



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Análisis de los efectos de las corrientes
geomagnéticas inducidas sobre la Red Eléctrica de
España

Autor

Sergio Sampériz Toa

Director

Rodolfo Dufo López

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Año 2017



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D^a. Sergio Sampérez Toa

con nº de DNI 18058851X en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado _____, (Título del Trabajo)

Análisis de los efectos de las corrientes geomagnéticas inducidas sobre la Red
Eléctrica de España

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada
debidamente.

Zaragoza, 20 de Noviembre de 2017

Fdo: _____

Sergio ST

Autor del trabajo: Sergio Sampérez Toa

Director del trabajo: Rodolfo Dufo López

Título del trabajo: Análisis de los efectos de las corrientes geomagnéticas inducidas sobre la Red Eléctrica de España

Titulación: Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

RESUMEN

Este trabajo trata de comprender el fenómeno de la tormenta solar y los potenciales problemas que pueden ocasionar en las redes eléctricas. El análisis se centrará en los efectos sobre la Red Eléctrica de España, la cual, a priori, es menos vulnerable debido a las latitudes en las que se encuentra el país. Además, se estudiará cuáles son los elementos de la red que más sufren y cuál es el mecanismo por el que las tormentas solares dañan la red. Por último se analizarán las posibles soluciones que protegen la red eléctrica ante estos fenómenos.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	3
1.1.-Introducción a las tormentas geomagnéticas	3
1.2.-Introducción a la Red Eléctrica de España	4
CAPÍTULO II: EXPLICACIÓN FENÓMENOS SOLARES	5
2.1.- Desarrollo de una tormenta geomagnética	5
2.2.- Generación de corrientes geomagnéticas inducidas	7
2.3.- Problemas generales provocados por las tormentas solares	8
2.4.- Tormentas solares significativas	9
CAPÍTULO III: AFECTACIÓN A LA RED ELÉCTRICA	11
3.1.- Características de las corrientes geomagnéticas inducidas	11
3.2.- Variables que influyen en la afectación	12
3.3.- Afectación a transformadores	14
3.4.- Afectación a la red como un conjunto	18
3.4.1.- Generación de armónicos	18
3.4.2.- Inestabilidad del voltaje	19
3.5.- Eventos pasados con afectación a Redes Eléctricas	21
CAPITULO IV: SOLUCIONES Y PROTECCIÓN	23
4.1.- Introducción a las soluciones	23
4.2.- Características del transformador y configuración de la red	24
4.3.- Sistema de bloqueo del neutro	26
4.4.- Predicción y meteorología espacial	29
4.5.- Modelado de las corrientes geomagnéticas inducidas	30
4.5.1.- Investigación sobre interpolación de GIC (Observatorio del Ebro)	32
4.6.- Medidas correctivas	34
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	36
BIBLIOGRAFÍA	37
ANEXOS	38
Anexo 1: Vocabulario	38
Anexo 2: Clasificación de las tormentas solares según su intensidad	40
Anexo 3: Tormentas solares de gran intensidad registradas en España	41

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1.-Introducción a las tormentas geomagnéticas

Una tormenta geomagnética, también conocida como tormenta solar, es un fenómeno consistente en la perturbación temporal de la magnetosfera terrestre, provocada por iones provenientes del sol. Dichos iones pueden llegar en forma de viento solar o eyección de masa coronal (CME por sus siglas en inglés). La gran deformación sufrida por la magnetosfera induce corrientes a la Tierra, que según la intensidad puede provocar graves problemas en los aparatos electrónicos, telecomunicaciones y redes eléctricas, lo cual es la base de este trabajo.

La actividad solar varía en ciclos de 11 años, tal y como descubrió Heinrich Schwabe en el siglo XIX[1]. Cuando dicha actividad es muy alta, se forman manchas solares, que son las culpables de la eyección de masa coronal, mientras que los vientos solares, se dan cuando la actividad solar es más débil.

El campo magnético expulsado por sol en forma de iones, interfiere en el campo magnético terrestre generando corrientes cuasi continuas (0.1–0.001 Hz) en la magnetosfera e ionosfera de millones de amperios[2]. Estas variaciones de los campos magnéticos de la atmósfera inducen gradientes en el potencial de la superficie terrestre, lo que puede provocar corrientes, que pueden entrar por el neutro en los grandes transformadores eléctricos y las redes eléctricas en general, pudiendo provocar daños[1].

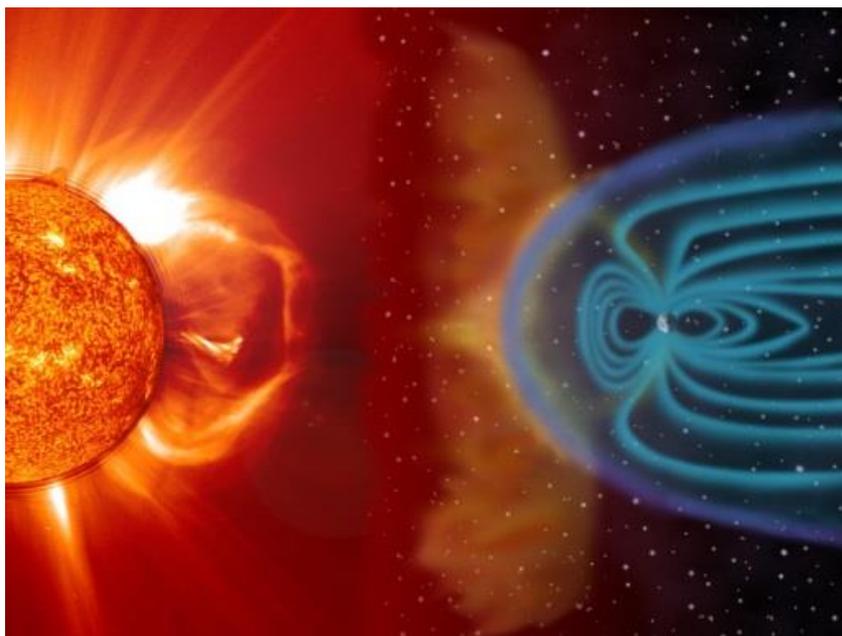


Figura 1. [ESA/NASA]

1.2.-Introducción a la Red Eléctrica de España

Una red eléctrica es un sistema interconectado cuya misión es llevar la energía eléctrica desde los centros de generación a los consumidores. Una red eléctrica está compuesta básicamente por 3 partes principales:

- Centros generadores
- Líneas de transporte
- Transformadores de potencia

La Red Eléctrica de España está formada por más de 40.000 kilómetros de líneas de alta tensión y numerosos centros de transformación y estaciones transformadoras. La latitud a la que se encuentra España minimiza los efectos de las tormentas solares, si bien más adelante veremos en detalle cómo influye este parámetro, entre otros.

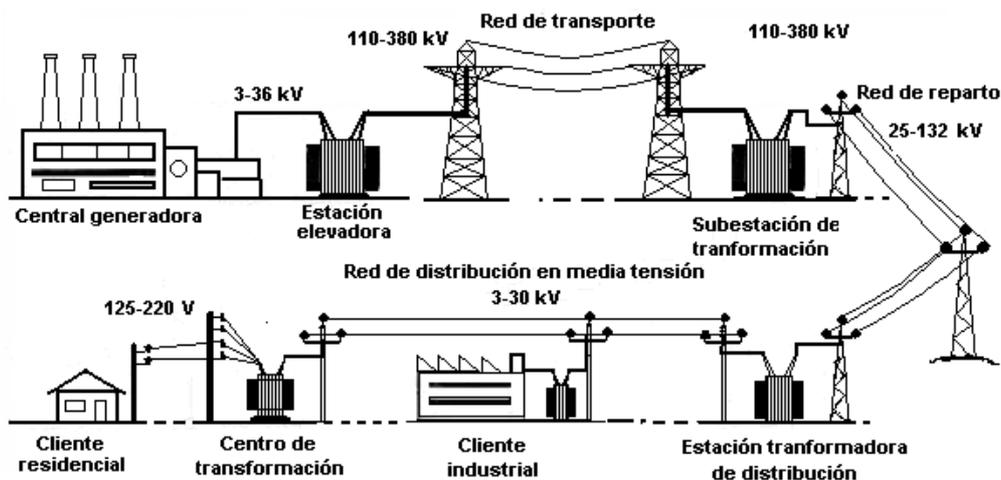


Figura 2. Esquema común simplificado de una Red Eléctrica [Creative Commons]

El punto débil de una red eléctrica en el caso de las corrientes geomagnéticas inducidas, son los transformadores, ya que estas corrientes se adentran en la red eléctrica a través de la conexión a tierra de los mismos. Aun así, los perjuicios se notan en toda la red, porque además de que el transformador sufra, la calidad de la electricidad distribuida disminuye.

Actualmente existen métodos para mitigar estas corrientes inducidas, pero en el pasado ya se han producido varios episodios de tormentas solares que han afectado redes eléctricas, como por ejemplo en Quebec en el año 1989. Más adelante se tratarán las soluciones en mayor profundidad.

CAPÍTULO II: EXPLICACIÓN DE LOS FENÓMENOS SOLARES

2.1.- Desarrollo de una tormenta geomagnética

Los fenómenos solares han sido, desde la época de Galileo, objeto de estudio y curiosidad para los seres humanos. Tal y como va avanzando la tecnología, es más fácil realizar estudios acerca del universo.

Los ciclos solares de nuestra estrella varían entre los siete y quince años, siendo su media de 11,1, aunque ha habido excepciones desde que se tienen registros, como es el mínimo de Maunder, en el cual no se registraron tan apenas manchas solares, lo cual afectó al clima terrestre. [3]

Cada 11,1 años de media, la actividad solar llega a su máximo, en el que más manchas solares aparecen. El sol está formado por tres capas básicamente, la más exterior es la Fotosfera, la cual se puede observar a simple vista en un telescopio (con filtro de protección), la siguiente es la cromosfera, visible en la parte ultravioleta del espectro, y la más interior es la corona solar, solo visible en el espectro de rayos X. Tal y como se aprecia en la figura 3, las manchas solares son apreciables en todas las capas, desde la más externa a la más interna.

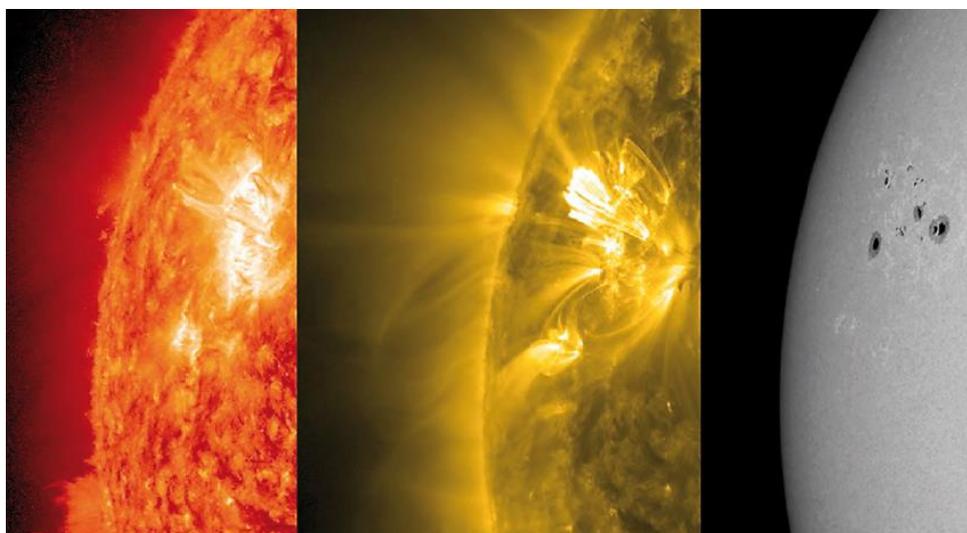


Figura 3. Vista de una mancha solar en las distintas capas de El Sol.[3]

De izquierda a derecha: A-Fotosfera, B-Cromosfera, C-Corona Solar

Los fenómenos se aprecian de manera más nítida en la corona solar, en la cual se visualizan los bucles (zonas negras de la figura 3). Estas zonas están dominadas por fuertes campos magnéticos, y la temperatura se multiplica unas diez veces aproximadamente. El problema surge cuando los bucles se rompen y se produce una eyección de masa coronal en dirección a la Tierra.[3]

A la hora de estudiar estos fenómenos no se puede experimentar de ninguna manera, ya que los parámetros del Sol no se pueden variar, por lo que los científicos investigan otras estrellas con el fin de poder extrapolar datos a nuestra estrella. Este hecho hace que la predicción de las tormentas solares se encuentre todavía en una fase muy temprana de desarrollo.

El Sol actúa sobre la Tierra de tres maneras distintas, a través del campo gravitatorio, a través de la radiación electromagnética (Calor y Luz) y la que más nos interesa de las tres, el viento solar. Los fenómenos electromagnéticos viajan a la velocidad de la luz, por lo que tardan en llegar a la Tierra en torno a 8 minutos, pero las deformaciones magnéticas producidas por el viento solar tardan horas e incluso días, al viajar dicha perturbación por el vacío.

La emisión de viento solar es continua y la magnetosfera contrarresta su efecto, es decir, permite la vida en el planeta Tierra, pero cuando se produce una eyección de masa coronal, aumenta de magnitud el viento solar, desequilibrando la magnetosfera y dando lugar a las tormentas geomagnéticas.

El proceso de una tormenta solar se divide en tres fases, la inicial, la principal y la de recuperación.[4]

- Fase inicial: Las líneas de campo magnético terrestre aumentan su densidad debido al aumento de presión del viento solar. Las monitorizaciones del campo magnético terrestre comienzan a variar (Entre 30 y 50 nanoteslas). Es el comienzo de la tormenta geomagnética, aunque esta fase no aparece en todos los eventos.
- Fase principal: Es el punto álgido de la tormenta solar. Se produce una gran inyección de plasma energizado proveniente del sol, lo cual induce la desestabilización del campo magnético terrestre (disminución de H). El inicio de esta fase se produce entre dos y diez horas después de la fase inicial y se puede prolongar durante varias horas.
- Fase de recuperación: Es la fase de normalización tras una tormenta solar. Hasta que la magnetosfera recupera su estado inicial pueden llegar a pasar varios días.

La única forma de visualizar este tipo de fenómenos solares con nuestros propios ojos son las auroras boreales. Este curioso efecto visual se produce normalmente en latitudes altas, aunque si la tormenta solar es de gran intensidad puede llegar a verse en latitudes incluso cercanas al Ecuador.

Las partículas provenientes de la eyección de masa coronal alteran la magnetosfera y se quedan atrapadas en las líneas de flujo. Las partículas solares colisionan con los propios átomos de la atmosfera, que se encuentran en el nivel fundamental. Debido a esto, se produce un estado de excitación (aumento de energía) y en el proceso de regreso a su estado normal emiten la energía en una longitud de onda visible para el ser humano, formando las conocidas auroras boreales (australes en el hemisferio sur).

Existen varias maneras de catalogar la intensidad de las tormentas solares, en el anexo 2 explicamos la manera más global de clasificarlas, con un código de letras y números, pero aquí vamos a explicar el modelo DST (Disturbance Storm Time). El DST es un índice de actividad magnética medido en una serie de observatorios situados a lo largo del perímetro terrestre. Lo que se mide en estos observatorios es la componente horizontal del campo magnético.

Las medidas en un día sin actividad son cero, y cuando una tormenta solar afecta a la Tierra el valor desciende y se transforma en negativo. En función del valor de DST se puede considerar una tormenta débil, moderada o intensa:

- Débiles $-30 > \text{DST} > -50$
- Moderadas $-50 > \text{DST} > -100$
- Intensas $-100 > \text{DST}$

Para que una tormenta produzca daños en la red eléctrica, consideramos que el índice DST debe estar por debajo de -100.

2.2.- Generación de corrientes geomagnéticas inducidas

Las corrientes en la parte alta de la atmósfera (ionosfera y magnetosfera) debidas a los eventos solares, crean variaciones en el campo magnético de la tierra, provocando gradientes en el potencial de la superficie terrestre de muy baja frecuencia (0.1–0.001 Hz) que en condiciones de baja resistividad del terreno y tormentas severas pueden llegar a ser superiores 6 V/km [1], lo que produce las corrientes geomagnéticas inducidas.

Dentro de la Tierra, las corrientes inducidas actúan para cancelar la variación del campo magnético externo, dando como resultado un descenso en la intensidad de dicha corriente en función de la profundidad de la corteza terrestre de la zona. No solo hay que tener en cuenta la profundidad, sino que la resistividad del terreno es un parámetro

que también influye en la determinación de los campos eléctricos producidos por las corrientes geomagnéticas inducidas. [5]

La tormenta que provocó el apagón de Quebec en 1989 provocó un gradiente de potencial de 2 V/km. En casos de tormentas extremas (que ocurren cada 100 años) el gradiente de potencial puede llegar a ser en Quebec (una zona “resistiva) del orden de 20 V/km, y en la Columbia Británica (una zona “conductiva”) del orden de 5 V/km [6]

2.3.- Problemas generados por las corrientes geomagnéticas inducidas

Las tormentas solares influyen ampliamente en el clima terrestre, pero además pueden afectar gravemente a la tecnología. Los sistemas más vulnerables son los satélites, los gasoductos y oleoductos, los medios de transporte y también las redes eléctricas (que son el objeto de este trabajo).

Los fallos de los satélites pueden llegar a ser catastróficos, ya que se podría producir un fallo en dominó de los sistemas GPS imposibilitando el tráfico por barco o por avión. También podrían hacer colapsar los sistemas de seguridad, las telecomunicaciones y las transacciones bancarias.

Aunque los problemas más graves son los nombrados anteriormente, hay que tener muy en cuenta la afección de las corrientes geomagnéticas inducidas. Estas corrientes que se forman debajo de la corteza terrestre pueden afectar tanto a las redes eléctricas (objeto de este trabajo, que se detallará más adelante) como a los oleoductos y gasoductos. Estas corrientes pueden afectar a las conducciones metálicas enterradas, provocando la corrosión y la degeneración de estas canalizaciones, lo cual hay que tratar con cautela al ser materias peligrosas.

Las corrientes geomagnéticas inducidas ya han provocado en el pasado graves problemas en las redes eléctricas, como por ejemplo en Quebec (Canadá), donde las pérdidas fueron millonarias.[4]

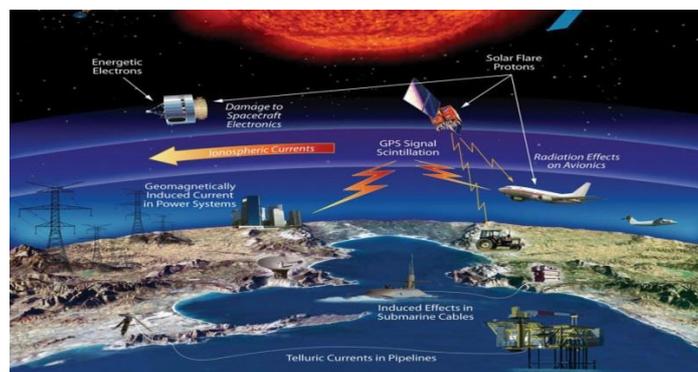


Figura 4. Esquema de la problemática de las tormentas solares [NASA]

2.4.- Tormentas solares significativas

A lo largo de la historia grandes tormentas solares han afectado a nuestro planeta. La dependencia de la humanidad con la tecnología cada vez es mayor, por lo que los efectos de una tormenta solar de gran magnitud podrían resultar fatales en la actualidad.

La primera vez que se registraron efectos negativos para la humanidad debido a la actividad solar fue en el año 1859. El evento Carrington, así llamado por el astrónomo que estudió el fenómeno, paralizó toda la red de telégrafos de Europa y América del Norte entre el 28 de Agosto y el 2 de Septiembre. Es la tormenta solar más potente desde que se tienen registros, pero en el futuro no hay dudas de que podría volver a ocurrir un fenómeno de características similares.

Los efectos visuales de esta tormenta solar fueron patentes en gran parte del hemisferio norte. En España fueron visibles y la prensa de la época lo recogió como un hecho sin precedentes. La visualización de estas auroras llegó hasta los 20° de latitud, siendo visibles incluso en Hawaii.[7]

Una tormenta del calibre del Evento Carrington sería a día de hoy muchísimo más perjudicial que en aquel entonces, cuando la tecnología casi no estaba desarrollada.[1] Ante una tormenta de esta magnitud, se estimaron en el año 2007 unas pérdidas en torno a 30.000 millones de dólares solamente en los satélites situados en la órbita geoestacionaria. A nivel global estas pérdidas son incalculables, y las agencias de protección civil de diversos países e incluso la NASA, han incluido las tormentas geomagnéticas dentro de los posibles riesgos naturales, y se han creado planes de protección. También la OCDE (Organización para la cooperación económica y el desarrollo) ha tomado cartas en el asunto y han presentado iniciativas de protección para la población.[4]

España al ser un país menos propenso a sufrir los efectos de una tormenta solar, está menos avanzada en cuanto a planes de protección frente a estos fenómenos. Aun así, en los últimos años, Protección Civil ha dado charlas técnicas de cómo se debería afrontar una situación de este estilo y el gobierno se ha interesado en mayor medida por la problemática de los eventos solares.

La probabilidad de que una gran tormenta afecte a España es pequeña, pero aun así, gracias al Instituto Geográfico Nacional, tenemos acceso a los magnetogramas de las tormentas solares más potentes registradas por los observatorios operativos. En el Anexo 3 del trabajo aparecen recogidas las fechas de las tormentas solares de mayor

intensidad y también los magnetogramas, donde se aprecia la variación del campo magnético.

A continuación podemos ver datos más recientes, las tormentas solares sucedidas dentro del ciclo 24 del sol, entre 2008 y 2013, y su categoría según el grado DST (explicado en el punto 2.1):

Nº.	Fecha	Dst	Nº.	Fecha	Dst	Nº.	Fecha	Dst
1	28/02/2008	-52	24	09/09	-69	47	18/01/2013	-57
2	09/03	-86	25	17/09	-70	48	26/01	-53
3	27/03	-56	26	26/09	-101	49	01/03	-52
4	04/09	-51	27	25/10	-132	50	17/03	-132
5	11/10	-54	28	25/01/2012	-75	51	21/03	-64
6	22/07/2009	-79	29	15/02	-62	52	29/03	-59
7	15/02/2010	-58	30	19/02	-54	53	24/04	-52
8	06/04	-81	31	07/03	-78	54	01/05	-76
9	12/04	-51	32	09/03	-129	55	19/05	-56
10	02/05	-66	33	12/03	-51	56	25/05	-55
11	29/05	-85	34	15/03	-80	57	01/06	-119
12	04/08	-67	35	28/03	-53	58	07/06	-71
13	05/05	-61	36	05/04	-56	59	29/06	-98
14	11/10	-80	37	24/04	-104	60	06/07	-79
15	28/12	-50	38	17/06	-86	61	14/07	-72
16	04/02/2011	-59	39	09/07	-69	62	27/08	-54
17	01/03	-81	40	15/07	-133	63	02/10	-67
18	11/03	-83	41	03/09	-78	64	09/10	-65
19	06/04	-65	42	01/10	-133	65	31/10	-52
20	12/04	-51	43	09/10	-111	66	07/11	-54
21	28/05	-91	44	13/10	-91	67	09/11	-81
22	05/07	-50	45	01/11	-74	68	08/12	-66
23	06/08	-107	46	14/11	-109			

Tabla 1. Tormentas solares entre 2008 y 2013, y su intensidad DST[4]

Lo que se aprecia en esta tabla es la gran cantidad de tormentas solares que se producen, aunque también se ve que la gran mayoría son de baja o media intensidad, y que no producen ningún inconveniente al ser humano. Solo las más grandes pueden afectar gravemente a la tecnología.

CAPÍTULO III: AFECTACIÓN A LA RED ELÉCTRICA

3.1.- Características de las corrientes geomagnéticas inducidas

Tal y como se ha explicado en los puntos anteriores, las tormentas solares generan corrientes geomagnéticas inducidas, las cuales son las causantes de la afectación de los eventos solares a la red eléctrica.

Estas corrientes son conocidas como corrientes cuasi continuas debido a la baja frecuencia que las caracteriza, entre 0.0001 y 0.1 Hercios, lo que conlleva que la respuesta del sistema sea básicamente resistiva.[2]

Las tormentas solares pueden durar varias horas e incluso varios días, pero las corrientes geomagnéticas inducidas sobre los transformadores se producen en picos de corta duración. En la siguiente gráfica podemos observar un ejemplo de la generación de corrientes geomagnéticas inducidas a lo largo del tiempo en un evento solar.

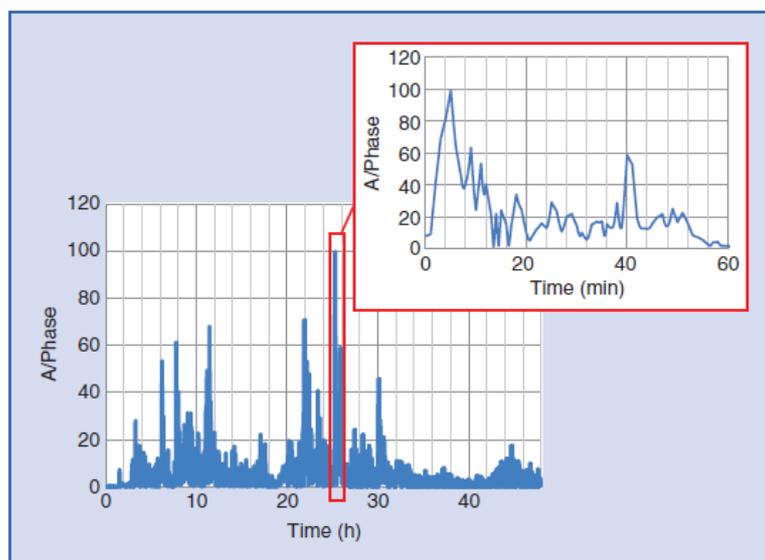


Figura 5. Corriente geomagnética inducida en función del tiempo[2]

Las corrientes geomagnéticas inducidas pueden verse incrementadas o disminuidas en función de una serie de variables las cuales se van a ver en el punto siguiente. La afectación entre dos transformadores relativamente cercanos puede llegar a ser muy distinta.

Tal y como se puede apreciar en la figura 6, las corrientes geomagnéticas inducidas surgen en el subsuelo y entran a los transformadores por el neutro (toma de tierra). Una vez dentro de los transformadores, fluyen por cualquier parte de la red y son las causantes de todos los problemas que más adelante se detallarán.



Figura 7. Mapa litológico Península Ibérica [Copyright Google Images]

Las zonas costeras también son un territorio de alta susceptibilidad debido a que las corrientes geomagnéticas inducidas en el océano encuentran una alta resistividad al entrar a la tierra firme y se genera una acumulación de cargas.[9]

Tal y como hemos visto en el punto anterior, las corrientes geomagnéticas inducidas se producen en picos y no tienen constancia. En caso de que las corrientes inducidas se prolonguen durante el tiempo con gran intensidad pueden provocar graves daños por altas temperaturas y generación de gases en el interior del transformador.

Existen estudios que afirman que las subestaciones que se encuentran en los extremos de las redes son más vulnerables a sufrir las corrientes geomagnéticas inducidas. El comportamiento mejora cuando se construyen líneas de transporte que unen este punto extremo con otros centros (es decir, anillando o mallando la red), para repartir así estas corrientes inducidas.[10]

En China concretamente, se están estudiando la creación de redes de transporte con una tensión nominal de 1000 kV, lo cual es más del doble de lo que tenemos en España (400kV). Al transportar la electricidad a una tensión muchísimo mayor, la resistencia por unidad de longitud es menor, lo que hace que las corrientes geomagnéticas también afecten en mayor medida a la red. Además de las elevadas tensiones de transporte, esta red proyectada está constituida por autotransformadores, lo que también hace más vulnerable la red. Se han hecho estudios midiendo las corrientes geomagnéticas en redes de 500 kV y 750 kV y se han extrapolado a la red de 1000 kV,

dando lugar a resultados que hacen replantearse la viabilidad de este futuro proyecto.
[11]

Como resumen, podemos decir que una tormenta geomagnética de gran intensidad, podría provocar efectos muy distintos en dos redes, pese a su misma potencia, y todo ello es debido a la gran cantidad de variables que afectan en el proceso de este tipo de eventos.[12]

3.3.- Afectación a transformadores

Tal y como hemos visto en los apartados anteriores (*Figura 6*), las corrientes geomagnéticas inducidas entran (o salen) a través del neutro del transformador, el cual está conectado a tierra. En la siguiente figura se puede ver como las corrientes se reparten por las tres fases del transformador y viajan por las redes de distribución y también salen repartidas por las tres fases de otro transformador (*Figura 8*).

Cuando una corriente continua actúa sobre los devanados del transformador da lugar a un cambio unidireccional del flujo del núcleo, el cual varía según la intensidad de la corriente, el número de espiras y la reluctancia del transformador.

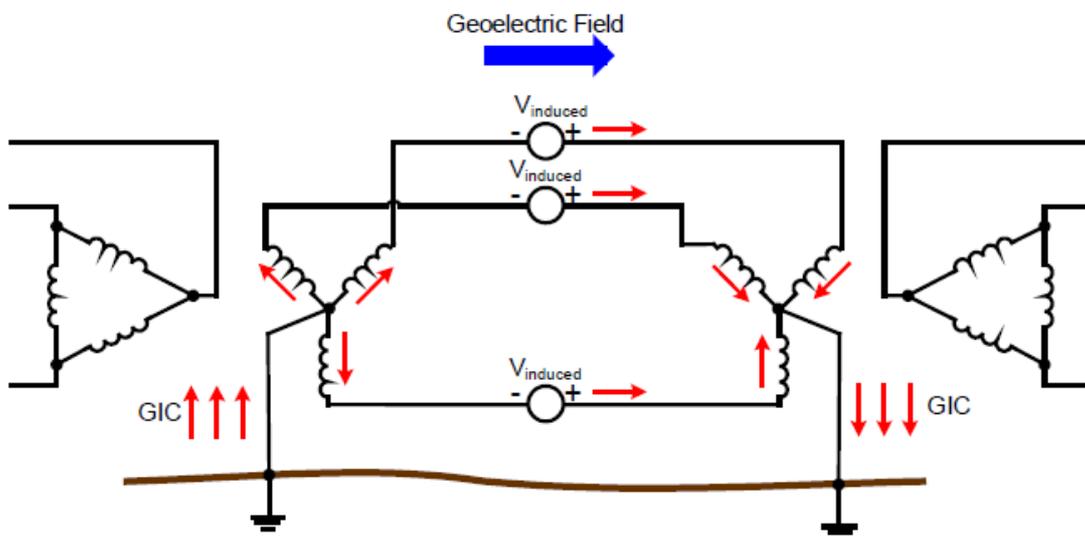


Figura 8. Esquema corrientes geomagnéticas inducidas trifásico[8]

Los núcleos de los transformadores eléctricos están hechos de materiales ferromagnéticos, los cuales tienen un ciclo de histéresis, es decir que cuando la corriente que reciben pasa de un máximo, el transformador se satura y “no da más de sí”.

Tal y como se ve en la figura 9, el flujo de continua provocado por la corriente geomagnética inducida, se suma al flujo de alterna (lo que pasa habitualmente por el

transformador), provocando la saturación del núcleo. En el ciclo contrario, cuando el flujo de alterna es negativo se provoca lo contrario, el flujo de continua se resta.

Cuando el flujo de continua proveniente de las tormentas geomagnéticas es suficientemente grande se alcanza el rango de pre-saturación a mitad del ciclo, dando lugar a una saturación parcial del ciclo.[8]

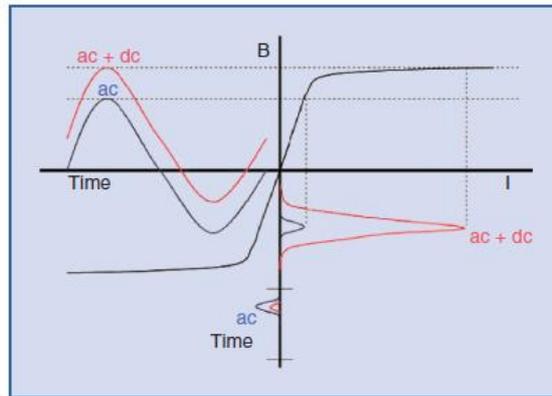


Figura 9. Saturación parcial del transformador[2]

Los transformadores trifásicos cuyo núcleo está formado por columnas (Figura 10a y Figura 10b) tienen una mayor reluctancia, lo que implica que no son tan susceptibles a las corrientes continuas, haciendo que sea menos probable que sufran una saturación parcial, como la que se ha comentado anteriormente. Pese a esto, si son afectados por una corriente de gran magnitud también se llegará a la saturación del núcleo.

Sin embargo, los transformadores acorazados, (Figura 10c) presentan una menor reluctancia, lo cual implica una mayor susceptibilidad a sufrir un ciclo de saturación parcial del núcleo ferromagnético aun siendo la corriente continua de pequeña magnitud.[8]

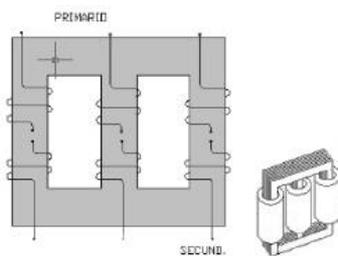


Figura 10a. Transformador de 3 columnas

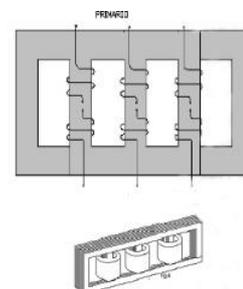


Figura 10b. Transformador de 5 columnas

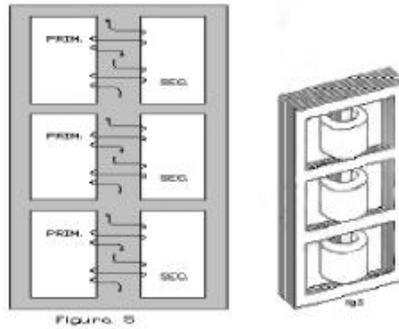


Figura 10c. Transformador acorazado
[Copyright: Universidad de Antioquia]

La variación de la energía reactiva absorbida por el transformador derivada de la saturación del núcleo, afecta directamente al funcionamiento de toda la red eléctrica. Se producen variaciones de tensión y se generan armónicos, en definitiva, esto da lugar a la bajada considerable de la calidad de onda, lo cual analizaremos en mayor profundidad en el siguiente punto.

No solo se pierde calidad en la onda que se distribuye al consumidor, sino que la saturación del núcleo y las corrientes de armónicos asociados, implican grandes pérdidas en el transformador. Estas pérdidas provocan graves aumentos de temperatura, los cuales pueden llegar a dañar el transformador en los repetidos ciclos.

Para el estudio de esta afectación, se puede simplificar la gráfica de la corriente geomagnética inducida por una gráfica en forma de escalera aproximada. El ejemplo de corriente inducida del apartado 3.1 se simplifica como se ve en la Figura 11, y la repercusión provocada en la temperatura del devanado del transformador es la que se ve en la Figura 12.

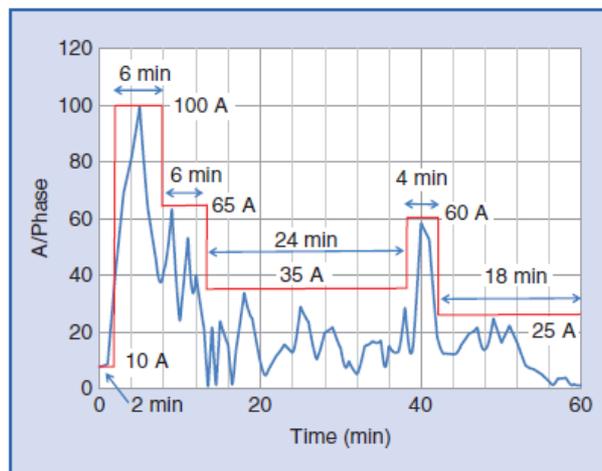


Figura 11. Simplificación para el estudio de temperatura[2]

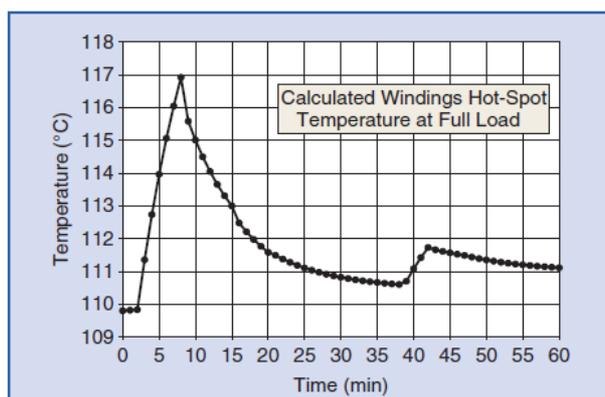


Figura 12. Temperatura en el devanado en función de la corriente geomagnética inducida[2]

Otra cosa a tener en cuenta es la conexión de los devanados de los transformadores trifásicos. Hemos comentado que las corrientes geomagnéticas inducidas entran en el transformador a través de la conexión del mismo a tierra. En la figura siguiente se muestran los distintos tipos de conexiones, y una de las más interesantes a tratar es la configuración en triángulo. Con esta configuración el neutro queda aislado de la tierra, por lo que las corrientes geomagnéticas no pueden penetrar en la red.

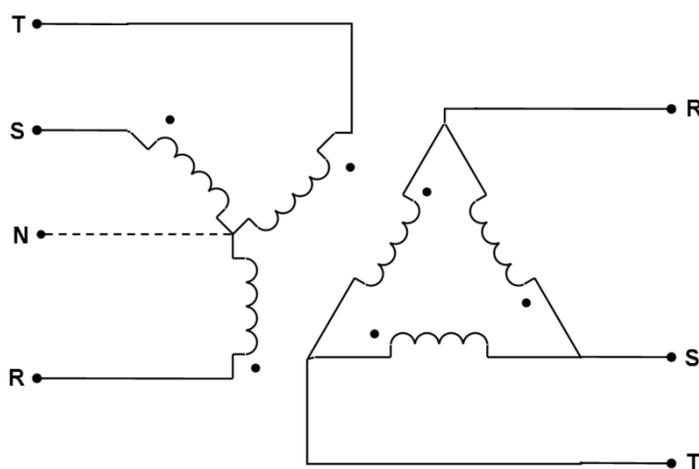


Figura 13. Conexión Estrella-Triangulo TrafoIII [Creative Commons]

En la figura 13 podemos ver una de las conexiones típicas de un transformador trifásico. Los devanados del primario están conectados en estrella, y por lo tanto el neutro es accesible y está conectado a tierra. En el secundario el neutro es ficticio al estar conectados los devanados en triángulo, de manera que las corrientes geomagnéticas no pueden entrar en el transformador por el secundario.

Existen gran cantidad de variables para conectar los devanados y es muy importante tener esto en cuenta a la hora de planificar una nueva red, ya que con los

distintos tipos de conexión se pueden dirigir las corrientes geomagnéticas como queramos, minimizando así los efectos sobre la red, y pudiendo evitar graves problemas como la caída en masa de las redes de transporte y centros de transformación.[2]

Además de todos estos problemas, el transformador sufre un envejecimiento prematuro debido a las continuas variaciones y llevando hasta el extremo sus características. Este hecho puede medirse con el nivel de gas generado en el depósito de aceite del mismo.[10]

3.4.- Afectación a la red como un conjunto

El primer desencadenante de los problemas en la red es la entrada de las corrientes geomagnéticas inducidas en el transformador. Como ya se ha explicado en el punto anterior, el transformador puede sufrir grandes aumentos de temperatura, pero la afectación va mucho más allá.

Una vez que las corrientes cuasi continuas entran en el transformador, se produce una gran absorción de potencia reactiva por el mismo. Esto provoca fluctuaciones en la tensión, cambios en la frecuencia de la corriente, generación de armónicos, y problemas a la hora de realizar mediciones de telemetría sobre el transformador.[12]

Las variaciones de la tensión provocadas por la fluctuación de energía reactiva, pueden hacer a su vez que varíe el flujo de potencia activa (MW), aunque suele ser de menor magnitud que las variaciones de reactiva. A su vez, estos cambios de potencia activa también provocan variaciones en la frecuencia, afectando así a la calidad del suministro.

Estas fluctuaciones e inestabilidad se propagan por las redes de transporte, lo cual hace que la afectación a un transformador pueda provocar incidencias a otros más alejados, y en casos mucho más graves podrían incluso desencadenar una caída en masa de la red eléctrica, como ya ocurrió en Canadá en el pasado, lo cual se explica en el apartado 3.5.

3.4.1.- Generación de armónicos

Las Corrientes geomagnéticas inducidas saturan el transformador tal y como se ha explicado anteriormente. Esta saturación es la que produce que se formen armónicos en la corriente, lo cual tiene un impacto significativo. Los bancos de condensadores

usados para controlar la potencia reactiva se convierten en caminos de baja impedancia para las corrientes armónicas, y pueden llegar a ser inutilizados.

Cuando esto ocurre, los filtros para armónicos de los compensadores estáticos de reactiva (SVC, por sus siglas en inglés) generan resonancias paralelas, y si los armónicos generados coinciden con la frecuencia característica de estas resonancias, puede llegar a producirse un gran desajuste de la tensión al entrar en resonancia. Debido a esto las protecciones pueden saltar y desconectar de la red el propio transformador, y si la respuesta no es rápida puede provocar incluso la caída en masa de parte de la red.

A su vez, los armónicos también pueden causar fallos en los relés de las instalaciones, dando lugar a que no estén operativos cuando sea necesario que estos actúen.

En los relés electrónicos los fallos no son totales, pero sí que reducen su eficacia, lo cual puede dar lugar a la rotura del banco de condensadores que antes comentábamos, pudiendo así producirse una grave caída del sistema eléctrico.[2]

3.4.2.- Inestabilidad de la tensión

Cuando el transformador entra en el ciclo parcial de saturación, se comporta como una gran carga reactiva y absorbe una gran cantidad de potencia reactiva. La siguiente figura representa la demanda de potencia reactiva (MVar) que consume cada fase de un transformador de 125 MVA respecto a la intensidad de las corrientes geomagnéticas inducidas que entran por el neutro. La dependencia es totalmente lineal.

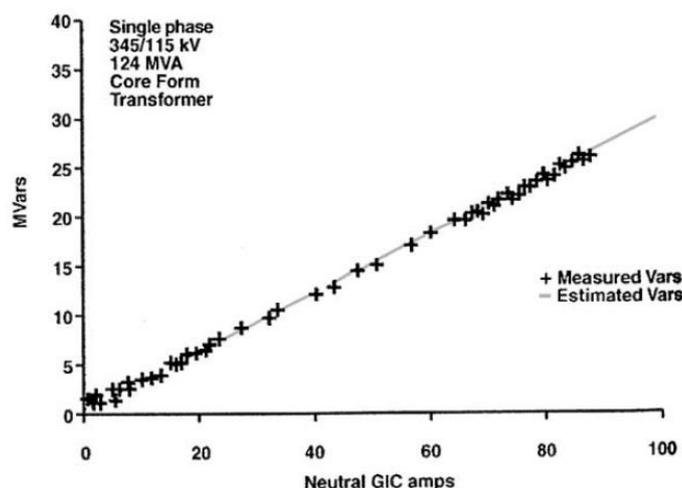


Figura 14. Consumo de potencia reactiva por fase de un transformador de 124 MVA de potencia nominal frente a la corriente geomagnética que entra por el neutro [8].

Este aumento de demanda de reactiva puede hacer que la tensión varíe hasta llegar a los límites de seguridad marcados, en los que los sistemas de seguridad desconectarían de la red los transformadores afectados.

Las fuentes de potencia reactiva como son los bancos de condensadores, los compensadores de potencia reactiva estáticos (SVC) y dinámicos intentan corregir el aumento de la potencia reactiva consumida por el transformador producido por las corrientes geomagnéticas. Si estas afecciones son de larga duración, estos sistemas de compensación pueden verse saturados y no conseguir su objetivo totalmente, haciendo posible un colapso de la red eléctrica.[2]

El estudio realizado por Shetye y Overbye en la red eléctrica de la zona este de Estados Unidos[13] muestra el consumo de potencia reactiva por los transformadores en función del gradiente de potencial del terreno provocado por la tormenta solar, así como la afectación a las tensiones de los nudos (número de nudos con tensión por debajo de 0,9 p.u.), tal y como se ve en las figuras 15 y 16. El máximo valor permitido para que la red no colapsase fue 12,5 V/km (con un valor de 13 V/km, el gradiente de potencial da lugar a más de 800 nudos con tensión inferior a 0,9 p.u., lo que provocaría el colapso total de la red).

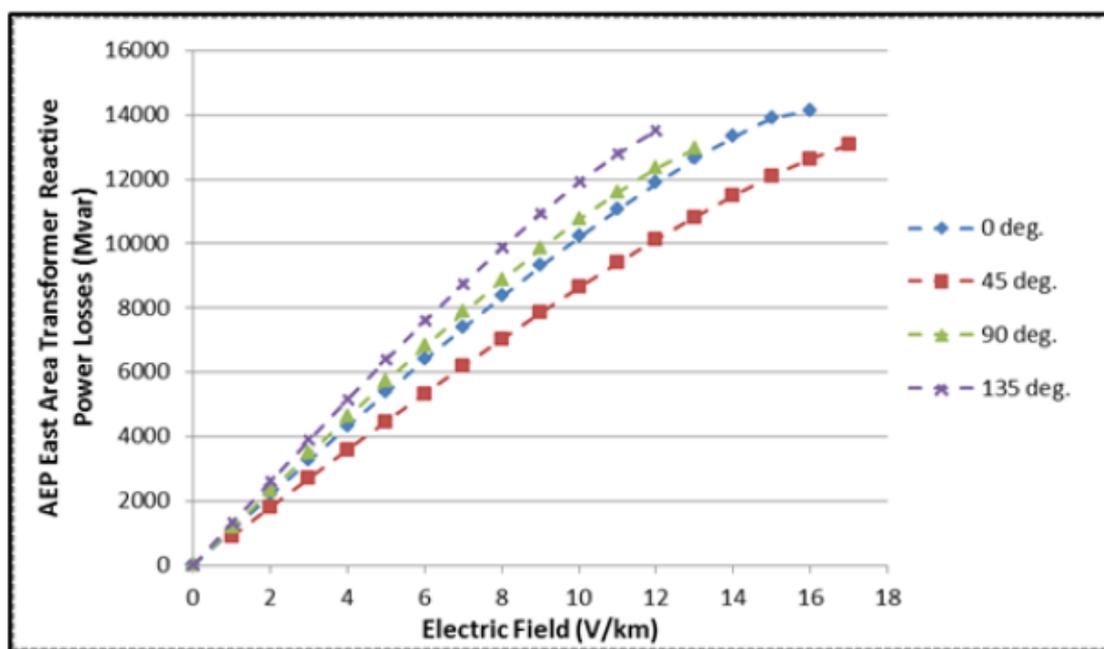


Figura 15. Energía reactiva consumida en función del gradiente de potencial [13]

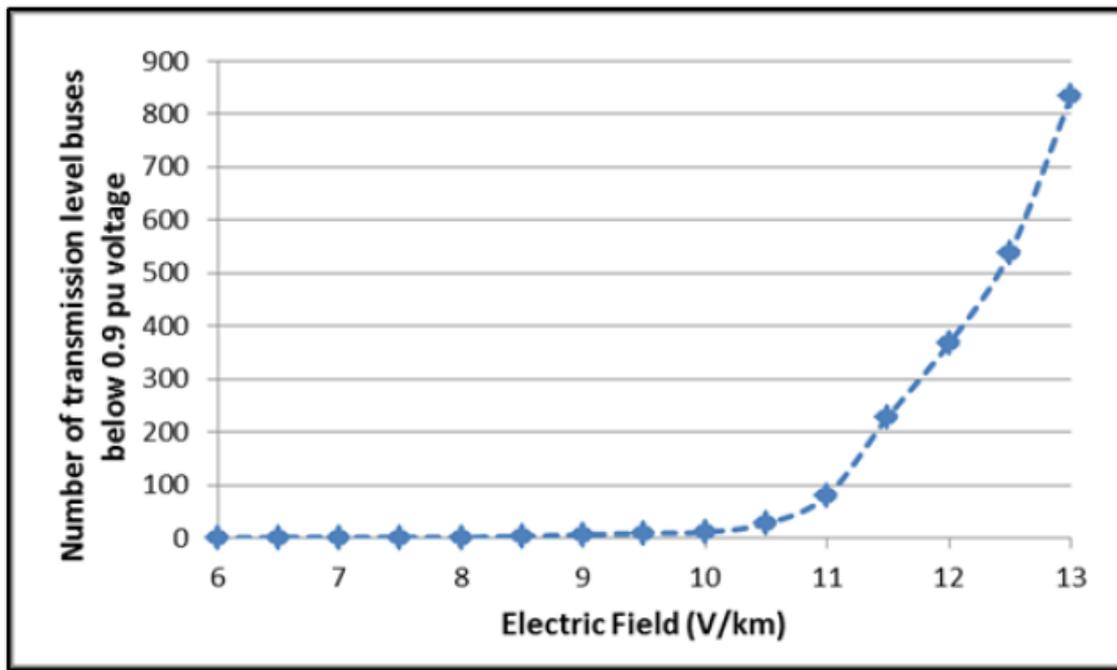


Figura 16. Numero de nodos puestos fuera de servicio en función del gradiente de potencial [13]

3.5.- Eventos pasados con afectación a Redes Eléctricas

En el año 1891 y 1892 varias líneas eléctricas entre Nueva York y Buffalo experimentaron fuertes corrientes que entraban por el neutro de los transformadores, de entorno a 300 mA, cuando lo normal en servicio era de 35mA, lo que provocó graves interrupciones en el servicio. Al principio se creía que esto podía estar causado por las corrientes telúricas provocadas por los terremotos, aunque probablemente, pese a no estar demostrado, forma parte de la afectación de una tormenta solar. [14]

Uno de los primeros problemas (constatados) sufridos por una Red Eléctrica, debido a una tormenta solar se produjo en América del Norte en Marzo de 1940. La “Compañía Eléctrica de Philadelphia” sufrió grandes variaciones en la potencia reactiva y en la tensión, y varios de los transformadores tuvieron que ser puestos fuera de servicio durante la afectación. Los efectos de esta tormenta solar también se reprodujeron en los servicios telefónicos y telegráficos.

En Marzo y Septiembre de 1946, una tormenta eléctrica provocó la puesta fuera de servicio de varios transformadores en Ontario

El 10 de Febrero de 1958 se sufrieron caídas de la red en Toronto y hubo flujos de potencia anormales en la zona estadounidense de Minnesota.

El 13 de Noviembre de 1960 se cortó el suministro en la alimentación de los cables transoceánicos y también se produjo la caída de 30 líneas en Suecia.

En dos ocasiones en dos años distintos (1980 y 1981) se produjo la caída de una línea de 500kV entre Manitoba y Minnesota.

El 13 de Julio de 1982 cuatro transformadores y 15 líneas quedaron fuera de servicio temporalmente debido a una tormenta solar en Suecia.[14]

El mayor impacto sufrido por una red eléctrica debido a los eventos solares, sucedió el 13 de Marzo de 1989. Una tormenta solar de intensidad X9 hizo que la Red eléctrica de “Hydro Quebec” se colapsara en apenas dos minutos. El sistema de generación de 21.500 MW y la red de distribución estuvieron inactivos durante nueve horas. Finalmente pudo resolverse la incidencia, pero este periodo sin electricidad causó graves pérdidas económicas. Desde entonces, las soluciones a los efectos de las corrientes geomagnéticas inducidas son tema de estudio, para que no se repitan estas situaciones tan comprometidas.[1]

Tras este grave episodio en Canadá, han seguido ocurriendo más eventos similares aunque de menor magnitud. Este hecho hizo que se potenciasen las investigaciones en este campo para evitar este tipo de sucesos, que tanto daño económico provocan a las instituciones.

En España no hay ninguna constancia de que un evento de estas características haya amenazado la integridad de nuestra Red Eléctrica, pero si se han detectado corrientes geomagnéticas inducidas en transformadores. Estas corrientes no han sido de la magnitud necesaria para afectar negativamente a la red, por lo que la investigación en este campo está bastante poco desarrollada, ya que hay una relativa calma. Pese a esto, hay que decir que una tormenta como la del evento Carrington podría volver a suceder, y afectar a latitudes cercanas al Ecuador como ya ocurriese en el pasado.

A pesar de la poca investigación en España, existen varios observatorios que se dedican a predecir la meteorología espacial y a hacer estudios para minimizar el efecto de las corrientes geomagnéticas.

El Observatorio del Ebro es uno de estos y gracias a ellos he podido obtener datos sobre los estudios que realizan, pero esto es cuestión del siguiente punto del trabajo, en el que se van a explicar las posibles soluciones a esta problemática.

CAPITULO IV: SOLUCIONES Y PROTECCIÓN

4.1.- Introducción a las soluciones

Sería un poco sensacionalista decir que existe una gran posibilidad de que una tormenta solar provoque un fenómeno de las características que se han explicado anteriormente, pero aun así, hay que tomar medidas preventivas y tener un plan correctivo en caso de que algún fenómeno solar de gran magnitud afecte a nuestras instalaciones.

Al ser España un país poco propenso a sufrir un episodio de fuertes tormentas solares debido a su latitud, no hay planes específicos por parte del gobierno para hacer frente, aunque si hay recomendaciones por parte de protección civil, pero de cara al ciudadano de a pie, no enfocadas a la red eléctrica.

En líneas proyectadas de nueva construcción se pueden tener en cuenta las características del transformador y la red, como la reluctancia, las conexiones de los devanados trifásicos y las conexiones entre ellos. De esta manera se podrían desviar las corrientes geomagnéticas inducidas convenientemente para afectar en menor medida a la red.

Para las líneas que ya están construidas no queda más remedio que hacer una implantación de algún sistema que limite la presencia de corrientes geomagnéticas inducidas. Ese sistema está compuesto por sensores y elementos electrónicos que impiden la entrada de la corriente por el neutro cuando se detecta alguna anomalía.
[15]

Otro punto que se está desarrollando en la actualidad es la predicción de la meteorología espacial. En España existen varios centros y observatorios que se dedican a investigar los periodos solares y cómo se producen estos fenómenos solares.

Junto a la predicción y la investigación de las tormentas solares, el modelado de la red y la simulación están en pleno desarrollo. Los estudios de predicción se añaden al modelo de la red y así se puede investigar la afección de las corrientes geomagnéticas sobre los transformadores y demás elementos. El Observatorio del Ebro es un referente español a nivel internacional en el modelado, y sus artículos han sido publicados en revistas de gran prestigio, como Space Weather.

Por último y en el caso de que un evento de extrema gravedad no pudiera combatirse de ninguna manera, hay que crear un plan con medidas correctivas para que

la afección a la sociedad sea la menor posible en caso de que la red eléctrica y el resto de tecnología del país pudiesen quedar comprometidas.

4.2.- Características del transformador y configuración de la red.

Los estudios demuestran que las características de los transformadores y de las redes eléctricas influyen activamente en el nivel de afección que las corrientes geomagnéticas inducidas provocan en los mismos.

Las medidas que se proponen aquí son de aplicación para las redes de nueva construcción, ya que en las redes existentes puede ser más costosa la reforma y remodelado que los beneficios que esto aporte. Quizá los transformadores que ya están instalados actualmente, acaben su vida útil antes de que una gran tormenta solar les afecte, por lo que no conviene cambiar la disposición de la red, ni cambiar los transformadores solo por este motivo.

Lo primero que hay que tener en cuenta, es que las corrientes geomagnéticas inducidas se distribuyen por el subsuelo, y es por la tierra del transformador por donde se introducen en la red. Existe una gran variedad de conexiones en los devanados de los transformadores trifásicos. En el caso de la conexión en estrella, el neutro es accesible y se conecta a tierra (directamente o a través de impedancia), mientras que en la conexión en triángulo el neutro es ficticio y por lo tanto no es accesible. De esta manera, los neutros aislados hacen menos probable la afectación de las tormentas solares al transformador.

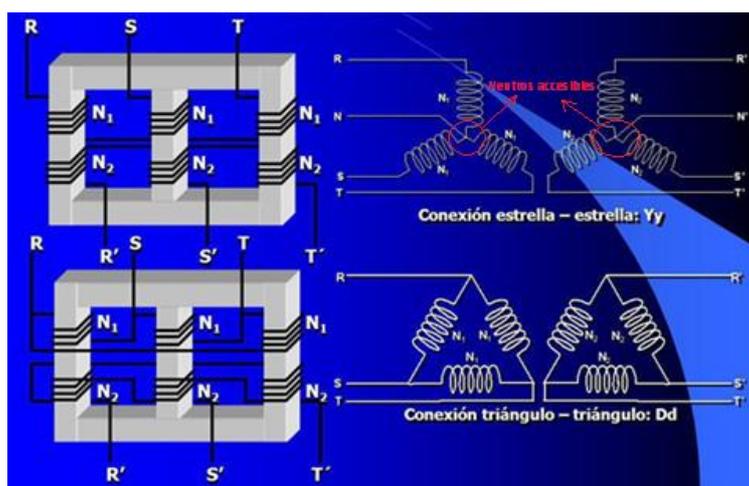


Figura 17. Tipos conexiones Trafos III [Universidad de Oviedo, Doroteo Zevallos]

Estas conexiones pueden estar “mezcladas” entre sí (Estrella-estrella, estrella-triángulo, triángulo-estrella, triángulo-triángulo), e incluso hay otro tipo de conexión que divide los devanados en dos partes, y se conoce como conexión zigzag.

Además de que en caso de que la conexión del transformador sea triángulo-triángulo se impide la entrada de la corriente geomagnética inducida, para redes antiguas podemos jugar con las conexiones para redirigir las corrientes por las distintas líneas y que la afección sea menor. Tal y como se ha visto antes en el esquema simplificado de la Figura 6, la corriente geomagnética entra por el neutro de un transformador, recorre una línea de transporte, y sale por la tierra de otro transformador. Esto implica que en una red mucho más compleja que la del ejemplo se pueden plantear las conexiones de los transformadores (estrella o triángulo, neutro de la estrella a tierra directamente o mediante impedancia) de manera que se redirijan las corrientes por las diferentes líneas, con el fin de minimizar el impacto [2].

Tal y como se ha explicado anteriormente la reluctancia es una característica inherente del transformador, que afecta en gran medida a la afección de las corrientes geomagnéticas inducidas. Dentro de los dos tipos principales de transformador en cuanto a tipo de construcción, el de tipo columna tiene una mayor reluctancia. Esto hace que el trafo sea menos susceptible a sufrir una saturación del núcleo, y por lo tanto que las corrientes geomagnéticas inducidas tengan menos posibilidades de generar un problema en la red.

Desde nuestro punto de vista, es mucho mejor un transformador de tipo columna que de tipo acorazado, pero hay que decir que cada uno de ellos tiene características distintas, y que no en todos los casos se pueden utilizar transformadores de columna.

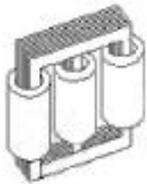
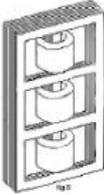
	TRAFO III COLUMNAS 	TRAFO III ACORAZADO 
PROS	<ul style="list-style-type: none"> -Menor afección de corriente geomagnética -Mayor facilidad de montaje y desmontaje -Mayor facilidad de reparación in situ -Transformador más común 	<ul style="list-style-type: none"> -Robustez mecánica y eléctrica -Reducción de dispersión del flujo magnético -Versatilidad (Uso en vertical u horizontal) -Alta potencia
CONTRAS	<ul style="list-style-type: none"> -Obligatorio su uso en vertical -Baja potencia 	<ul style="list-style-type: none"> -Dificultad de montaje y desmontaje -Mayor afección corrientes geomagnéticas

Tabla 2. Pros y contras de los tipos constructivos de trafos III [16]

En la tabla 2 podemos ver los pros y contras de cada transformador. En nuestro caso, siempre que se pueda hay que recomendar el uso del tipo columnas, ya que es

beneficioso de cara a soportar mejor una tormenta solar, pero hay que tener en cuenta las restricciones que tienen y el gran rendimiento que proporcionan actualmente los acorazados.

Otra manera de eliminar o al menos reducir los amperios que entran de las corrientes geomagnéticas inducidas es situar una impedancia (resistencia o condensador) entre el neutro del transformador y la tierra. Sin embargo, con esta solución, además de no ser extremadamente efectiva, hay que tener en cuenta una serie de aspectos que pueden afectar al uso de los transformadores:

- Pueden darse sobretensiones, haciendo saltar las protecciones
- Hay que evaluar que los márgenes de seguridad se mantienen durante los cortocircuitos
- Puede dar lugar a resonancia, lo cual hay que evaluarlo también
- Problemas de garantía con el fabricante por no usar el transformador según te indica en su manual.

4.3.- Sistema de bloqueo del neutro [15]

Las tormentas solares son inevitables, y por lo tanto, tarde o temprano van a ocurrir. De esta manera, no queda otro remedio que preparar las instalaciones para hacer frente activamente a las corrientes geomagnéticas inducidas. Para ello se ha desarrollado un sistema electrónico, que detecta la entrada de una corriente cuasi continua por el neutro del transformador, e inmediatamente actúa para contrarrestar esos amperios.

Este sistema fue probado en el año 2012 en el laboratorio KEMA y en las instalaciones de los laboratorios nacionales de Idaho. Ante la gran respuesta obtenida, se decidió instalar este sistema en el norte del estado de Wisconsin en Estados Unidos.

Los beneficios que aporta este tipo de solución a las redes eléctricas son los siguientes:

- Se reduce ampliamente la posibilidad de caída de la red eléctrica
- Protege a los transformadores más antiguos de la red, y evita que la temperatura del refrigerante suba por encima de los límites recomendados

- La inversión que supone instalar este sistema puede ser recuperada en uno o dos años, ya que se evitan las pérdidas que suponen otros métodos basados en la predicción.
- Este método evita que el ser humano tenga que decidir si activar el protocolo de emergencia, por lo tanto se evitan potenciales errores de cálculo.
- Efectivo en un gran rango de magnitudes de corrientes geomagnéticas.

Como se puede apreciar, los beneficios de este sistema son extensos y compensan claramente las contras que supone la instalación de los bloqueos automáticos del neutro.

En lugar de que el neutro esté conectado permanentemente a tierra a través de una impedancia, lo que se consigue con este sistema es que el neutro se conecte a tierra a través de la impedancia en el momento que una corriente geomagnética inducida aparezca en el transformador, y en el estado normal de funcionamiento esté conectado directamente a tierra.

Como se puede apreciar en la siguiente imagen, el sistema tiene la parte de conexión neutro-tierra y la parte del circuito de sensores que detectan las corrientes inducidas.

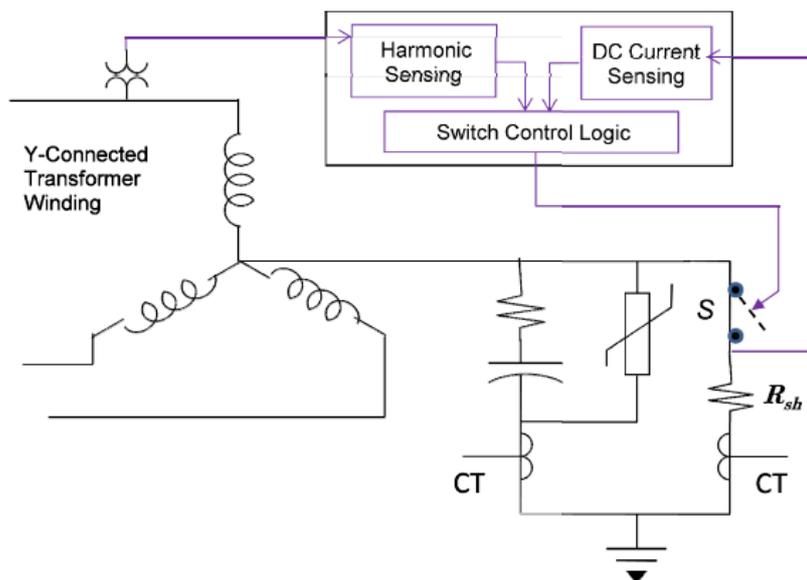


Figura 18. Esquema del sistema de bloqueo del neutro [15]

El estado de reposo de este sistema es con el interruptor “S” cerrado, de manera que la conexión del neutro es directa a tierra (la resistencia es la inherente a la propia

conexión). En el momento que se detectan corrientes cuasi continuas o una determinada tasa de armónicos (%THD) el circuito de protección entra en acción y se abre el interruptor S, de manera que se abre un camino a tierra a través del condensador (que tiene una alta impedancia para frecuencias bajas) y evita que las corrientes cuasi DC se cueen en el interior del transformador.

El sistema posee unos aparatos y sensores electrónicos de gran calidad, y unos interruptores que tienen que actuar en espacios muy cortos de tiempo para que la protección sea efectiva, por lo que el precio es bastante alto.

Como podemos ver en la siguiente figura, el tiempo de reacción es muy bueno, en tan solo 2.5 segundos desde que comienza la entrada de corriente continua por el neutro el sistema activa el condensador.

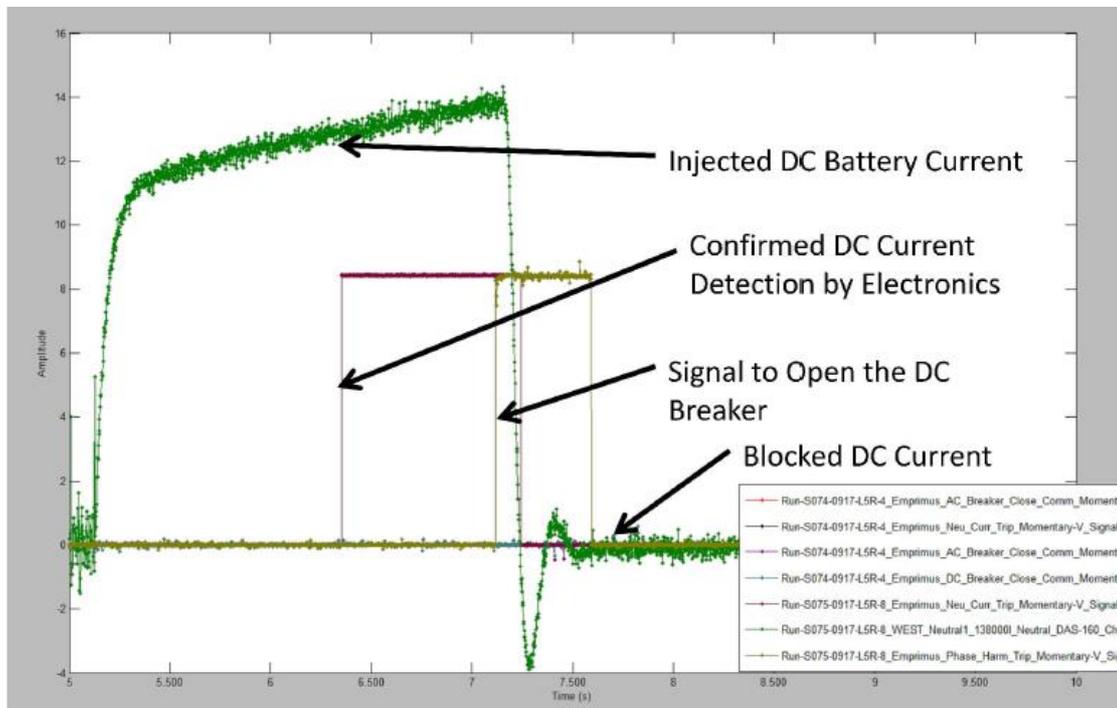


Figura 19. Ensayo del sistema de bloqueo del neutro[15]

La figura 19 representa un ensayo realizado en las instalaciones de los laboratorios de Idaho. La corriente geomagnética inducida está reproducida en este caso por una batería que aporta una corriente continua al neutro. Como se puede ver, la electrónica se cerciora de que efectivamente se trata de la entrada de corriente continua, y tras 1.3 segundos presenta una señal, que al mantenerse durante otro segundo, genera una nueva señal, la cual es la encargada de la apertura de los interruptores, provocando

que en un total de 2.5 segundos la entrada de corriente continua por el neutro se haya frustrado.

Hay que tener en cuenta que es un sistema muy novedoso, y que todavía hay que pulir distintas problemáticas que pueden surgir, como por ejemplo las resonancias que se pueden producir en los elementos de la red o la rotura de los elementos del sistema electrónico en caso de sobretensiones o sobre intensidades, pero a priori es un sistema que funciona correctamente y que puede mitigar las corrientes geomagnéticas inducidas.

Quizá España al ser menos vulnerable por norma general, como ya se ha explicado antes, no es el lugar propicio para invertir mucho dinero en esta tecnología, pero sí que es algo a tener en cuenta para las zonas más próximas a los polos. Otra cosa a tener en cuenta es que también se han realizado pruebas para que un solo sistema de bloqueo del neutro se pueda usar para varios transformadores de una misma subestación, lo cual abarata los costes.

4.4.- Predicción y meteorología espacial

Un punto clave para que la red eléctrica de España no sufra graves problemas debido a las potenciales tormentas solares que afecten a la Tierra son los estudios previos y las predicciones. Estos estudios se usan para poder tomar medidas en la red eléctrica mediante simulaciones y experimentaciones, para así poder ver los puntos débiles de nuestro sistema e intentar mejorarlos con sistemas como el explicado anteriormente. A día de hoy, España cuenta con varios centros de investigación para el estudio de los eventos solares, como por ejemplo los observatorios del Instituto Nacional Geográfico, que monitorean la actividad solar constantemente para prevenir de posibles eventos.

No solo los observatorios del instituto nacional geográfico están en funcionamiento, ya que en la península existen también varios centros donde se predice la actividad solar, como por ejemplo en la Universidad de Alcalá. Ahí se pueden detectar las alteraciones del campo magnético terrestre.

Otro de los centros, uno de los más prestigiosos del mundo, es el Instituto de Astrofísica de Canarias, conocido por realizar investigaciones en conjunto con la NASA.

Desde Huelva, más concretamente desde la Estación de Sondeos Atmosféricos, El Arenosillo, el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) se dedica a hacer mediciones periódicas de la ionosfera. Cada 15 minutos se hace una observación de

dicha capa atmosférica y los datos tomados sirven para predecir el comportamiento de las corrientes geomagnéticas.

El observatorio del Ebro va incluso más allá y no solo monitorea la actividad solar, sino que se centran en aplicar estas predicciones a modelos desarrollador por ellos mismos para entender la afectación de las corrientes geomagnéticas inducidas en la red eléctrica. Se ha desarrollado un proyecto que puede predecir y medir las corrientes inducidas geomagnéticamente en los transformadores de la red. En concreto este proyecto se ha centrado en una subestación de Vandellós, donde se ha logrado modelar de manera muy fiel la afectación de estas corrientes geomagnéticas inducidas.[17]

La Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), lanzo en Noviembre de 2013 la Misión “Swarm”, para entender mejor el campo magnético alrededor de nuestro planeta. Esta misión mejora las oportunidades del monitoreo en tiempo real de la ionosfera y la alta atmósfera.

Con la tecnología avanzando a pasos agigantados, cada vez es más normal poder acceder a información y datos que antes resultaban imposibles conseguir. Esta toma de datos facilita la posibilidad de investigación de estos fenómenos, y poco a poco conseguimos saber más de cómo nos afectan los eventos solares. El objetivo es estar preparados ante una tormenta solar de gran calibre y poder predecirla con tiempo, para poder tomar las medidas oportunas que minimicen el impacto sobre la tecnología mundial.

4.5.- Modelado de las corrientes geomagnéticas inducidas

Como ya se ha dicho antes, desde el evento ocurrido en Canadá en Marzo de 1989 han surgido grandes intereses en el modelado de las corrientes geomagnéticas inducidas. El objetivo del modelado es el estudio de las partes más vulnerables de la red debido a la acción del campo magnético generador de corrientes inducidas.

En la figura 20 podemos ver como es el diagrama de flujo con el que se modela la influencia de la tormenta solar en un transformador. Los datos de entrada es el campo magnético producido por la eyección de masa coronal del sol, y según la conductividad de la tierra se obtiene el campo geoelectrico y posteriormente ya la Corriente geomagnética inducida. A partir de datos del transformador se analizan los flujos de potencia, tensiones y temperatura en función de esta corriente geomagnética y se analizan los datos comparándolos con un rango de valores. Si los datos obtenidos indican que todo es correcto, el funcionamiento del transformador es el normal, y en

caso contrario se tienen que aplicar unas medidas que mitiguen dicha afección para que no se vea afectada la red.[18]

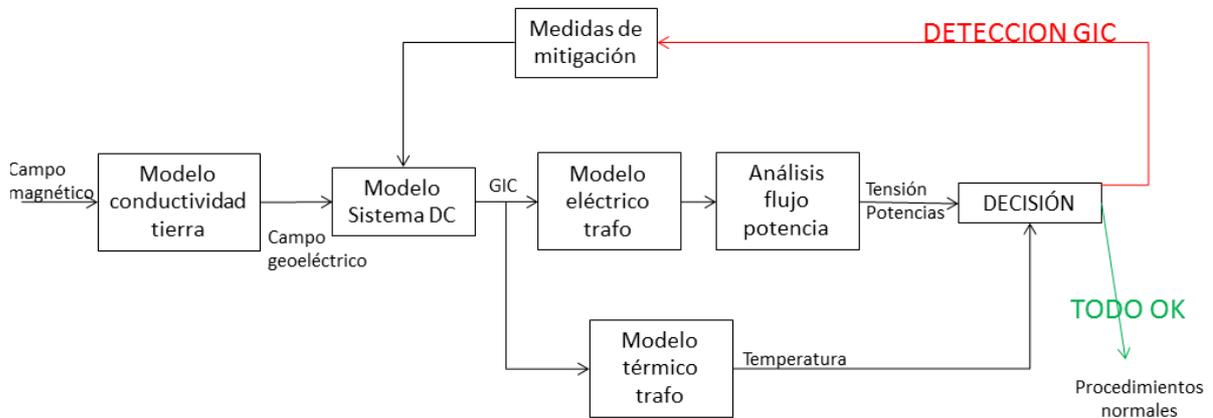


Figura 20. Modelado de los efectos del campo geomagnético y su afección a un transformador [18]

Debido a que las corrientes geomagnéticas inducidas son cuasi continuas, las redes de transporte están representadas por valores puramente resistivos. Este es uno de los puntos críticos del modelaje cuando se analizan redes completas, ya que es muy complicado dar con los valores exactos de las distintas resistencias del sistema.

Existen muchos puntos en común para el modelado de las redes eléctricas, aunque es importante no generalizar y hacer estudios individualizados debido a la gran cantidad de variables que afectan a estos fenómenos.

Las líneas de alta tensión usan conductores múltiples por lo que tienen una menor resistencia, y por tanto son las más afectadas por las corrientes geomagnéticas inducidas. Conforme se van mejorando las infraestructuras, se van aumentando las tensiones a las que se transporta la electricidad, por lo que el estudio de estos fenómenos es de gran interés de cara al futuro. [5]

Los objetivos que se buscan con el modelado de las redes son los siguientes:
[18]

- Identificación de los transformadores más susceptibles de la red a sufrir un fallo debido a las corrientes geomagnéticas inducidas.
- Estimación de los requerimientos de energía reactiva asociados a las corrientes geomagnéticas inducidas
- Entendimiento de cómo afectan las medidas de mitigación insertadas a la red
- Estudio del impacto de las tormentas solares en la seguridad de la red

4.5.1.- Investigación sobre interpolación de GIC (Observatorio del Ebro)[19]

En España, el Observatorio del Ebro, se encarga de monitorear datos de corrientes geomagnéticas inducidas y compararlos con los estudios teóricos que ellos mismos realizan. El Dr. Miquel Torta, especializado en geomagnetismo y aeronomía ha compartido conmigo sus estudios, los cuales han sido de gran ayuda para realizar este trabajo. Actualmente, él mismo me ha comentado que la red eléctrica española ha llegado a sufrir corrientes geomagnéticas inducidas, pero en ningún momento han llegado a causar problemas graves.

El último proyecto salido del Observatorio del Ebro, de la mano de Miquel Torta entre otros, consiste en afinar su antiguo modelado de la transmisión de las corrientes geomagnéticas inducidas, usando variables que en su día no se tuvieron en cuenta. Estas tres variables son:

- 1.- Conocimiento de la variabilidad del campo magnético en cada nodo de la red.
- 2.- Conocimiento de las estructuras geológicas que se encuentran bajo tierra.
- 3.- Conocimiento de la topología y las resistencias relativas de los elementos de la red eléctrica.

En el caso que una subestación esté cerca de uno de los observatorios, los datos de las corrientes geomagnéticas inducidas son lo suficientemente fieles como para usarlos directamente y se pueden tomar directamente de lo observado, pero en caso de que la subestación esté alejada de cualquier observatorio, hay que hacer uso de la interpolación. Para hacer una interpolación precisa y que los datos sigan siendo realistas, lo que se intenta es ver cómo afectan las distintas condiciones terrenales a la transmisión de las corrientes geomagnéticas e introducirlas en el cálculo a través de tensores.

En este estudio se han propuesto dos métodos puramente matemáticos y otros dos puramente físicos, y los resultados son extremadamente parecidos, lo que indica que los datos tomados y los cálculos realizados son fiables.

En la siguiente imagen podemos ver las distintas interpretaciones de las corrientes geomagnéticas inducidas en función de las variables que se hayan tenido en cuenta.

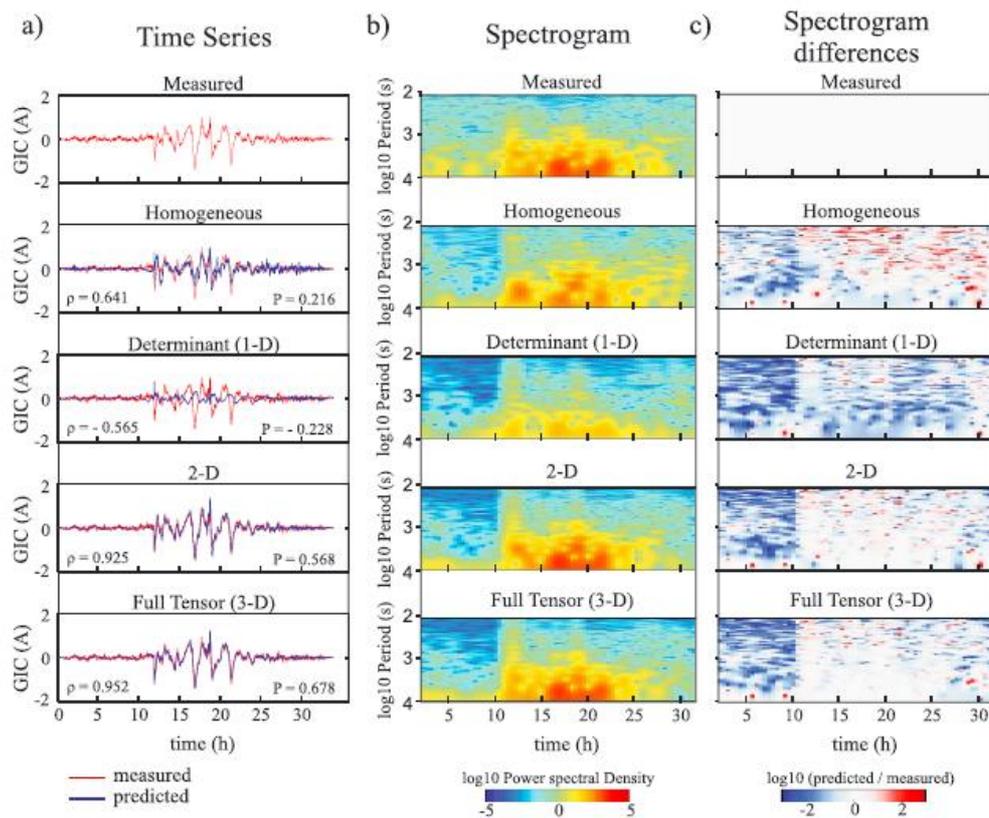


Figura 21. Aproximaciones de corrientes geomagnéticas inducidas en función del modelo usado[19]

En el método homogéneo se tiene en cuenta una resistividad del terreno de 1000 Ohm*m, pero los demás parámetros que pueden influir (los tres comentados anteriormente), no se tienen en cuenta.

En el método 1-D, no se tiene en cuenta el efecto costa. Al estar la subestación de Vandellós situada a escasos metros del mar, se ve altamente influenciada por ello, por lo cual este método no aproxima correctamente en estas situaciones.

Tanto en el método 2-D como en el método del tensor 3-D, se puede apreciar perfectamente que la corriente geomagnética estimada en la subestación concuerda de manera muy realista con lo medido en la realidad. Esto significa que la aproximación realizada es correcta.

Un apunte a tener en cuenta es que la presencia de autotransformadores afecta a la transmisión de las corrientes geomagnéticas inducidas y puede distorsionar los resultados obtenidos. En este caso concretamente, la subestación de Vandellós no tiene autotransformadores, pero si hay alguno a lo largo de la línea que llega a influenciarlo.

Este experimento puede tener una gran cantidad de aplicaciones ya que viendo que efectivamente funciona, podríamos usar perfiles ficticios de tormentas solares para

ver la influencia de las variables y como afectarían a las distintas subestaciones españolas, con el fin de detectar los puntos más débiles y poder reforzarlos.

4.6.- Medidas correctivas

En el momento que se produce una tormenta solar y no estamos preparados para ello mediante algún sistema de protección, solo nos queda esperar a recibir la corriente geomagnética inducida. Para minimizar los daños que se puedan producir e intentar que no caiga la red (en un evento extremo) podemos tomar unas medidas simples para que la red soporte mejor la embestida: [2]

- Poner en marcha todo el equipamiento que este fuera de servicio, para repartir mejor las corrientes y soportar mejor una posible caída de parte de la red.
- Posponer todas las interrupciones planificadas, como por ejemplo los mantenimientos rutinarios en los que es necesario sacar del servicio líneas o transformadores.
- Iniciar la producción de energía con los generadores que estén fuera de servicio
- Arrancar toda la refrigeración (bombas y ventiladores) para incrementar los márgenes térmicos de los transformadores

En el momento que la Red Eléctrica sufre un incidente grave y las medidas anteriores no han dado sus frutos, hay que actuar rápidamente para evitar un mal mayor. Cuando algo empieza a fallar, suelen comenzar a producirse los fallos en cadena, que pueden provocar el caos. Por eso es importante tener un plan de medidas correctivas para que en caso de que una gran tormenta solar afectara a la red eléctrica, se pudiese subsanar la situación a la mayor brevedad posible, para que las pérdidas económicas fueran mínimas y no se perturbara el bienestar de los consumidores.

Hay que recordar que en el verano de 2007, algo tan simple como la caída de un cable de alta tensión, provocó en Barcelona la caída en masa de la red, dejando sin suministro eléctrico a más de 350.000 usuarios y causando un caos terrible en la ciudad, debido a la suspensión del transporte público y el no funcionamiento de la semaforización de la ciudad.

La caída del cable de alta tensión provocó que parte de la red se desconectara y que se generase un incendio posterior en otra subestación eléctrica. En caso de que la gestión de la incidencia hubiese sido mejor prevista, se podría haber evitado gran parte

de lo ocurrido. Este es un simple ejemplo de lo que pasó, pero en el caso de una tormenta solar la problemática podría ser similar. Si las corrientes geomagnéticas inducidas dejan inútil un transformador, hay que redirigir los flujos con gran diligencia para que no se sobrecarguen partes de la red y se produzca una caída en masa.

El apagón de Barcelona costó 62 millones de euros en pérdidas y hasta que se restableció el suministro por completo pasó más de un mes. Antes de que el servicio estuviese recuperado en su totalidad, la energía eléctrica fue suministrada por generadores, lo cual era insalubre para los vecinos debido a los gases contaminantes, lo que provocó quejas y problemas de salud. El evento ocurrido en Canadá en el año 1989, fue bastante similar. Se colapsó la red eléctrica de Hydro Quebec debido a una gran tormenta solar y la estadística dice que tarde o temprano podrá llegar una tormenta de ese calibre o incluso mucho mayor, por lo que debemos estar preparados.

En España, Protección Civil tiene un plan de emergencias en caso de tormenta solar, y también hay una página web que indica lo que se debe hacer a nivel personal en caso de que nos afecte un evento de este tipo. (<https://www.tormentasolar.info>)



Figura 22. Recomendaciones ante tormenta solar [www.tormentasolar.info]

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

España es un país poco propenso a sufrir una tormenta solar de grandes dimensiones, pero aun así hay que estar alerta. Hay que seguir invirtiendo en investigación, ya que los hechos pasados ya reflejan como en el año 1859 una tormenta solar generó el caos en el mundo, cayendo la red de telégrafos a nivel global. Una tormenta solar de esa magnitud a día podría ser caótica al estar la tecnología muchísimo más desarrollada.

No es fácil investigar en este campo, ya que hay gran cantidad de variables que condicionan los estudios y que pueden hacerlos cambiar de manera radical. De todas maneras, ya hay investigaciones a nivel mundial que intentan mejorar la respuesta de las redes eléctricas ante eventos solares.

Las soluciones que se proponen a este problema, básicamente son las siguientes:

- Predicción y meteorología espacial, para prevenir cuanto antes una tormenta solar y poder tomar medidas
- Modelado de redes y transformadores para estudiar la afección de las corrientes geomagnéticas inducidas
- Sistemas activos de control de corrientes inducidas. Como por ejemplo el sistema de bloqueo del neutro
- También hay que tener un plan con medidas correctivas para el caso de fallo de algún transformador y hubiera que recuperar el servicio de la red.

En cuanto a las infraestructuras de la Red Eléctrica Española, no merece la pena hacer cambios actualmente, pero sí que conviene que se tenga en cuenta a las corrientes geomagnéticas inducidas a la hora de realizar recambios o remodelados de las redes y sus componentes.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] B. R. Sun, M. Mcvey, M. Lamb, and R. M. Gardner, “Mitigating geomagnetic disturbances,” *IEEE Electr. Mag.*, no. December, pp. 34–45, 2015.
- [2] “Geomagnetic Disturbances,” *IEEE Power Energy Mag.*, no. August, pp. 71–78, 2013.
- [3] J. Sanz Forcada, “El enigmático ciclo de actividad del Sol,” *Rev. Astron.*, vol. 172, pp. 30–37, 2013.
- [4] M. Herraiz Sarachaga and G. Rodriguez Caredot, “Tormentas geomagnéticas y evaluación de su impacto en el ámbito de las tecnologías e infraestructuras en España y Portugal,” *Rev. Segur. y Medio Ambient.*, vol. 133, pp. 18–34, 2014.
- [5] D. Boteler, “Geomagnetic Effects on Power Systems,” *IEEE Electr. Mag.*, no. December, pp. 4–7, 2015.
- [6] D. H. Boteler, “Geomagnetically Induced Currents: Present Knowledge and Future Research,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 9, pp. 50–58, 1994.
- [7] J. Green and S. Boardsen, “Duration and extent of the Great Auroral Storm of 1859,” *Adv. Sp. Res.*, vol. 38, pp. 130–135, 2006.
- [8] J. Verner, G. Hoffman, and W. Bartley, *IEEE Guide for Establishing Power Transformer Capability while under Geomagnetic Disturbances*. 2015.
- [9] T. S. Molinski, “Why utilities respect geomagnetically induced currents,” *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, vol. 64, pp. 1765–1778, 2002.
- [10] J. M. Torta, S. Marsal, and M. Quintana, “Assessing the hazard from geomagnetically induced currents to the entire high-voltage power network in Spain,” *Earth, Planets Sp.*, pp. 1–17, 2014.
- [11] L. Liu, W. Wu, and K. Zheng, “Preliminary Estimate of GIC Risk in China’s Future Power Grid Due to Geomagnetic Disturbances,” *North China Electr. Power Univ.*, 2013.
- [12] V. D. Albertson and J. M. Thorson, “Power system disturbances during a K8 geomagnetic storm,” pp. 1025–1030, 1972.
- [13] K. S. Shetye, T. J. Overbye, Q. Qiu, and J. Fleeman, “Geomagnetic Disturbance Modeling Results for the AEP System : A Case Study,” 2013.
- [14] D. H. Boteler, R. J. Pirjola, and H. Nevanlinna, “The Effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at Earth’s surface,” *Adv. Sp. Res.*, vol. 22, no. 1, pp. 17–27, 1998.
- [15] F. R. Faxvog *et al.*, “Power Grid Protection against Geomagnetic Disturbances (GMD),” *IEEE Electr. Power Energy Conf.*, pp. 1–13, 2013.
- [16] “Transformadores de Potencia tipo columna y acorazado,” www.sectorelectricidad.com. [Online]. Available: <http://www.sectorelectricidad.com/10895/transformadores-de-potencia-tipo-columna-y-acorazado/>.
- [17] M. Máiquez, “La primera gran tormenta solar del siglo XXI,” *20 Minutos*, 2013. [Online]. Available: <http://www.20minutos.es/noticia/1829000/0/tormenta/solar/silgo-xxi/#xtor=AD-15&xts=467263>.
- [18] C. Jing, D. Franklin, S. Mavis, and D. Cabbell, “Geomagnetic Disturbance Impact Study on System Reliability at Southern California Edison,” *South. Calif. Edison*, 2016.
- [19] J. M. Torta, A. Marcuello, J. Companyà, S. Marsal, P. Queralt, and J. Ledo, “Improving the modeling of geomagnetically induced currents in Spain,” *Sp. Weather*, pp. 691–703, 2017.

ANEXOS:

Anexo 1: Vocabulario

GIC: Corriente geomagnética inducida, por sus siglas en inglés

Magnetosfera: Región que rodea a un planeta, cuya función es desviar el viento solar procedente de las estrellas, haciendo de escudo protector contra las partículas de alta energía

Viento Solar: Gas ionizado (protones, iones y núcleos de helio), que escapa del sol y puede causar las tormentas solares si impacta contra la magnetosfera terrestre

Eyección de Masa Coronal: Onda formada por radiación solar y plasma (viento solar) que se desprende del Sol. Dicha onda es muy peligrosa debido a la influencia que puede causar sobre la red eléctrica y aparatos electrónicos en caso de impacto con la atmósfera terrestre.

Mancha Solar: Región del sol que tiene una temperatura más baja que su alrededor y goza de una intensa actividad magnética, que puede dar lugar a eyecciones de masa coronal, con la consecuente afección a la Tierra en forma de tormenta solar.

Aurora Boreal: Fenómeno visual en forma de luminiscencia que se aprecia en el cielo nocturno en latitudes altas, aunque puede aparecer en otros lugares situados más cerca del ecuador. Se produce debido al impacto de los iones provenientes del sol con las capas de la atmósfera.

Material Ferromagnético: Los materiales ferromagnéticos son los más comunes dentro de los magnéticos y experimentan un fenómeno de ordenación magnética, el cual les confiere las cualidades que hacen que sean útiles en la confección de núcleos de transformadores. Este tipo de material propicia el acoplamiento de los devanados.

Potencia Reactiva: Es la potencia utilizada para la formación del campo eléctrico y campo magnético, y se mide en voltamperios reactivos (VAr)

Potencia Activa: Es la potencia que se disipa en forma de calor o trabajo y se mide en Watios (W).

Compensador estático de potencia reactiva (SVC): Dispositivo conectado en paralelo a la red eléctrica que, a través de semiconductores controlados, genera o absorbe potencia reactiva. El adjetivo estático hace referencia a que no posee ninguna parte móvil, al contrario que los compensadores síncronos.

Relé: Dispositivo electromagnético que, estimulado por una corriente eléctrica muy pequeña, abre o cierra un circuito en el cual se disipa una potencia mayor que en el circuito de accionamiento.

Aeronomía: Ciencia que estudia las capas superiores de la atmósfera donde en concreto ocurre la ionización y disociación.

Anexo 2: Clasificación de las tormentas solares según su intensidad

Las tormentas solares se pueden clasificar según cinco letras en función de la intensidad de la misma. De menos a más, esta clasificación es A, B, C, M y X; y dentro de cada categoría se dividen del 1 al 9, excepto en la X, que no tiene límite.

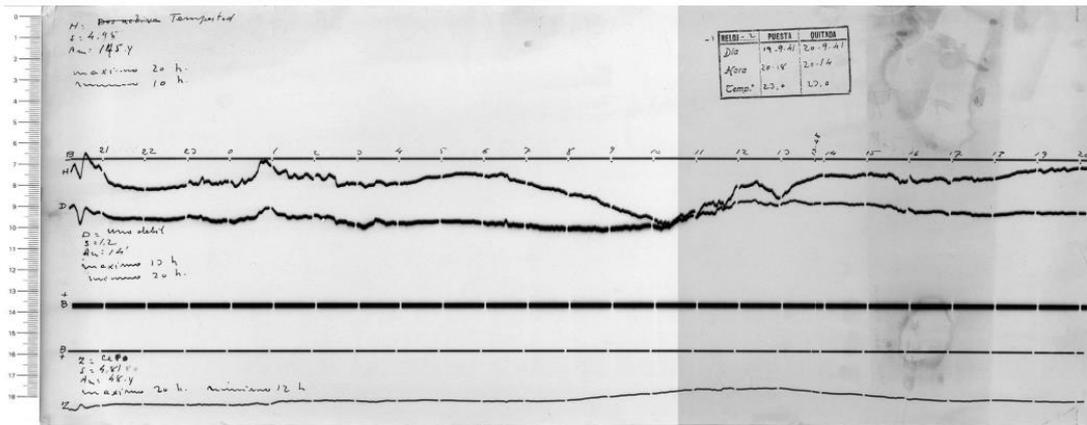
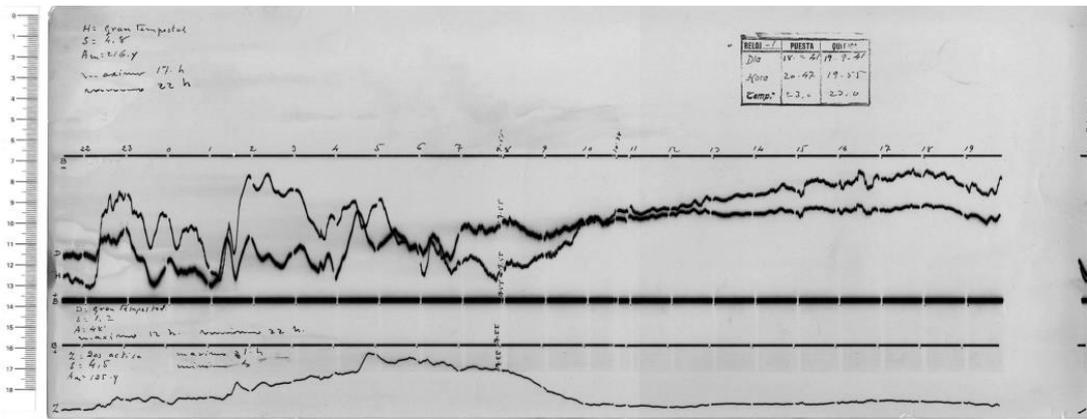
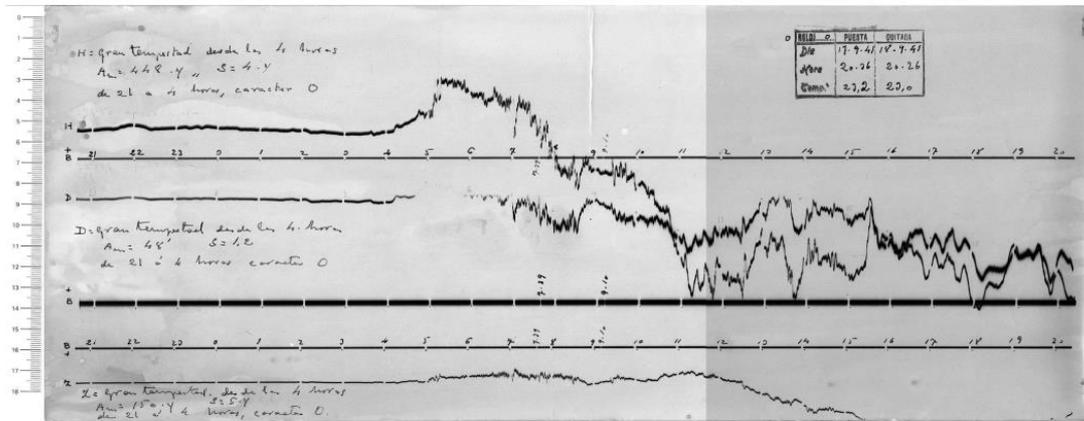
La medida de la potencia se realiza en W/m^2 y los valores para determinar la categoría son los siguientes:

- A $x < 10^{-7}$
- B $10^{-7} < x < 10^{-6}$
- C $10^{-6} < x < 10^{-5}$
- M $10^{-5} < x < 10^{-4}$
- X $10^{-4} < x$

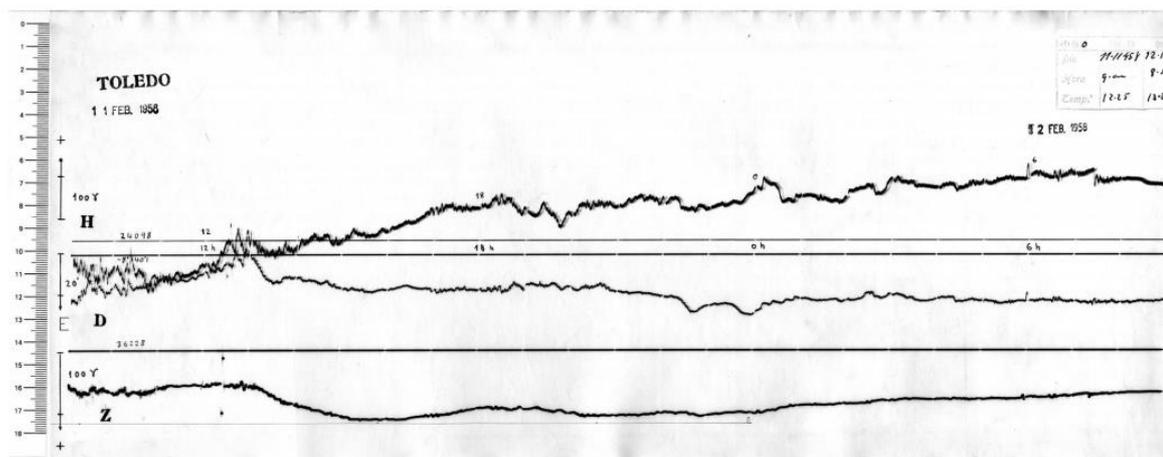
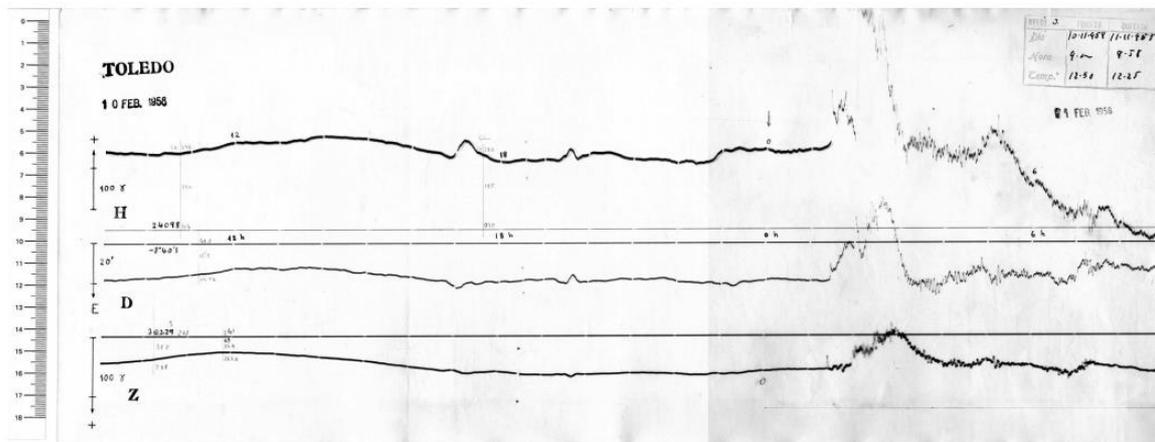
La tormenta ocurrida en el año 1989 que colapsó la Red Eléctrica de Hydro Quebec fue de una intensidad X9, sin embargo la eyección solar más potente jamás registrada tuvo lugar en Noviembre de 2003. Esta tormenta solar alcanzó la categoría X17, pero los aparatos de medida situados en los satélites GOES se saturaron. Tras muchos estudios, actualmente se estima que esta fulguración solar pudo alcanzar intensidades de X28, pero por suerte, no se dirigió a la Tierra.

[Kopp, Greg; Lawrence, George, Rottman, Gary; "The Total Irradiance Monitor (TIM): Science Results;" Solar Physics, Volume 230, Issue 1-2, pp. 129-139]

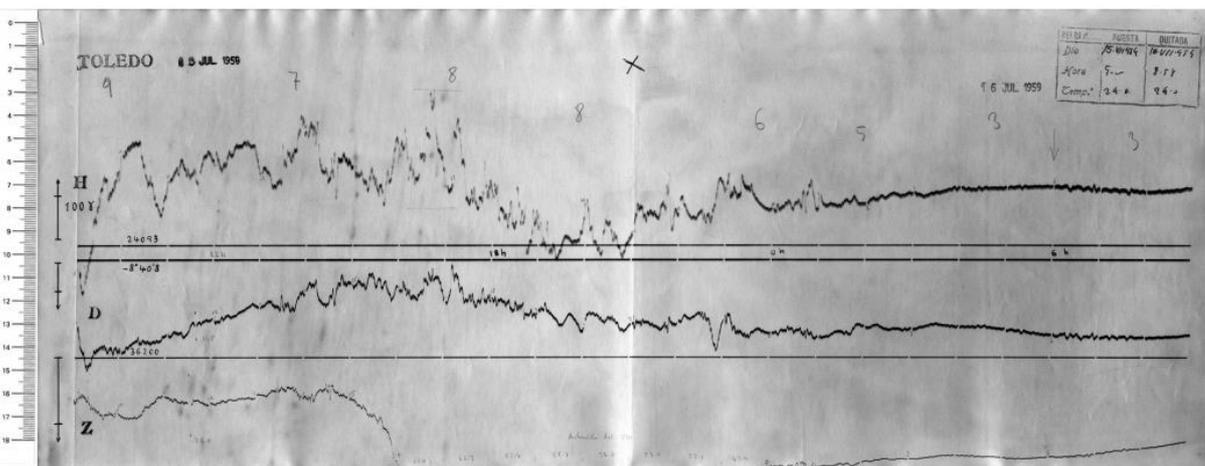
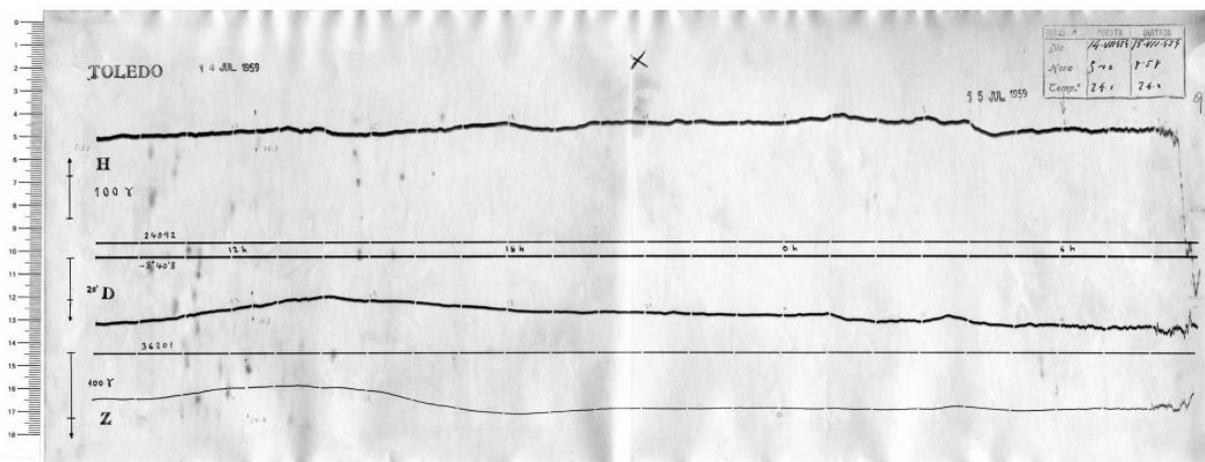
Anexo 3: Tormentas solares de gran intensidad registradas en España -18 Septiembre 1941 (Observatorio de Toledo)



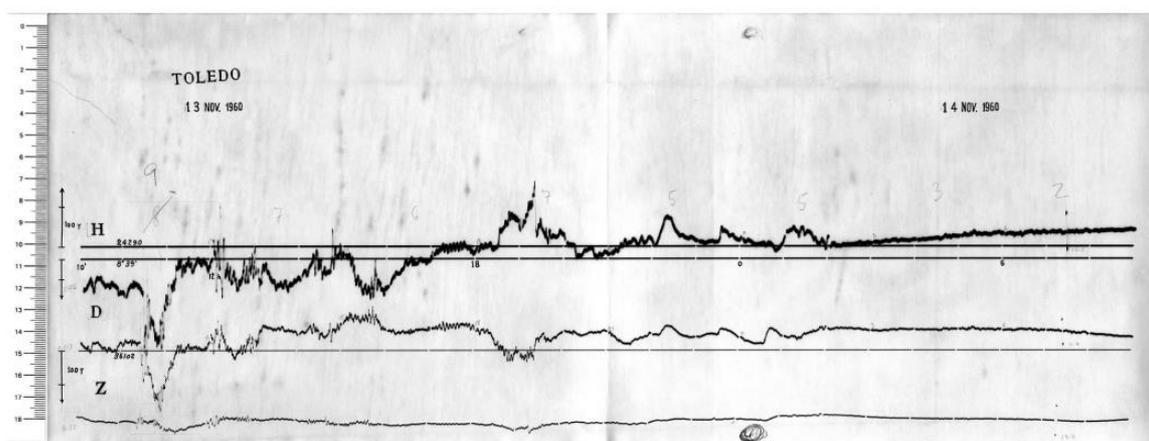
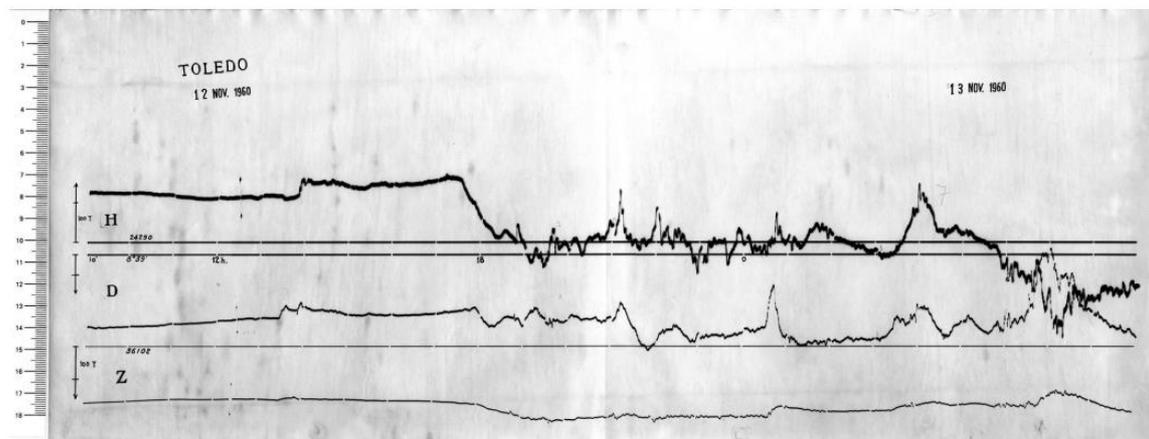
-11 Febrero 1958 (Observatorio de Toledo)



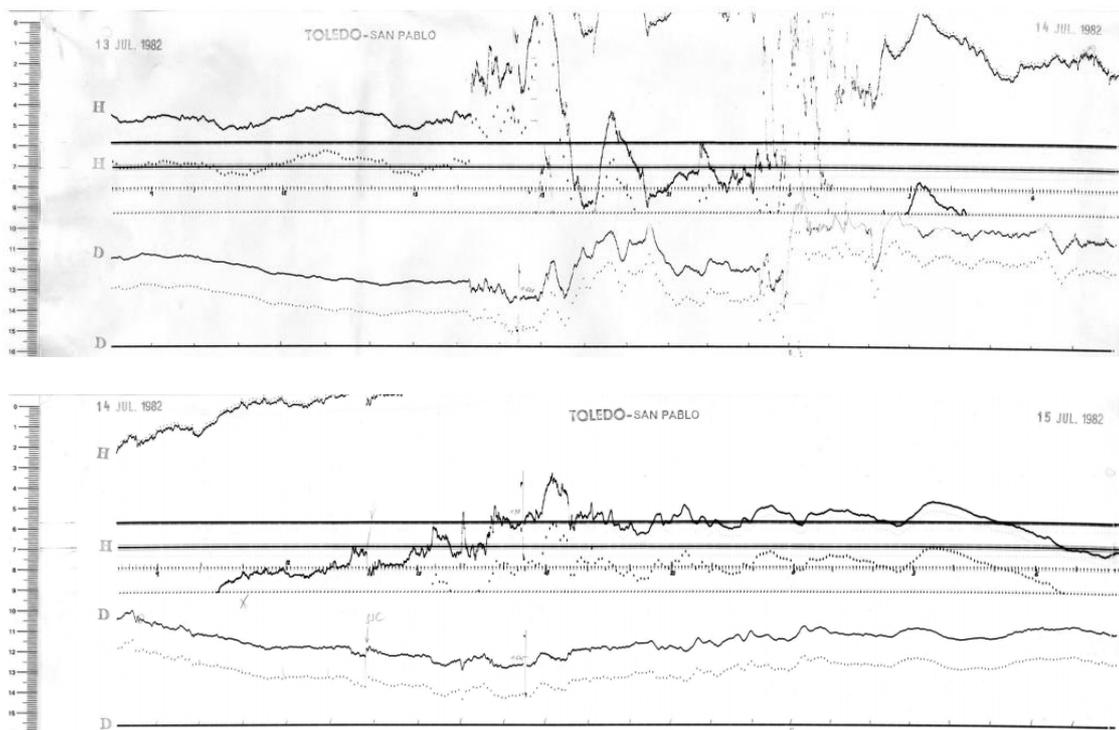
-15 Julio 1959 (Observatorio de Toledo)



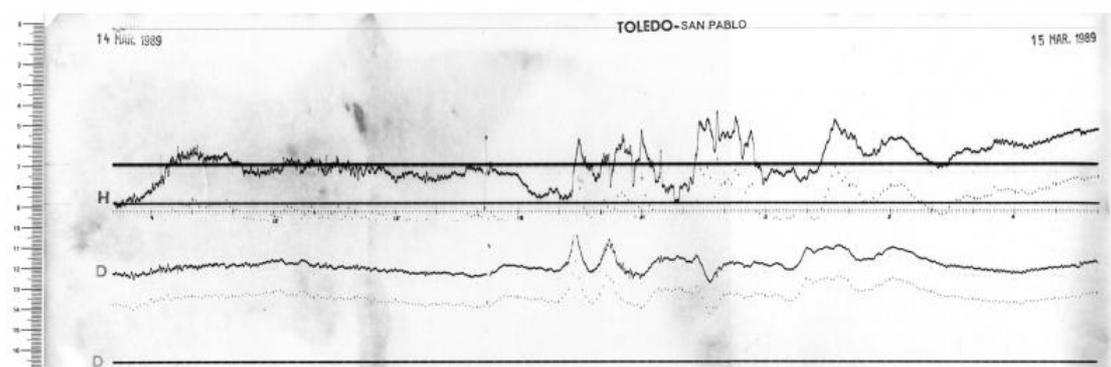
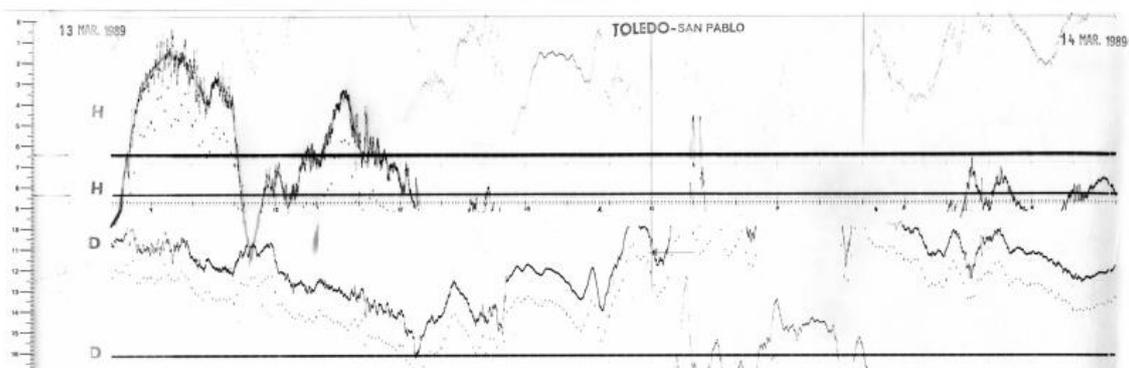
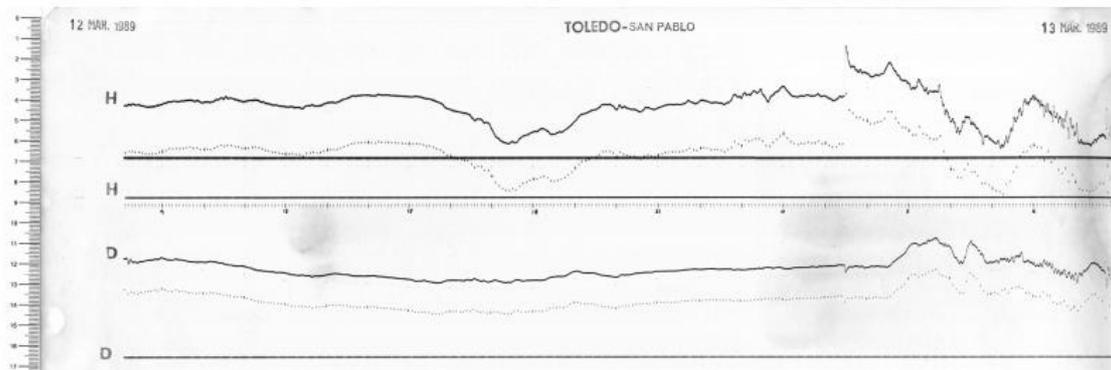
-12 Noviembre 1960 (Observatorio de Toledo)



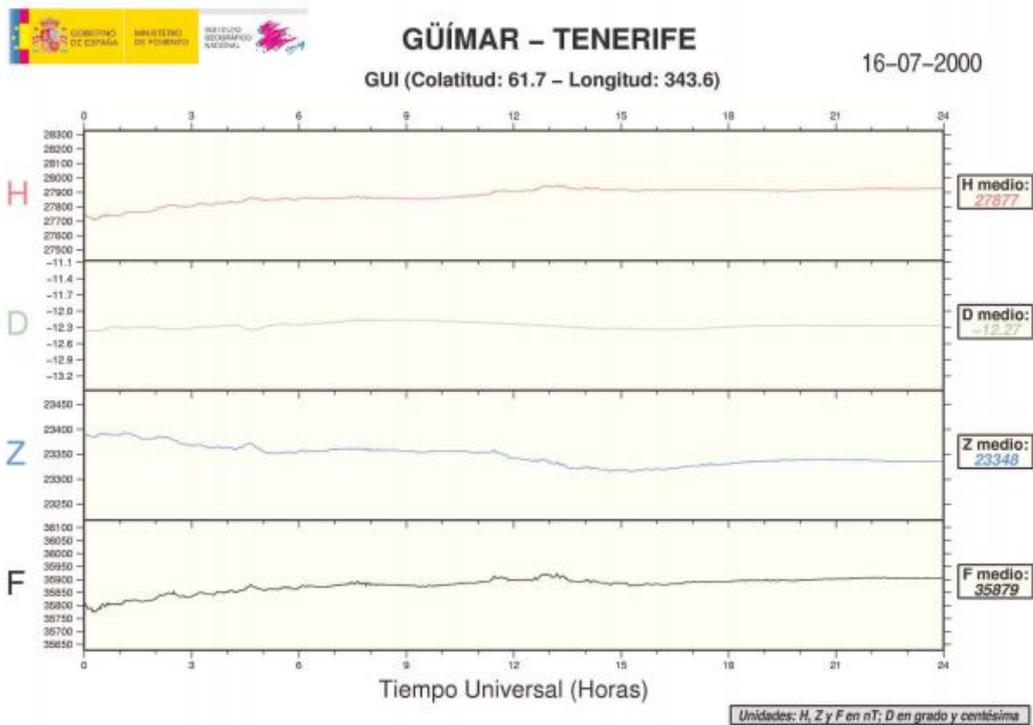
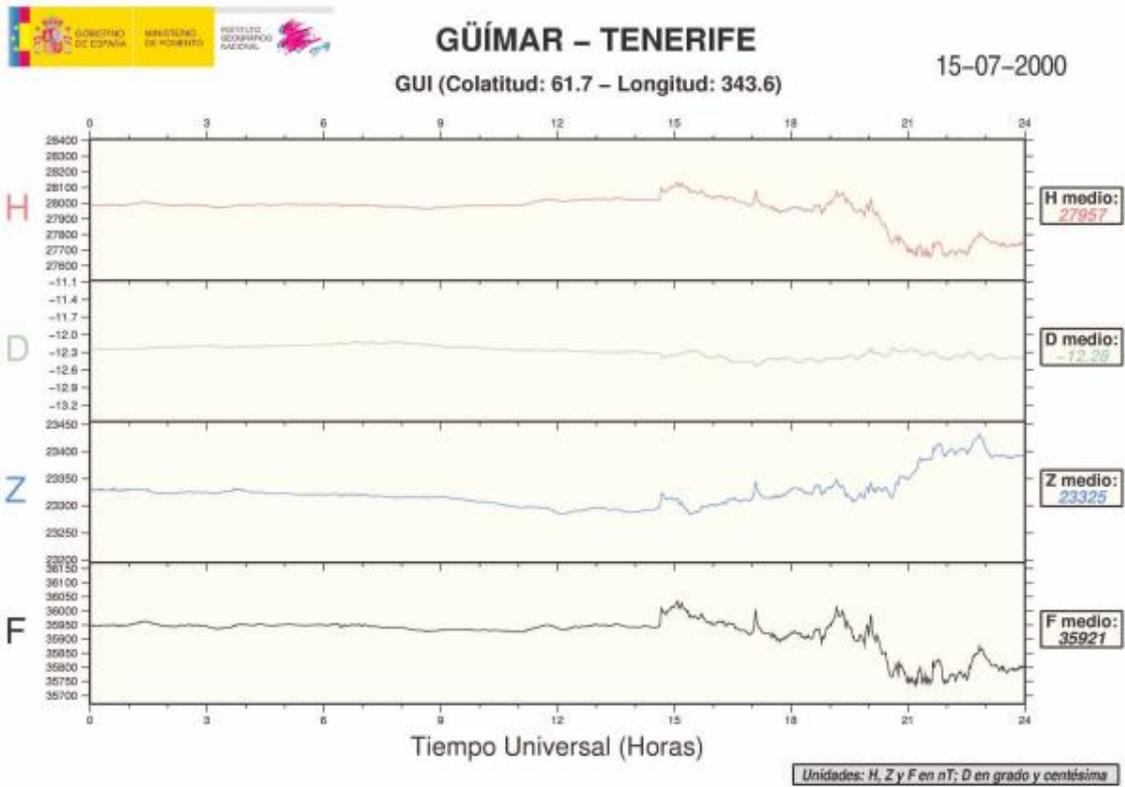
-13 Julio 1982 (Observatorio de Toledo)



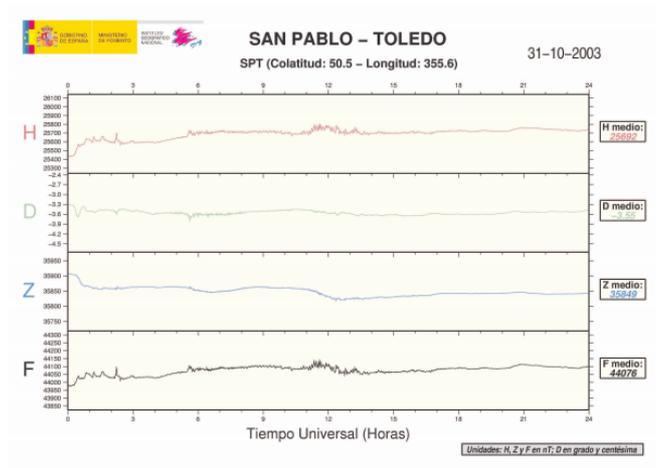
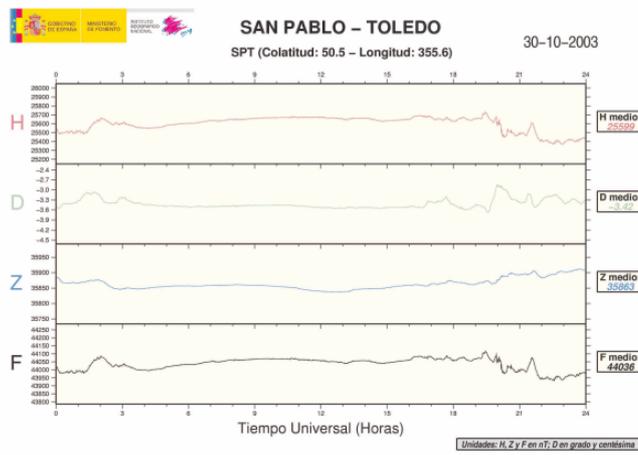
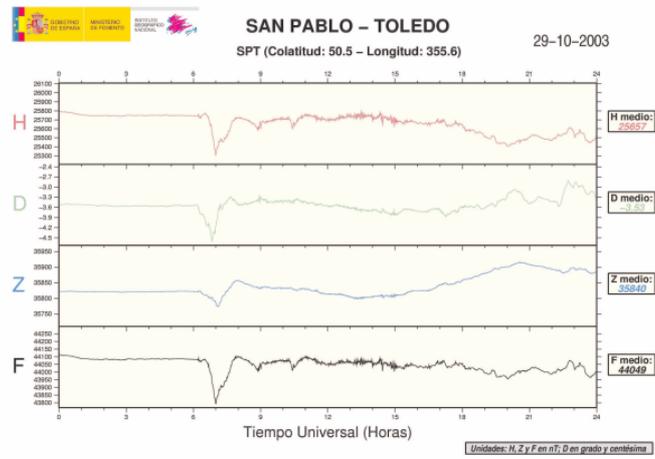
-13 Marzo 1989 (Observatorio de Toledo)



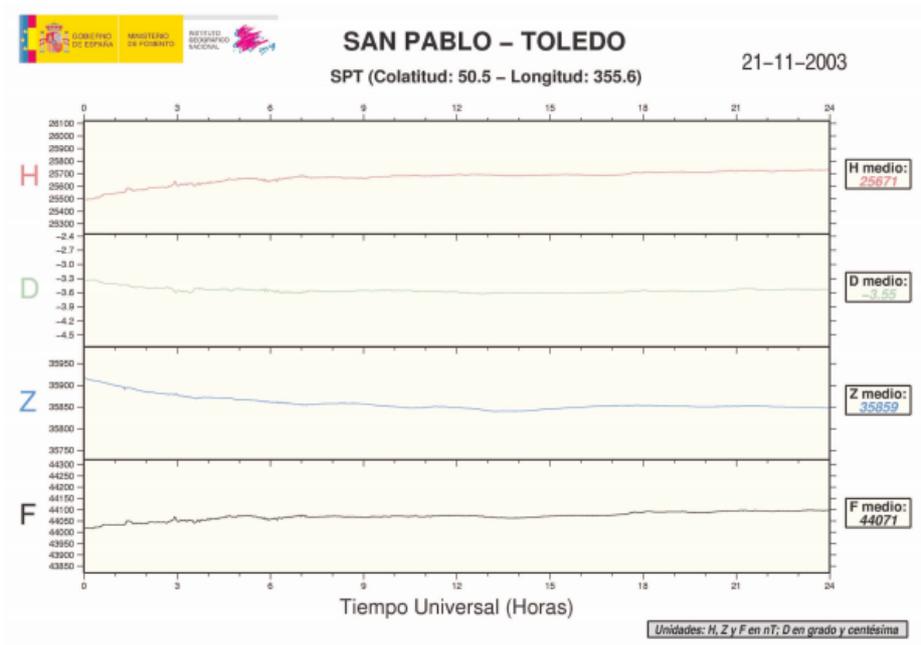
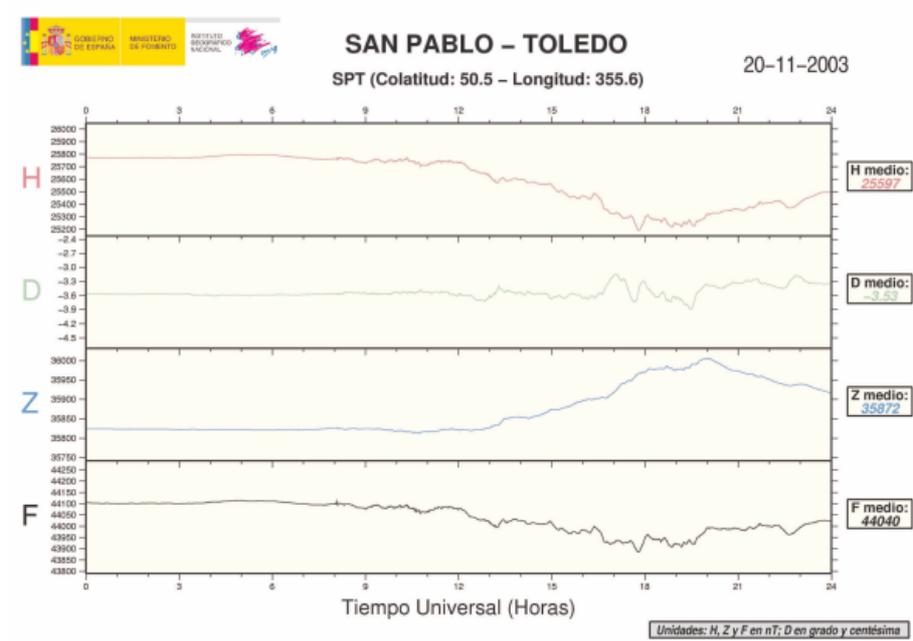
-15 Julio 2000 (Observatorio de Güimar - Tenerife)



-29 Octubre 2003 (Observatorio Toledo)



-20 Noviembre 2003 (Observatorio de Toledo)



-24 Agosto 2005 (Observatorio de Toledo)

