de disparo restantes.

Veamos la equivalente al sol.



Figura 4.25: Hipótesis del calentamiento del aire. “*Días del futuro pasado*”

Lo que ella haría sería calentar el aire de su alrededor, creando una masa de aire mucho más caliente que el de la atmósfera, provocando que esta masa de aire suba muy rápidamente, ya que en todo momento va a ser mucho menos densa que la propia atmósfera, pudiendo alcanzar gran altura, características de una nube con actividad eléctrica, como comentamos en la sección 4.1.2. Esta hipótesis podría cuadrar dentro de la rapidez con la que forma las tormentas, pero hay escenas como la que se muestra en la imagen 4.26 en la que aparecen rayos mientras ella está en el interior de un avión. En esas situaciones la teoría anteriormente nombrada no tendría ningún tipo de sentido, pues si calentara el aire, las personas que estuvieran dentro del vehículo acabarían asfixiadas por el aire caliente.

La otra opción sería el dominio del forzamiento dinámico, controlando el movimiento de las masas de aire. Partiendo de que el avión es una Jaula de Faraday, y que como se ha mencionado, va a impedir el paso de información, esta escena no debería podría ocurrir. Aún así, supondremos que los hechos que en ella aparecen son posibles. Si puede dominar el aire, podría controlar las cizalladuras para poder mejorar la creación de las tormentas. Por tanto, para poder crear esa tormenta, tendría que poder acercar varias masas de aire, que converjan y se produzca la ascensión del aire para poder crear esa nube de tormenta. Luego, podría conseguir en los diferentes estratos de la nube que el aire tuviera velocidades diferentes, haciéndolas girar y así favorecer la formación de las tormentas.



Figura 4.26: Tormenta usando sus poderes en el interior de un avión. “X2: United”

Por otro lado, poder dominar las masas de aire explicaría por qué Tormenta puede levitar en ciertas ocasiones, puesto que puede dominar las masas de aire. Así podría meterse en la corriente ascendente de la tormenta con una fuerza del aire suficientemente intensa para poder elevarse de una forma controlada y no salir despedida.



Figura 4.27: Tormenta levitando gracias a las corrientes ascendentes. “X-Men”

Pero de todo esto, hay algo que no cuadra... Si su poder es controlar las masas de aire.. los rayos deberían tener un efecto en ella exactamente igual que en el resto de personas, y como veremos en el análisis de las siguientes escenas, acabaría muerta.

Algo parecido ocurre con la serie “One Piece” de anime y manga (ya que son cómics y dibujos), ya que en el episodio número 268, “*¡Reunámonos con Luffy! ¡La guerra total de los piratas de Sombrero de Paja!*”, tienen una vara capaz de crear nubes juntando calor y frío y, posteriormente electrificarlas, generando una tormenta.

4.2.2. Escena 02: Thor



Figura 4.28: Poster de las películas principales de Thor

En la mitología nórdica, Thor es el dios del trueno, hijo de Odín y portador del “Mjolnir”, un martillo con el que podía alterar el tiempo y convocar huracanes y tormentas. En agosto de 1962, en el comic “Journey into Mystery”, Stan Lee, Larry Lieber y Jack Kirby, presentaron su propia versión de Thor, que compartía esas características con su homónimo de la mitología.

El personaje de Thor siempre ha sido popular dentro del mundo de los cómics, por su apabullante poder, y en todo momento ha tenido una buena legión de seguidores. Pero su fama se disparó cuando en 2010, se presentó a este superhéroe dentro del Universo Cinematográfico de Marvel (MCU). Desde ese año, Thor ha participado en 8 largometrajes diferentes, siempre interpretado además por Chris Hemsworth.



Figura 4.29: Personajes recurrente en las películas de Thor

Alguno de los poderes que pueden verse en las películas son: generación de rayos desde el propio cuerpo o creación de tormentas usando su martillo y concentración de los rayos en dicho punto.



Figura 4.30: Escena de Thor Ragnarok: Creación de rayos desde el propio cuerpo

En la película Thor Ragnarok, Odín muere, dejando el trono de Asgard libre. En ese momento, aparece la hermana de Thor, Hela, que quiere hacerse con el trono de su padre. Éstos intentan impedirlo, pero lo único que consiguen es llevarla hasta Asgard y en la lucha, Hela desintegra el martillo de Thor. Al intentar impedir que llegue a su mundo mediante el Bifrost, los hermanos se desvían y acaban en un mundo lejano, sin nadie conocido y Thor sin su maravillosa herramienta. Allí le obligan a luchar contra Hulk y, como no puede hablar con él porque no le reconoce, finalmente tiene que pelear, pero sin su martillo no puede vencerle. Durante la lucha final contra su hermana, se da cuenta que él no es un dios por el martillo, sino que el Mjólnir centra todo su poder.

Por tanto el poder de Thor no está dentro del martillo, sino dentro de él. Así que hay que preguntarse... Entonces ¿qué hace el martillo? ¿Cómo puede generar esos rayos?

La imagen típica que se conoce de Thor es la siguiente:



Figura 4.31: Thor con su Mjólnir

Para poder generar los rayos, Thor necesita romper el campo de ruptura del aire que le rodea, con un valor de 3MV/m . Y para poder hacer eso, tiene que haber alcanzado el campo de ruptura, que generará una diferencia de potencial, apareciendo el rayo.

Desde el punto de vista eléctrico podemos suponer a Thor como un gran condensador que almacenará carga. Además se sabe que la carga que almacene el condensador va a depender únicamente de la forma del mismo (su geometría), y no del campo o material, eliminando el problema de si es mejor o peor conductor. Es decir,

Thor tiene forma humana, por tanto, la carga capaz de almacenar su cuerpo será la misma que una persona en las mismas condiciones. Según [3], la capacidad del cuerpo humano oscila entre los 150-250 pF. Sin embargo nosotros, por mucho que nos concentremos, no conseguimos soltar chispas, lanzar a los malos por los aires o generar rayos, y como la carga que vamos a almacenar es la misma que la de Thor (aunque es cierto que es un dios y puede ser más grande) es imposible que él consiga algo más allá de las descargas electrostáticas que conocemos (a distancias cortas y de baja intensidad) y podemos sufrir nosotros, con un voltaje máximo de descarga entre los 30.000 y 40.000 V.

Una vez visto que es imposible que ocurra lo que la mitología nórdica nos hace creer (y Marvel). Obviando el problema anteriormente explicado, se va a buscar una forma de explicar cómo sería posible que se dieran los rayos. Como se hizo mención en el apartado 4.1.2, la tierra es un gran condensador. El condensador es de placas plano paralelas, con una placa la parte inferior de la nube y la otra, la superficie terrestre, como se puede ver en el siguiente dibujo:

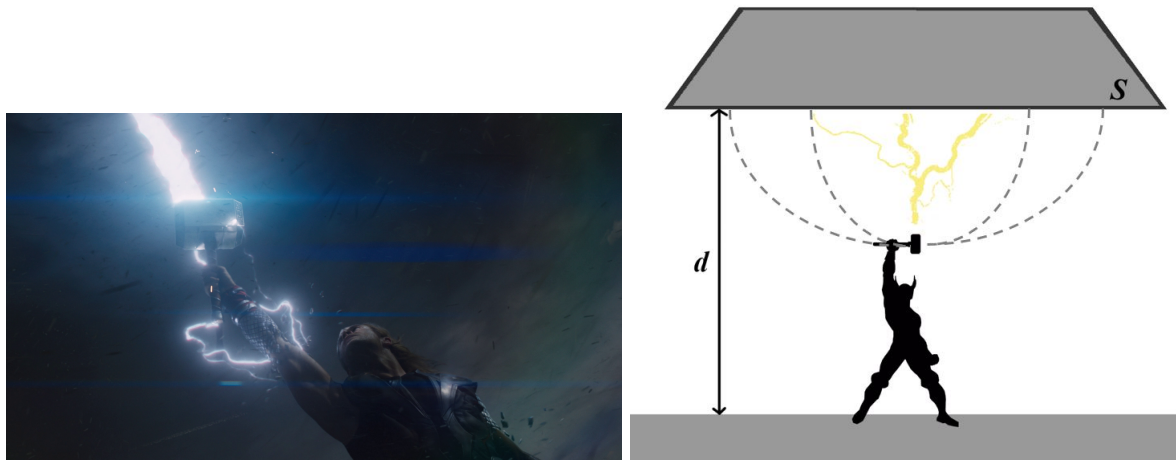


Figura 4.32: Analogía con un condensador

Cuando Thor va a lanzar un rayo (fig 4.31), primero eleva el martillo, lo carga con los rayos y luego los lanza desde el propio martillo. Por ser un condensador, se tiene que cargar y cuando haya almacenado el campo eléctrico de ruptura empezará a descargarse a modo de descarga eléctrica. Vamos a realizar los cálculos para encontrar la energía necesaria para producir estas descargas. La capacidad de un condensador de placas plano paralelas es $C = \epsilon \cdot \frac{S}{d}$, donde ϵ_0 es la permitividad del medio, S la superficie de las placas, y por último, d es la distancia que las separa, en este caso, la altura del suelo a la nube. En el análisis de esta escena nos interesa los órdenes de magnitud de los cálculos y no tanto los números en sí.

La superficie viene marcada por la nube. Se puede estimar que una célula pequeña tiene una superficie de 25km^2 ($5\text{km} \cdot 5\text{km}$), una mediana 100km^2 y por último, una gran célula de tormenta tendría una superficie aproximada de 400km^2 .

Cuando se habla de ϵ nos referimos a la permitividad del medio, la cual se obtiene mediante la expresión $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$, con ϵ_r la permitividad relativa al medio, que en el aire tiene un valor de 1,00058986, y ϵ_0 la del vacío, de valor $8,85 \cdot 10^{-12}$. Así, la permitividad que usaremos para estos cálculos es:

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 = 8,8594 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

En cuanto a la distancia, será la distancia del suelo a la nube. Para nuestros cálculos obtendremos la energía para diferentes alturas, situadas a 1km, 5km y 15km.

Por otro lado, la energía de un condensador viene dado por $\frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2$, siendo C la capacidad y V se aproxima, en este caso a $V = E_{ruptura} \cdot d$, quedando entonces la energía como:

$$U_p \simeq \frac{1}{2} \cdot C \cdot (E_{ruptura} \cdot d)^2$$

Si ahora se introduce el valor de la capacidad:

$$U_p \simeq \frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot \frac{S}{d} \cdot (E_{ruptura} \cdot d)^2 = \frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot S \cdot d \cdot (E_{ruptura})^2$$

Hagamos los cálculos para una célula de superficie $25\text{km}^2 = 25 \cdot 10^6\text{m}^2$ (pequeña) situada a 1km de distancia:

$$U_p \simeq \frac{1}{2} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot 1000 \cdot (3 \cdot 10^6)^2 = 9,961 \cdot 10^{11} J \sim 1TJ$$

De la misma forma se procede a hacer los cálculos para las distancias de 5km y 15km. Igualmente se hace para las células mediana y grande. Los resultados quedan reflejados en la siguiente tabla (todos los resultados de la energía vienen expresados en TJ):

Célula \ Distancia	1000 m	5000 m	15000 m
Pequeña (25km^2)	0,9961	4,98	14,941
Mediana (100km^2)	3,987	19,922	59,766
Grande (400km^2)	15,938	79,688	239,063

Tabla 4.2: Diferentes energías (en TJ) dependiendo del tipo de nube y la altura a la que se encuentra

En esta tabla se ven las energías que almacenaría el condensador antes de realizar la descarga. Las energías varían entre el valor de la distancia de 1km de la célula más pequeña y como máximo tendremos la energía de la célula más grande a más distancia del suelo.

La bomba atómica que se lanzó a Hiroshima tuvo una energía de 15kilotones, es decir, una energía de $2,28 \cdot 10^{13} J = 22,8TJ$. De hecho, al mirar la tabla, más de la mitad son energías más altas que la bomba de Hiroshima.

Otra pregunta que cabría plantearse es por qué los rayos van hacia Thor. Al tener poderes eléctricos, va a atraer las cargas del suelo hacia él y su martillo. Como está cargado, va a atraer las cargas de signo opuesto de las nubes, generando la diferencia de potencial. Como se ha visto en la figura 4.32, el que haya una persona en el condensador, hace que las líneas de campo no vayan de una placa a la otra, sino que se curven, haciendo que cuando salga el rayo, vaya hacia Thor. El rayo es recogido por el martillo, impactando en el momento inicial principalmente por las esquinas debido al efecto puntas. Como se ve en "*Thor Ragnarok*", Thor puede disponer de su poder sin necesidad del Mjólnir, así el martillo únicamente sería una vía de escape.

En la siguiente figura puede apreciarse perfectamente cómo funciona el efecto puntas. Se pone como ejemplo a un avión, diseñado para que cuando le caiga un rayo, incida por la esquina delantera y salga por las alas, zonas más puntiagudas.



Figura 4.33: Rayo en un avión

Una vez el rayo ha incidido por las esquinas, el aire se hace conductor alrededor. Los rayos se generarían aleatoriamente y ya no sólo en las puntas. Aquí se puede apreciar como el rayo incide por las puntas, ioniza el aire y finalmente salta a la armadura de Thor.



Figura 4.34: Mjolnir

Si nos paramos a pensar, en la película “*Avengers Infinity War*”, Thor se hace con una nueva herramienta, un hacha creada por el mismo maestro que construyó el Mjolnir, en el mismo lugar y con los mismos materiales... A excepción de una cosa: el mango pasaba a ser de madera extraterrestre, pues hubo un problema y Groot para poder ayudar a éste en el último momento tiene que arrancarse un brazo, formando parte de este hacha. La forma del hacha también presenta zonas puntiagudas en las que los rayos podrían incidir con mayor probabilidad, gracias de nuevo al efecto puntas. Por tanto, esta posibilidad no es tan descabellada.



Figura 4.35: Escena de *Avengers Infinity War*: Cambio del martillo por un hacha con el mango de madera, parte del cuerpo de Groot

4.2.3. Escena 03: A dos metros bajo tierra



Figura 4.36: Logo “A dos metros bajo tierra”

“*Six Feet Under*” (o “*A Dos Metros Bajo Tierra*”, en español) es una serie de HBO que comienza su emisión el 3 de junio del año 2001 en EEUU, mientras que en España se tuvo que esperar hasta el 6 de mayo del 2003.

La serie trata sobre una funeraria regentada por Nathaniel Fisher, padre de familia, y ayudado por David Fisher, su segundo hijo. La serie comienza el día de Navidad, mientras Ruth (la madre) intenta reunir a todos sus hijos para la cena de Navidad. Durante el vuelo de vuelta a su hogar, Nate (el hijo mayor) recibe la llamada de su hermana Claire anunciándole la muerte de su padre, arrollado por un autobús mientras iba a recoger un cuerpo para la funeraria. La serie recoge la vida de esta peculiar familia, de cómo Nate tiene que abandonar su vida para ayudar a su hermano a sacar a flote la funeraria, y las idas y venidas de Ruth y Claire, mientras el espíritu de Nathaniel les sigue perturbando, metiéndose con ellos y, muy ocasionalmente, dándoles algún consejo.



Figura 4.37: Reparto de “A dos metros bajo tierra”

Lo peculiar de esta serie es la manera en la que afronta la muerte, ya que en todos los capítulos muere alguna persona. Los tres primeros minutos de cada episodio se destina a mostrar la muerte de la persona que se va a embalsamar.

En esta escena 4.38, se ha escogido el capítulo 4 de la 4ª temporada “¿Puedo salir ahora?”, donde un hombre, sale a la calle en un día de tormenta y le alcanza un rayo, causándole la muerte.



Figura 4.38: Escena de ¿Puedo salir ahora?

La pregunta es: ¿El rayo que le cae, debería haberle matado? ¿Podría existir alguna posibilidad de sobrevivir a este impacto?

Como se puede apreciar en el vídeo, el hombre coge un paraguas situado en el interior del edificio y sale a la calle. No se puede llegar a apreciar en la escena si el extremo del paraguas es de metal o de madera, pero lo que sí se llega a ver es que tiene un extremo bastante largo, pudiendo provocar un efecto puntas, creando una salida fácil para el rayo. En la imagen se ve cómo el rayo va directamente al pico que sobresale en la parte alta del paraguas. Si observamos (casi con una lupa y con algo de imaginación), aunque la calidad de la imagen es mala (la serie es antigua y hace que se pixele más la imagen) se puede intuir que en el momento que el rayo descarga sobre él, tiene únicamente un pie en el suelo. Se hace un esquema de lo que ocurre en las imágenes 4.39.

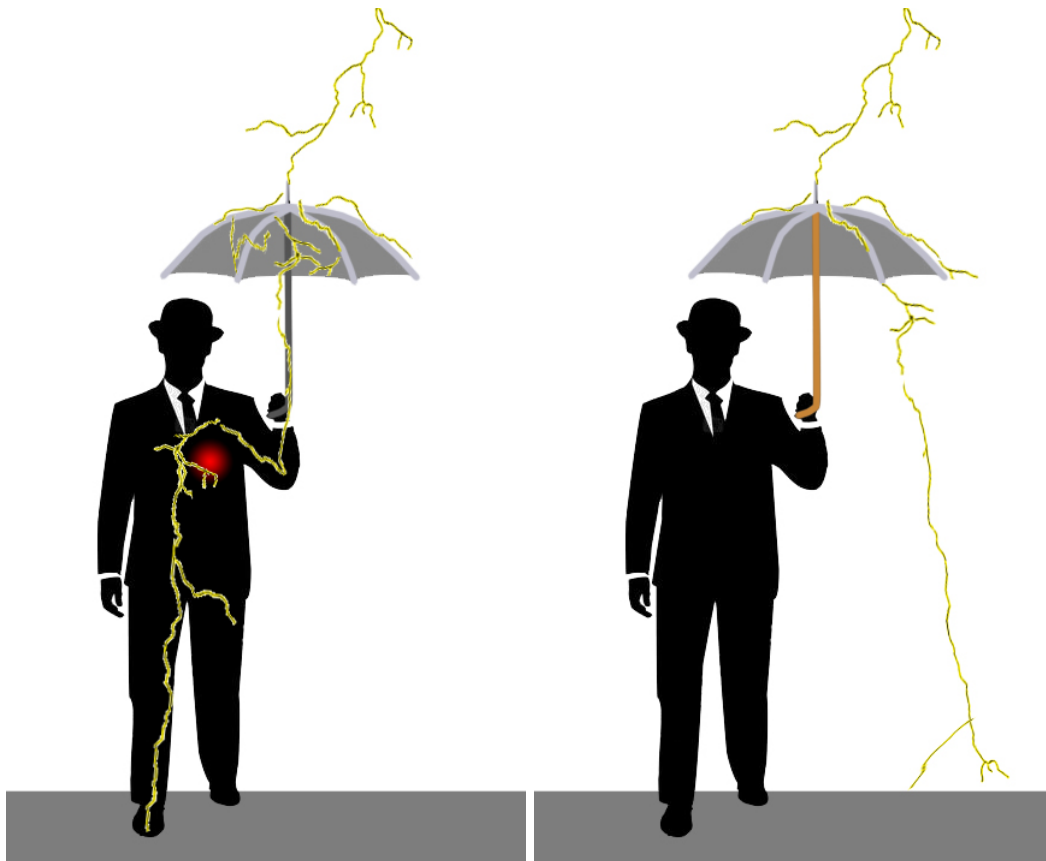


Figura 4.39: Posibles descargas a un paraguas

Como se puede apreciar en la imagen de la derecha, si el paraguas tuviera el mango de madera, por ser éste un material aislante, la descarga podría propagarse a través de las varillas. Debido al efecto puntas, aparecería además el llamado **Fuego de San Telmo** en el extremo de las varillas. El aire que las rodee se ionizará, permitiendo una vía de escape, y con alta probabilidad, los rayos van a partir desde ese punto a uno con un potencial menor (la propia persona, el suelo o cualquier objeto que se pueda encontrar por la calle). En el caso de la izquierda, el mango es de metal, material conductor, ofreciendo menos resistencia al paso de corriente y llegando el rayo a la persona. Nuestro caso es el de la izquierda, porque en nuestras escenas no se ven rayos saliendo del paraguas y, además la persona acaba muriendo.

Teniendo en cuenta los datos mostrados en la subsección 4.1.2, el 95% de los rayos suelen ser negativos. La serie tiene lugar en Los Ángeles, situada en la costa oeste, en el estado de California. Por tanto, se supone que el rayo podría ser negativo, en una zona litoral (tabla 4.1), y una intensidad media de corriente de 32kA [12].

Como hemos visto anteriormente, cuando una corriente atraviesa el cuerpo humano produce una serie de efectos dependiendo de la intensidad y de la resistencia que ofrezca el camino escogido. Pero existe un problema: las tablas y efectos nombrados en el capítulo 3 están construidas para una corriente de baja frecuencia. Un rayo atmosférico tiene un rango muy amplio de frecuencias, ya que abarca altas frecuencias. Se quieren analizar los cuatro tipos de rayos que hay, y para ello, se recurrirá a una tabla del espectro de frecuencia de un rayo y otra de la energía transferida debido al efecto Joule, que se muestran a continuación en las figuras 4.40 y 4.41.

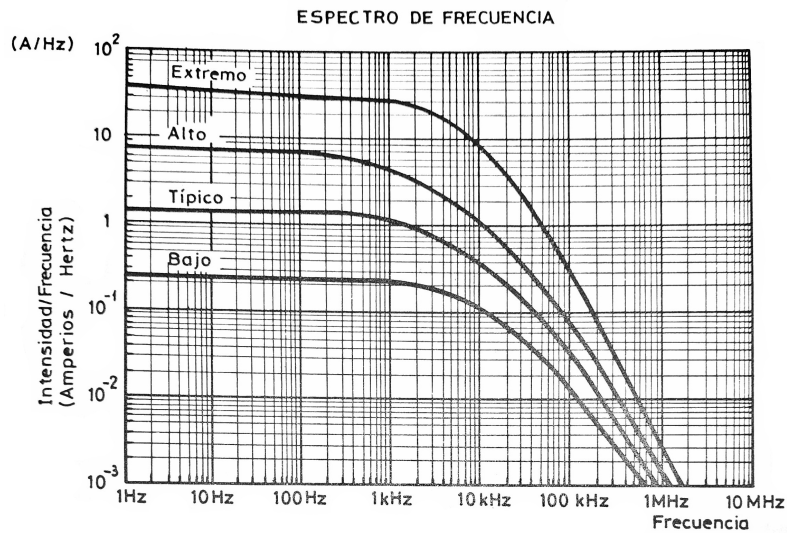


Figura 4.40: Distintas intensidades de descargas en función de la frecuencia y la intensidad [25]

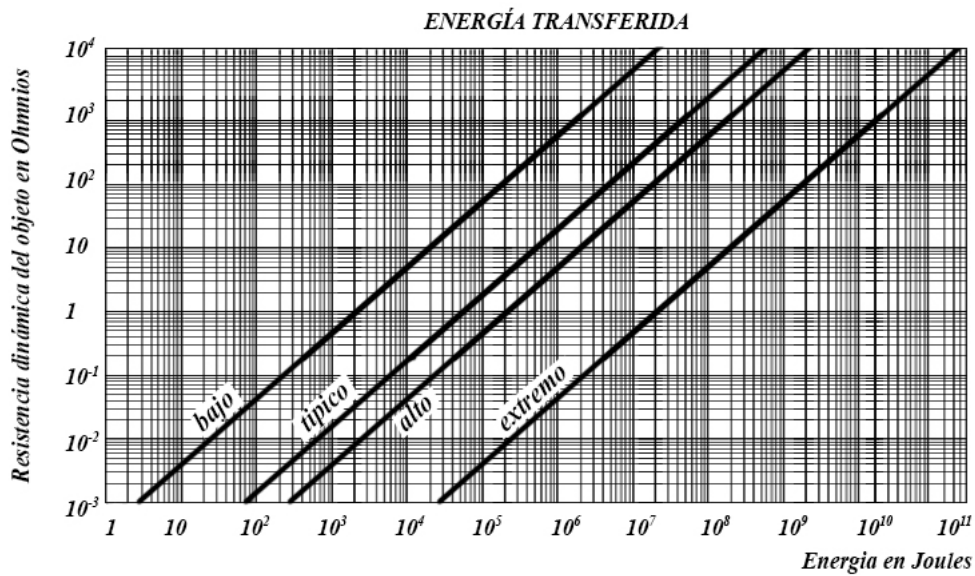


Figura 4.41: Resistencia de un objeto respecto a la energía disipada por efecto Joule [25]

Lo que se realiza a continuación no es un cálculo exhaustivo ya que se desea comparar los órdenes de magnitud.

Estas gráficas recogen el estudio de corrientes mayores que 1 miliamperio. La señal de corriente a analizar es un pulso temporal, por lo que se supone una superposición continua de varias frecuencias. Para los cálculos, lo aproximamos a una señal cuadrada en frecuencia, lo que se ve en la figura 4.42. Ya que en la primera gráfica las curvas de todos los tipos de rayo empiezan a decaer en la misma zona, y alcanzan aproximadamente la misma frecuencia, se aproximan todas a una caja cuyo final situaremos, en aproximación, sobre los 20kHz.

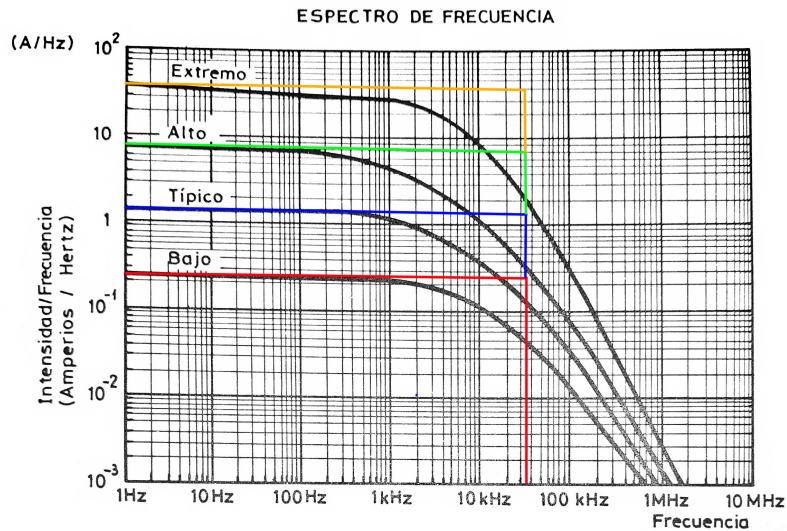


Figura 4.42: Pulsos de cada rayo: Bajo(rojo, Típico(azul), Alto(verde) y Extremo(naranja)

Para poder calcular la intensidad que va a tener cada uno de esos rayos, lo que se hace es aproximar la integral de la intensidad correspondiente a la transformada de Fourier $I = \int (I(\omega) \text{sen}(\omega t)) d\omega$, que no es más que el área encerrada bajo la curva (donde ω es la frecuencia, t el tiempo). Al hacer la aproximación al pulso, el área vendrá dada por:

$$I \sim (I/f) \cdot f$$

Calculando la intensidad correspondiente a cada rayo:

- **Bajo:** $I \sim 0,25A/Hz \cdot 20kHz = 0,25A/Hz \cdot 20000Hz = 5kA$
- **Típico:** $I \sim 1,5A/Hz \cdot 20kHz = 1,5A/Hz \cdot 20000Hz = 30kA$
- **Alto:** $I \sim 8A/Hz \cdot 20kHz = 8A/Hz \cdot 20000Hz = 160kA$
- **Extremo:** $I \sim 40A/Hz \cdot 20kHz = 40A/Hz \cdot 20000Hz = 800kA$

Mirando las intensidades calculadas para estos tipos de rayos, se aprecia que cuadran los cálculos con lo supuesto al principio. Para comprobar los efectos que producirían estas corrientes en el cuerpo humano, habría que mirar las tablas presentes en el capítulo 3, pero las intensidades que tienen estos rayos son enormes, se escapan de las tablas. Calculando el tiempo del pulso:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{20 \cdot 10^3} = 5 \cdot 10^{-5} s$$

Al ser un tiempo de descarga tan pequeño, el único efecto que habrá será de quemaduras o parada cardiaca reversible (fig: 3.4).

Mirando la figura 4.41 se obtendrán las energías. Según [3], la resistencia del cuerpo humano va a depender de muchos factores, por eso se suele encontrar un rango de la resistencia entre $500\Omega - 10k\Omega$, pero el valor mínimo se sitúa en 1000Ω . Conociendo la recta de cada uno de los rayos y la resistencia del cuerpo humano, se conocerá el dato de la energía. La siguiente cuenta que aparecerá en cada uno de los rayos se corresponde con la potencia disipada al paso de una corriente, también conocida como la *Ley de Joule*.

- **Bajo:** $E = 2 \cdot 10^6 J \implies P = \frac{E}{T} \sim \frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^{-5}} \sim 4 \cdot 10^{10} W = 40GW$
- **Típico:** $E = 4 \cdot 10^7 J \implies P = \frac{E}{T} \sim \frac{4 \cdot 10^7}{5 \cdot 10^{-5}} \sim 8 \cdot 10^{11} W = 800GW$
- **Alto:** $E = 10^8 J \implies P = \frac{E}{T} \sim \frac{10^8}{5 \cdot 10^{-5}} \sim 2 \cdot 10^{12} W = 2TW$
- **Extremo:** $E = 2 \cdot 10^9 J \implies P = \frac{E}{T} \sim \frac{2 \cdot 10^9}{5 \cdot 10^{-5}} \sim 4 \cdot 10^{13} W = 40TW$

Como se puede apreciar, los números son altísimos. Por tanto, se puede concluir que la persona falleció a causa de las quemaduras producidas por la corriente que le atravesó.

El rayo entró por el paraguas, agarrado por la mano, así que la primera parte del cuerpo con la que entró en contacto el rayo (a parte de la mano) fue el brazo. Se desea calcular si habría quemadura en el brazo.

Para ello se necesita calcular el área del brazo, por lo que me he medido el brazo y en el antebrazo, justo por debajo del codo, tengo un diámetro 24cm (suponiendo que es circular). Se calcula el radio:

$$24cm = 2\pi r \implies r = \frac{24cm}{2\pi} \sim 3,82cm = 38,2mm$$

El área:

$$A = \pi \cdot r^2 \sim 4583,66mm^2$$

Así que la intensidad por centímetro cuadrado en cada uno de los rayos sería de:

- **Bajo:** $\frac{I}{A} = \frac{5kA}{4583,66} = 1,091 \cdot 10^{-3}kA/mm^2 = 1091mA/mm^2$
- **Típico:** $\frac{I}{A} = \frac{30kA}{4583,66} = 6545mA/mm^2$
- **Alto:** $\frac{I}{A} = \frac{160kA}{4583,66} = 34907mA/mm^2$
- **Extremo:** $\frac{I}{A} = \frac{800kA}{4583,66} = 174533mA/mm^2$

Es decir, en cualquiera de los 4 tipos de rayo, ya en el propio brazo se producirían quemaduras.

En algunas ocasiones la gente sobrevive a los rayos. Dados los cálculos anteriores, se puede apreciar que un rayo es letal debido a las quemaduras que produce. ¿Qué es lo que ocurre en esas situaciones?

Cuando un rayo se forma, se crea un canal, es decir, un camino ionizado por el que el rayo va a producir la descarga. El área de ese canal es muy diverso, dándose ocasiones donde la sección del canal es mayor que la sección de la persona, y como la descarga se va a producir por el lugar donde la resistencia sea menor, es posible que evite a la persona y el rayo caiga justo al lado, pero no sobre la persona, librándose de la descarga.

4.2.4. Escena 04: Regreso al futuro



Figura 4.43: Portadas de la trilogía *Regreso al Futuro I, II y III*

Regreso al Futuro es una trilogía compuesta por tres películas dirigidas por Robert Zemeckis, producidas por Universal Studios, y estrenadas en 1985, 1989 y 1990, respectivamente.

Las películas cuentan las aventuras de “Doc”, Emmett Brown (Christopher Lloyd) y Marty McFly (Michael J. Fox), que viajan juntos en el tiempo utilizando un viejo DeLorean como máquina del tiempo, intentando arreglar errores cometidos accidentalmente y restaurando las cosas a la normalidad. En sus viajes conocen a sus padres, a sus tatarabuelos, o a sus futuros hijos y nietos, mientras intentan no alterar el pasado con su presencia.



Figura 4.44: Reparto principal de las películas

La trilogía supuso un fenómeno a escala mundial y todavía aun hoy, sigue siendo objeto de culto, celebrándose incluso un día en su honor. Una de las escenas más recordadas, y que tiene el honor de ser la única que aparece en las tres películas, es cuando, para poder devolver a Marty al presente, utilizan la corriente eléctrica de un rayo para alimentar el “condensador de fluzo” del DeLorean y conseguir que funcione. Para este trabajo, se ha escogido precisamente esa escena y se tratará de responder a la pregunta: “¿pudo “Doc” haber sobrevivido a esa descarga?”



Figura 4.45: Escena de Regreso al futuro

Cuando Marty viaja al pasado, busca a Doc para que le ayude a volver al presente. En el presente utilizan plutonio para generar una reacción nuclear y conseguir 1,21 GW, pero en el pasado les es imposible conseguir el plutonio, así que Doc se inclina por un rayo. Como Marty viene del futuro conoce cuándo y dónde va a caer un rayo.

En la escena se aprecia cómo el rayo que cae en el reloj del Ayuntamiento, estropeado desde ese impacto, es conducido a través de un cable colocado por Doc y llega hasta el lugar por donde pasará el DeLorean, haciéndolo funcionar y devolviendo a Marty al futuro. Poco antes de que la descarga se produzca, el cable se desenchufa y Doc corre para intentar unir las dos partes antes de que llegue el rayo (imagen 4.45). Consigue llegar al lugar a tiempo pero no juntar los dos extremos del todo. Cuando el rayo incide en el reloj, sigue por el cable hasta llegar al lugar en el que Doc se encontraba sujetando los cables, el rayo pasa mediante un arco eléctrico y Doc sale despedido hacia atrás. Finalmente, el DeLorean consigue la energía necesaria para volver.

En esta escena hay varias cosas que no tienen mucho sentido. En primer lugar, el rayo en el momento que descarga en el reloj es posible que circule por el cable, pero no a modo de “electricidad lenta”, muy típica del cine. Por otro lado, es extraño que a Doc no le ocurra nada más allá de ser impulsado hacia atrás. Y por último, que haya rayos por fuera del aislamiento del cable y, salte de un extremo al otro.

Para estudiar esta escena, es necesario conocer la energía suficiente para poder conseguir hacer funcionar el DeLorean. Además, a esta energía hay que añadirle las pérdidas producidas por el efecto Joule al circular por el cable y, por supuesto, el hecho de que salte de un lado a otro del cable. Ya se ha comentado anteriormente que un rayo sigue la trayectoria que menos resistencia ofrezca, y esta puede ser muy aleatoria. Es posible que la tormenta haya producido la ionización del aire entre los dos extremos, o simplemente la energía del propio rayo, creando un canal. Esa energía que gasta para crear ese canal habría que tenerla en cuenta a la hora de hacer los cálculos.

Por otro lado, es interesante saber por qué Doc no se ha matado al sujetar el cable. Se van a estudiar tres posibles escenarios.

Una opción es que el rayo siga por el cable, otra que pase parte del rayo a través de él y parte por el cable acabando en el otro cable o por último, el rayo le atraviesa, terminando en el suelo.

Como bien se ha analizado anteriormente, en cualquiera de los 4 tipos de rayo, se alcanzará la potencia que Doc reclama para poner en funcionamiento la máquina del tiempo, ya que el rayo más bajo disipa unos 20GW mientras que Doc necesita 1,21GW. Así que se puede afirmar que prácticamente cualquier descarga que se produzca será válida. Es muy importante recordar aquí que la descarga se producirá por el camino que ofrezca menos resistencia.

Comprobemos qué pasaría si el rayo siguiera por el cable. Una de las cosas que aparece cuando la descarga llega al reloj es que se ve perfectamente por dónde avanza y la trayectoria que sigue. Esto solo podría producirse si el cable se quemara y la protección del cable se destruyera, y el aire alrededor del mismo se ionizara. La mayor parte de la corriente se desplazará por el interior del cable, ya que ofrece menos resistencia. En el punto de ensamble, aunque los extremos estén separados, el rayo tiene tanta energía que la probabilidad de que el aire entre los extremos de cable se ionice es muy elevada. El aire ionizado tiene menos resistencia que Doc, generando un canal por el que la corriente se desplaza, llegando hasta el Delorean.

Pero el hecho de que Doc esté tocando el cable podría producirle algún efecto. En la escena se ve como sale despedido para atrás, lo que se traduce como una contracción muscular. Mirando en la tabla ??, para que se produzca eso tiene que haber entre 200mA y 500mA en un tiempo de 0.1s. Incluso despreciando el funcionamiento a “cámara lenta” del rayo, es posible ver que en esta escena, este tarda más tiempo en atravesar a Doc. Además, como ya se ha visto en “*A dos metros bajo tierra*”, las corrientes que circulan hasta en los rayos más débiles son muchísimo más elevadas que esos valores, por lo que esta opción no es posible. En el caso hipotético más favorable, nos encontraríamos en la zona 4, en la cual se le tendrían que haber producido quemaduras, que tampoco se aprecian.

La única posibilidad es que toda la corriente se destinara a viajar por el cable, que es el arco que se ve en la escena, a excepción de 200-500 mA, que seguirían la trayectoria atravesando a Doc. Ahí es donde entraríamos en el segundo caso, y es que si la corriente se propagara principalmente al circular por el cable, Doc podría sobrevivir.

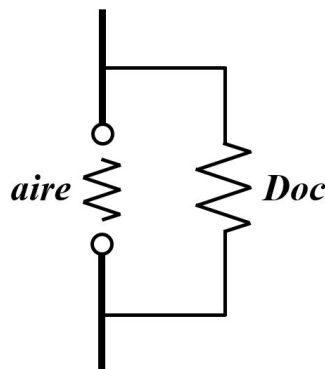


Figura 4.46: Esquema de asociación en paralelo de Doc y el cable

En el tercer caso, sería muy parecido a lo ocurrido en la escena estudiada anteriormente. Al circular toda la corriente por el cuerpo de Doc, no sería posible que éste sobreviviera al impacto.

Por ello, la única posibilidad aceptable sería la de que toda la corriente pasara por el cable, a excepción de los 200-500 mA, que se irían en el trayecto mano-mano de Doc.

Capítulo 5

Bobina de Tesla

La Bobina de Tesla es un dispositivo fascinante capaz de crear efectos espectaculares. Es capaz de generar pulsos de alto voltaje desde algunos cientos de kilovoltios hasta varios megavoltios de amplitud en corriente alterna (CA) y de emitir descargas eléctricas que se extienden fácilmente varios metros y que recuerdan enormemente a los rayos.

La Bobina de Tesla es un invento de Nikola Tesla en el año 1914 y originalmente estaba destinado a transferir energía eléctrica sin cables a lámparas y otros dispositivos. En su patente, Tesla lo denominaba “Aparato para transmitir energía eléctrica”, y se utilizaría para transmitir energía eléctrica sin cables a través de una antena. La emisión de descargas eléctricas era un efecto no deseado que funcionaba como una “válvula de seguridad”, según el propio inventor [27].

La bobina de Tesla demuestra los principios fundamentales de fenómenos eléctricos de alta frecuencia. Muestra los principios de ionización de los gases y el comportamiento de los aislantes y conductores en contacto con campos eléctricos de alta frecuencia. Aunque inicialmente se utilizaba para prueba de aislantes de alto voltaje y para dispositivos de distribución de energía industrial, en los últimos años se han convertido en un requisito vital en muchas áreas de la investigación, particularmente aquellas que implican física de partículas y plasma, así como para los sistemas de potencia elevada que son necesarios para la generación de microondas y radiación de rayos X.

5.1. Base teórica

5.1.1. Principios básicos

Resistencia:

Una resistencia es un componente eléctrico que se opone al paso de una corriente. Cada conductor tiene una cierta resistencia si aplica una diferencia de potencial V en los terminales de una resistencia. La unidad de resistencia en el SI es el Ohmio. La corriente I que pasa a través de ella está dada por:

$$I = \frac{V}{R}$$

Esta fórmula se conoce como la Ley de Ohm. Se puede demostrar que la energía (en Julios/segundo) disipada debido a una resistencia es igual a:

$$P = VI = IR^2$$

Condensador:

Un condensador es un componente que puede almacenar energía en un circuito en forma de campo eléctrico. Está compuesto en su forma más básica por dos electrodos separados por un medio dieléctrico. Si hay una diferencia de potencial V entre esos dos electrodos, las cargas se acumularán en estos de la siguiente forma: una carga Q en el electrodo positivo y una carga opuesta $-Q$ en el negativo; y por lo tanto, surge un campo eléctrico entre ellos. Si ambos electrodos llevan la misma cantidad de carga, se puede escribir:

$$Q = CV$$

Donde C es la capacidad del condensador. Su unidad es el Farad [F]. La energía E almacenada en un condensador (en Julios) viene dada por:

$$E = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2$$

Donde uno puede notar que la dependencia en la carga Q muestra que la energía es de hecho la energía del campo eléctrico. Esto corresponde a la cantidad de trabajo que se debe hacer para colocar las cargas en los electrodos.

Bobina:

Una bobina almacena la energía en forma de un campo magnético. Cada circuito eléctrico se caracteriza por una cierta inductancia. Cuando la corriente fluye dentro de un circuito, genera un campo magnético B que se puede calcular a partir de la ley de Maxwell-Ampere:

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

La auto-inductancia de un circuito mide su tendencia a oponerse a un cambio en la corriente: cuando la corriente cambia, el flujo del campo magnético ϕ_B que cruza el circuito cambia. Eso lleva a la aparición de una “fuerza electromotriz” ε que se opone a este cambio.

La inductancia L de un circuito se define como:

$$V = L \frac{\partial I}{\partial t}$$

Donde $I(t)$ es la corriente que fluye en el circuito y V la fuerza electromotriz (FEM) que provocará un cambio de esta corriente. La inductancia se mide en Henrys [H]. La energía U (en julios) almacenada en una bobina está dada por:

$$U = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

Donde la dependencia en la corriente I muestra que esta energía se origina en el campo magnético. Corresponde al trabajo que debe hacerse contra la FEM para establecer la corriente en el circuito.

Transformador:

Un transformador es un dispositivo que sirve para aumentar o disminuir el voltaje de un circuito. Se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética. Se construye con dos hilos enrollados en forma de bobina alrededor de un núcleo que suele ser normalmente de hierro suave o ferrita, ya que son materiales que se pueden magnetizar y desmagnetizar fácilmente y que se encuentran aislados eléctricamente.

En su funcionamiento, se hace atravesar por el primero una corriente alterna, produciendo un campo magnético oscilante en el núcleo, que pasa al núcleo del segundo. Debido a este campo magnético oscilante, se induce una corriente alterna en la segunda bobina. Debido a que el voltaje en cada vuelta de la bobina es el mismo, y que este es proporcional al número de vueltas:

$$\frac{N_1}{V_1} = \frac{N_2}{V_2}$$

Debido a que la energía se conserva, la corriente en el lado en el que el voltaje es más alto, es más pequeño en la misma proporción.

Impedancia:

La impedancia de un componente expresa comportamiento de una componente en corriente alterna a una frecuencia y este concepto generaliza la noción de resistencia. De hecho, cuando se trata de corriente alterna, un componente actúa tanto en la amplitud como en la fase de la señal.

La impedancia puede representarse usando una forma normal y una compleja. El cambio entre las dos representaciones se realiza utilizando la fórmula de Euler. La utilización de números complejos es un simple truco matemático, ya que se entiende que solo la parte real de estas cantidades es significativa. Ahora se nos da una expresión de la forma general de la tensión $V(t)$ y la corriente $I(t)$:

$$V(t) = V_0 \cdot \cos(\omega t + \phi_V) \iff V(t) = V_0 \cdot \operatorname{Re}\{e^{j(\omega t - \phi_V)}\}$$

$$I(t) = I_0 \cdot \cos(\omega t + \phi_I) \iff I(t) = I_0 \cdot \operatorname{Re}\{e^{j(\omega t - \phi_I)}\}$$

Donde V_0 y I_0 son las amplitudes respectivas, $\omega = 2\pi f$ es la velocidad angular (se supone idéntica para ambas cantidades) y ϕ son las fases [30].

La impedancia, generalmente denotada por Z , estará entonces formada por una parte real, la resistencia R y una parte imaginaria, la reactancia X :

$$Z = R + jX$$

$$Z = |Z|e^{j\Theta}$$

Donde j es el número de unidad imaginaria, $\Theta = \operatorname{arccotan}(X/R)$ es la diferencia de fase entre Voltaje y corriente, y $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$ la forma euclidiana de Z en el plano complejo.

En este punto, podemos generalizar la ley de Ohm de la siguiente manera:

$$V(t) = ZI(t)$$

Cuando el componente solo actúa sobre la amplitud, es decir, cuando $X = 0$, la parte imaginaria desaparece y encontramos $Z = R$, y por lo tanto, se comporta como una resistencia. En este caso, se dice que el componente es puramente resistivo y se aplica la versión para corriente continua de la ley de Ohm. Cuando el componente solo actúa sobre la fase de la señal, es decir, cuando $R = 0$, la impedancia es puramente imaginaria. Esta conlleva el comportamiento “perfecto” de condensadores y bobinas.

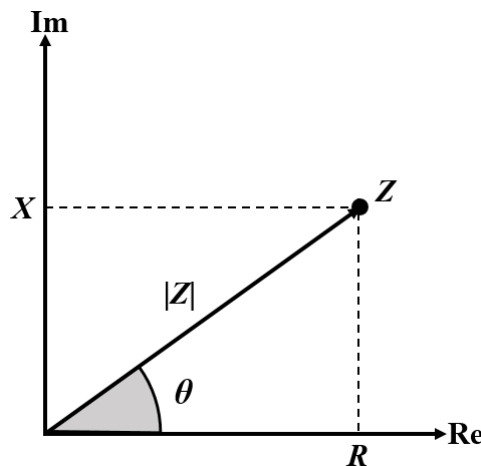


Figura 5.1: Representación de la impedancia en el espacio complejo

Podemos dar una fórmula general para la impedancia de cada tipo de componente.

Componente	Impedancia	Efecto de la señal alternante
Resistencia	$Z = R$	Disminución de la amplitud (corriente y tensión)
Condensador	$Z = \frac{1}{jC\omega}$	La tensión tiene un desfase de $\pi/2$ sobre la corriente
Bobina	$Z = jL\omega$	La corriente tiene un desfase de $\pi/2$ sobre la tensión

Tabla 5.1: Impedancia de cada componente

Estas fórmulas se obtienen fácilmente desde las expresiones diferenciales de estos componentes. Para cada combinación de componentes, se puede calcular la diferencia de fase entre la corriente y la tensión por vector, sumando las impedancias.

Finalmente, es bueno tener en cuenta que cualquier componente de la vida real tiene una resistencia y reactancia distinta de cero. Incluso el circuito más simple, un cable conectado a un generador tiene una capacitancia,

una inductancia y una resistencia, por pequeños que sean.

Circuito LC:

Un circuito LC se forma con un condensador **C** y una bobina **L** conectados en paralelo o en serie a un generador de señal sinusoidal (corriente alterna). Este circuito supone la base del funcionamiento de la Bobina de Tesla, ya que, en esta, los circuitos primario y secundario son circuitos LC en serie acoplados magnéticamente [28].

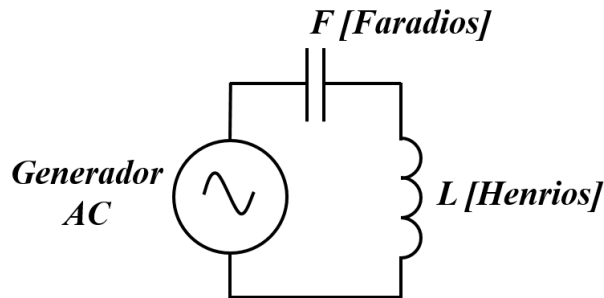


Figura 5.2: Circuito LC en serie

Usando la ley de Kirchhoff para la corriente, obtenemos que la corriente en la bobina y la corriente en el condensador son idénticas. Ahora usamos la ley de Kirchhoff para voltaje, que establece que la suma del voltaje a través de los componentes a lo largo de un circuito cerrado es cero, para obtener la siguiente ecuación:

$$V_{gen}(t) = V_L(t) + V_C(t)$$

Para la bobina, si se expresa la derivada de tiempo de la corriente en términos de carga, y según $I = \frac{dq}{dt}$ encontramos:

$$V_L(t) = L \frac{dI}{dt} = L \frac{d^2Q}{dt^2}$$

Ahora, para el condensador, si aislamos la carga Q en la relación $Q = CV$, obtenemos:

$$V_c(t) = \frac{1}{C} Q(t)$$

Al poner en la ecuación $V_{gen}(t)$ obtenemos:

$$V_{gen}(t) = L\ddot{Q} + \frac{1}{C}Q$$

Esta ecuación describe un oscilador armónico (no amortiguado) con conducción periódica. La bobina se asimila a la “masa” del oscilador: un circuito de gran inductancia tendrá mucha “inercia”. La constante del oscilador está asociada con la inversa de la capacitancia C^{-1} (esta es la razón por la cual a C^{-1} en ocasiones se denomina “elastancia”).

Frecuencia de resonancia:

En el análisis del circuito LC, encontramos que las oscilaciones de corriente y tensión ocurren naturalmente a una velocidad angular precisa, determinada de manera unívoca por la capacitancia y la inductancia del circuito. Sin otros efectos, las oscilaciones de corriente y voltaje siempre tendrán lugar a esta velocidad angular, llamada velocidad angular resonante (s^{-1}) [28].

$$\omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Es importante observar que, a la velocidad angular resonante, las partes reactivas respectivas de una bobina y un condensador son iguales (en valor absoluto). Sin embargo, es mucho más importante hablar sobre la frecuencia resonante, que es solo una escala de la velocidad angular:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Cuando hay un generador de señal sinusoidal, también vimos que, si su frecuencia es igual a la frecuencia de resonancia del circuito que impulsa, la corriente y el voltaje tienen amplitudes cada vez mayores. Por supuesto, esto no sucede si son diferentes (la oscilación permanece limitada).

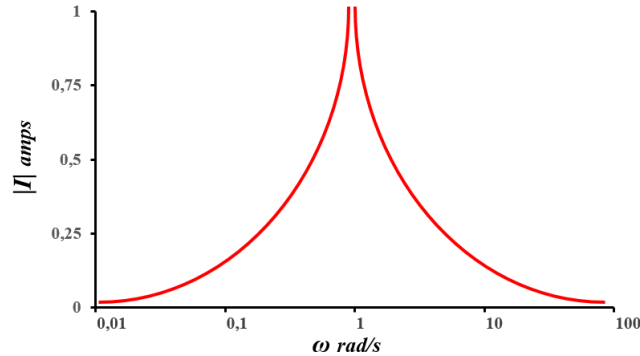


Figura 5.3: Relación velocidad angular resonante - corriente

En bajas frecuencias de conducción, la impedancia es principalmente capacitiva ya que la reactancia de un condensador es mayor a bajas frecuencias. A altas frecuencias, la impedancia es principalmente inductiva. En la frecuencia resonante, desaparece, de ahí el comportamiento asintótico de la corriente.

Sin embargo, en un circuito real, donde la resistencia no es cero, el ancho y la altura del pico están determinados por el factor **Q**, de que se hablará más tarde. El hecho de que conducir un circuito de LC a su frecuencia de resonancia (LCR) provoca un aumento dramático de voltaje y corriente que es crucial para el desarrollo de una bobina de Tesla. Pero también puede ser potencialmente dañino para el transformador que alimenta el circuito primario.

5.1.2. Funcionamiento de una Bobina de Tesla

Una bobina Tesla es un dispositivo que produce una corriente de alta frecuencia, a un voltaje muy alto pero de intensidad relativamente pequeña. Básicamente, es un transformador formado por dos circuitos (primario y secundario), que son circuitos LCR de baja resistencia acoplados magnéticamente. Sin embargo, las Bobinas de Tesla difieren radicalmente de un transformador convencional [30].

En primer lugar, un transformador estándar utiliza un acoplamiento hermético entre sus devanados primario y secundario y la relación de transformación de voltaje se debe solo al número de vueltas de cada devanado. Por el contrario, una bobina Tesla utiliza un acoplamiento relativamente flexible entre primario y secundario, y la mayor parte de la ganancia de voltaje se debe a la resonancia en lugar de a la relación de vueltas de devanado.

Un transformador normal utiliza un núcleo de hierro para funcionar a bajas frecuencias, mientras que la Bobina de Tesla tiene núcleo de aire para operar de manera eficiente a frecuencias mucho más altas.

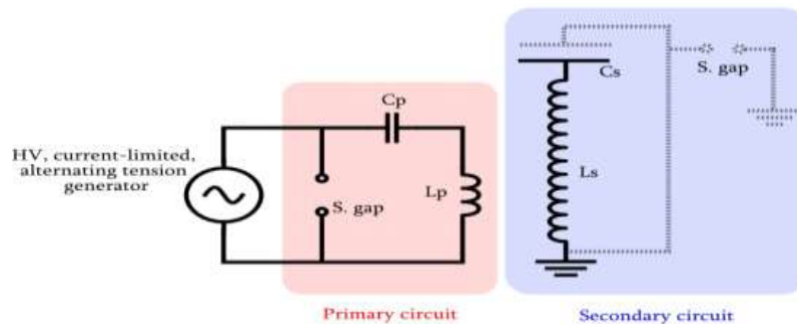


Figura 5.4: Esquema de una Bobina de Tesla

La figura 5.4 representa el esquema de una Bobina de Tesla. Las líneas punteadas en la figura representan que estas partes no son directamente visibles en el aparato, sino que los efectos que este produce corresponden a lo esperado de estas. Por ejemplo, con respecto al condensador secundario, vemos que una Bobina de Tesla físicamente sólo aporta una placa del condensador. Con respecto a la chispa secundaria, representada en el esquema a trazos, muestra el lugar donde tienen lugar los arcos de descarga.

A lo largo del funcionamiento de un ciclo en una Bobina de Tesla, ocurren las siguientes etapas:

Carga:

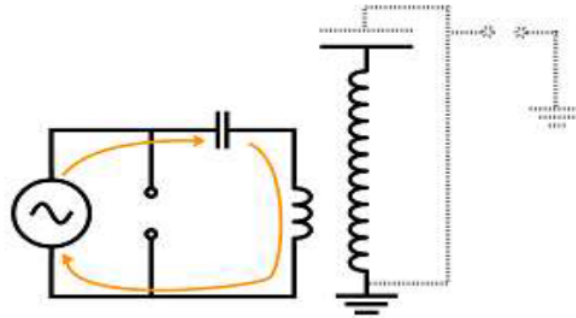


Figura 5.5: Carga del condensador primario

Este primer paso del ciclo es la carga del condensador primario por el generador de corriente alterna. Vamos a suponer la frecuencia eléctrica es de 50 Hz. La capacidad del condensador debe ser cuidadosamente elegida de modo que se cargue completamente en exactamente $1/100$ segundos, ya que la tensión del generador cambia dos veces un período.

Oscilaciones:

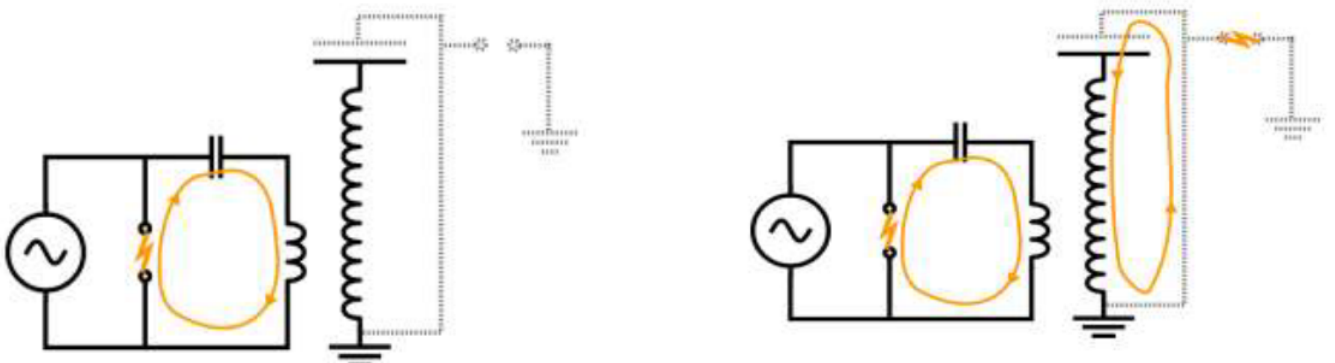


Figura 5.6: Oscilaciones entre el circuito primario y secundario

Cuando el condensador está completamente cargado, el boquete de chispa primario se activa y, por lo tanto, cierra el circuito primario. Conociendo la intensidad del campo eléctrico de rotura del aire, el ancho del espacio de chispa debe establecerse de modo que se dispare exactamente cuando la tensión a través del condensador alcanza su valor máximo.

A partir de este punto, no es necesario que el generador siga suministrando corriente eléctrica. La corriente y el voltaje oscilarán entonces en la frecuencia de resonancia de los circuitos; esta frecuencia es muy alta en comparación con la frecuencia de la red, generalmente entre 50 y 400 kHz.

Como los circuitos primario y secundario están acoplados magnéticamente, las oscilaciones que tienen lugar en el primario inducen una fuerza electromagnética en el secundario. A medida que la energía del primario se vierte en el secundario, la amplitud de las oscilaciones en el primario disminuirá gradualmente mientras que las del secundario se amplificarán. Esta transferencia de energía se realiza mediante inducción magnética.

El acoplamiento constante k entre los dos circuitos se mantiene a propósito bajo, generalmente entre 0.05 y 0.2. Por lo tanto, se requerirán varias oscilaciones para transferir la totalidad de la energía.

Las oscilaciones en el primario actuarán como un generador de voltaje de corriente alterna colocado en serie en el circuito secundario. Para maximizar el voltaje en el secundario, es intuitivo que ambos circuitos deben compartir exactamente la misma frecuencia de resonancia: esto permitirá que el voltaje en el secundario aumente drásticamente.

Rebotes:

Supongamos que ahora, toda la energía se ha transferido al circuito secundario. Con un boquete de chispa primario ideal, éste se desconectaría, el proceso finalizaría y podría comenzar un nuevo ciclo.

Sin embargo, el camino del aire ionizado subsiste unos momentos incluso cuando la intensidad del campo ha caído por debajo del valor crítico, y por lo tanto, la energía del secundario puede ser retransmitida de vuelta al primario de una manera similar.

La corriente y el voltaje en el secundario disminuirán mientras que los del primario aumentarán. Tales rebotes pueden ocurrir 3, 4, 5 veces o incluso más. En cada rebote, una fracción de la energía se pierde definitivamente, principalmente en las chispas producidas y en las resistencias internas de los componentes.

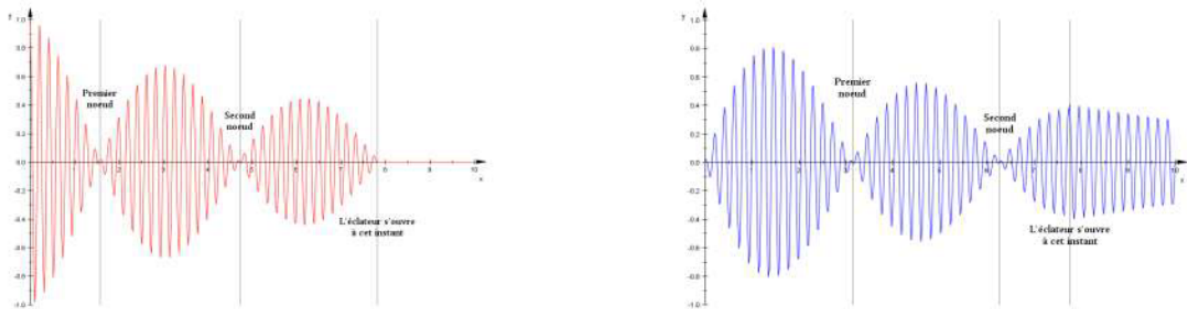


Figura 5.7: Representación de la amplitud de las ondas a lo largo del tiempo para las bobinas primaria y secundaria. Proceso de 3 rebotes

Esta es la razón por la cual la forma de onda cae exponencialmente. Después de un cierto número de rebotes, el voltaje habrá disminuido significativamente y el boquete de chispa se desconectará y no se volverá a abrir hasta el siguiente ciclo.

Estos rebotes son importantes para la creación de arcos largos, ya que crecen en la trayectoria del aire ionizado creado durante el rebote precedente. En cada rebote, la chispa se hace más larga. El proceso completo ocurre cientos de veces por segundo.

Decaimiento:

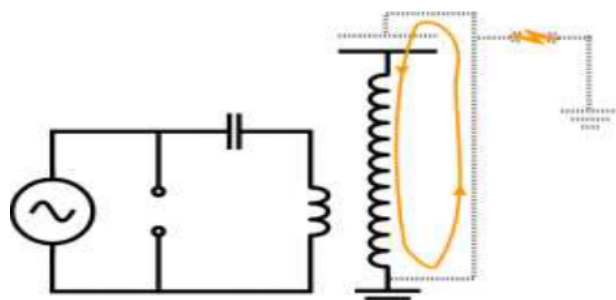


Figura 5.8: Decaimiento del circuito secundario

Una vez que el boquete de chispa principal se ha desconectado, el circuito primario está abierto y toda

la energía restante queda atrapada en el secundario. Esta situación es la misma que en un circuito LCR. Las oscilaciones decaerán exponencialmente a medida que la carga se disipa a través de las chispas.

5.1.3. Componentes principales de una Bobina de Tesla

Bobina primaria:

La bobina primaria se usa para crear el circuito LCR primario. Esta también se acopla a la bobina secundaria para transferir potencia desde el circuito primario al secundario.

La bobina primaria suele ser plana, aunque algunas Bobinas de Tesla más pequeñas pueden usar una espiral en forma de bobina primaria vertical. Las formas helicoidales cónicas verticales elevarán la parte superior de la bobina primaria más cerca de la carga superior y aumentarán las posibilidades de que un arco golpee la bobina primaria y aumentarán el acoplamiento entre las bobinas primaria y secundaria.

Un mayor acoplamiento es típicamente mejor en la mayoría de los transformadores, pero las Bobinas de Tesla es mejor que estén ligeramente acopladas. El sobreacoplamiento (o una mala conexión a tierra) puede provocar que el arco suba y baje por la bobina secundaria. Si se ven arcos subiendo por la bobina secundaria, las bobinas primaria y secundaria deberían alejarse más. Una manera fácil de hacerlo es simplemente elevar un poco la bobina secundaria.

Típicamente se usa tubería de cobre (aprox. 6mm) para hacer la bobina primaria. El espacio de giro entre cada vuelta debe ser del mismo tamaño aproximadamente (aprox. 6mm).

El armazón de la bobina primaria se puede construir en casi cualquier material no conductor. El material debe ser lo suficientemente fuerte como para soportar el peso del cobre. La barra de cobre suele sujetarse al armazón mediante barras de plásticos con muescas.

Bobina secundaria:

La bobina secundaria crea el circuito LCR secundario. El circuito secundario también se acopla a la bobina primaria para transferir potencia desde el circuito primario al secundario.

El tamaño de la bobina secundaria generalmente se rige por la potencia de salida de la fuente de alimentación. Para una Bobina de Tesla de tamaño promedio (aproximadamente 1kW), la bobina secundaria tendrá 10-15 centímetros de diámetro. Las bobinas más pequeñas deben tener aproximadamente 7-10 centímetros de diámetro, mientras que las bobinas más grandes deben tener al menos 15 centímetros de diámetro. Se necesitarán alrededor de 1000 vueltas en el bobinado secundario.

La relación de aspecto alto-ancho es importante. Si la bobina es demasiado corta, recibirá muchos golpes desde la carga superior hasta la bobina primaria. La altura de la bobina debe ser aproximadamente 4 o 5 veces su diámetro. Las bobinas más pequeñas deben tener una relación de aspecto más cercana a 6, mientras que las bobinas más grandes pueden estar incluso cerca de 3.

Toroide:

La placa superior actúa como un condensador en el circuito secundario y suele diseñarse con forma toroidal. Como ya se ha explicado, a medida que la bobina opera, se acumulará una carga alrededor de la superficie superior. Una esfera tendría una fuerza de campo distribuida uniformemente en toda su superficie. Sin embargo, al aplanar la esfera en un toroide, la intensidad del campo aumentará alrededor del radio y los arcos estallarán donde la intensidad de campo sea mayor.

El beneficio de concentrar el campo alrededor del radio es ayudar a dirigir los arcos hacia afuera. Usar una carga superior esférica daría como resultado arcos más pequeños distribuidos uniformemente.

El tamaño de este elemento y la cantidad de potencia aplicada determinarán el tamaño y la cantidad de arcos que produce la bobina de Tesla. Si este es pequeño, producirá numerosos arcos simultáneos y más cortos. A medida que aumenta el tamaño, se reducirá la cantidad de arcos y aumentará la longitud del arco. Si el toroide es demasiado grande, la intensidad del campo no será lo suficientemente fuerte para permitir que los arcos se rompan. Colocar un objeto punzante afilado como una chincheta (llamada punto de ruptura) en el

toroide creará una interrupción en el campo y permitirá que el arco se rompa desde el punto de ruptura.

En general, el diámetro de la circunferencia del toroide debe ser aproximadamente el mismo que el de la bobina secundaria, y su radio tiene que ser aproximadamente 4 veces el diámetro de la circunferencia del toroide. Es importante tener el toroide a la altura correcta por encima de los devanados secundarios. Si el toroide es demasiado alto, verá una corona desarrollarse cerca de la parte superior de los devanados secundarios. También puede ver algunos pequeños arcos desde la parte superior de la bobina secundaria. La corona y los arcos pueden degradar el aislamiento del bobinado secundario.

Boquete de chispa:

El boquete de chispa se usa como un interruptor para conectar momentáneamente el condensador primario a la bobina primaria. Cuando se apaga la chispa, se permite que se descargue en la bobina. Se pueden usar muchos diseños de chispa, aunque existen dos diseños básicos: estático y rotativo. Cuando los electrodos que se utilizan son estacionarios, el espacio se denomina espacio "estático". Un espacio rotativo usa electrodos giratorios.

El diseño más simple es un espacio estático que consta de 2 pernos o similares que actúan como electrodos. Los electrodos deben ser lisos y redondeados, sin bordes afilados que puedan causar un cortocircuito errático. El ancho necesario determina el voltaje requerido para el espacio. La brecha ideal se acortará justo cuando la carga primaria alcanza su voltaje máximo.

Las brechas estáticas son el diseño de espacio más simple, pero tienen algunas desventajas. A menudo, la brecha continuará después de que el voltaje haya caído por debajo de su pico. Esto sucede porque el aire sigue ionizado aún cuando se corta la brecha. El aire ionizado es más conductivo y permite que la brecha permanezca.

Toma de tierra:

La conexión a tierra es importante para la seguridad y el funcionamiento correcto de la bobina. La Bobina de Tesla debe tener dos tierras separadas: la primera toma de tierra es la toma de tierra de la casa o el edificio; y la segunda, debe estar conectada a una varilla de puesta a tierra de metal que se golpee contra el suelo. Cualquier cosa que pueda ser golpeada por un arco de descarga, o que pueda experimentar regímenes transitorios de alta tensión, debe conectarse a esta segunda tierra.

La varilla de conexión a tierra deberá estar lo más cerca posible de la Bobina de Tesla, y lo más lejos posible de la varilla de tierra de la casa o del edificio. Generalmente se recomienda una profundidad mínima de 6 u 8 pies, pero realmente depende de las condiciones del suelo y otros factores, siendo siempre mejor, cuanto más profundo sea.

5.1.4. Formulación teórica

Voltaje máximo:

Vamos a obtener una fórmula aproximada que da la tensión V en el bobinado secundario. Llamamos a V_{en} al voltaje en corriente alterna suministrado por el transformador. La siguiente derivación se basa en la conservación de la energía, y supondremos que no hay pérdidas resistivas ($R = 0$) y que los circuitos primario y secundario están perfectamente en resonancia.

Recordemos la fórmula que proporciona la energía almacenada en un condensador como una función del voltaje. La energía del circuito primario (U_p) está así dada por:

$$U_p = \frac{1}{2} C_p V_p^2$$

Donde C_p es la capacidad del condensador primario.

La energía U_s almacenada en el circuito secundario es:

$$U_s = \frac{1}{2} C_s V_s^2$$

Usando la hipótesis de que toda la energía almacenada en el primario entra en el secundario, equiparamos U_p y U_s :

$$\frac{1}{2}C_p V_p^2 = \frac{1}{2}C_s V_s^2$$

La ganancia de voltaje es entonces:

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{C_p}{C_s}} = \sqrt{\frac{L_s}{L_p}}$$

Ahora podemos entender cómo la Bobina de Tesla puede alcanzar voltajes tan altos: la bobina secundaria, que tiene alrededor de 1000 vueltas, tiene una inductancia considerablemente más alta que la bobina primaria, que generalmente tiene 10 vueltas. Usando valores típicos, esta fórmula producirá un V_s del orden de 10^5 V o incluso 10^6 V para las bobinas más grandes.

Pérdidas de energía:

La operación de una Bobina de Tesla no es tan ideal como se mostro en la figura 5.4. Existen pérdidas en diferentes puntos del circuito:

- El cableado y las inductancias tienen una resistencia interna que disipa la energía en forma de calor según $P = R \cdot I^2$. Una Bobina de Tesla contiene varios cientos de metros de cable. El efecto de piel, que explica que la corriente fluya principalmente cerca de la superficie de los conductores a frecuencias más altas, aumenta aún más la resistencia efectiva.
- Las chispas que ocurren en el boquete de chispa actúan como una resistencia, disipando energía en forma de luz, calor y sonido.
- El dieléctrico dentro del condensador primario disipa una fracción de la energía cuando se aplica una corriente alterna. La pérdida depende del dieléctrico utilizado y la frecuencia.
- La bobina Tesla opera a frecuencias de radio (típicamente entre 50 y 400 kHz). Una fracción de la energía se irradia como ondas electromagnéticas.
- El efecto Corona es una descarga continua de los conductores en el medio ambiente, produciendo un halo violeta alrededor de conductores mantenidos a altos voltajes. La energía utilizada para ionizar el aire se toma de la bobina.

Oscilación y sintonización:

La oscilación es el proceso por el cual se produce un intercambio de energía entre la bobina y el condensador en un circuito LCR. La forma de onda de salida de una Bobina de Tesla, que comúnmente se conoce como “timbre”, es causada por la respuesta oscilatoria del circuito LC resonante.

El cierre eléctrico del boquete de chispa es el equivalente eléctrico de golpear una campana con un martillo: cuando suena una campana, lo hace con un tono o frecuencia musical particular, que viene determinado por las propiedades físicas de la campana. En el caso de un circuito LC, su capacitancia e inductancia determinan la frecuencia del circuito.

El circuito LC continuará “sonando” mientras dure el arco eléctrico a través del boquete de chispa. Cuando el condensador se carga a su voltaje máximo, el boquete de chispa se cierra y el condensador descarga su energía en la bobina primaria. El condensador comienza a su voltaje máximo y se descarga hasta cero voltios, formando 1/4 ciclo de la frecuencia de resonancia del circuito LC. A medida que el condensador se descarga, la caída de voltaje disminuye y la corriente que fluye a través del circuito aumenta, lo que hace que la intensidad de campo de la bobina primaria aumente.

La bobina primaria almacena esta energía en forma de su campo electromagnético. Cuando la corriente que fluye a través de la bobina primaria alcanza su punto máximo y la tensión del condensador es cero, el flujo de corriente comienza a caer porque el condensador ya no puede suministrar corriente. La bobina primaria resiste esta disminución en el flujo de corriente al producir FEM (fuerza electromotriz).

Esta FEM es causada por el colapso del campo magnético de la bobina a medida que desciende la corriente que fluye a través de ella. La FEM hace que la corriente fluya en la misma dirección y la bobina primaria carga el condensador con su FEM en el lado opuesto a la polaridad original del condensador. Ahora que el condensador se carga con la nueva polaridad, también se descarga en la bobina primaria a esa nueva polaridad, lo que hace

que el campo electromagnético de la bobina primaria cambie la polaridad.

A medida que la FEM almacenada en el condensador decrece, la bobina primaria produce FEM de nuevo, haciendo que el condensador se cargue en su polaridad original, y el ciclo se repite. Las oscilaciones continúan repitiéndose hasta que se apaga la chispa, o el circuito se queda sin energía.

El resultado de las oscilaciones es una onda sinusoidal amortiguada, en la que cada ciclo es más débil en magnitud que el anterior. La disminución de cada ciclo es causada por pérdidas dentro de los componentes del circuito LC, como ya se ha explicado. Si no hubiera pérdidas dentro del circuito, las oscilaciones continuarían indefinidamente y no habría un efecto de amortiguación (excluyendo el de la transferencia de energía), pero tal condición no existe.

La oscilación del circuito secundario puede ser diferente a la frecuencia de oscilación del circuito primario, a pesar de que este se induce magnéticamente con la energía del circuito primario. A pesar de que la oscilación del circuito secundario funciona de la misma manera que en el circuito primario, la diferencia es que su fuente de excitación es la bobina primaria, en lugar de un condensador. Según se desarrolla el proceso de oscilaciones, las frecuencias de ambos circuitos tenderán a diferenciarse por la elevación resonante. Es por eso que es absolutamente crítico que el circuito primario resuene a la misma frecuencia que el circuito secundario, si no se quiere que, en vez de reforzarse, se cancelen.

Para alcanzar la longitud de chispa más larga, es necesario para que se produzca la chispa en un primer intento. Esto requiere que el toroide sea del tamaño correcto para que solo se produzca la ruptura a la tensión máxima. El tamaño óptimo del toroide se encuentra generalmente por experimentación, ya que se ve afectado por muchos factores.

Es importante tener en cuenta que estas formas de onda son producidas por una bobina Tesla que no está lanzando hacia la tierra. Si hubiera una chispa a la tierra, las formas de onda serían bastante diferentes. En el momento en que el arco completara su sendero a tierra, el nivel de energía de la secundaria descendería rápidamente y no aumentaría más. Cualquier energía que el primario pueda seguir suministrando se consumiría para mantener el arco. Tampoco habría una mayor oscilación entre los circuitos, ya que el secundario nunca alcanzaría un nivel máximo de energía después de que el arco tocara tierra.

5.2. Análisis de las escenas

5.2.1. Escena 05: El Truco Final



Figura 5.9: Cartel de la película El Truco Final

El Truco Final (*The Prestige*, en su versión original) es una película de 2006 dirigida por Christopher Nolan, que narra la historia de dos ilusionistas (Christian Bale y Hugh Jackman), en la búsqueda de la creación del truco de magia perfecto. Para ello, cada uno de ellos recurre a estrategias diferentes, y el camino de uno de ellos le conduce hasta el mismísimo Nikola Tesla, interpretado en esta película por David Bowie.

Nikola Tesla nació en Smiljan, Croacia en 1856. Asistió a la Universidad Técnica de Graz, Austria y la Universidad de Praga (1879-1880). Su primer invento lo hizo a los 24 años, el altoparlante. En 1882, dos años después, construyó su primer motor de inducción. Tesla se mudó a América en 1884 y en 1887 estableció su propio laboratorio en la ciudad de Nueva York, donde realizó innumerables experimentos que incluyen trabajar en una lámpara de botón de carbono, en el poder de la resonancia eléctrica, y en varios tipos de iluminación.

Desde mayo de 1899 hasta principios de 1900, Tesla se trasladó a Colorado Springs, donde descubrió las ondas estacionarias terrestres. En este período, también dirigió la mayoría de los experimentos destinados a desarrollar una forma de transmitir energía eléctrica de forma inalámbrica a electrodomésticos, y es aquí donde se encuentra en esta película [29].

De esta película cabe destacar el gran elenco que la compone, así como la fotografía, la dirección y la música, que generan todas ellas un ambiente atrapante. El montaje, además, intercala escenas que ocurren simultáneamente, o multitud de *flashbacks*, consigue mantener la atención y la tensión hasta el final.



Figura 5.10: Escena del protagonista con Nikola Tesla

En esta película, el genio científico serbio le construirá a este mago una máquina con la que poder llevar a cabo su truco final. El diseño de esta máquina, y de otras que aparecen en esta película, se parece a lo estudiado

hasta el momento, e incluye diseños de algo que podría ser una Jaula de Faraday. Teniendo en cuenta estos diseños se analizará esta película.

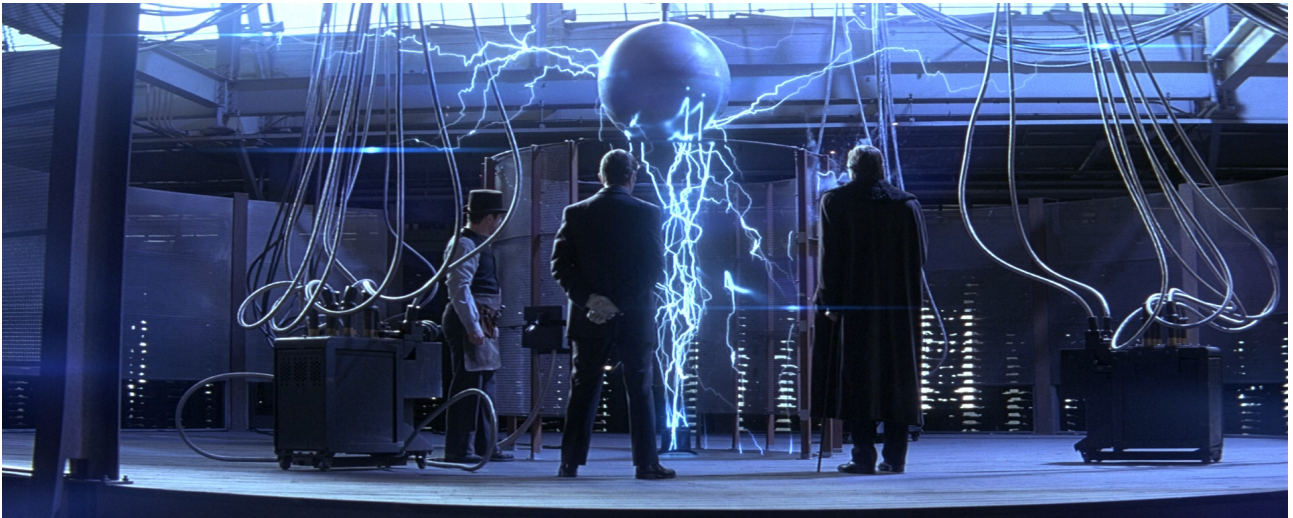


Figura 5.11: Máquina que fabrica Nikola Tesla

Si analizamos la máquina que Tesla construye en esta película, vemos que incluye una Bobina de Teslay una Jaula de Faraday aunque esta última con particularidades.

Como se ha visto en la teoría de este capítulo, cuando una Bobina de Tesla se pone a funcionar, los rayos aparecen porque el aire alrededor del elemento de descarga superior se ioniza. La siguiente escena muestra una presentación que quiere hacer Nikola Tesla. Al fondo de la imagen se observan dos bobinas, las dos con la parte superior esférica (como se hizo referencia anteriormente, esta parte podía ser tanto toroidal como esférica) y como los rayos aumentan cada vez más y se vuelven más largos. Esto se debe a que la cantidad del aire ionizado aumenta también, permitiendo canales de descarga mayores.



Figura 5.12: Presentación de inventos

Pasemos ahora a la Jaula de Faraday. En primer lugar, la jaula no es cerrada. En las escenas puede verse que está abierta en su parte superior, y en el frente, permitiendo entrar a Angier. Además, puede verse que en las escenas, hay rayos dentro de la jaula, que golpean al protagonista.

En primer lugar es necesario aclarar que la Jaula de Faraday es una construcción ideal, en la que el conductor envuelve perfectamente el objeto, pero que en su ejecución real siempre va a presentar una serie de problemas. En primer lugar, si se pretende observar lo que hay dentro, estará construida con una rejilla, por lo que existirá un límite a la frecuencia eléctrica.

Se ha escogido la escena 5.13 de la película para poder hacer los cálculos.



Figura 5.13: Jaula de Faraday que usa

Como se puede apreciar, la Jaula de Faraday es translúcida, por lo que tiene que estar formada por una rejilla. Se coge como aproximación un espaciado de 1,5cm. Este espaciado corresponde a $\lambda = 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} = 3 \cdot 10^{-2}m$, por tanto la frecuencia será:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^{-2}} = 10^{10} Hz$$

Es decir, todas las frecuencias superiores a la indicada podrán pasar. Como la Bobina de Tesla funciona con frecuencias de 230kHz y es menor a la indicada, no vamos a tener problema.

Por otro lado, a lo largo de toda la película puede apreciarse cómo los rayos salen disparados, prácticamente hacia todos los sitios, aunque el interior de la máquina se concentra una gran densidad. Esto se debe a la forma en que la jaula está dispuesta, ya que posee una abertura superior y otra frontal, y al no ser cerrada, no podría hacer su función de protección. Pero al ser de metal, como se ha comentado anteriormente, es un camino que ofrece menos resistencia al paso de corriente, por tanto la alta concentración de rayos en su interior tiene sentido.

En la construcción de una Jaula de Faraday, no podrá hacerse nunca en una única pieza, siendo necesario emplear mínimo dos para poder hacer una puerta. Al hacer esto, sería posible que diferentes partes de la Jaula tuvieran potenciales diferentes.

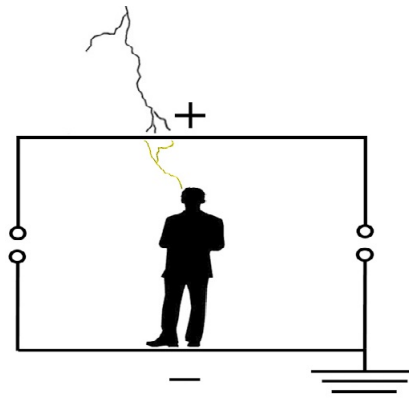


Figura 5.14: Esquema de una Jaula de Faraday imperfecta

Además, no todas las uniones y segmentos de la Jaula tienen que ser iguales y tienen que tener las mismas propiedades. Es posible que alguna de las piezas incluso, no esté soldada y esto introducirá impedancias, y una resistencia. Como hay una resistencia, esto implica que si circula una corriente hacia la tierra, hay una diferencia de potencial, guiado por la ley de Ohm: $V = I \cdot R$. Si esta es suficientemente grande es posible que el rayo saltara dentro de la Jaula. Común a todas las escenas está la imagen de un ser vivo que entra dentro de la máquina y siempre sale ileso. Esto es debido al uso de altas frecuencias.

5.2.2. Escena 06: El Aprendiz de Brujo



Figura 5.15: Cartel de la película El Aprendiz de Brujo

Cuando se menciona la película “El Aprendiz de Brujo” lo primero que le viene a la mente a cualquier persona es ese corto protagonizado por Mickey Mouse que formaba parte de la película *Fantasia*, del año 1940. Es conocido por todos esa escena en la que Mickey anima unas escobas para que hagan el trabajo por él, aunque el resultado es catastrófico.

Tomando como premisa esa película, en el año 2010, Disney propuso una actualización de dicho clásico. En esta adaptación, Balthazar Blake (Nicolas Cage) es un prestigioso hechicero neoyorquino, que intenta defender la ciudad de su archienemigo Maxim Horvath (Alfred Molina). Como no puede hacerlo solo, recluta como ayudante a Dave Stutler (Jay Baruchel), un chico aparentemente normal que posee grandes poderes. Tras darle un curso de magia antigua, ambos se disponen a vencer a las fuerzas del Mal.

Ya hemos visto cómo funciona una bobina de Tesla, así que ahora nos toca preguntarnos... ¿cómo es posible que haga sonido e incluso música? Por eso se analiza la escena 5.16

El sonido es una onda de presión. Al hacer vibrar nuestras cuerdas vocales o cualquier instrumento, se hacen vibrar las partículas de aire, y estas, hacen que vibren las que están en su entorno, creando un “efecto en cadena”, pero volviendo posteriormente a su posición de equilibrio. Las partículas de aire no se van a mover de su posición, pero al vibrar lo que hacen es producir una transmisión de energía mecánica entre sus partículas. Esto sería una onda acústica. La onda de presión se produce cuando las partículas se acumulan, creándose lugares de compresión y aumenta la densidad, pero si se separan, habrá dilatación, disminuyendo la densidad.

El tono está determinado por la frecuencia de la onda. Podemos hacer sonidos en una variedad de formas: los altavoces convencionales hacen vibrar una membrana, nosotros al cantar, hacer girar un tubo corrugado... En cuanto a las bobinas de Tesla, usan la expansión y la contracción del aire debido al calentamiento del plasma. Esa será la onda de sonido que producen.

La frecuencia de resonancia secundaria de una bobina convencional es de aproximadamente 230 kHz, muy por encima del rango de audio. Se pueden usar ráfagas de chispas producidas a 230 kHz para crear ondas de presión a la frecuencia audible. Una ráfaga de chispas se genera en cada punto máximo de la señal de audio. La velocidad a la que las chispas son disparadas es más rápida de lo que el ojo humano puede apreciar, por lo que parece continuo, pero en realidad la chispa se está formando y extinguiendo a intervalos de la frecuencia a la que se está produciendo el sonido. Esta técnica de modulación se conoce como modulación de densidad de pulso (PDM) o modulación de repetición de pulso (PRM).

La corriente en la primaria va a seguir aumentando. Dentro de un solo ciclo, la corriente en el primario puede alcanzar hasta cientos de amperios durante un corto período de tiempo. Debido a razones térmicas, el ciclo de trabajo máximo es aproximadamente del 10%.



Figura 5.16: Escena de la película El Aprendiz de Brujo donde se ve una Jaula de Faraday y varias Bobinas de Tesla

Los rayos que salen de una bobina de tesla tienen una frecuencia de unas decenas de kilohertzios, serán producidos en paquetes de frecuencias más bajas y variables, siempre dentro del rango 20-2000 Hz, ya que es lo que nosotros oímos cuando se le pide que haga un sonido. Eso sí, la frecuencia base siempre será la de resonancia del segundo bobinado, es decir, del circuito secundario, pero por sí sola sería demasiado aguda como para poderla escuchar.

Además de todo esto, es interesante destacar que la bobina musical que se muestra en la película no es solo un recurso cinematográfico, sino que en la vida real también se hace, por ejemplo, la asociación “Physics League”, a la que pertenezco, tiene una. Normalmente la conectamos a un teclado y hacemos música con ella. Por otro lado, existe un proyecto¹ en el cual se quiere acercar este método para hacer música a los estudiantes de la ESO a través de estos aparatos.

¹ Toda la información sobre este proyecto puede encontrarse en: <https://www.xataka.com/otros/tinytesla-un-instrumento-musical-electronico-y-educativo>

Capítulo 6

Conclusiones

La idea original de este trabajo, como ya se explicó en la introducción, consistía en la investigación acerca de un concepto de la física dentro del ámbito cinematográfico. Dentro del cine, el género de fantasía es el que más oportunidades nos ofrece y se decidió escoger las descargas eléctricas como tema principal de este documento. Esta decisión llevó a algunas preguntas.

El primer problema al que me enfrenté fue hacer una selección de las películas que iba a analizar. Se han dejado fuera de este estudio muchas películas muy buenas pero que se alejaban de las líneas de este trabajo o que escogían vertientes en las que no encajaban dentro de este documento.

Para poder dar una explicación lo más detallada de las escenas se hizo un trabajo de investigación bibliográfico, basado en una búsqueda en múltiples fuentes y lugares hasta poder conseguir lo que aquí se presenta. De esta recopilación de información, puede obtenerse varias conclusiones:

La redacción de la base teórica relativa a las tormentas ha sido compleja debido a la poca información concreta que existe publicada. Para la redacción de ese apartado se ha tenido que buscar información de varias fuentes, y finalmente, reunirla. Es un campo muy interesante pero poco investigado. A lo largo de esa búsqueda se ha podido apreciar la gran cantidad de gente aficionada interesada por el estudio de estos fenómenos, y que a pesar de no tener título que les acredite para ello, se molestan en buscar y recopilar información para llegar a comprender el fenómeno.

Otro tema que revistió complicaciones fue el estudio de la Jaula de Faraday. La carencia de material bibliográfico sobre este fenómeno más allá de una explicación cualitativa hizo que el estudio de ese capítulo no fuera tan exhaustivo como me hubiera gustado. Una línea futura para la continuación de este trabajo podría ser este, ya que es un objeto muy utilizado dentro del cine.

El estudio realizado acerca de los rayos y sus efectos ha sido muy interesante, ya que ha permitido conocer todos los posibles complicaciones que puede haber dentro de una descarga eléctrica. A la hora de realizar los cálculos, es impresionante comprobar los órdenes de magnitud que se manejan en los rayos de cara a las intensidades y energías que se producen. Estos efectos no son generalmente conocidos y su letalidad está subestimada.

A la hora de recopilar información sobre las tormentas se llevó a cabo un estudio de campo mediante la participación en varias “cazas de tormentas” durante varios meses. Se pudo observar la belleza que entraña una tormenta, sirvieron para distinguir las fases de una tormenta y todos los conceptos teóricos estudiados previamente y sirvieron para afianzar estos conocimientos a través de una experimentación en vivo.

Una vez recopilada toda esa información, se pasó a desglosar cada escena, atendiendo a todos los fotogramas y tomando los datos necesarios para una mejor descripción. Esta parte ha sido la más complicada del trabajo, al tener que poner en práctica toda la teoría, tener de tener todos los pequeños detalles en cuenta, y comprobar que un simple detalle puede cambiar todo el proceso.

Del análisis de las 6 escenas puede extraerse los siguientes resultados:

- **X-Men:** Del estudio de esta escena se puede concluir que el apoyo científico no ha sido muy bueno, debido a que se han encontrado grandes fallos en temas como la formación de tormentas y que no se ha encontrado una base científica para los poderes de Tormenta. El análisis final de la escena ha tenido que asumir ciertos aspectos sobre los poderes que no se han podido explicar para poder continuar con el

análisis (cómo genera una tormenta y que el avión no funciona como una Jaula de Faraday).

- **Thor:** A partir de la asunción de que algunos de sus poderes vienen sobrevenidos ya que Thor es un dios, el análisis realizado confirma que los hechos concuerdan con lo estudiado en la parte teórica (efecto puntas).
- **A dos metros bajo tierra:** El análisis de esta escena demuestra la peligrosidad real de un rayo y el análisis numérico confirma estos resultados y las consecuencias de los mismos.
- **Regreso al Futuro:** Pese a la inverosimilitud de la escena, se comprueba mediante un argumento claro que la escena puede llegar a ser viable, y, por lo tanto, confirmando que el apoyo científico de esta película hicieron bien su trabajo (tomándose licencias como viajar en el tiempo o el avance lento de la electricidad). Aparte de esto, a lo largo de toda la película se hacen referencias a diferentes teorías científicas y personajes históricos que concuerdan con lo estudiado (con la excepción del “condensador de flujos los “gigovoltios”, creados a partir de una mala traducción).
- **El Truco Final:** A pesar de la espectacularidad de la película, el uso que hacen de la Jaula de Faraday es atípico. Este elemento se encuentra abierto durante la película y permite que los rayos atraviesen. Sin embargo, estos pequeños defectos no impiden que sea altamente recomendable.
- **El Aprendiz de Brujo:** Esta película nos muestra como un elemento tan básico como la Bobina de Tesla no es solo un elemento cinematográfico capaz de producir descargas visuales, sino que además permite utilizar sus altas frecuencias para producir música ionizando el aire. Además, se están realizando estudios para convertir este elemento en un instrumento musical asequible para todos los públicos.

Otra cosa que he disfrutado mucho de este trabajo ha sido la lectura de biografías de personajes célebres e investigación dentro de sus vidas. Personalmente, creo que en unos estudios superiores debería incluirse estos aspectos y poder así conocer más las raíces de donde provienen y qué les llevó a pensar así.

Bibliografía

- [1] LÜTTGENS, G. AND WILSON, N (1997) *Electrostatic Hazards*. Butterworth-Heinemann, Oxford (Reino Unido).
- [2] BÜRGESESSER, R.E. (2008). *Transferencia de carga eléctrica durante la colisión de granizos y cristales de hielo*. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. http://www2.famaf.unc.edu.ar/publicaciones/documents/serie_d/DFis131.pdf
- [3] BARBA, I. *Apuntes de la asignatura. Master en*
- [4] KRAUS, J. D. (1992) *Electromagnetics*. 4ª Edición. McGraw-Hill
- [5] CHAPMAN, S. J., HEWETT, D. P. AND TREFETHEN, L. N. (2015) *Society for Industrial and Applied Mathematics REVIEW*. Vol. 57, No. 3, pp. 398–417
- [6] FRANKLIN, B. (1791) *Autobiografía y otros escritos*. Editora Nacional: Biblioteca de la Literatura y Pensamiento Universales.
- [7] TESLA, NIKOLA (INVENTOR) (1916) *US1266175A*. U.S. Patent.
- [8] AENOR (1995) *UNE 21185- Protección de Estructuras Contra el Rayo y Principios Generales*.
- [9] MINISTERIO DE FOMENTO. GOBIERNO DE ESPAÑA (2010) *Documento Básico Seguridad de Utilización y Accesibilidad (SUA)*. Madrid
- [10] FEIJÓ MUÑOZ, J (2017) *Instalaciones Eléctricas en la Arquitectura*. 3ª edición corregida y ampliada. Ediciones Universidad de Valladolid, España.
- [11] PORRAS CRIADO, A Y GUERRERO FERNÁNDEZ, A (2006) *Riesgo Eléctrico* Creaciones Copyright, España
- [12] SCHNEIDER ELECTRIC *Protección contra tensiones transitorias. Guía 2010*. Schneider Electric.
- [13] COOPER, MARY ANN, PRICE, TIMOTHY G. *Electrical and lightning injuries (2006)* Rosen's Emergency Medicine, Concepts and Clinical Practices, 6th Edition.
- [14] FRANKLIN, B. (1751) *Experimentos y Observaciones sobre electricidad* Alianza editorial. Edición de 1988. España.
- [15] KRIDER, E. PHILIP (2006) *Benjamin Franklin and Lightning Rods* Physics Today. American Institute of Physics. 59 (1): 42–48.
- [16] SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL, MINISTERIO DEL AIRE. (1967) *Uso del Diagrama Oblicuo T, log P en el Análisis y Predicción. Análisis de Radiosondeo. Parte 1: Texto*. Gráficas Virgen de Loreto.
- [17] SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL, MINISTERIO DEL AIRE. (1967) *Uso del Diagrama Oblicuo T, log P en el Análisis y Predicción. Análisis de Radiosondeo. Parte 2: Figuras*. Gráficas Virgen de Loreto.
- [18] BILBAO SANTOS, J. (2014) *Apuntes de la asignatura Física de la Atmósfera. Grado en Física*. Universidad de Valladolid
- [19] AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA *Manual de uso de términos meteorológicos* Edición 2015
- [20] SAUCIER, W. J. (1955) *Principles of Meteorological Analysis*. Courier Corporation
- [21] QUIRANTES CALVO, J.A, RIESCO MARTÍN, J. Y NÚÑEZ MORA, J.A. (2014) *Características básicas de las supercélulas en España* Edita: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Agencia estatal de meteorología, Madrid

- [22] GALLEGO, J.A. Y QUIRANTES, J.A. (2011). *Atlas de nubes y meteoros*. La editorial de Urueña, Santander.
- [23] FORO DE METEOROLOGÍA <https://foro.tiempo.com/> Última fecha de visita: 20/06/2018
- [24] MARROQUÍN SANTOÑA, A. *Descargas eléctricas* Director del C.M.T. en Extremadura. Meteorólogo del Estado.
- [25] BALCELLS, J., DAURA, F., ESPARZA, R. Y PALLÁS, R. (1992) *Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos* MARCOMBO S.A., Barcelona.
- [26] MARVEL COMICS (2012) *The art of Thor*. Marvel Comics, New York
- [27] DENICOLAI, M. (2001) *Tesla Transformer for Experimentation and Research*. Helsinki University of Technology. www.saunalahti.fi/dncmrc1/lthesis.pdf
- [28] SCIENCE FIRST (2006) *Tesla Coil 10-206. Instructions and Application*. Science First. Buffalo, EEUU.
- [29] CRAVEN, R.M, SMITH, I.R. AND NOVAC, B.M. (2016) *Magnetic Coupling in Tesla transformers*. Applied Physics Research; Vol. 8, No. 6; 101-105.
- [30] JADWANI ET AL. (2012) *A Project Report on Tesla Coil*. Chhattisgarh Swami Vivekanand Technical University, Bhilai (India).

Anexo I: Películas restantes

Para la preparación de este TFG, se visualizaron muchas más películas y series de las que se estudian anteriormente. Las escenas finales se escogieron por su relevancia y claridad. A continuación se referencian todas aquellas escenas que no se incluyeron en el trabajo definitivo.

AKAME GA KILL! - TV (2004-2012)



Director: Tomoki Kobayashi

Reparto: Katsuyuki Konishi, Yukari Tamura, Mamiko Noto, Kouji Ishii, Kaori Nazuka

Sinopsis:

Tatsumi es un chico de campo que llega a la capital del Imperio para alistarse en el ejército. Pero cuando llega a la ciudad se da cuenta que no todo es como él esperaba. Debido a una serie de acontecimientos deberá enfrentarse a un grupo de sicarios conocido como Night Raid.

Escena:

Budo era uno de los generales más temidos y respetados del Imperio, así como también el líder de la Guardia Imperial. Tenía poderes eléctricos y podía invocar rayos. El poder de Budo abarca la destrucción de una ciudad al completo, aunque fue detenido por todos los miembros de Night Raid.

BLEACH - TV (2004-2012)



Director: Kubo Tite

Reparto: Masakazu Morita, Fumiko Orikasa, Shinichirou Miki, Mitsuaki Madono, Hiroki Yasumoto

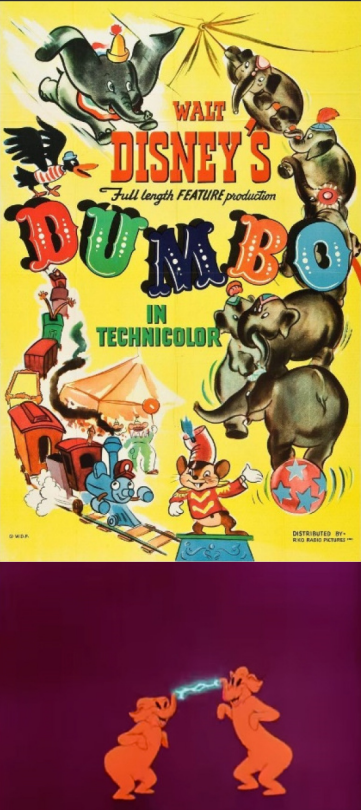
Sinopsis:

Ichigo Kurosaki es un chico de 15 años que puede ver espíritus. Al intentar proteger el espíritu de una niña pequeña de un espíritu malvado, se enfrenta a él junto con una shinigami (Rukia). El hollow deja a Rukia herida, y para salvar a la familia de Ichigo, Rukia le traspasa sus poderes y así se convierte en un shinigami.

Escena:

Gonryomaru es un shinigami que posee una espada con la que es capaz de convocar rayos.

BOKU NO HERO - TV (2016-)	
	<p>Director: Kenji Nagasaki</p>
	<p>Reparto: Daiki Yamashita, Nobuhiko Okamoto, Kenta Miyake, Ayane Sakura</p>
	<p>Sinopsis:</p> <p>El protagonista de esta historia es un chico normal sin superpoderes que quiere ser un gran héroe como el legendario All-Might. Para convertirse en el héroe que quiere ser, se apunta a una de las academias de héroes más prestigiosas del país: Yueiko.</p>
	<p>Escena:</p> <p>Denki es un estudiante de la misma escuela que tiene el poder de lanzar rayos. Después de hacerlo necesita recargarse usando el cargador de un móvil. Además, canaliza la electricidad a una antena para poder comunicarse con otros.</p>

DUMBO (1941)	
	<p>Director: Ben Sharpsteen</p>
	<p>Reparto: Benjamin Bocquelet, Jon Foster, James Lamont, Tobi Wilson</p>
	<p>Sinopsis:</p> <p>Cuando una cigüeña reparte a la señora Dumbo, una elefanta, un bebé tiene unas orejas enormes; todas sus compañeras se ríen de él, pero la señora Dumbo lo defiende siempre, hasta el punto de ser encerrada por enfrentarse a todo aquel que se mofe de su retoño. El pequeño Dumbo, maltratado y ridiculizado por todos sus compañeros, sólo cuenta con la ayuda de un minúsculo ratoncito llamado Timothy, que decide hacer de él una estrella del circo.</p>
	<p>Escena:</p> <p>Cuando Dumbo accidentalmente se emborracha, empieza a ver figuras con forma de elefante rosa haciendo gestos extraños. Una de estas figuras son dos elefantes que producen rayos desde sus trompas.</p>

EL ASOMBROSO MUNDO DE GUMBALL -TV (2011-)



Director: Benjamin Bocquelet

Reparto: Benjamin Bocquelet, Jon Foster, James Lamont, Tobi Wilson

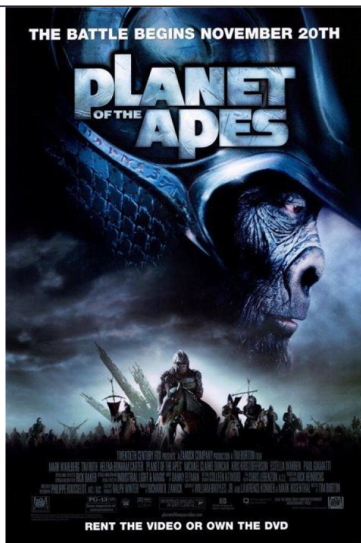
Sinopsis:

Narra las divertidas aventuras de Gumball y su peculiar familia en el idílico pueblecito de Elmore: un papá conejo rosa de 1,95 metros, una madre que se gana la vida vendiendo arcoíris, un gato azul muy torpe y una conejita con un cerebro superdotado. No hay que olvidar a Darwin, un pez rojo que se convirtió en miembro del clan el día en que le crecieron piernas y pulmones.

Escena:

En esta escena, para poder destruir a un robot asesino, Gumball frota sus pies contra la moqueta de la biblioteca y después suelta una descarga que fríe el robot.

EL PLANETA DE LOS SIMIOS (2001)



Director: Tim Burton

Reparto: Mark Wahlberg, Helena Bonham Carter, Tim Roth, Estella Warren

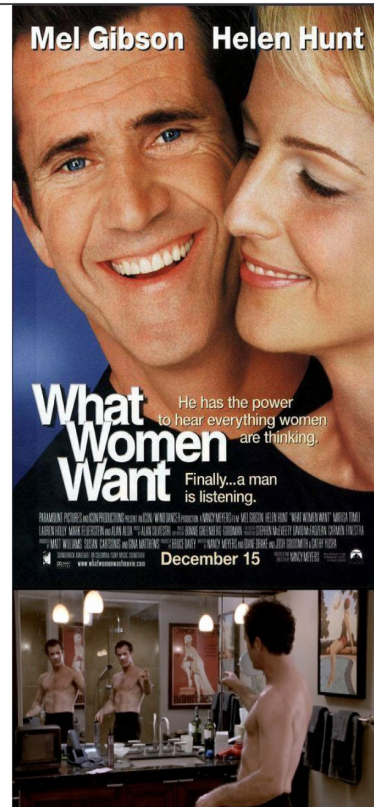
Sinopsis:

En una misión rutinaria, el astronauta Leo Davison pierde el control de su nave y aterriza en un planeta extraño, que está gobernado por una raza de simios cuya inteligencia es similar a la de los seres humanos, a los que, sin embargo, tratan como si fueran animales.

Escena:

En la escena de apertura, el protagonista se introduce en una tormenta espacial persiguiendo una cápsula tripulada por un mono. En esta escena se ven rayos en el espacio.

¿EN QUÉ PIENSAN LAS MUJERES? (2000)



Director: Nancy Meyers

Reparto: Mel Gibson, Helen Hunt, Marisa Tomei, Alan Alda, Lauren Holly

Sinopsis:

Después de sufrir un accidente con un secador en la bañera, Nick Marshall, un egocéntrico publicista de Chicago, se da cuenta de que puede escuchar los pensamientos de las mujeres. Esto le permite descubrir que ellas no lo estiman tanto como él cree, pero intentará sacarle partido a este don para triunfar en la empresa.

Escena:

Después de electrocutarse accidentalmente, Nick decide perseguir a una tormenta con el secador de pelo, intentado que otro rayo le golpee y le quite su nueva habilidad.

FRANKENSTEIN (1931)



Director: James Whale

Reparto: Boris Karloff, Colin Clive, Mae Clarke, John Boles

Sinopsis:

El doctor Henry Von Frankenstein acomete un experimento tenebroso: construir, a partir de fragmentos de cadáveres, un nuevo ser humano. Con la ayuda de su criado Fritz, se adentra durante la noche en los cementerios de la localidad para arrancar a los cadáveres las partes que necesita. Lo que ignora es que el cerebro que ha utilizado en su experimento había pertenecido a un criminal.

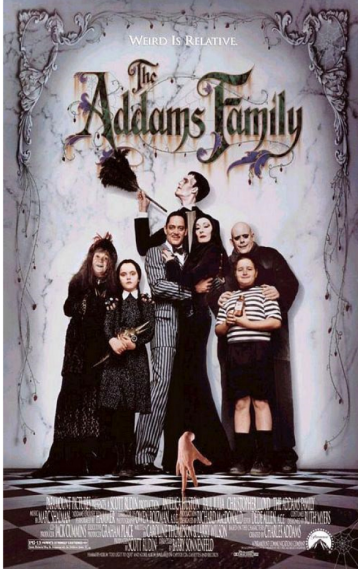
Escena:

En la escena más famosa de la película, el Doctor Viktor Frankenstein canaliza la energía de una tormenta y de sus rayos a su laboratorio, donde hace que atraviesen el cuerpo del “monstruo” y le den la vida.

IMPACT - TV (2008)	
	Director: Mike Rohl
	Reparto: David James Elliott, Natasha Henstridge, James Cromwell
	<p>Sinopsis:</p> <p>Narra la catástrofe que se produce en el planeta por culpa de una fuerte lluvia de meteoritos que impacta sobre la Luna. Todo ello provoca una serie de anomalías en la Tierra, como el crecimiento exagerado de las mareas o casos esporádicos de ingravidez. Alex Kinter, astrofísico, descubre que la Luna se ha desviado de su órbita, y que se encuentra en rumbo de colisión contra la Tierra y que tienen 39 días para detenerla, o la Tierra y todos sus habitantes serán aniquilados.</p> <p>Escena:</p> <p>Durante un partido de beisbol, la cercanía de la Luna a la Tierra hace que empiecen a saltar rayos entre las verjas que delimitan el campo, y hace que los espectadores tengan que salir corriendo.</p>

JURASSIC PARK (1993)	
	Director: Steven Spielberg
	Reparto: Sam Neill, Laura Dern, Jeff Goldblum, Richard Attenborough, Samuel L. Jackson
	<p>Sinopsis:</p> <p>El multimillonario John Hammond consigue hacer realidad su sueño de clonar dinosaurios del Jurásico y crear con ellos un parque temático en una isla remota. Antes de abrirlo al público, invita a una pareja de eminentes científicos y a un matemático para que comprueben la viabilidad del proyecto, pero ni todas las medidas de seguridad evitan la catástrofe.</p> <p>Escena:</p> <p>Mientras escapan del Tiranosaurus Rex, los chicos y el Dr. Grant deben escalar una verja electrificada que está desconectada. El último de ellos no consigue bajar a tiempo y sale despedido cuando re-conectan la electricidad. Sale ileso de la descarga y la caída.</p>

LA FAMILIA ADDAMS (1991)



Director: Barry Sonnenfeld

Reperto: Anjelica Huston, Raul Julia, Christopher Lloyd, Christina Ricci

Sinopsis:

El apacible estilo de vida de la peculiar familia Addams se ve amenazado peligrosamente cuando un codicioso dúo formado por madre e hijo, con la ayuda de un abogado sin ningún escrúpulo, conspiran para hacerse con la fortuna familiar.

Escena:

Miércoles Addams tiene en el sótano una silla eléctrica con la que se entretiene torturando a su hermano.

MISFITS -TV (2009-2013)



Director: Howard Overman

Reperto: Nathan Stewart-Jarrett, Joseph Gilgun, Iwan Rheon, Lauren Socha, Antonia Thomas

Sinopsis:

Misfits es una serie británica que mezcla ciencia ficción, humor y drama. Trata sobre un grupo de jóvenes con comportamientos antisociales obligados a trabajar en un programa de servicios a la comunidad.

Escena:

En el primer episodio de la serie, un rayo cae a los protagonistas nada más conocerse y les da superpoderes.

ONE PIECE -TV (1999-)



Director: Eiichiro Oda

Reperto: Mayumi Tanaka, Kazuya Nakai, Akemi Okamura, Wakana Yamazaki, Kappei Yamaguchi, Hiroaki Hirata

Sinopsis:

Esta serie relata las aventuras y desventuras de un joven pirata, Monkey D. Luffy, quien accidentalmente de pequeño, comió una Fruta del Diablo (Akuma no Mi), que hizo que su cuerpo ganara las propiedades físicas de la goma, convirtiéndose en el hombre de goma.

Escena:

En esta escena, Nami, utilizando una vara del tiempo, libera a la atmósfera esferas de calor y de frío, que generan nubes, y que luego electrifica, provocando rayos que caen sobre los enemigos.

POKEMON -TV (1997-)



Director: Kunihiko Yuyama

Reperto: Mayumi Tanaka, Kazuya Nakai, Akemi Okamura, Wakana Yamazaki, Kappei Yamaguchi, Hiroaki Hirata

Sinopsis:

Ash Ketchum es un niño de Pueblo Paleta de 10 años que sueña con llegar a ser el mejor entrenador Pokémon del mundo, por lo que visita al profesor Oak, que le da a Pikachu, un Pokemon de tipo eléctrico. Ash entrenará para poder capturar a todos los Pokemon que existen.

Escena:

Además de Pikachu, existen una gran cantidad de Pokemon de tipo eléctrico, que son capaces de generar tormentas, electrificar su cuerpo y de lanzar rayos.

STAR WARS - EPISODIO VI: EL RETORNO DEL JEDI (1983)



Director: Richard Marquand

Reparto: Mark Hamill, Harrison Ford, Carrie Fisher, David Prowse, Ian McDiarmid, Billy Dee Williams, Frank Oz

Sinopsis:

Para ir a Tatooine y liberar a Han Solo, Luke Skywalker y la princesa Leia deben infiltrarse en la peligrosa guarida de Jabba the Hutt, el gángster más temido de la galaxia. Una vez reunidos, el equipo recluta a tribus de Ewoks para combatir a las fuerzas imperiales en los bosques de la luna de Endor. Mientras tanto, el Emperador y Darth Vader conspiran para atraer a Luke al lado oscuro, pero el joven está decidido a reavivar el espíritu del Jedi en su padre.

Escena:

Al final de la película, el Emperador Palpatine, viendo su derrota cercana, ataca a Luke Skywalker y a su padre, Darth Vader, con rayos que le salen de las manos.

SMALLVILLE - TV (2001-2011)



Director: Alfred Gough

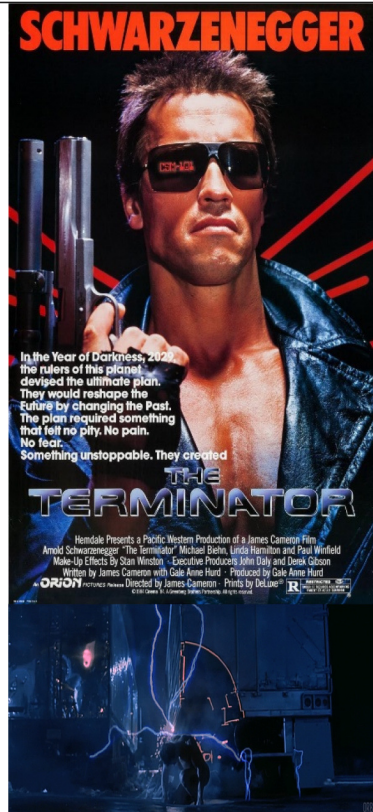
Reparto: Tom Welling, Kristin Kreuk, Michael Rosenbaum, Allison Mack, John Schneider, Annette O'Toole, Erica Durance, John Glover

Sinopsis:

Serie que narra los inicios de Superman -Clark Kent- en su pueblo natal, Smallville. Allí vivía con sus padres, estudiaba en el instituto local, conoció a su primera novia, Lana Lang, y a su futuro rival, Lex Luthor. Es una serie que combina la mitología clásica de Superman con las tramas adolescentes.

Escena:

En un episodio, Clark y otro compañero del instituto son golpeados simultáneamente por el mismo rayo. A partir de ese momento, los poderes de Superman serán transferidos a este chico, hasta que vuelven a ser alcanzados por un rayo.

TERMINATOR (1984)

Director: James Cameron

Reparto: Arnold Schwarzenegger, Linda Hamilton, Michael Biehn, Paul Winfield

Sinopsis:

En el año 2029, las máquinas dominan el mundo. Los rebeldes que luchan contra ellas tienen como líder a John Connor, un hombre que nació en los años ochenta. Para acabar con la rebelión, las máquinas deciden enviar al pasado a un robot - Terminator- cuya misión será eliminar a Sarah Connor, la madre de John, e impedir así su nacimiento.

Escena:

Cuando John Connor y el Terminator viajan en el tiempo hasta el pasado, lo hacen envueltos en una bola de luz que desprende rayos. Estos se mantienen en el aire una vez que el viaje en el tiempo ha sido realizado.

THE AMAZING SPIDER-MAN 2: EL PODER DE ELECTRO (2014)

Director: Marc Webb

Reparto: Andrew Garfield, Emma Stone, Jamie Foxx, Dane DeHaan, Sally Field

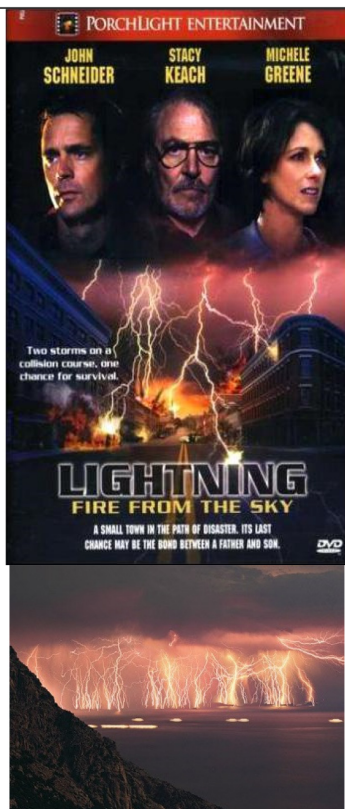
Sinopsis:

Peter Parker lleva una vida muy ocupada, compaginando su tiempo entre su papel como Spider-Man, acabando con los malos, y en el instituto con la persona a la que quiere, Gwen. Las cosas cambiarán para Peter cuando aparece un nuevo villano, Electro, y un viejo amigo, Harry Osborn, regresa, al tiempo que descubre nuevas pistas sobre su pasado.

Escena:

Electro, el villano de la película es un ingeniero que, tras sufrir un accidente, tiene el poder para absorber la energía eléctrica y disparar rayos. En varias escenas, ataca a Spider-Man con sus rayos, o se introduce en una central eléctrica y la destroza.

TORMENTA ELÉCTRICA (2001)



Director: David Giancola

Reparto: John Schneider, Stacy Keach, Michele Greene, Gary Sandy

Sinopsis:

El sheriff del condado de Rutland está desbordado ante la gran tormenta eléctrica que se avecina. Un fenómeno que su hijo Eric ya había previsto, debido a su afición a la meteorología. El sheriff deberá aprender a seguir los consejos de su hijo para salvar a su familia y a toda su comunidad. Existe un telefilm canadiense de argumento muy similar, mismo título español "Tormenta eléctrica" del año 2003.

Escena:

Durante toda la película se ven rayos en multitud de escenas.