



BUAP

BENEMÉRITA **U**NIVERSIDAD **A**UTÓNOMA DE **P**UEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE TORMENTAS
SOLARES INTENSAS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL,
UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES
DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN
EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES
DEL CENTRO NACIONAL DE CONTROL DE ENERGÍA”.**

TESIS

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

ARTURO DE LA CRUZ GONZÁLEZ

Director de trabajo de tesis:

DR. CARLOS RAMIREZ PACHECO

Co-director de trabajo de tesis

M.C. JOSÉ ANGEL VALDÉZ SÁNCHEZ

DR. JUAN CARLOS ESCAMILLA SÁNCHEZ

Puebla, Pue. Febrero 2020



BUAP

Oficio No. 0285/2020

C. Arturo de la Cruz González

Pasante de la Maestría en Ingeniería
con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia
Facultad de Ingeniería, BUAP.
Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema titulado: **Efectos y análisis de contingencias ante tormentas solares intensas en la Red Eléctrica Nacional, utilizando resultados obtenidos por simuladores de GIC'S y flujo de potencia para su implementación en sesiones de entrenamiento para operadores del Centro Nacional de Control de Energía.** Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia. Asignándose como Director al Dr. Carlos Ramírez Pacheco y Co-directores al Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez y M.C. José Ángel Valdez Sánchez.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Zaragoza, enero 16 de 2020


M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director

C.c.p., Dr. Carlos Ramírez Pacheco, Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez y M.C. José Ángel Valdez Sánchez,
Director y Co-directores del Tema de Tesis

C.c.p. Archivo

ABH/GCC/sco*



Asunto: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ.
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE
LA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
PRESENTE

Los suscritos Dr. Carlos Ramírez Pacheco, Dr. Juan Carlos Escamilla Sanchez y M.C. José Ángel Valdez Sánchez , Director y co-directores del tema de tesis denominado **“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE TORMENTAS SOLARES INTENSAS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES DEL CENTRO NACIONAL DE CONTROL DE ENERGÍA”**, presentado por el C. Arturo de la Cruz González, pasante de la maestría en ingeniería, opción terminal Sistemas Eléctricos de Potencia , nos permitimos informar a usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, la metodología, la redacción y la ortografía de la tesis, no tenemos inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Así mismo solicitamos tenga a bien autorizar el jurado para su examen profesional.

Lo hacemos de su conocimiento para los efectos legales a que haya lugar.

ATENTAMENTE

H. Puebla de Z., a 27 de enero del 2020

DR. CARLOS RAMIREZ PACHECO
DIRECTOR

DR. JUAN CARLOS ESCAMILLA SANCHEZ
CO-DIRECTOR

M.C. JOSÉ ÁNGEL VALDEZ SÁNCHEZ
CO-DIRECTOR

C.c.p. M.I. Genaro Campos Castillo, Coordinador de la Maestría en Sistemas Eléctricos de Potencia



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero dar gracias a Dios porque me dio la oportunidad, salud y tiempo para lograr este objetivo que es muy importante para mí.

A mis padres:

María de la Paz González Servín y Felipe de la Cruz Fernández

Porque gracias a sus enseñanzas, cuidado y amor que he recibido de ellos han hecho de mí una persona que trabaja para lograr sus objetivos y comparte sus logros.

A mi familia:

Mi esposa: Adriana Ibarra Olivares

Gracias por todo el apoyo que me brindaste a lo largo de este camino, comprendiendo las dificultades y limitantes que se derivaron durante todo este tiempo, solucionando todo lo que estaba a tu alcance para evitar distraerme en mis estudios pero principalmente por confiar en mí y con tu amor, acompañarme incondicionalmente.

Mis hijos: Ingrid y Arturo

Por ser mi motivación en todo momento con su empeño y dedicación en sus estudios pero sobre todo por sus palabras de aliento y amor hacia mí desde que formamos este gran equipo del cual estoy muy orgulloso.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

Mi hermanita: Mimi

Que desde el cielo seguro me ha acompañado y seguramente estará orgullosa de este logro.

Mi hermano: Luis Felipe

Que para mí ha sido un gran ejemplo de empeño, dedicación y responsabilidad pero sobre todo por ser mi gran amigo durante toda mi infancia y adolescencia y porque a lo largo de este trabajo fue un gran apoyo para mí compartiéndome sus conocimientos y experiencia.

A todos mis compañeros y grandes amigos que no terminaría de citarlos pero gracias a todo su apoyo fueron parte importante para lograr concluir de este trabajo.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

ABSTRACT

The main objective of the present thesis work is to disseminate and sensitize to the national electrical system operators, analysts and executive leaders about the impact of geomagnetically induced currents (GIC’s) on the national electrical system (NES) through training sessions where they can be sensitized and act accordingly to the evolution of a severe solar event and at the same time been aware of the posible damage to equipment and its consequences in the medium and long term. In Mexico various works have emerged regarding this issue.

Chapter 1 addresses the theoretical issues that support the approach. A brief review of the intense geomagnetic storms that have historically caused damage to other electrical power systems.

Chapter 2 discusses the fundamentals of space weather and the instances that regulate the information obtained from the observatories.

Chapter 3 establishes the relationship between space weather phenomena and electrical power systems.

Chapter 4 mentions the actions that were carried out in the Hydro-Quebec electrical system after the 1989 storm.

Chapter 5 describes how the session was defined to disseminate the impact of geomagnetic currents on the national electrical system.

Comments are made regarding the conclusions obtained, as well as recommendations for future works.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

CONTENIDO

ABSTRACT.....	v
INDICE DE FIGURAS.....	viii
INDICE DE TABLAS.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1.....	2
PROCOLO DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.2.1 SOCIAL.....	3
1.2.2 TEÓRICA.....	3
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	4
1.4 HIPÓTESIS.....	4
1.4.1 VARIABLES.....	5
1.5 ESTADO DEL ARTE.....	5
1.5.1 “EL EVENTO CARRINGTON DE 1859”.....	5
1.5.2 “EL EVENTO DE ELECTRICIDAD EN QUEBEC EN 1989”.....	7
1.5.3 “HALLOWEEN DE OCTUBRE A NOVIEMBRE DE 2003”.....	8
CAPÍTULO 2.....	9
MARCO DE REFERENCIA.....	9
2.1 COMO AFECTA A LOS SERES HUMANOS Y LA TECNOLOGÍA.....	10
2.2 TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS.....	11
2.4 FORMACIÓN DE LAS TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS.....	12
2.5 COMO SE MIDEN LAS TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS.....	20
2.6 CLASIFICACIÓN DE LAS TORMENTAS SOLARES SEGÚN SU INTENSIDAD.....	23
2.7 COMPONENTES DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE (CMT).....	24
2.8 GENERACIÓN DE CORRIENTES GEOMAGNÉTICAS INDUCIDAS (GICs).....	25
2.9 PROBLEMAS GENERADOS POR LAS CORRIENTES GIC’s.....	26



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

CAPÍTULO 3.....	27
ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LAS GIC’S EN LOS SEP’s.....	27
3.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS CORRIENTES GEOMAGNÉTICAS INDUCIDAS	27
3.2 VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA AFECTACIÓN.....	29
3.3 AFECTACIÓN A TRANSFORMADORES	31
3.4 AFECTACIÓN A LA RED COMO UN CONJUNTO.....	36
3.5 GENERACIÓN DE ARMÓNICOS.....	37
3.6 INESTABILIDAD DE LA TENSIÓN.....	37
3.7 EVENTOS CON AFECTACIÓN A REDES ELÉCTRICAS	40
CAPÍTULO 4.....	42
MEDIDAS CORRECTIVAS POSTERIORES Y EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA	42
4.1 COMPENSADORES ESTÁTICOS DE VAR’S (CEV’S).....	42
4.2 INCREMENTO DE COMPENSACIÓN SERIE.....	42
4.3 PRUEBA DE AUMENTO DE TEMPERATURA DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.....	43
4.4 MONITOREO DE PERTURBACIONES GEOMAGNÉTICAS Y PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS	44
4.5 CENTRO DE CONTROL DEL SISTEMA.....	45
CAPÍTULO 5.....	48
PREPARACIÓN DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.....	48
5.1 DESCRIPCIÓN DE SESIONES DE ENTRENAMIENTO.....	48
5.2 OBJETIVO DE LAS SESIONES DE ENTRENAMIENTO POR IMPACTO DE GIC’S AL SIN	49
5.3 DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO.....	49
5.4 CONDICIONES INICIALES DEL ESCENARIO.....	51
5.5 DESARROLLO DE LA SESIÓN.....	56
5.6 EXPECTATIVAS DEL DESEMPEÑO DEL OPERADOR	61
5.7 RETROALIMENTACIÓN CON EL OPERADOR	65
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
ANEXO 1	71
LISTA DE ACRONIMOS	71
REFERENCIAS	72



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Recreación de la magnetosfera crédito de imagen: NASA	13
Figura 2.2	Evolución del ciclo solar, crédito de imagen: NASA	14
Figura 2.3	Ciclo solar y sus manchas solares .Créditos NOAA/SWPC,CO USA	15
Figura 2.4	Fulguración solar captada por el satélite SDO, crédito de imagen: NASA.....	16
Figura 2.5	Vista de una mancha solar en las distintas capas de el sol, crédito de imagen: NASA ..	17
Figura 2.6	Eyección de masa coronal, crédito de imagen: NASA.....	18
Figura 2.7	Campo magnético registrado en el mes de noviembre del 2019 [12]	21
Figura 2.8	Campo magnético registrado en el mes de marzo de 1989 [12].....	21
Figura 2.9	Campo magnético registrado en el mes de marzo de 2001 [12].....	22
Figura 2.10	Campo magnético registrado en el mes de octubre y noviembre de 2003 [12].....	22
Figura 2.11	Campo magnético registrado en el mes de febrero 2014 [12]	23
Figura 2.12	Componentes magnéticas.....	25
Figura 3.1	Corriente geomagnética en función del tiempo [15].....	28
Figura 3.2	Esquema del flujo de las corrientes geomagnéticas inducidas en redes eléctricas [15] .	29
Figura 3.3	Corrientes geomagnéticas inducidas en un transformador trifásico [17].....	31
Figura 3.4	Saturación parcial del transformador [15].....	32
Figura 3.5	Transformador de 3 columnas [7].....	33
Figura 3.6	Transformador de 5 columnas [7].....	33
Figura 3.7	Transformador acorazado [7]	33
Figura 3.8	Simplificación para el estudio de temperatura [16]	34
Figura 3.9	Temperatura en el devanado en función de la corriente geomagnética inducida [16]....	35
Figura 3.10	Transformador Trifásico conexión estrella – delta	35
Figura 3.11	Potencia reactiva consumida por fase en un transformador de 124 MVA de potencia nominal respecto a las GIC entrando por el neutro [17]	38
Figura 3.12	Potencia reactiva consumida en función del gradiente de potencial [9].....	39
Figura 3.13	Número de nodos puestos fuera de servicio en función del gradiente de potencial [9].	39
Figura 5.1	GIC´s estimadas en el Sistema Eléctrico Nacional [21].....	50



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

Figura 5.2 Índice DST registrado por el observatorio de Kyoto en el mes de octubre del 2003 [12] 51
Figura 5.3 Perfil de demanda del SIN 51
Figura 5.4 Condiciones iniciales de demanda y generación por gerencia en el SIN..... 52

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de actividad magnética..... 20
Tabla 2.2 Clasificación de las tormentas solares 23
Tabla 5.1 Generación despachada que se afectará con la presencia de GIC’s 53
Tabla 5.2 Carga y generación de SIN por gerencia regional de control..... 53
Tabla 5.3 Demanda y generación de las gerencias regionales de control..... 63



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis tiene como principal objetivo difundir y sensibilizar al personal de operación del sistema eléctrico nacional, acerca del impacto de las corrientes geomagnéticas inducidas en el sistema eléctrico nacional (SIN) mediante una sesión de entrenamiento con la cual se puedan sensibilizar en cuanto a su evolución, daños a equipos y consecuencias a corto, mediano y largo plazo. En nuestro país han surgido diversos trabajos referentes a este tema.

En el capítulo 1 se abordan las cuestiones teóricas que sustentan el planteamiento. Se hace un breve repaso de las tormentas geomagnéticas intensas que históricamente han ocasionado daños a otros sistemas eléctricos de potencia.

En el capítulo 2 se habla de los fundamentos del clima espacial y las instancias que regulan la información obtenida de los observatorios.

En el capítulo 3 se establece la relación de los fenómenos de clima espacial con los sistemas eléctricos de potencia.

En el capítulo 4 se mencionan las acciones que se realizaron en el sistema eléctrico de Hydro-Quebec después de la tormenta de 1989.

En el capítulo 5 se describe como se definió la sesión para difundir el impacto de las corrientes geomagnéticas en el sistema eléctrico nacional.

En el capítulo 6 se hacen comentarios respecto a las conclusiones obtenidas, así como recomendaciones para trabajos futuros.



CAPITULO 1

PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Tomando en cuenta los enormes daños que históricamente han ocasionado los efectos del clima espacial a nivel mundial y considerando como base los estudios realizados por el laboratorio de clima espacial LANCE, en donde se observa el posible impacto de corrientes geomagnéticas en el territorio mexicano, surge la preocupación respecto a las acciones que se pueden realizar en el centro nacional de control de energía (CENACE) con la finalidad de mantener la seguridad y confiabilidad del sistema eléctrico nacional, considerando además que los sistemas eléctricos de potencia presentan un comportamiento dinámico debido a que sus elementos se encuentran en constante cambio y que esta naturaleza puede ser de origen topológico u operativo, causado por fallas en los equipos, por variaciones de demanda, cambios programados según la disponibilidad de los recursos de generación y/o transmisión y en particular para el caso de estudio de este trabajo, los fenómenos derivados del clima espacial.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Considerando los daños que se han presentado en equipos de sistemas eléctricos de potencia en otros países, resultado de los efectos del clima espacial, se busca generar un escenario que considere el desarrollo de manera cronológica de estos fenómenos para presentarlo a los operadores del sistema eléctrico nacional Mexicano dentro de las sesiones de entrenamiento que forman parte de su capacitación continua, para que ante la ocurrencia de un disturbio de esta índole puedan tomar las mejores decisiones y ejecutar acciones según sea el caso para mantener o llevar al sistema eléctrico a un estado operativo normal.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

1.2.1 SOCIAL

En la actualidad la gran mayoría de las actividades de todos los seres humanos requerimos de la energía eléctrica, lo que se pretende en esta tesis es hacer consciencia al personal de operación acerca de este fenómeno natural para que tengan herramientas que les ayuden a la toma de decisiones con la finalidad de lograr mantener el sistema eléctrico en condiciones confiables y seguras en beneficio de todos los mexicanos.

1.2.2 TEÓRICA

El problema de las afectaciones por corrientes geomagnéticas inducidas ha tomado tal relevancia a nivel mundial que en la actualidad existen muchas entidades dedicadas a su estudio y análisis, el servicio de clima espacial México (SCIESMEX) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) que forma parte del Laboratorio de clima espacial (LANCE), coordina el intercambio de información de clima espacial a nivel mundial dando paso a muchos trabajos de titulación y publicación de artículos dedicados a este tema. Para el caso de esta tesis tendrá como insumo los resultados de simulaciones de corrientes geomagnéticas de diferentes magnitudes en el territorio mexicano obtenidos por el SCIESMEX, para posteriormente modelarlos en el sistema de entrenamiento del centro nacional de control de energía (CENACE) y mediante flujos de potencia ver su impacto en una sesión de entrenamiento.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una sesión de entrenamiento para ingenieros operadores del sistema eléctrico nacional, basada en los efectos dañinos que pueden ocasionar las corrientes geomagnéticas inducidas en los transformadores de potencia y líneas de transmisión de acuerdo a los estudios de su impacto en el territorio mexicano, con la finalidad de generar una consciencia situacional de este fenómeno y definir estrategias operativas que puedan ayudar a para mitigar su impacto y evitar daños importantes que afecten la confiabilidad y seguridad del sistema eléctrico nacional.

1.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- En base a las estimaciones de corrientes geomagnéticas inducidas en la red de trasmisión del sistema eléctrico nacional obtenidas por el laboratorio de clima espacial LANCE, definir un escenario que por sus características operativas sea relevante para su aplicación en sesiones de entrenamiento para ingenieros operadores del sistema eléctrico nacional.
- Implementar sesiones de entrenamiento para operadores del sistema eléctrico nacional para generar consciencia situacional del impacto de las corrientes geomagnéticas inducidas y sus posibles afectaciones.

1.4 HIPÓTESIS

Coadyuvar a mantener el sistema eléctrico de potencia nacional en condiciones seguras y confiables en caso de la presencia de corrientes



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

geomagnéticas inducidas tales que puedan generar daños considerables a los equipos y por ende afectar a la sociedad mexicana.

Los eventos de Clima Espacial afectan de manera directa al comportamiento de algunos equipos que pertenecen a los sistemas eléctricos de potencia, sin embargo, en el centro nacional de control de energía (CENACE) no se ha explorado la posible afectación que este fenómeno natural provocaría al sistema eléctrico nacional (SEN), con este trabajo se busca difundir y concientizar a los operadores del centro nacional de control de energía la relevancia de una afectación de esta índole y sus consecuencias en una sesión de entrenamiento.

1.4.1 VARIABLES

- Dependientes. - Resultado de simulaciones de corrientes geomagnéticas inducidas en el territorio mexicano realizadas por el Laboratorio de clima espacial, estudios de flujos de potencia, pronósticos de demandas coincidentes en el sistema eléctrico nacional.
- Independientes. - Simulaciones de entrenamiento.

1.5 ESTADO DEL ARTE

La siguiente sección cita las principales tormentas geomagnéticas documentadas hasta el momento; el evento Carrington de 1859, el apagón de Quebec en 1989 y el evento "Halloween" de octubre-noviembre de 2003

Estas tres tormentas geomagnéticas severas históricas ilustran la vulnerabilidad de varios tipos de infraestructura a las tormentas geomagnéticas.

1.5.1 “EL EVENTO CARRINGTON DE 1859”



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

En 1859, nuestros antepasados vivieron de primera mano el impacto del Sol en la tecnología de la época. Es algo a lo que conocemos como el Evento Carrington, que sucedió el 1 de septiembre de aquel año. En esa época, la tecnología estaba avanzando a pasos agigantados. Se comenzaban a instalar las primeras redes eléctricas y las primeras líneas de telégrafo.

En la mañana de aquel jueves, el astrónomo británico Richard Carrington observó el Sol con su telescopio. Observó una gigantesca mancha solar; llamó tanto su atención que hizo un dibujo de ella. Mientras continuaba con sus observaciones, Carrington vio cómo se iluminaba, delante de sus propios ojos, convirtiéndose en una gran llamarada blanca. Era consciente de que estaba viendo un nivel de actividad solar nunca observado antes. Sólo un minuto después, esa llamarada desapareció.

Sólo pasaron 5 minutos hasta que los efectos de aquella llamarada se pudieron sentir en el planeta. Fue cuando comenzó una intensa actividad de auroras. No eran como las que pueden ver, habitualmente, los habitantes de las regiones más cercanas a los polos. Eran auroras que podían observarse en casi cualquier lugar del planeta. Incluyendo los trópicos (fueron observadas en lugares como España, Colombia y Panamá).

Las auroras nocturnas fueron sólo uno de los efectos de la tormenta solar. El otro impacto fue mucho menos idílico. Las líneas de telégrafo y las redes eléctricas se sobrecargaron por la cantidad de electricidad que circuló por sus cables. Los operadores de telégrafos recibieron descargas eléctricas de sus máquinas, y el papel que se utilizaba comenzó a arder. Eran las consecuencias de la peor tormenta solar de la que se tiene constancia.

En el continente americano también se tienen registros, en Chile, gracias a los testimonios de los tripulantes de la embarcación “Southern Cross”, quienes navegaban frente a las costas de este país, por un momento pensaron que estaban



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

sobre un "océano de sangre". Los reportes de estas exhibiciones de auroras se extendieron también desde el sur de Cuba hasta Hawái. [1].

1.5.2 “EL EVENTO DE ELECTRICIDAD EN QUEBEC EN 1989”

El viernes 10 de marzo de 1989, los astrónomos presenciaron una poderosa explosión en el sol. En cuestión de minutos, las fuerzas magnéticas enredadas sobre el sol lanzaron una nube de gas de mil millones de toneladas. Era como la energía de miles de bombas nucleares explotando al mismo tiempo. La nube de tormenta salió del sol, directamente hacia la Tierra, a un millón de millas por hora. La llamarada solar que acompañó el estallido causó inmediatamente una interferencia de radio de onda corta, incluida la interferencia de señales de radio de Radio Europa Libre a Rusia [2].

En la tarde del lunes 12 de marzo, la gran nube de plasma solar (un gas de partículas cargadas eléctricamente) finalmente golpeó el campo magnético de la Tierra. La violencia de esta "tormenta geomagnética" causó espectaculares "luces del norte" que se podían ver tan al sur como Florida y Cuba. La perturbación magnética fue increíblemente intensa. En realidad, creó corrientes eléctricas en el suelo debajo de gran parte de América del Norte. Justo después de las 2:44 am del 13 de marzo, las corrientes encontraron una debilidad en la red eléctrica de Quebec. En menos de 2 minutos, toda la red eléctrica de Quebec perdió energía. Durante el apagón de 12 horas que siguió, millones de personas se encontraron repentinamente en oscuros edificios de oficinas y túneles subterráneos para peatones, y en ascensores bloqueados.

El apagón de Quebec no fue de ninguna manera un evento local. Algunas de las empresas eléctricas de EE. UU. Tenían que lidiar con sus propios problemas. New York Power perdió 150 MW en el momento en que se cayó la red eléctrica de Quebec. El New EnglandPower Pool perdió 1.410 MW casi al mismo tiempo.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

1.5.3 “HALLOWEEN DE OCTUBRE A NOVIEMBRE DE 2003”

Desde finales de octubre hasta principios de noviembre de 2003, grandes tormentas geomagnéticas afectaron el sistema eléctrico, infraestructura, industria de la aviación y comunicaciones por satélite. En Suecia, el Grupo Sydkraft (una gran empresa de servicios de energía) experimentó problemas con los transformadores, lo que provocó una falla en el sistema y un apagón posterior [3].

Durante el evento de Halloween de octubre a noviembre de 2003, la industria de las líneas aéreas internacionales experimentó problemas de comunicación a diario, con comunicaciones significativamente degradadas en latitudes altas. La actividad solar causó problemas de comunicación para los controladores de tierra y de las líneas aéreas y las comunicaciones de alta frecuencia degradadas. Como parte de las medidas preventivas de las compañías aéreas contra los altos niveles de exposición a la radiación solar y las áreas de apagón de comunicaciones, las compañías decidieron desviar los vuelos de alta latitud, que cuestan a las líneas aéreas entre \$10.000 y \$ 100.000 por vuelo redirigido.

Las fuertes tormentas de radiación causaron que la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) emitiera una directiva de vuelo para sus astronautas en la Estación Espacial Internacional, ordenándoles tomar medidas de precaución y suspender los paseos espaciales. El Equipo de Operaciones de la Misión de Ciencia Espacial del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA informó que el 59 por ciento de las misiones se vieron afectadas por las tormentas geomagnéticas durante este período. Después de la CME de octubre a noviembre de 2003, el satélite japonés ADEOS-2 perdió contacto con la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón. El daño evaluado al satélite ADEOS-2 podría ser la razón principal por la que no se ha recuperado desde el incidente. Del mismo modo, la computadora satelital del espectrómetro de plasma interestelar caliente (CHIPS) se desconectó durante 27 horas.



CAPÍTULO 2

MARCO DE REFERENCIA

El Clima Espacial (CE) o Meteorología del Espacio se define como la medición y el análisis en tiempo real del conjunto de propiedades físicas del Sol, el medio interplanetario, la magnetosfera, la atmósfera y la superficie terrestre que se encuentran influenciadas directa o indirectamente por la actividad solar y las cuales tienen un impacto en la infraestructura, tecnología, sociedad y salud. Estos fenómenos representan serios riesgos para el desarrollo humano puesto que se ha demostrado que afectan de forma global, la tecnología e infraestructura espacial y terrestre [4].

Las mediciones en tiempo real (o cercano al tiempo real) del **CE** se pueden dividir en:

1. En la superficie solar (fulguraciones y eyecciones de masa coronal),
2. En el medio interplanetario (radio eventos, viento solar y centelleo interplanetario)
3. En la vecindad terrestre (campo geomagnético, condiciones del viento solar, ionósfera y partículas energéticas).

Cada medición tiene un índice que mide el nivel de perturbación asociado a eventos solares eruptivos y a su vez, definen una escala para avisos de eventos de **CE**. Internacionalmente se han definido 3 tipos de avisos: Tormentas Geomagnéticas, Tormentas de Partículas y Radio interferencias cuyas escalas van de menor, moderada, fuerte, severa a extrema [5].

Los impactos en la tecnología incluyen interferencias en radio comunicaciones de baja frecuencia, corrientes inducidas geomagnéticamente (GICs), errores en los sistemas de posicionamiento global (GPS), lluvia de partículas energéticas a pilotos y pasajeros de aeronaves [6]. Los avisos se generan a partir



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

de los valores de uno o más índices y el objetivo es acceder en tiempo real o cercano al tiempo real.

Debido a que el Clima Espacial es un fenómeno global, existe una red de Centros Regionales de Avisos de **CE** coordinados por el Servicio Internacional de Ambiente Espacial (“International Space Environment Service” ISES) [7]. Algunos países como EUA, Gran Bretaña y Corea del Sur ya han catalogado al **CE** como un asunto de seguridad nacional y han publicado recientemente sus planes de acción con el objetivo de mitigar los efectos del **CE** en sus territorios para los próximos años. Actualmente, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) a través de la Organización Mundial Meteorológica (WMO) creó la Oficina de Asuntos del Espacio Exterior (UNOOSA) la cual está llevando a cabo los asuntos relacionados a la cooperación internacional en el tema de Clima Espacial.

2.1 COMO AFECTA A LOS SERES HUMANOS Y LA TECNOLOGÍA

El clima espacial afecta a las actividades en la Tierra, como las telecomunicaciones (satélites que controlan los teléfonos, el Internet y la televisión), la red eléctrica y las plantas petroquímicas, la navegación aérea y los sistemas de posicionamiento, el clima terrestre, e incluso la salud de los seres vivos.

En el año 2014 se creó el Servicio de Clima Espacial México (Sciesmex), iniciativa del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) campus Morelia. Su objetivo es monitorear y comunicar los fenómenos espaciales, como las condiciones del Sol, del medio interplanetario y del entorno geomagnético de nuestro planeta. La finalidad es prever eventos de clima espacial que pudieran representar un peligro para la Tierra, y así salvaguardar la seguridad nacional.

Los peligros provenientes de los cambios en el clima espacial no se pueden entender de manera directa o inmediata. Los efectos para el planeta Tierra y para



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

los seres que habitan en él pueden provocar daños observables a corto y largo plazo. El primer investigador que asoció las afectaciones del clima espacial al clima terrestre fue el astrónomo inglés William Herschel, quien en 1801 publicó un artículo acerca del efecto de las manchas solares y su relación con el régimen de lluvias terrestre. Posteriormente, en 1844, el farmacéutico y astrónomo amateur alemán Heinrich Schwabe publicó sobre la existencia de un ciclo solar de 11 años. Hoy sabemos que entre los factores que modifican el clima espacial están los eventos (tormentas) o llamaradas solares, y las tormentas geomagnéticas y de radiación.

2.2 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 (EMC 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 [8]. 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 el 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 [9]. Estas variaciones de los campos magnéticos de la atmósfera inducen gradientes en el potencial (relación de cambio entre el potencial eléctrico y la distancia recorrida por dicho potencial) de la superficie terrestre, lo que puede provocar corrientes, que pueden entrar por el



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

neutro en los grandes transformadores eléctricos y las redes eléctricas en general, pudiendo provocar daños significativos .

2.4 FORMACIÓN DE LAS TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS

La ocurrencia de tormentas geomagnéticas está relacionada con la actividad solar. El Sol está continuamente emitiendo partículas en lo que se conoce como “viento solar”. Normalmente estas partículas no llegan a penetrar en la atmósfera terrestre ya que son desviadas por la magnetosfera terrestre, la figura 2.1 muestra como la NASA, recrea la “armadura” magnética que protege a la tierra del sol.

"La parte frontal de la magnetosfera está justo en la línea entre el Sol y la Tierra, es un lugar crucial donde es importante comprender hasta los más ínfimos cambios, ya que cada uno puede tener grandes consecuencias", sostiene el investigador David Sibeck del Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA en Greenbelt [12]. "Al penetrar en la magnetosfera, la radiación solar puede provocar fuertes tormentas geomagnéticas que afectan al funcionamiento de los satélites de comunicación, de los que dependemos enormemente".



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

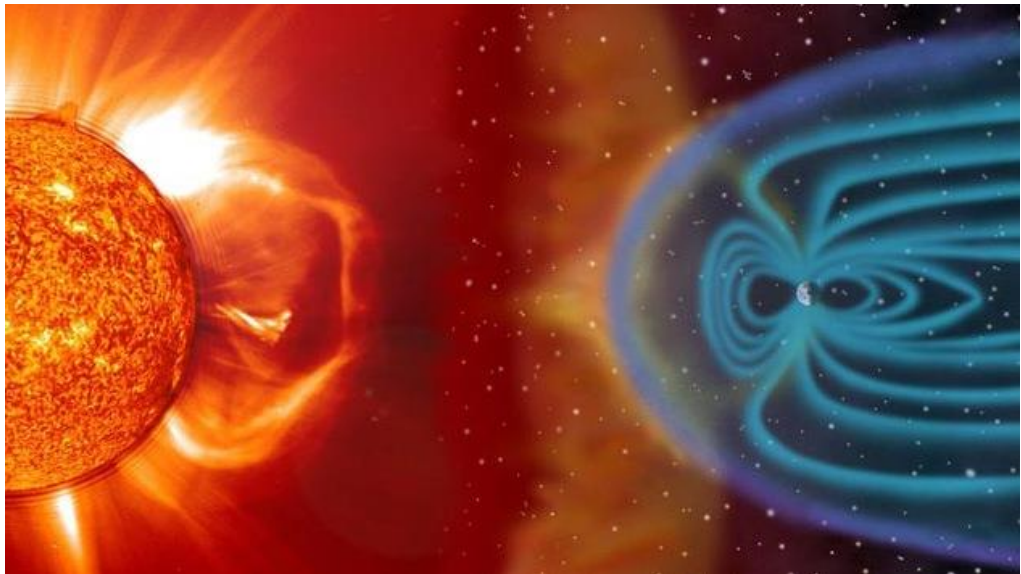


Figura 2.1 Recreación de la magnetosfera crédito de imagen: NASA

Sin embargo, el Sol no tiene una actividad constante, sino que presenta una actividad que varía según periodos de 11 años de duración (figura 2.2), en lo que se conoce como “ciclo solar”, que se cuantifica en función del número de manchas solares que presenta en cada momento. A lo largo de estos ciclos de 11 años el Sol varía desde un mínimo de actividad en el que desaparecen prácticamente las manchas solares, hasta un máximo en el que el número de manchas solares aumenta considerablemente.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

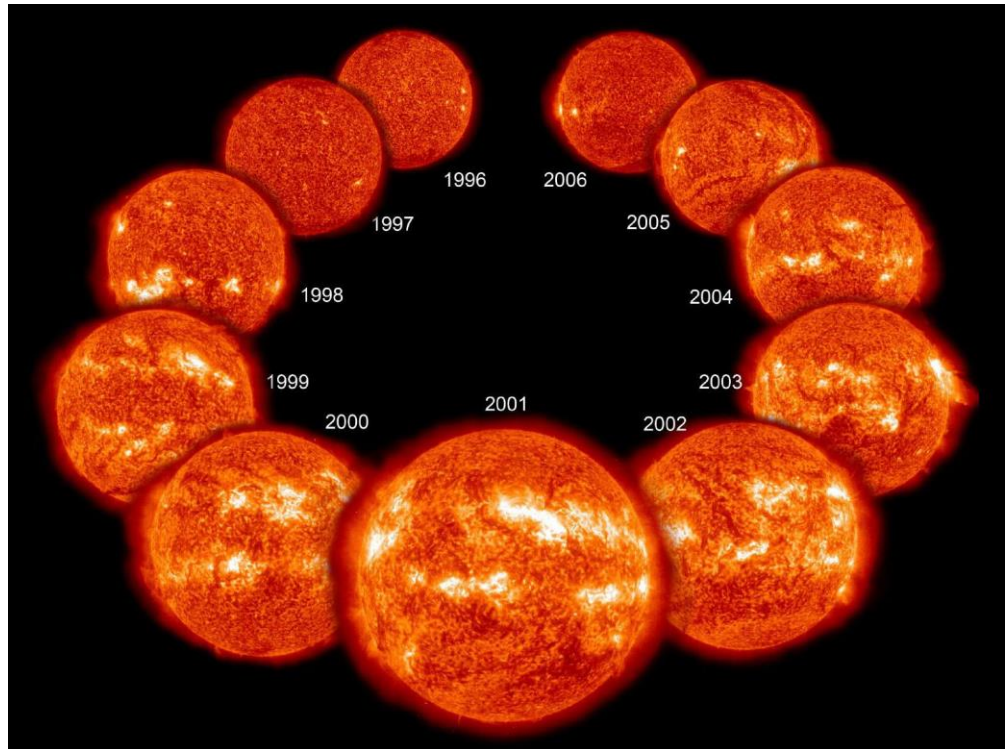


Figura 2.2 Evolución del ciclo solar, crédito de imagen: NASA

La figura 2.3 muestra el conteo del número de manchas solares desde enero del 1995 hasta el mes de noviembre del año 2019, interpretando esta información en el reporte semanal emitido por el servicio de clima espacial LANCE de la siguiente manera:

Entre más manchas solares presente el Sol, es mayor la posibilidad de que ocurra una tormenta solar [10].



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

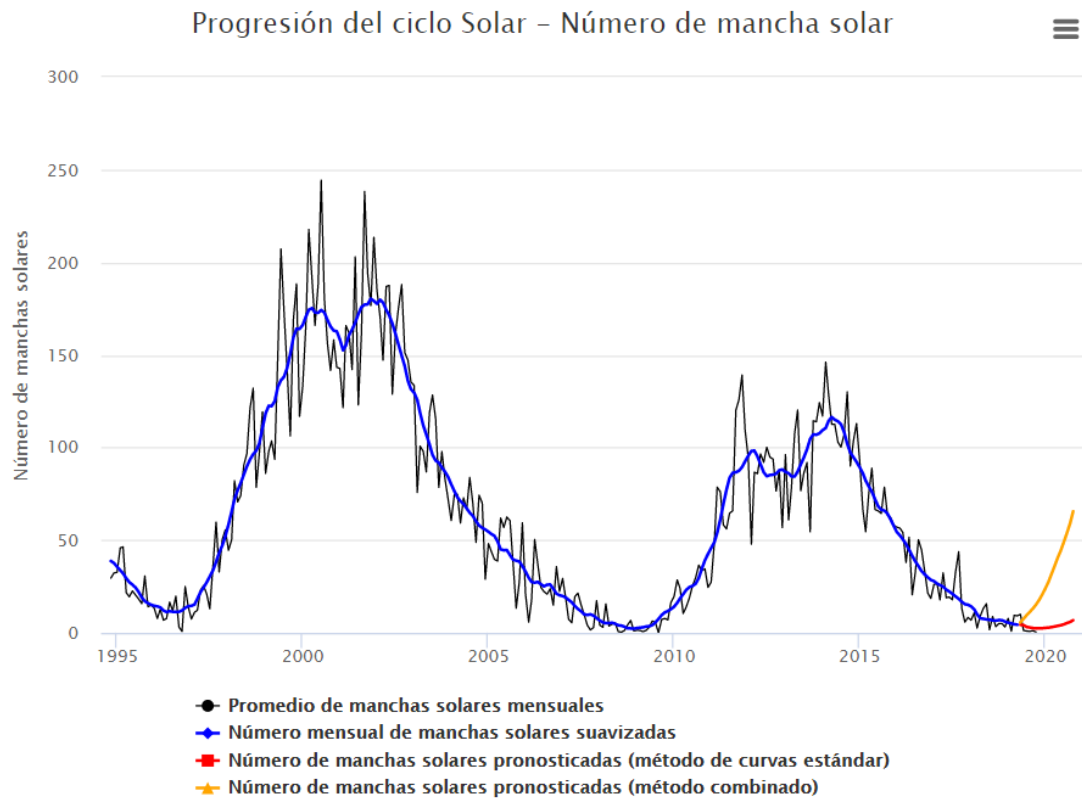


Figura 2.3 Ciclo solar y sus manchas solares .Créditos NOAA/SWPC,CO USA

Las manchas solares corresponden con las zonas más frías de la fotosfera solar en las que el campo magnético es muy fuerte y que se consideran como zonas activas del Sol. En estas manchas solares es donde se originan las fulguraciones solares (figura 2.4) y las eyecciones de masa coronal (EMC) que se corresponden con violentas erupciones que arrojan inmensas cantidades de materia coronal al medio interplanetario, modificando la densidad del viento solar y su velocidad.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

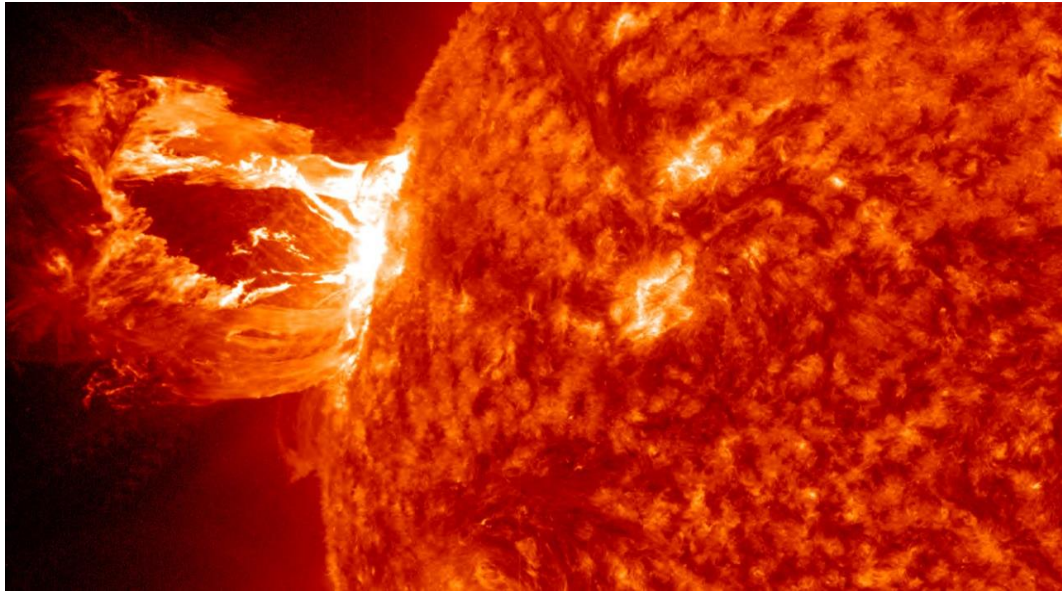


Figura 2.4 Fulguración solar captada por el satélite SDO, crédito de imagen: NASA

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 2.5, las manchas solares son apreciables en todas las capas, desde la más externa a la más interna.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

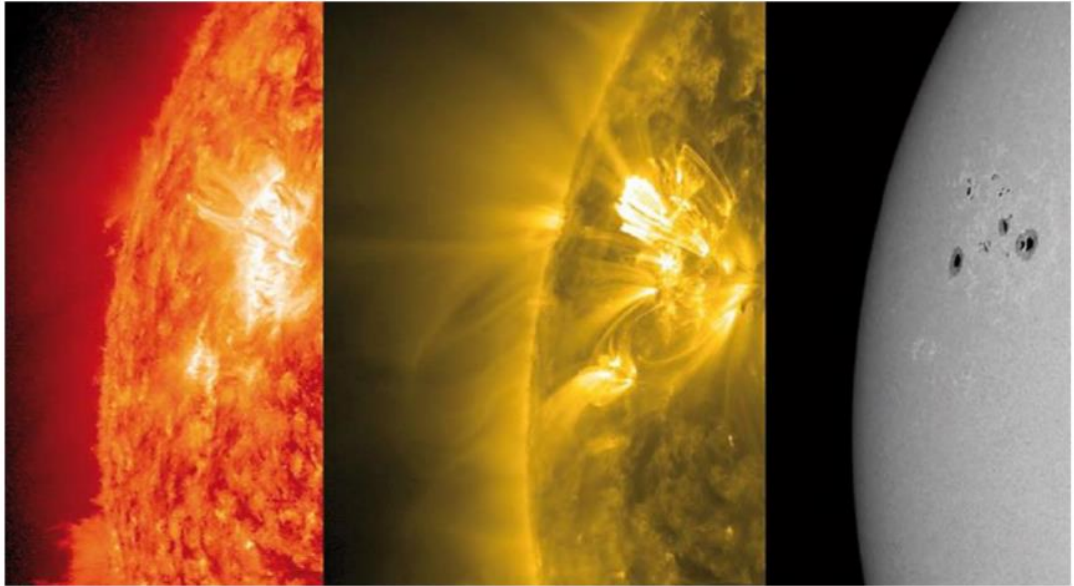


Figura 2.5 Vista de una mancha solar en las distintas capas de el sol, crédito de imagen: NASA

Los fenómenos se aprecian de manera más nítida en la corona solar, en la cual se visualizan los bucles (zonas negras de la figura 1.5). 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 [11]. Figura 2.6



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”



Figura 2.6 Eyección de masa coronal, crédito de imagen: NASA

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 ($299,792,458 \text{ m/s}$), 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



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

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.

- 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 nano teslas). 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 que corresponde a la componente horizontal del campo magnético). 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).



2.5 COMO SE MIDEN LAS TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS

Las tormentas geomagnéticas se registran en los Observatorios Geomagnéticos como una perturbación de inicio más bien brusco que afecta a las componentes del campo magnético terrestre y que se prolonga durante uno o más días hasta volver a una situación de calma.

El modelo DST (Disturbance Storm Time) 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 “H”. 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, tabla 2.1.

Tabla 2.1 Clasificación de actividad magnética

Débiles	$-30 > DST > -50$
Moderadas	$-50 > DST > -100$
Intensas	$-100 > DST$

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

El día 23 de noviembre de 2019 fue posible consultar la condición actual del campo magnético terrestre mediante el centro de análisis de datos de geomagnetismo y magnetismo espacial de la facultad de ciencias de la universidad de Kyoto [12]. Figura 2.7 en donde podemos observar que no presenta actividad considerable lo cual corresponde con el conteo de manchas solares menor a 10 en la figura 2.3.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

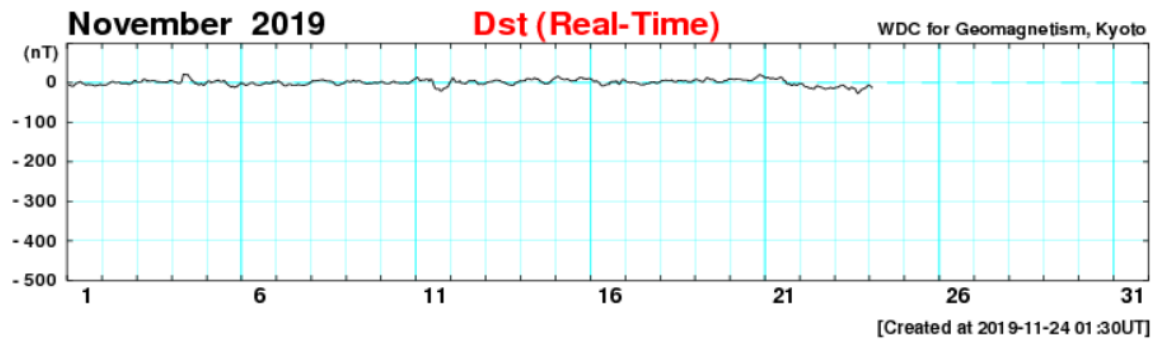


Figura 2.7 Campo magnético registrado en el mes de noviembre del 2019 [12]

Tomando como referencia los registros de las últimas tormentas solares severas. Para el caso de la registrada en Marzo de 1989, la figura 2.8 muestra las mediciones registradas por el observatorio de Kyoto.

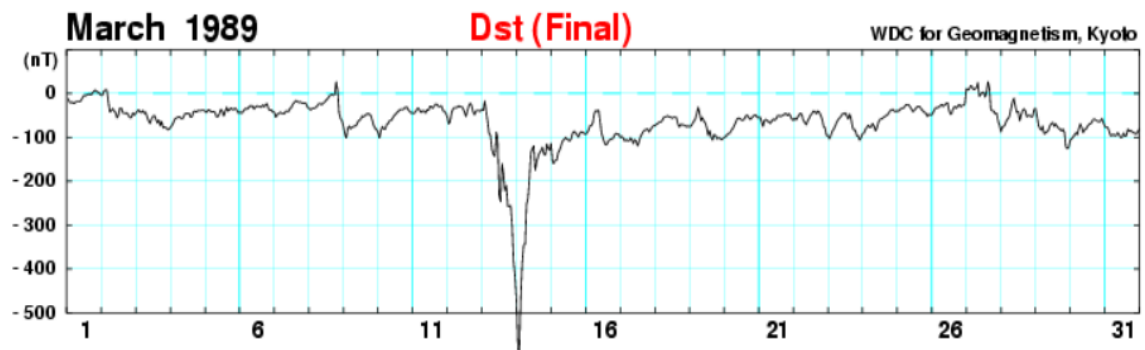


Figura 2.8 Campo magnético registrado en el mes de marzo de 1989 [12]

Como podemos observar, el día 13 de marzo de 1989, se presentó un índice DST dentro de la clasificación de intensas, menor a -500 nT, ocasionando daños significativos en el sistema eléctrico de Quebec.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

Para el mes de marzo del año 2001, que no se tiene registro de daños significativos, el índice registrado el día 30 casi alcanza -400 nT, como se puede observar en la figura 2.9.



Figura 2.9 Campo magnético registrado en el mes de marzo de 2001 [12]

Para la tormenta Halloween en el mes de Noviembre del año 2003, podemos observar en la figura 2.10 que el índice Dst alcanza casi -400 nT en el mes de octubre y lo alcanza a superar en el mes de noviembre ocasionando daños en Sudáfrica.

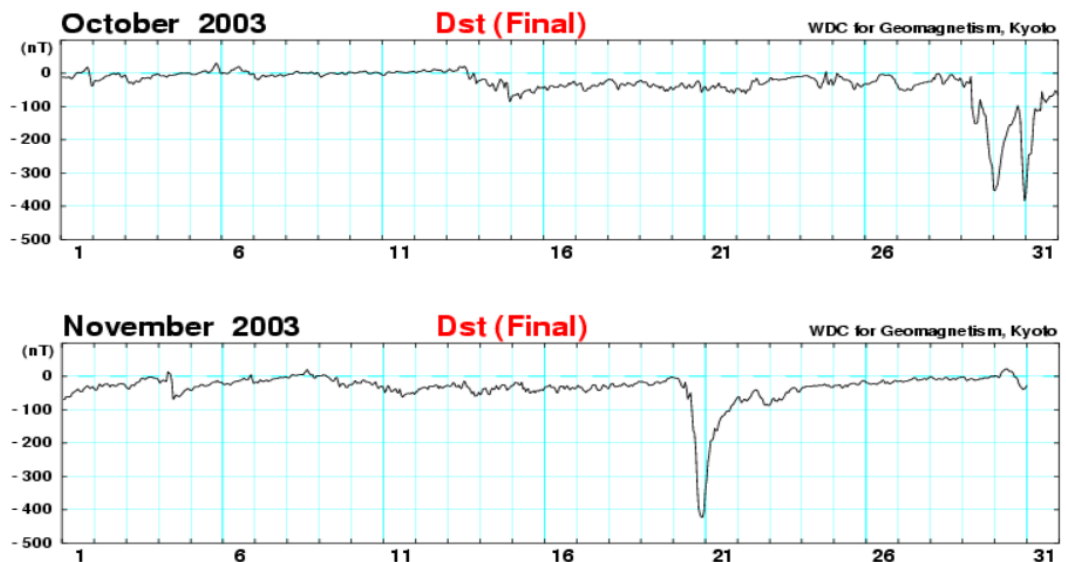


Figura 2.10 Campo magnético registrado en el mes de octubre y noviembre de 2003 [12]



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

De acuerdo a la figura 2.3 en donde apreciamos el ciclo solar, la mayor actividad corresponde al periodo de los años 2000 a 2003, 11 años antes concuerda con la actividad registrada en 1989, para el ciclo siguiente, en el año 2014 el mes con mayor actividad fue febrero no con la misma intensidad figura 2.11



Figura 2.11 Campo magnético registrado en el mes de febrero 2014 [12]

En México, el Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE), en colaboración con el Servicio Magnético, calcula indicadores geomagnéticos para el territorio nacional mexicano. Los indicadores geomagnéticos que se calculan son: el índice regional K (Kmex) y las variaciones horarias de la componente horizontal (ΔH).

2.6 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 Wb/m^2 y los valores para determinar la categoría son los de la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Clasificación de las tormentas solares

CLASE	POTENCIA (Wb/m^2)
A	$x < 10^{-7}$



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

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 equipos de medición 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.

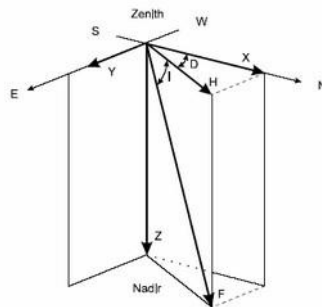
2.7 COMPONENTES DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE (CMT).

El campo magnético terrestre es una magnitud vectorial y como tal se caracteriza por su módulo, por su dirección y por su sentido [13] (Figura 2.8). Al módulo de este vector lo denominamos fuerza total o intensidad total, F. Equivale al módulo del vector resultante de la suma vectorial de sus tres componentes cartesianas (X, Y, Z). La composición de X e Y da lugar a la componente horizontal, “H”. El ángulo que forma H con el eje X (dirección del Norte Geográfico) se denomina "Declinación", “D”. El ángulo que forma H con el eje Z se denomina "Inclinación", “I”. La unidad de medida de la intensidad total del campo geomagnético F y de sus componentes se denomina Tesla (T). Esta unidad es demasiado grande para la medida del CMT. Por ello se utiliza un submúltiplo, el nano tesla, nT (1nT=10-9 Tesla).

La magnitud de F es del orden de 30.000 nT en el Ecuador y 60.000 nT en los Polos, siendo su dirección prácticamente horizontal en el Ecuador y vertical en los Polos.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”



D=Declinación; **Y**=Componente Este-Oeste;
I=Inclinación; **Z**=Intensidad vertical;
H=Intensidad horizontal; **F**= Intensidad total;
X= Componente Norte-Sur;
N= Norte geográfico; **S**= Sur; **E**=Este; **W**= Oeste

Figura 2.12 Componentes magnéticas

2.8 GENERACIÓN DE CORRIENTES GEOMAGNÉTICAS INDUCIDAS (GICs)

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/k, 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. 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



2.9 PROBLEMAS GENERADOS POR LAS CORRIENTES GIC’s

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 [14]



CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LAS GIC’S EN LOS SEP’S

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.

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 figura 3.1 podemos observar un ejemplo de la generación de corrientes geomagnéticas inducidas a lo largo del tiempo en un evento solar. [7]



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

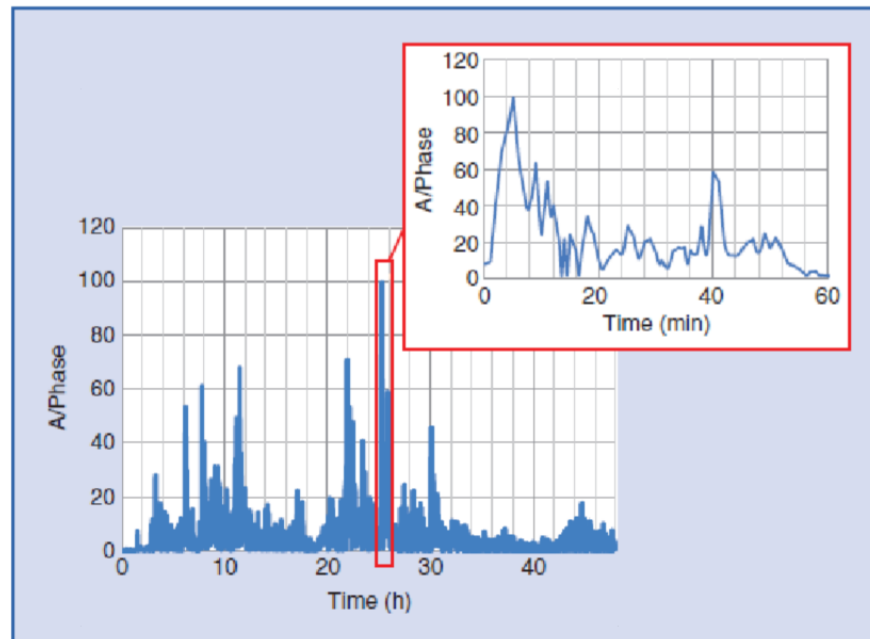


Figura 3.1 Corriente geomagnética en función del tiempo [15]

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 3.2, 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.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

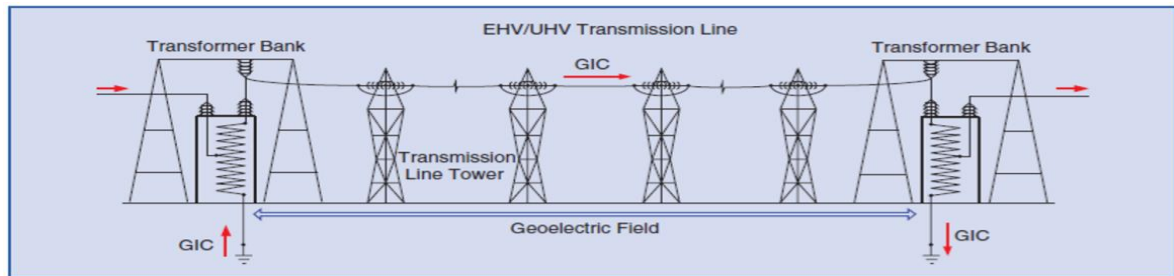


Figura 3.2 Esquema del flujo de las corrientes geomagnéticas inducidas en redes eléctricas [15]

3.2 VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA AFECTACIÓN

Las tormentas solares son regulares y se producen de manera casi diaria, pero no siempre las eyecciones apuntan hacia la Tierra, ya que pueden salir despedidas del sol en cualquier dirección. Si la tormenta solar se dirige a la Tierra, existen una gran cantidad de factores que harán que la corriente geomagnética inducida pueda producir un riesgo grave para las redes eléctricas, y son los siguientes:

- Latitud
- Resistividad de la Tierra en la zona
- Efecto de la costa
- Duración e intensidad de la tormenta solar
- Características de la Red Eléctrica

La zona en la que a priori es más posible que se produzca una afectación es la zona auroral, donde las tormentas solares se dejan ver en forma de auroras boreales, y esto son latitudes de entre 55° y 70° , aunque la concatenación de los diversos factores, hace factible la posibilidad de una gran afectación a redes eléctricas que se encuentren fuera de estos valores de latitud.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

El tipo de rocas que forman la corteza terrestre de la zona puede influir en gran medida en la afección de las corrientes geomagnéticas inducidas. Cuanto más resistivas son estas, mayor afección pueden sufrir las redes eléctricas. Las zonas ígneas, con grandes cantidades de silicio son las más propensas a sufrir un mayor impacto.

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, 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. [16]

En China concretamente, se están estudiando la creación de redes de transporte con una tensión nominal de 1000 kV. 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.

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.

3.3 AFECTACIÓN A TRANSFORMADORES

Las corrientes geomagnéticas inducidas entran (o salen) a través del neutro del transformador, el cual está conectado a tierra. En la figura 3.3 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. 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.

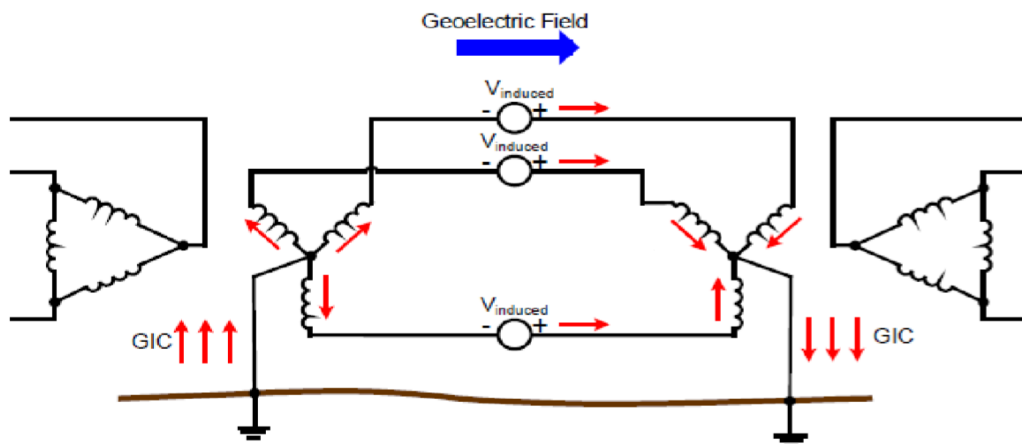


Figura 3.3 Corrientes geomagnéticas inducidas en un transformador trifásico [17]

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 3.4, el flujo de corriente continua provocado por la corriente geomagnética inducida se suma al flujo de corriente alterna [37] (lo que pasa habitualmente por el transformador), provocando la saturación del núcleo. En el ciclo contrario, cuando el flujo de corriente alterna es negativo se provoca lo contrario, el flujo de corriente continua se resta. Cuando el flujo de corriente 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. [38]

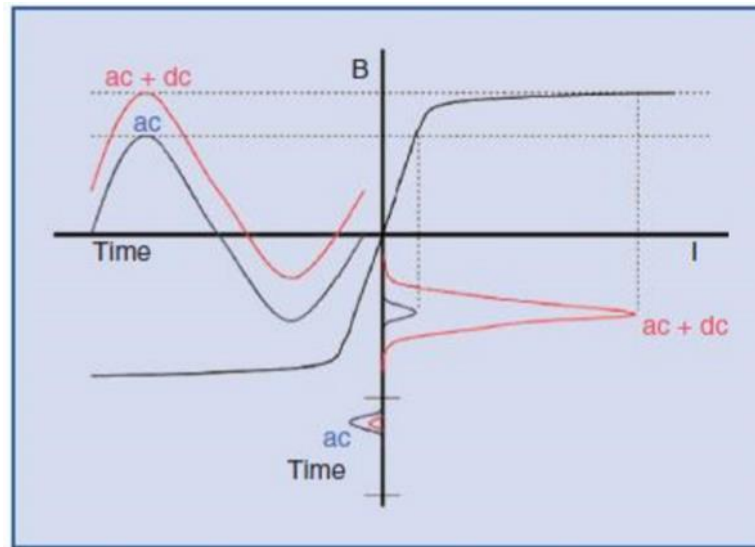


Figura 3.4 Saturación parcial del transformador [15]

Los transformadores trifásicos cuyo núcleo está formado por columnas (Figura 3.5 y Figura 3.6) 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 3.7) 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.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

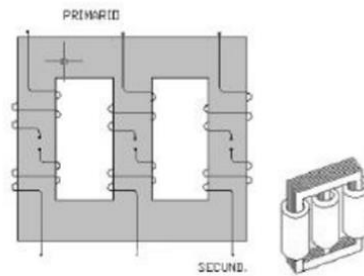


Figura 3.5 Transformador de 3 columnas [7]

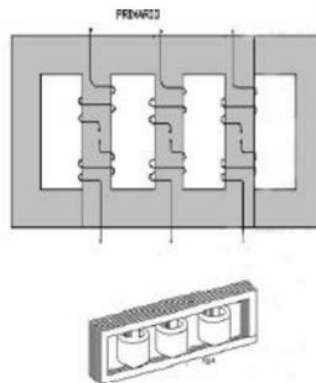


Figura 3.6 Transformador de 5 columnas [7]

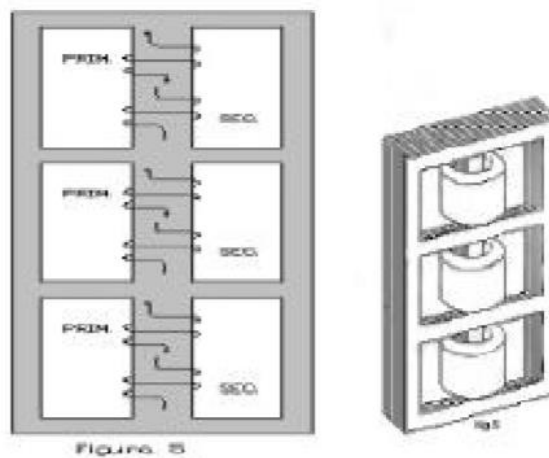


Figura 3.7 Transformador acorazado [7]

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.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

Se producen variaciones de tensión y se generan armónicos, en definitiva, esto da lugar a la bajada considerable de la calidad de onda. 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 3.8, y la repercusión provocada en la temperatura del devanado del transformador, es la que se ve en la Figura 3.9.

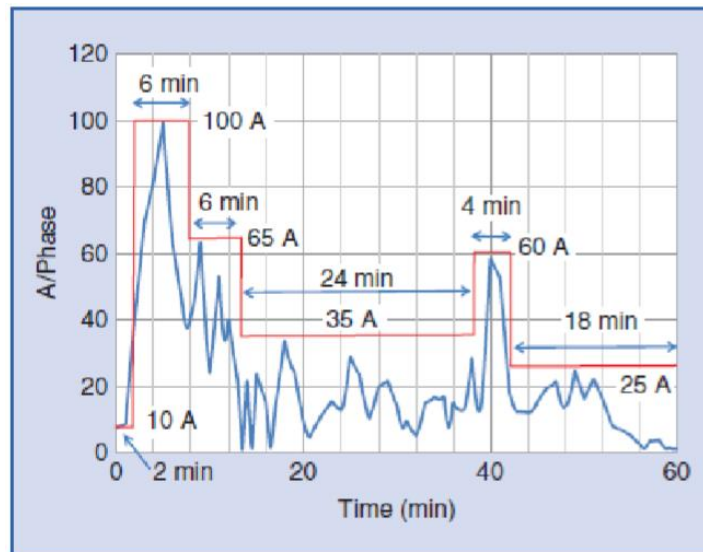


Figura 3.8 Simplificación para el estudio de temperatura [16]



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

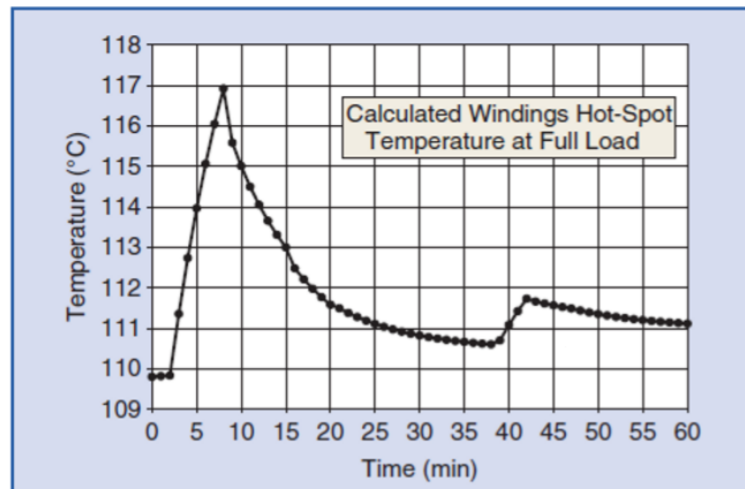


Figura 3.9 Temperatura en el devanado en función de la corriente geomagnética inducida [16]

Otro aspecto 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 3.10 se muestran los distintos tipos de conexiones, y una de las más interesantes a tratar es la configuración en triángulo o delta. Con esta configuración el neutro queda aislado de la tierra, por lo que las corrientes geomagnéticas no pueden penetrar en la red.

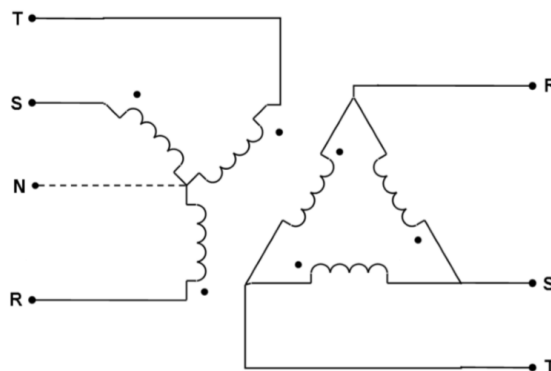


Figura 3.10 Transformador Trifásico conexión estrella – delta



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

En la figura 3.10 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 delta, 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. 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.

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. [18]

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 potencia reactiva. A su vez, estos cambios de potencia activa también provocan variaciones en la frecuencia,



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

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.

3.5 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 VAR’s (CEV’s) 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 reducen su eficacia, lo cual puede dar lugar a la desconexión del banco de condensadores que antes comentábamos, pudiendo así producirse una grave caída de tensión del sistema eléctrico. [16]

3.6 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 figura 3.11 representa la demanda de potencia reactiva (MVAR) que consume cada



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

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 [16].

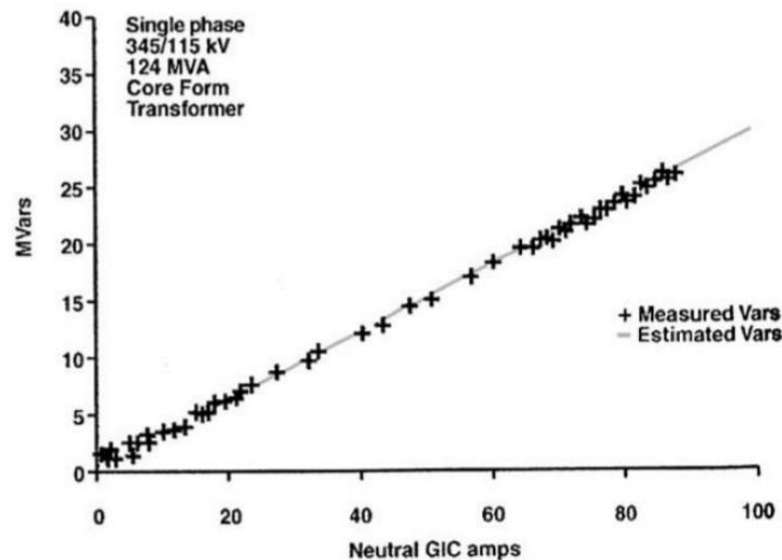


Figura 3.11 Potencia reactiva consumida por fase en un transformador de 124 MVA de potencia nominal respecto a las GIC entrando por el neutro [17]

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 (CEV'S) 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. [50]

El estudio realizado por Shetye y Overbye en la red eléctrica de la zona este de Estados Unidos [51] muestra el consumo de potencia reactiva por los transformadores en función del gradiente de potencial del terreno provocado por la



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

tormenta solar, así como la afectación a las tensiones de los nodos (número de nodos con tensión por debajo de 0,9 p.u.), tal y como se ve en las figuras 3.12 y 3.13 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 nodos con tensión inferior a 0,9 p.u., lo que provocaría el colapso total de la red) [52].

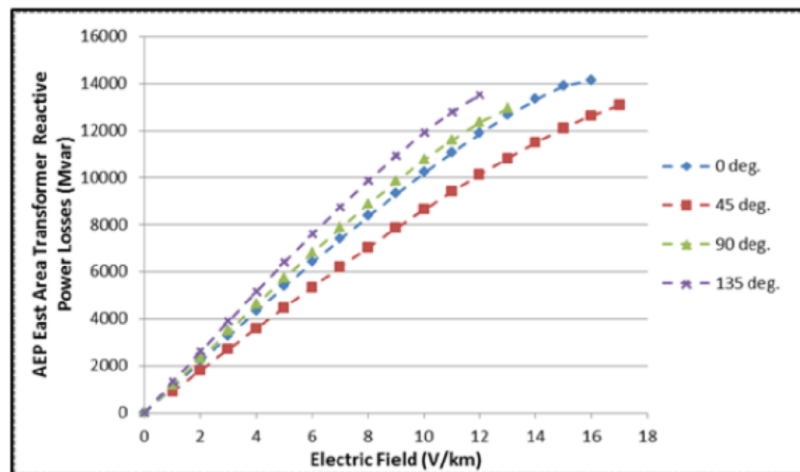


Figura 3.12 Potencia reactiva consumida en función del gradiente de potencial [9]

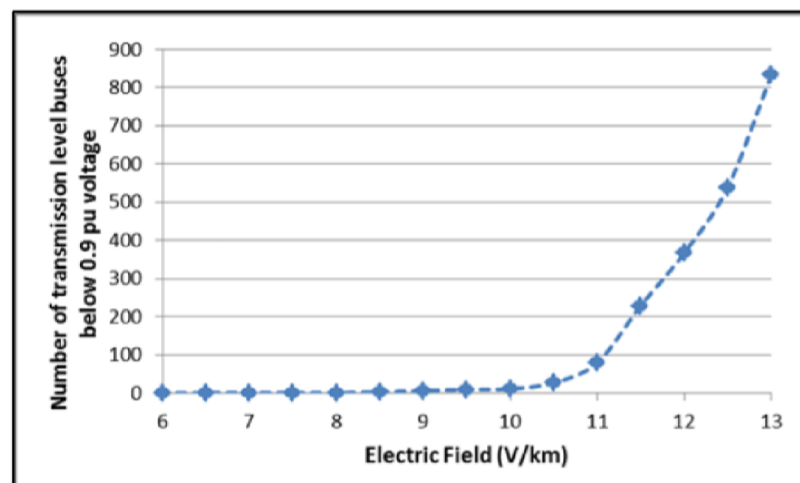


Figura 3.13 Número de nodos puestos fuera de servicio en función del gradiente de potencial [9]



3.7 EVENTOS 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 alrededor de 300 mA, cuando lo normal en servicio era de 35 mA, 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 [19]. 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. [19]. 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



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

entonces, las soluciones a los efectos de las corrientes geomagnéticas inducidas son tema de estudio, para que no se repitan estas situaciones tan comprometidas. 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.



CAPÍTULO 4

MEDIDAS CORRECTIVAS POSTERIORES Y EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Después del apagón ocurrido en Quebec, se realizaron varias medidas correctivas aplicadas a los equipos del sistema de potencia y en la manera en que el sistema eléctrico fue operado [2].

4.1 COMPENSADORES ESTÁTICOS DE VAR’S (CEV’S)

Los CEV’s, que se identificaron como el eslabón débil durante la tormenta geomagnética, fueron sometidos a una revisión completa, y se descubrió que la mayoría de ellos habían sido sobreprotegidos en comparación a su capacidad real. Era, por lo tanto, posible elevar su sobretensión o umbrales de disparo por sobre corriente considerablemente, desensibilizando los sistemas de protección. Con estos nuevos umbrales, los CEV’s fueron capaces de resistir fácilmente posteriores tormentas geomagnéticas en los años 1990 y 2000. Ya que en 1989, el número de CEV’s en el sistema de energía era de nueve (de los cuales siete estaban en funcionamiento el 13 de marzo de 1989), aumentaron a un total de 15 mejorando así la capacidad de compensación de potencia reactiva disponible.

4.2 INCREMENTO DE COMPENSACIÓN SERIE.

Tras varios cortes de energía en la década de 1980, Hydro-Québec lanzó un importante programa para mejorar la confiabilidad de su sistema de eléctrico, agregando mucho equipo eléctrico. Vale la pena mencionar algunas de las iniciativas relacionadas con las tormentas geomagnéticas.

- La adición de compensadores en serie



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

- La adición de un esquema de conmutación automática de reactor de derivación.

La adición de compensadores en serie en las líneas de 735 kV entre la generación y los centros de carga, aunque dirigido a resolver algunos problemas de estabilidad en el sistema de energía, demostró ser muy eficaz en la reducción de GIC’s.

Otra adición importante como parte del programa de confiabilidad. Fue el esquema para la conmutación automática de reactores shunt en varios nodos de 735 kV en el sistema, lo que ayuda a reducir el riesgo de colapso de voltaje asociado con la potencia reactiva consumida por transformadores saturados durante una tormenta geomagnética. El esquema para la conmutación automática de reactores shunt, fue diseñado inicialmente para permitir la rápida conexión de reactores de derivación después de que una perturbación genera una sobretensión en la red de 735 kV. Este esquema puede también controlar la desconexión de los reactores, lo que puede ser útil durante tormentas geomagnéticas creando la caída de voltaje en el sistema de transmisión. Los sistemas de control local permiten la desconexión de un máximo de dos reactores shunt por subestación, una a la vez, e independientemente de una subestación a otra. El disparo de reactores shunt lo hace posible para preservar el rango de regulación de los CEV’s, por lo tanto facilita el control de voltaje.

Para el peor de los casos, un esquema de corte automático de carga por bajo voltaje para mantener niveles de voltaje de 735 kV en el área de Montreal.

4.3 PRUEBA DE AUMENTO DE TEMPERATURA DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

Pruebas de incremento de temperatura en el interior de transformadores de potencia por circulación de corrientes de corriente directa se llevaron a cabo en los laboratorios del Instituto de Investigación Hydro-Quebec en 1995. Durante estas



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

pruebas, realizadas en colaboración con la compañía ABB (Asea Brown Boveri), una corriente equivalente a 75 amperios continuos en el lado de alta circulado en dos autotransformadores durante un período de una hora. El aumento de temperatura en el interior de estos transformadores fue monitoreado por termopares colocados específicamente en los lugares se esperaba un sobrecalentamiento. Las pruebas realizadas en transformadores de 700/300 kV, 550MVA y de 735/230 kV, 370 MVA, revelaron que efectivamente se produce un calentamiento significativo en su interior pero los valores máximos alcanzados resultaron inferiores a los valores permitidos, de acuerdo con las normas relativas a los transformadores. El calentamiento máximo se produce en las placas flitch, que se utilizan para mantener la rigidez mecánica de bobinados y podría tener un impacto temporal en la fuerza mecánica del transformador. Sin embargo, la prueba duró una hora completa a 75 A por fase, mientras que los flujos de GIC importantes generalmente duran menos de 5 min. Se concluyó que el calentamiento del transformador no era una preocupación importante para el diseño específico de transformadores de 735 kV como los utilizados en el sistema Hydro-Québec.

4.4 MONITOREO DE PERTURBACIONES GEOMAGNÉTICAS Y PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS

Los operadores del sistema requieren información suficiente y oportuna en la condición de perturbación geomagnética real en el sistema de potencia. Proporcionar monitoreo geomagnético fue un importante objetivo posterior al evento y fue logrado con la implementación de tres sistemas de monitoreo: COUTEL, SMDA y DOGME.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

- COUTEL es un sistema de monitoreo GIC fuera de línea instalado en cinco subestaciones de 735 kV para medir flujos GIC, ambos voltajes y armónicos actuales.
- SMDA es un sistema en tiempo real para controlar el voltaje armónico distorsión en diferentes subestaciones (principalmente 735 kV). El sistema usa tecnología sincrofasorial para proporcionar en tiempo real armónicos de tensión al sistema centro de control (SCC).
- DOGME, monitorea la distorsión armónica de cuatro Subestaciones de 735 kV y proporciona condiciones en tiempo real al SCC. Este sistema es complementario al sistema de monitoreo de distorsión de voltaje, SMDA, y proporciona una redundante medición no basada en tecnología de sincrofasores.

4.5 CENTRO DE CONTROL DEL SISTEMA

Las mediciones en tiempo real, la información de los sistemas SMDA y DOGME proporciona en tiempo real información a los operadores del sistema en el SCC, además, el sistema de medición de asimetría de voltaje de cuatro puntos, que solo produjo datos informativos, se adaptó para también activar una alarma cuando se alcanzan ciertos límites de asimetría o sean excedidos, con los años, este sistema se ha ampliado y modificado para incluir armónicos de voltaje de sincrofasores en diez subestaciones de 735 kV mientras se han agregado cuatro puntos más para medir solo armónicos pares. Hoy, estos 14 armónicos de voltaje y las mediciones proporcionan una supervisión de las condiciones geomagnéticas en tiempo real del sistema de eléctrico Hydro-Québec.

Nuevas estrategias de operación del sistema eléctrico en condiciones de tormenta geomagnética fueron implementadas y actualizadas a lo largo de los años.

Una alerta pronosticada del índice K planetario (K_p) por encima de ocho $K_p > 8$ o cuando las mediciones en tiempo real de armónicos pares contengan una distorsión



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

mayor al rango de 2.2 a 2.6%, el sistema de alimentación se coloca en un estado operativo seguro mediante las siguientes acciones:

- Volver a poner en servicio la compensación de la serie.
- Ajuste de planificación de mantenimiento.
- Limitar el flujo de potencia en el sistema de transmisión.
- Reducir el flujo de transmisión de potencia en las interconexiones a aproximadamente 40–80% de su capacidad nominal.
- Aumento de la reserva de potencia reactiva.

La estrategia luego requiere la reducción de los límites de transferencia basados sobre la topología del sistema de alimentación y el número de CEV’s disponibles para preservar un margen de reserva de potencia reactiva segura.

Tras el apagón de 1989, Se han realizado una gran cantidad de análisis y muchos estudios, se han instalado nuevos equipos y esquemas de control para mejorar la confiabilidad del sistema de energía Hydro-Québec. Desde 1989, la robustez del sistema durante tormentas geomagnéticas severas ha sido analizada de manera satisfactoria. Sin embargo, incluso a más de 25 años, el problema de tormentas geomagnéticas todavía está a la vanguardia del sistema eléctrico en su planeación y operación.

Por lo tanto, las condiciones de tormenta geomagnética siguen siendo una causa para preocuparse en una sociedad moderna y digital cada vez más dependiente en un suministro confiable de electricidad.

Para prepararse ante futuros eventos, Hydro-Québec ha desarrollado una gran experiencia en la simulación de disturbios geomagnéticos, las primeras simulaciones en la década de 1990 comenzaron con la aceleración del tiempo de saturación de los transformadores de potencia con presencia de corrientes de corriente directa en una hora. Hoy una simulación digital completa del sistema Hydro-Québec, incluida la saturación, es posible en menos de 15 minutos, estos



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

estudios toman en consideración fenómenos eléctricos completos con corriente alterna y corriente directa simultáneamente (fuentes de voltaje de CA y CD, (GIC), saturación del transformador, armónicos y estabilidad de voltaje). Así, Hydro-Québec puede estudiar todos los aspectos de las perturbaciones geomagnéticas y el objetivo es integrar eficientemente los efectos de CD (GIC) y el impacto de potencial en los estudios regulares de estabilidad del sistema realizados por personal de planificación de la red.



CAPÍTULO 5

PREPARACIÓN DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

5.1 DESCRIPCIÓN DE SESIONES DE ENTRENAMIENTO

Las sesiones de entrenamiento en simulador para operadores del CENACE [20], son parte fundamental de la formación laboral y reforzamiento de sus conocimientos basando su contenido en experiencias ocurridas en eventos relevantes que han ocasionado que el Sistema Eléctrico Nacional (SIN) pase de un estado operativo normal a uno de alerta o de emergencia o bien para condiciones críticas resultado de estudios en simulaciones ante posibles contingencias de elementos en diferentes condiciones (horario, demanda, fecha ... etc). El simulador de entrenamiento del CENACE, es una herramienta que pertenece al sistema de monitoreo de tiempo real del Sistema eléctrico nacional, que utiliza:

- La topología del SIN (Interruptores, líneas, buses ... etc)
- Corridas de flujos de potencia de manera periódica cada 3 segundos
- Configuración de slack distribuido en sus buses para solución de flujos de potencia
- Modelo dinámico de las unidades generadoras
- Perfil de carga

Con toda esta información, es posible apreciar un efecto en los flujos de potencia en líneas, transformadores y cargas muy similar al dinamismo del sistema eléctrico nacional que se tiene en tiempo real y su respuesta ante cambios en sus elementos tales como, generación o carga por lo que las sesiones de entrenamiento son una gran herramienta para la evaluación del desempeño y detectar áreas de oportunidad que ayuden a definir estrategias para reforzar las habilidades basadas en conocimientos especializados para los operadores del centro nacional y alterno del CENACE.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

5.2 OBJETIVO DE LAS SESIONES DE ENTRENAMIENTO POR IMPACTO DE GIC’S AL SIN

El tema principal de este trabajo es un fenómeno natural que ha tenido poca difusión entre el personal que opera el sistema eléctrico nacional del CENACE, por lo que con esta sesión se pretende mostrar a los operadores, los posibles daños que se pueden ocasionar por la presencia de corrientes geomagnéticas inducidas en los elementos del sistema eléctrico nacional para generarles una consciencia situacional de las mismas, su evolución, el impacto en el sistema eléctrico, los daños y principalmente las consecuencias a corto, mediano y largo plazo.

5.3 DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO.

En el escenario presentado, se muestra el posible impacto de las corrientes geomagnéticas inducidas con una perspectiva de supervisión, desde el centro nacional y alterno, por lo que principalmente su enfoque es en las redes troncales de 400 kV’s así como el control balance carga-generación para control de la frecuencia.

En base a la información histórica que se mencionó en los capítulos anteriores, se recreará la condición esperada en el sistema eléctrico nacional resultado de los estudios que realiza el Laboratorio de clima espacial (LANCE). En la figura 5.1 se muestra las regiones susceptibles definidas en el artículo “Estimates of Geomagnetically Induced Currents on the Mexican Power Grid” publicado en el año actual.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

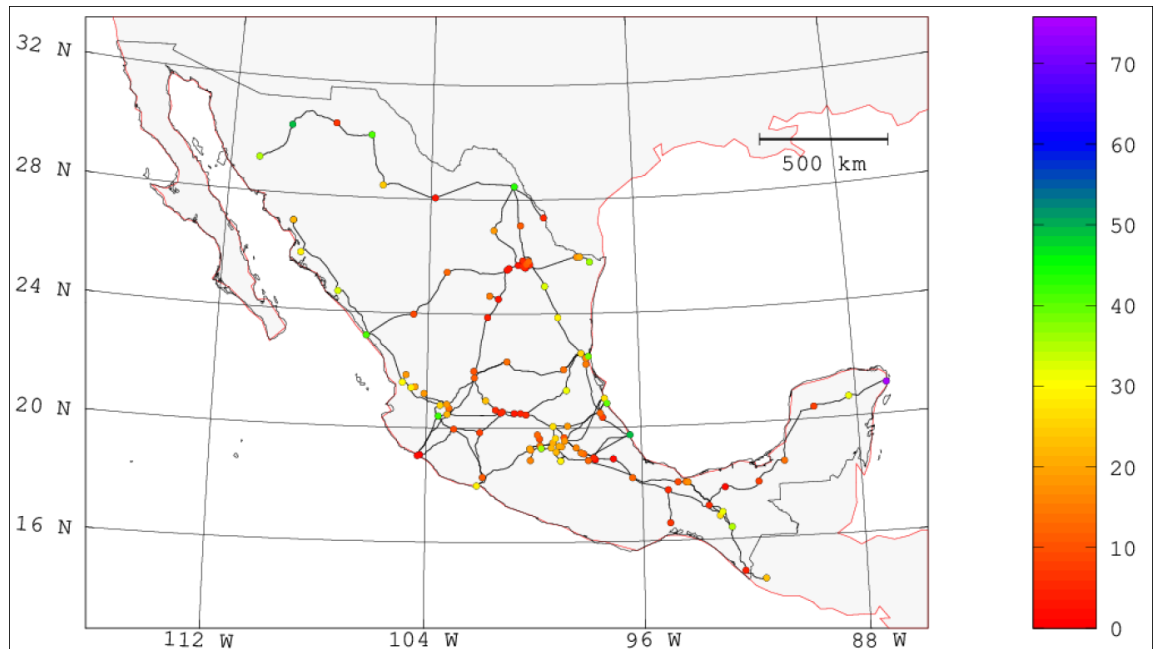


Figura 14 GIC's estimadas en el Sistema Eléctrico Nacional [21]

Como se puede observar en la figura 5.1 las principales zonas de mayor presencia de GIC's son Veracruz y la Península de Yucatán, como el escenario es dirigido al personal de supervisión del sistema eléctrico nacional del cenal/cenalte se afectará la generación que incide en el nodo de tres estrellas para la gerencia de control oriental y se afectará carga de la zona de rivera maya de la gerencia de control peninsular.

Para lograr los resultados mostrados en la figura 5.1, el laboratorio de clima espacial aplico el comportamiento de las corrientes geomagnéticas más representativas de los ciclos solares 23 y 24. El resultado mostrado corresponde a la tormenta Halloween del día 29 de Octubre del 2003 la cual registro un índice DST en el observatorio de Kyoto mostrado en la figura 5.2



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”



Figura 15.2 Índice DST registrado por el observatorio de Kyoto en el mes de octubre del 2003 [12]

5.4 CONDICIONES INICIALES DEL ESCENARIO

La determinación de las condiciones iniciales de un escenario de entrenamiento dependen en gran manera del objetivo de la misma, en este caso se tomó la decisión de que el operador tenga recursos suficientes para solucionar el problema inicial que es el control de frecuencia por pérdida de generación, por lo que se tomó como referencia el día 30 de octubre del 2019 a las 03:30 horas con la finalidad de no complicar el escenario para no distraerlo con sobrecarga de flujo en compuertas, restricciones de generación por congestión de red, ni limitación de recursos de generación. La fig. 5.3 muestra el perfil de demanda del sistema interconectado nacional y las demandas que se consideraron por cada gerencia de control.

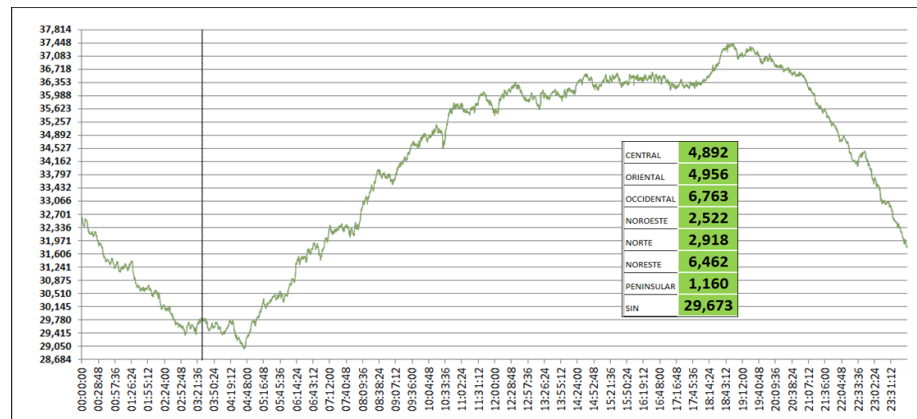


Figura 16 Perfil de demanda del SIN



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

La figura 5.4 muestra la demanda y generación por gerencia de control regional del SIN así como los flujos de enlace entre gerencias.



21

Figura 17 Condiciones iniciales de demanda y generación por gerencia en el SIN

Debido a que el impacto de las GIC’s va relacionado con la degradación del voltaje en buses por el consumo de potencia reactiva al interior de los transformadores de potencia, se seleccionó un caso con demanda mínima para que las condiciones de demanda no sean un factor que confunda al operador respecto al incremento de temperatura en los mismos.

El despacho de generación que se está considerando en base a la demanda inicial y por economía, incluye en su mayoría centrales ciclo combinado y muy poca generación hidráulica, lo cual puede ayudar al operador para tener recursos de respuesta rápida para recuperar la frecuencia ante las afectaciones de generación (Dado que el objetivo de la sesión no es de control de frecuencia). La tabla 5.1 muestra los montos de generación incluidos en el despacho asignado para la sesión.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

Tabla 5.1 Generación despachada que se afectará con la presencia de GIC’s

	MW
02TUV	498
02EAT	427
02FET	859
02ETS	438
02LAV	1,491
TOTAL	3,713

De manera integral, la tabla 5.2 muestra la carga y generación considerada en el caso base de todo el SIN, estos datos se obtuvieron de los registros históricos, con la finalidad de mantener congruencia con las condiciones que el operador vive en cada turno.

Tabla 5.2 Carga y generación de SIN por gerencia regional de control.

	CEL	ORI	OCC	NOR	NTE	NES	PEN	SIN
DEMANDA	4,892	4,956	6,763	2,522	2,918	6,462	1,160	29,673
GENERACION	3,296	6,677	3,532	2,255	2,765	10,250	875	29,650

Debido a que la sesión contempla la pérdida de generación, es necesario analizar la sensibilidad de la frecuencia ante movimientos de generación o carga, este dato se conoce como Bias del sistema el cual está calculado en función de las unidades generadoras conectadas al SIN su despacho y sus datos dinámicos. En la figura 5.5 podemos observar el cálculo del Bias para las condiciones de la sesión.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

Datos de Frecuencia		52.7 MW
Frecuencia Actual	60.009	Hz
Frecuencia Programada	60.000	Hz
Desviación de Frecuencia	0.009	Hz
Límite Desviación de Alarma	0.200	Hz
Límite Time-out Desv Sobre Frec	0.500	Hz
Límite Time-out Desv Baja Frec	0.500	Hz
Método de Selección de Frec	Prioridad	
Límite Desv Frec Mayor/Menor	1.000	Hz
Estado del Filtro	On	
Hora Inicio de Frec Programada		HH:MM
Hora Fin de Frec Programada		HH:MM
Frecuencia Fuera del Nominal	59.980	Hz
Desplazamiento Prog Máximo	0.030	Hz
Programa de Frec en Progreso	No	
Obligación de Frecuencia para ECA	52.7	MW
Cte de Bías Frecuencia Manual	450.00	MW/.1Hz
Constante de Bías Calculada	555.19	MW/.1Hz
Uso de Bías de Frec/Tiempo Calc	On	
Multi-Islas	No	

Figura 5.5 Bías calculado en las condiciones de la sesión

Con el Bías de 555 MW/0.1Hz calculado por el simulador en base a las unidades conectadas y sus estatismos, se realizó el análisis del impacto a la frecuencia para la afectación de generación de 3,713 MW con las condiciones de carga y generación del caso base, sin considerar la desconexión de carga por baja frecuencia, en base a los lineamientos actuales del CENACE para este efecto, la figura 5.6 muestra que para esta condición no es necesario aplicar ningún paso de tiro de carga por baja frecuencia.

GCR	(EDBF) ESQUEMA DE DESCONEXION POR BAJA FRECUENCIA						DEMANDA		GENERACION	
	59.3	59.2	59.1	58.9	58.7	58.5	ACTUAL		CONECTADA	AFECTADA
CEL	410.93	190.79	386.47	357.12	381.58	357.12	4,892		3,296	
ORI	163.55	223.02	232.93	282.49	401.44	332.05	4,956		6,677	3,713
OCC	561.33	311.10	534.28	446.36	466.65	561.33	6,763		3,532	
NOR	151.32	75.66	211.85	211.85	211.85	211.85	2,522		2,255	
NTE	175.08	87.54	248.03	245.11	245.11	245.11	2,918		2,765	
NES	420.03	478.19	581.58	536.35	458.80	381.26	6,462		10,250	
PEN	138.04	81.20	81.20	81.20	-	-	1,160		875	
SIN	2,020.28	1,447.49	2,276.34	2,160.47	2,165.42	2,088.72	29,673		29,650	3,713
	59.3	59.2	59.1	58.9	58.7	58.5		-		
CARGA AFECT.	2,020.28	3,467.77	5,744.10	7,904.58	10,070.00	12,158.71		BIAS	555	0.67
DEM. FINAL	27,652.73	26,205.23	23,928.90	21,768.42	19,603.00	17,514.29			FREC.FINAL	59.33

Figura 5.6 Esquema de desconexión de carga por baja frecuencia



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

Como podemos observar la frecuencia, esperada para esta condición es de 59.33 Hz lo cual implicaría no aplicar tiro de carga por baja frecuencia. Sin embargo, dado que el evento implica la pérdida de elementos de generación, este análisis se realizó con una nueva constante de Bias de 475 MW/0.1Hz considerando la pérdida de inercia y el despacho de las unidades al momento del disturbio

En la figura 5.7 se muestra este análisis para la pérdida de 3,713 MW de generación en la cual se puede apreciar que es necesario aplicar un tiro de carga de 2,020 MW correspondientes al paso 1 de baja frecuencia, dado que ésta alcanzaría a caer a 59.22 Hz.

GCR	(EDBF) ESQUEMA DE DESCONEXION POR BAJA FRECUENCIA						DEMANDA		GENERACION	
	59.3	59.2	59.1	58.9	58.7	58.5	ACTUAL		CONECTADA	AFECTADA
CEL	410.93	190.79	386.47	357.12	381.58	357.12	4,892		3,296	
ORI	163.55	223.02	232.93	282.49	401.44	332.05	4,956		6,677	3,713
OCC	561.33	311.10	534.28	446.36	466.65	561.33	6,763		3,532	
NOR	151.32	75.66	211.85	211.85	211.85	211.85	2,522		2,255	
NTE	175.08	87.54	248.03	245.11	245.11	245.11	2,918		2,765	
NES	420.03	478.19	581.58	536.35	458.80	381.26	6,462		10,250	
PEN	138.04	81.20	81.20	81.20	-	-	1,160		875	
SIN	2,020.28	1,447.49	2,276.34	2,160.47	2,165.42	2,088.72	29,673		29,650	3,713
	59.3	59.2	59.1	58.9	58.7	58.5				
CARGA AFECT.	2,020.28	3,467.77	5,744.10	7,904.58	10,070.00	12,158.71		BIAS	475	0.78
DEM. FINAL	27,652.73	26,205.23	23,928.90	21,768.42	19,603.00	17,514.29			FREC.FINAL	59.22

Figura 5.7 Determinación de tiro de carga por gerencia

Aplicando el tiro de carga de 2,02 MW, la frecuencia se alcanza a recuperar a 59.64 Hz como se puede observar en la figura 5.8, por lo que es necesario realizar acciones de incremento de generación.

GCR	(EDBF) ESQUEMA DE DESCONEXION POR BAJA FRECUENCIA						DEMANDA		GENERACION	
	59.3	59.2	59.1	58.9	58.7	58.5	ACTUAL	P1	CONECTADA	AFECTADA
CEL	410.93	190.79	386.47	357.12	381.58	357.12	4,892	411	3,296	
ORI	163.55	223.02	232.93	282.49	401.44	332.05	4,956	164	6,677	3,713
OCC	561.33	311.10	534.28	446.36	466.65	561.33	6,763	561	3,532	
NOR	151.32	75.66	211.85	211.85	211.85	211.85	2,522	151	2,255	
NTE	175.08	87.54	248.03	245.11	245.11	245.11	2,918	175	2,765	
NES	420.03	478.19	581.58	536.35	458.80	381.26	6,462	420	10,250	
PEN	138.04	81.20	81.20	81.20	-	-	1,160	138	875	
SIN	2,020.28	1,447.49	2,276.34	2,160.47	2,165.42	2,088.72	29,673	2,020	29,650	3,713
	59.3	59.2	59.1	58.9	58.7	58.5				
CARGA AFECT.	2,020.28	3,467.77	5,744.10	7,904.58	10,070.00	12,158.71		BIAS	475	0.36
DEM. FINAL	27,652.73	26,205.23	23,928.90	21,768.42	19,603.00	17,514.29			FREC.FINAL	59.64

Figura 5.8 Determinación y aplicación de tiro de carga por baja frecuencia



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

Dado el alcance de la tesis, no se realizará el análisis de la operación de otros esquemas de acción remedial como los de bajo voltaje que tendrían que analizarse en otras condiciones de estudio, la recuperación a la frecuencia de 60 Hz en esta sesión queda dentro de las acciones del operador.

Para el diseño de la sesión se modelaron cargas no industriales, que se conectan en los buses de 400 kV de las subestaciones Tres estrellas, Laguna Verde, y Rivera Maya de manera ficticia, con la finalidad de que mediante una secuencia programada presenten un comportamiento de incremento de potencia reactiva con la finalidad de consumir los recursos de potencia reactiva en estas regiones simulando la saturación de los transformadores colindantes por presencia de corrientes geomagnéticas inducidas en sus núcleos, la figura 5.9 Muestra el tabular de cargas especiales para simulación de corrientes geomagnéticas con control de potencia activa y/o potencia reactiva.

DTS: MW y MVAR de Cargas BIL							
Fecha/Hora Inicio Simulación		Fecha/Hora Fin Simulación			Estado Actual Simulador		
30/oct/2019 03:30:00					Simul		
Carga BIL	Número Área	Número Zona	Número Isla	Tipo Carga	Valor Actual Activa MW	Valor Actual Reactiva MVAR	Estado Carga
02 LAV GICS	2	8	1	Confrm	0.0	50.0	Dentro
02 TTE GICS	2	8	1	Confrm	50.3	75.0	Dentro
08 RMY GICS	8	9	1	Confrm	0.0	75.0	Dentro

Figura 5.9 Tabular de cargas del simulador de entrenamiento para simulación de GIC’s

5.5 DESARROLLO DE LA SESIÓN

Se realiza la entrega de turno en donde se informa al operador las condiciones del SIN, tomando como referencia principal, los diagramas de las troncales de 400 y 230 kV’s de las gerencias de control, así como el despacho de generación.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

La sesión inicia con horario de 03:30 Horas por lo que de acuerdo a la figura 5.3 el operador deberá definir una estrategia de despacho de generación para las siguientes horas considerando la demanda mínima.

Una vez iniciada la sesión se le deberá informar al operador de entrenamiento vía telefónica que el Servicio de Clima Espacial México (Sciesmex) ha comunicado que se tiene registro del índice DST (Disturbance storm time) de -200 nT en los sensores instalados en el observatorio de Teoloyucan y un pronóstico para las siguientes horas de hasta -400 nT. Para lo cual recomienda monitorear la zona de Tuxpan Veracruz, Riviera Maya y Manzanillo.

La gerencia de control oriental dará aviso al operador de entrenamiento que se tienen problemas de alta temperatura en los dos transformadores de unidad de la central Laguna Verde, con la finalidad de atraer la atención del mismo hacia ese punto, dado que hay suficientes recursos de potencia reactiva, el voltaje en los buses no se verá degradado fuera de sus límites aceptables y la capacidad de los transformadores estará dentro de sus valores aceptables lo cual descarta la posibilidad de ser una sobrecarga el motivo de la alta temperatura.

Una vez informado al operador de esta condición se aplicara la secuencia programada para control de cargas de simulación de corrientes geomagnéticas inducidas con la que se incrementará la potencia reactiva en los nodos de TTE (tres estrellas), LAV (laguna verde) y RMY (Riviera maya) de acuerdo a la figura 3.11, la figura 5.10 muestra el resultado de los perfiles de voltaje en las subestaciones mencionadas con anterioridad.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

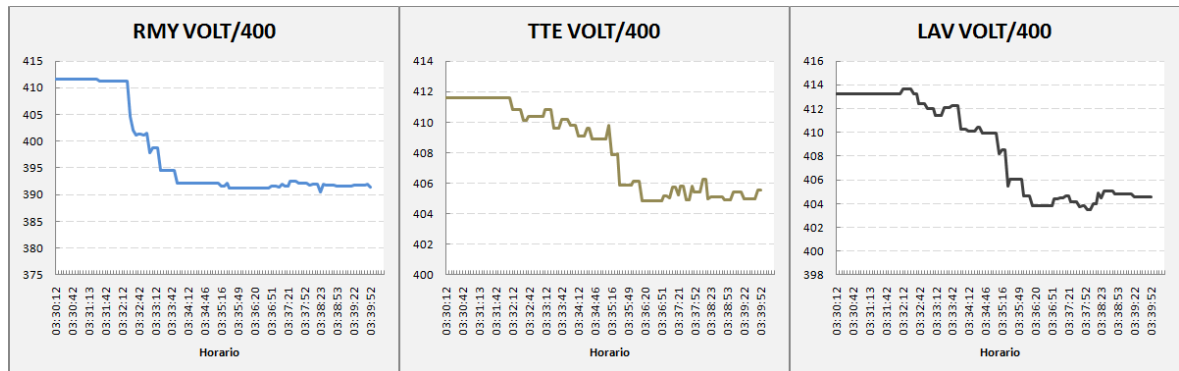


Figura 5.10 Perfil de voltaje en subestaciones RMY/TTE/LAV

Bajo estas condiciones que no son de alerta por el perfil de voltaje, es muy probable que el operador de entrenamiento solamente tome acciones en laguna verde por ser una central nuclear. Seguido de esta etapa, se aplicara la secuencia programada de desconexión de elementos correspondientes al área de impacto de corrientes geomagnéticas. La gerencia de control oriental, se encuentra en las condiciones mostradas en la figura 5.11



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

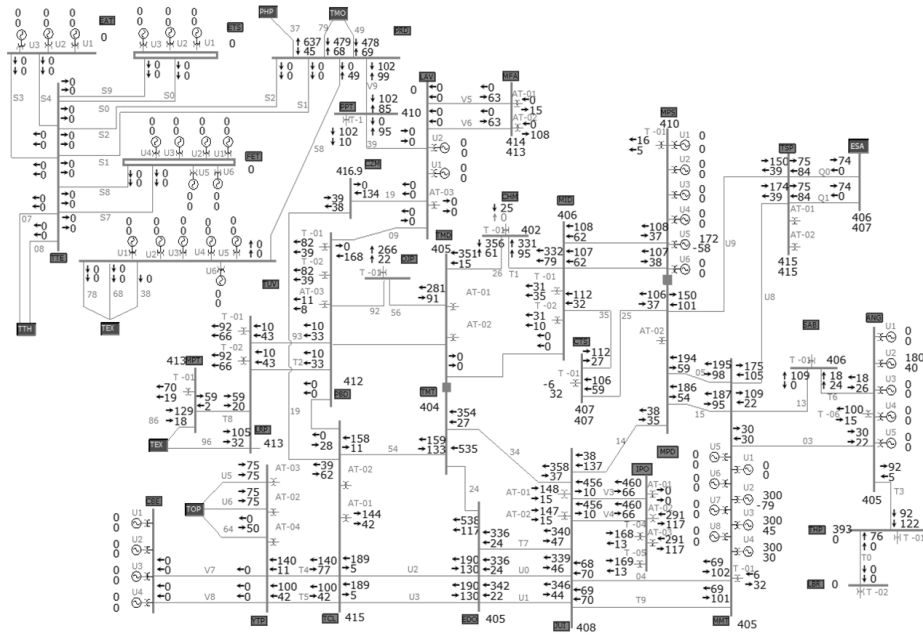


Figura 5.12 Red troncal de 400 kV’s de la gerencia de control regional oriental ante contingencia

Finalmente la redistribución de flujos en el sistema interconectado nacional, la demanda y generación por gerencia de control regional y la frecuencia final se puede apreciar en la figura 5.13

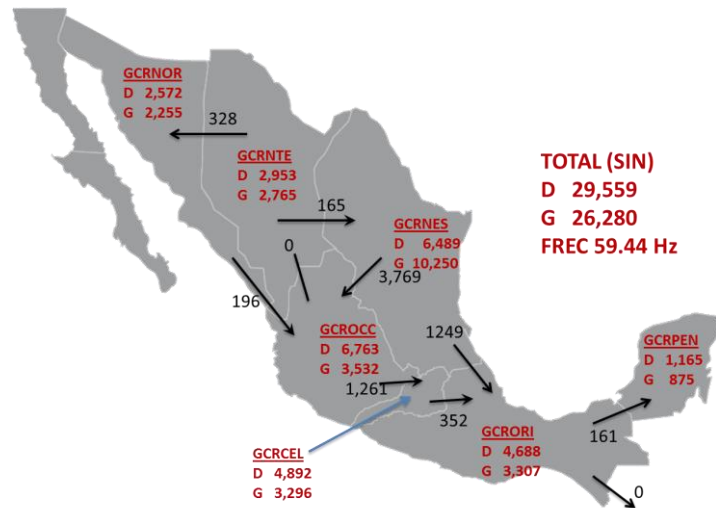


Figura 5.13 Sistema Interconectado Nacional en contingencia



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

La respuesta del sistema ante la afectación de generación por la presencia de corrientes geomagnéticas es mostrada en la figura 5.14 que se obtuvo de manera directa en la simulación.

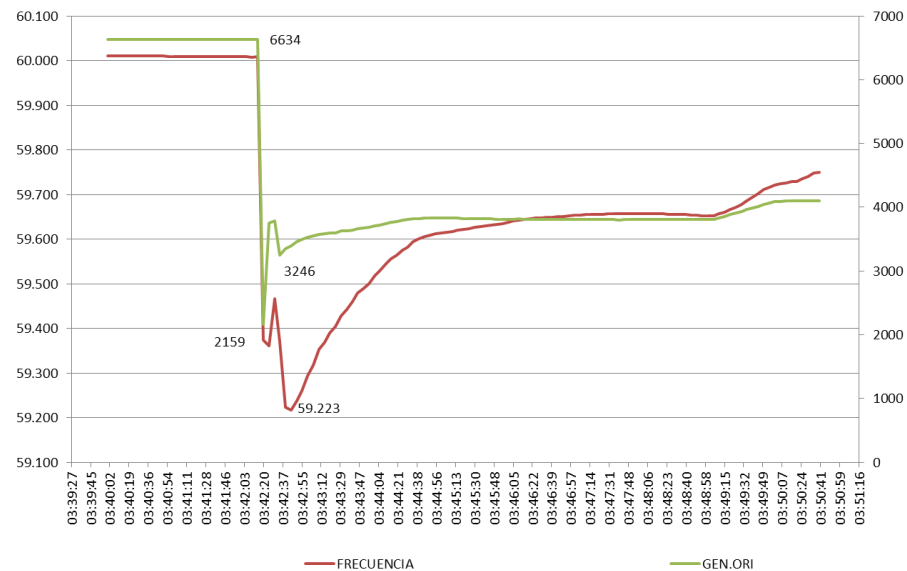


Figura 5.14 Respuesta de la frecuencia durante la simulación

Hasta este momento durante la sesión se ha simulado el efecto y evolución de la presencia de corrientes geomagnéticas inducidas en el territorio mexicano

5.6 EXPECTATIVAS DEL DESEMPEÑO DEL OPERADOR

Dado la naturaleza del fenómeno, la información proporcionada y la afectación ocasionada, se pretende que el operador realice los suficientes cuestionamientos para poder definir una estrategia operativa y poder llevar el sistema eléctrico nacional de un estado de emergencia a normal.

Antes de tratar de recuperar la frecuencia deberá realizar un análisis rápido en cuestión de unos cuantos minutos de las nuevas limitaciones en compuertas principales del sistema interconectado nacional de interconexión entre gerencias al



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

cambiar su topología por indisponer elementos tales como líneas de transmisión y transformadores.

Para el caso de los enlaces entre las gerencias de control regionales central y oriental, la figura 5.15 y 5.16 muestra las condiciones iniciales y posteriores al evento.

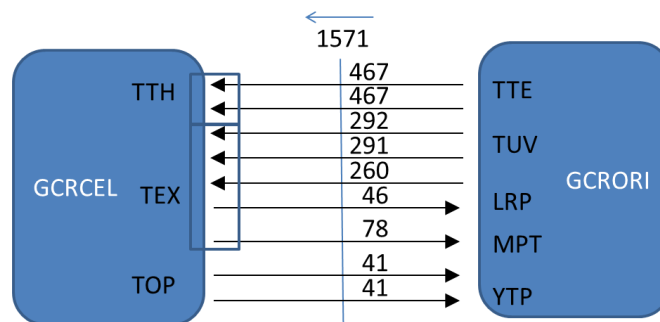


Figura 5.15 Enlaces de 400 kV's entre las gerencias de control regionales central y oriental en condiciones normales

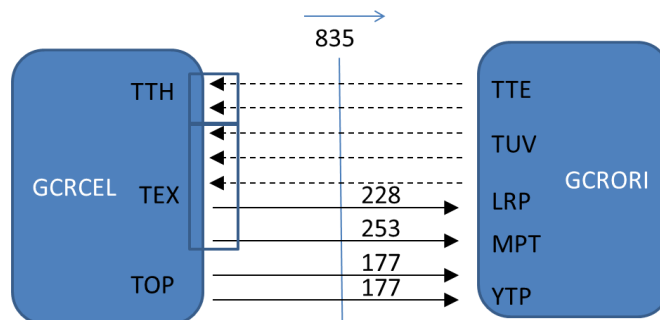


Figura 5.16 Enlaces de 400 kV's entre las gerencias de control regionales central y oriental ante contingencia

Como podemos observar entre la gerencia de control regional central y la gerencia de control regional oriental se cuenta con 9 líneas de 400 kV's de enlace en condiciones normales, analizando estas dos gerencias de control de manera independiente a las demás, podemos definir como deficitaria a la gerencia de control



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

regional central respecto a su balance carga generación, caso contrario a la gerencia de control regional oriental que cuenta con suficientes recursos de generación para soportar su demanda, tabla 5.3

Tabla 5.3 Demanda y generación de las gerencias regionales de control.

GERENCIA	DEMANDA MAXIMA / MINIMA		DISPONIBLE	EXCEDENTE
CENTRAL	9,027	13-FEB-2019 19:17 HRS	6,559	-2,468
	4,121	01-ENE-2019 08:41 HRS		2,438
ORIENTAL	7,959	27-AGO-2019 21:07 HRS	14,577	6,618
	3,816	25-DIC-2019 07:15 HRS		10,761

Los lineamientos actuales para control de flujo en enlaces se realizan con todos los elementos o líneas en servicio dada la redistribución de flujos de manera dinámica, en este caso particular en donde las condiciones de red serían muy distintas, el lineamiento que deberá considerar el entrenando es de acuerdo a su límite térmico el cual es por lo general de 1000 MVA´s por línea en 400 kV´s. Ante la contingencia, la sobrecarga de enlaces interregionales de acuerdo a las condiciones iniciales de carga y generación durante la sesión, se presentan en la figura 5.17.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

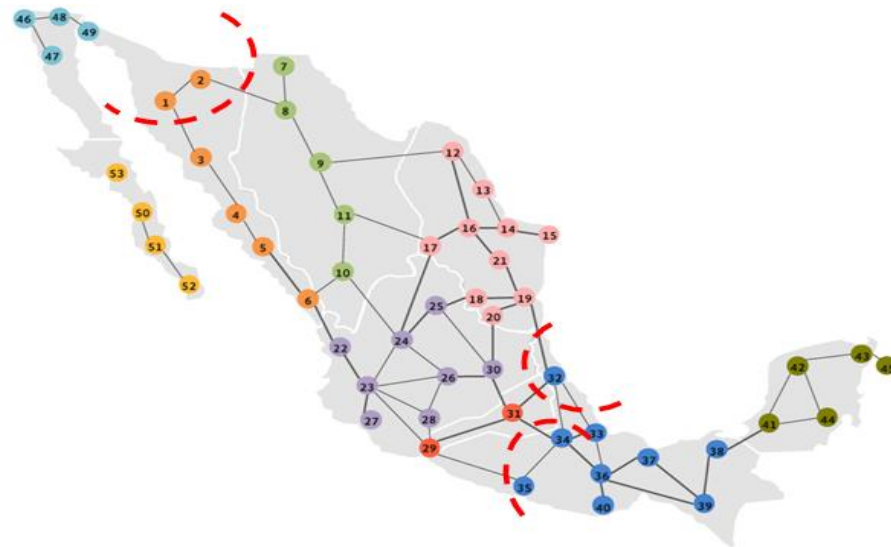


Figura 5.17 Enlaces interregionales del sistema interconectado nacional [22]

Considerando que la sesión se realiza con horario de la madrugada, lo importante en este caso es visualizar las condiciones para la entrada de demanda típicamente a partir de las 06:00 horas, demanda media 13:00 horas y la demanda máxima a las 20:00 horas, como se puede apreciar en la figura 5.18, por lo que el operador de entrenamiento deberá tomar en cuenta esto en sus decisiones de despacho de generación para evitar que el daño al sistema eléctrico aun interconectado pase a la formación de islas o incluso hasta colapsarse.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”



Figura 5.18 Perfil de la demanda histórica del día 03 de Febrero de 2019

Para el control de la frecuencia, dada la naturaleza del fenómeno y la afectación regionalizada principalmente en la zona de Tuxpan Veracruz, existen suficientes recursos de generación hidráulica en las gerencias de control regional central, oriental y occidental por lo que este factor no representa complejidad, solo la habilidad del operador de entrenamiento para solicitar los montos adecuados y haciendo usos de los recursos de regulación secundaria.

5.7 RETROALIMENTACIÓN CON EL OPERADOR

Esta es la parte más importante de una sesión de entrenamiento puesto que es en donde se busca dar a conocer mediante el sustento teórico y práctico las áreas de oportunidad y mejores prácticas de desempeño durante la misma, en este caso dada la formación que tienen los operadores los conceptos de balance carga



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

generación no son relevantes, lo que se busca es dar a conocer que existen en México organismos que actualmente realizan la supervisión y seguimiento a estos fenómenos, dado el impacto en otros países.

Se dará a conocer la información emitida por el servicio de clima espacial México a través del documento mostrado en la figura 5.19

CLIMA ESPACIAL ¿Cómo nos afecta?

¿Qué es?
Un fenómeno global producido por la actividad solar que puede causar afectaciones a nuestra tecnología

Fenómenos asociados con las variaciones en el clima espacial

- 1 Eyeciones de masa coronal**
Nube de partículas cargadas eléctricamente que sale de la atmósfera solar
Efecto
Fallas en las órbitas de los satélites y daños en las corrientes eléctricas de alta tensión (apagones)
- 2 Fulguraciones solares**
El Sol emite rayos X, gamma, ultravioleta, luz visible, infrarrojos, microondas y ondas de radio.
Efecto
Interferencias en telecomunicaciones y radiocomunicaciones, fallas en los sistemas de posicionamiento global
- 3 Partículas energéticas solares**
Protones, neutrones y electrones acelerados por fulguraciones solares
Efecto
Daño en componentes de los satélites, dosis de radiación peligrosa para astronautas y afectaciones a las y los pasajeros de vuelos transpolares

Efectos más importantes en la infraestructura espacial y terrestre

Ionósfera
Corrientes de la ionósfera
Emisiones solares de radio
Perturbaciones en las ondas de radio
Interrupción de la señal de telefonía celular

Efectos en el espacio:
Rayos cósmicos
Micrometeoros
Daño en paneles solares
Fulguraciones solares
Fallas y pérdida de información en computadoras y sistemas de almacenamiento
Inseguridad para astronautas
Arrastre atmosférico de satélites y modificación de su órbita

Efectos en la Tierra:
Burbujas de plasma
Exposición a radiación de las personas a bordo de los aviones
Vapor de agua de lluvia
Interrupción en la red eléctrica
Centelleo de señales
Errores en los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés)
Daños en oleoductos y gasoductos
Interrupción de telecomunicaciones por cable

Infórmate
Servicio de Clima Espacial - México www.sciemex.unam.mx
Centro Nacional de Prevención de Desastres www.gob.mx/cenapred
Space Weather Prediction Center <http://www.swpc.noaa.gov>

Fuente: Aguilar Rodríguez, E., 2014. Servicio de clima espacial en México. Cuadernos de divulgación científica y tecnológica, cuaderno núm. 5. Consejo Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación de Michoacán, México. (Difusión en solución a mi alcance)

Figura 5.19 Boletín de informativo del servicio de clima espacial México [23]

Se mencionarán de manera breve las tormentas solares intensas que han ocasionado daños y se mostrara la figura 5.20 como evidencia transformadores de potencia dañados por corrientes geomagnéticas en el año 2003 durante la tormenta



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

Halloween que es la que el laboratorio de clima espacial tomó como referencia para la realización de los estudios del impacto de las corrientes geomagnéticas en el territorio mexicano.



Figura 5.20 Transformadores dañados durante la tormenta "Halloween" [3]

Es importante destacar en esta parte de la sesión las acciones que actualmente se realizan para la detección de estos fenómenos. La Figura 5.21 muestra la aplicación de un registrador de fallas tipo Tesla 4000 midiendo corrientes y voltajes en ambos lados de un transformador estrella – estrella y un sensor de corriente directa en el aterrizamiento de los devanados, así como la medición de temperaturas dentro del mismo, esta aplicación es una propuesta realizada por la compañía DOBLE [24] .



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

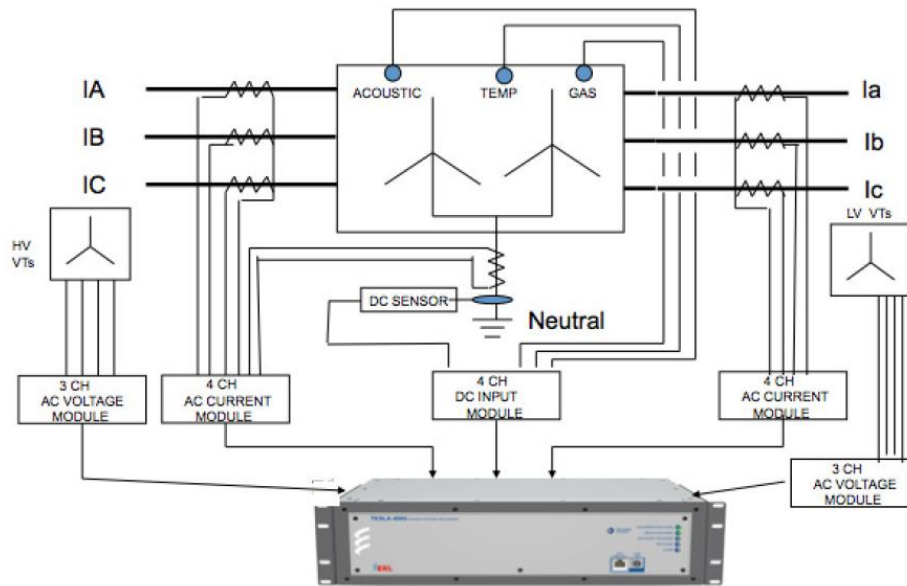


Figura 5.21 Monitoreo de GIC's en un transformador de potencia

En México, el 30 de Octubre de 2018 se instaló el primer sensor de corrientes geomagnéticas inducidas en la subestación Querétaro con el cual inicia una nueva etapa de monitoreo de parámetros que ayuden a la toma de decisiones y complementen información para mejorar las simulaciones de la presencia de las mismas figura 5.22



Figura 5.22 Instalación del primer sensor de GIC's subestación Querétaro [21]



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con este trabajo podemos visualizar que el principal impacto y daño a los equipos del SIN esta en los transformadores de potencia los cuales en caso de requerir ser reparados, el tiempo de indisponibilidad de estos podría ir de 1 a 6 meses y en caso de que por sus daños se requiera su sustitución, este proceso tardaría al menos unos 5 años para lograr su disponibilidad, con estas condición será necesario hacer un análisis de nuevos límites operativos en el SIN dado el cambio en su topología y capacidad de transformación.

Es muy importante continuar con la investigación y difusión de estos fenómenos respecto a su impacto en el sistema eléctrico nacional, con la finalidad de sensibilizar al personal de operación del Centro nacional de control de energía (CENACE) de manera coordinada con los especialistas del Laboratorio de clima espacial (LANCE)

Se recomienda modelar sesiones para esta condición en los siguientes escenarios.

- Demanda máxima pronosticada para el año actual (en base a datos históricos)
- Demanda mínima pronosticada para el año actual (en base a datos históricos)
- Máxima generación renovable coincidente.

Con la finalidad de tener un panorama más completo acerca de las medidas preventivas y restaurativas requeridas para mantener la confiabilidad esperada del sistema interconectado nacional.

Hasta este momento este escenario ha sido presentado a manera de consideración en cuanto a desarrollo y contenido a personal de la Gerencia de Ingeniería especializada de la Comisión Federal de Electricidad, y algunos Supervisores de



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

Operación del Centro Nacional Alterno (CENACE), implementando en su contenido las observaciones y sugerencias recibidas.

La siguiente etapa es realizar un programa de difusión mediante sesiones de entrenamiento a los supervisores de operación del Centro Nacional y Centro Nacional Alterno (CENAL/CENALTE).

Es necesario que a manera complementaria se definan estrategias de control para los escenarios correspondientes a las distintas demandas con lo que se complementarían dichas sesiones así como la validación de su eficiencia durante el desarrollo de las mismas.

Para poder justificar la aplicación de las estrategias de control será necesario complementar las acciones mediante un análisis económico de la afectación por estrategia de desconexión de cargas contra la Indisponibilidad por daño en equipos en caso de no aplicar dichas estrategias.

Todo esto puede ser utilizado para continuar con las investigaciones que complementen y sirvan de apoyo para la realización de más sesiones de entrenamiento o bien para otros trabajos de investigación utilizados para tesis.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

**ANEXO 1
LISTA DE ACRONIMOS**

CE: Clima espacial

CENACE: Centro nacional de control de energía

CHIPS: Computadora satelital del espectrómetro de plasma interestelar caliente.

CEV: Compensador estático de potencia reactiva (SVC en inglés).

DST: Disturbance Storm Time (índice de actividad magnética medido en una serie de observatorios)

EMC: Eyección de masa coronal

GIC: Corriente geomagnética inducida, por sus siglas en inglés.

GPS: Sistemas de posicionamiento global.

ISES: International Space Environment Service (Servicio Internacional de Ambiente Espacial)

LANCE: Laboratorio de clima espacial

NASA: Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio.

ONU: Organización de las Naciones Unidas.

SCIESMEX: servicio de clima espacial México.

SEN: Sistema eléctrico nacional.

SEP: Sistema eléctrico de potencia.

SIN: Sistema interconectado nacional

UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México

UNOOSA: Oficina de Asuntos del Espacio Exterior.

WMO: Organización Mundial Meteorológica.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

REFERENCIAS

- [1] D. J. A. G. Esparza, «Hacia el Espacio,» gob.mx, 03 09 2018. [En línea]. Available: <https://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=851>. [Último acceso: 29 05 2019].
- [2] P. T. L. G. a. D. B. Sebastien Guillon, «A Colorful Blackout,» *iee power & energy magazine*, pp. 59-69, 2016.
- [3] R. Netting, «NASA CIENCIA,» NASA, 31 10 2013. [En línea]. Available: https://ciencia.nasa.gov/ciencias-especiales/31oct_minihalloween. [Último acceso: 1 06 2019].
- [4] M. Moldwin, «An Introduction to Space Weather,» *Cambridge University Press*, 2008.
- [5] N. W. Service, «Space Weather Prediction Center,» National Weather Service, [En línea]. Available: <http://www.swpc.noaa.gov/>.
- [6] N. S. Weather, «NOAA Space Weather Scales,» NOAA Space Weather, [En línea]. Available: <http://www.swpc.noaa.gov/NOAAscales/>. [Último acceso: 27 05 2019].
- [7] S. S. TOA, ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LAS CORRIENTES GEOMAGNETICAS INDUCIDAS SOBRE LA RED ELEÉCTRICA DE ESPAÑA, ESPAÑA: ESCUELA DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA UNIVERSIDAD ZARAGOZA, 2017.
- [8] M. M. M. L. a. R. M. G. B. R. Sun, Mitigating geomagnetic disturbances, *IEEE Electríf. Mag*, 2015.
- [9] T. J. O. Q. Q. J. F. K. S. Shetye, «Geomagnetic Disturbance Modeling Results for the AEP System : A Case Study,» *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2013.
- [10] LANCE, «REPORTE SEMANAL,» LANCE SERVICIO DE CLIMA ESPACIAL, 03 01 2019. [En línea]. Available: <http://www.sciesmex.unam.mx/static/media/reportes/2019/01/04/reporte-semanal-clima-espacial-2019-01-03.pdf>. [Último acceso: 28 05 2019].
- [11] A. Arsentiev, «El soplido del viento solar: Las manchas solares, los ciclos solares y la vida en la Tierra,» *Oilfield Review* , pp. 50 - 62, 2013.
- [12] O. d. W. Kyoto, «Centro mundial de datos para el geomagnetismo, Kyoto,» Escuela de Graduados de Ciencias, Universidad de Kyoto, [En línea]. Available: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/201911/index.html. [Último acceso: 23 11 2019].
- [13] A. ESPAÑOLA, «ARMADA ESPAÑOLA,» [En línea]. Available: <http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/cienciaobservatorio/prefLang-es/05Geofisica--02serviciogeomagnetismo>. [Último acceso: 2 11 2019].
- [14] S. W. P. CENTER, «NATIONAL SPACE WEATHER STRATEGY AND ACTION PLAN RELEASED,» [En línea]. Available: <https://www.swpc.noaa.gov/news/national-space-weather-strategy-and-action-plan-released-0>. [Último acceso: 04 05 2019].



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”

- [15] «Geomagnetic Disturbances,» *IEEE Power Energy Mag*, pp. 71-78, 2013.
- [16] S. M. M. Q. J. M. Torta, «Assessing the hazard from geomagnetically induced currents to the entire high-voltage power network in Spain,» *Earth, Planets*, pp. 1-17, 2014.
- [17] G. H. W. B. J. Verner, «IEEE Guide for Establishing Power Transformer Capability while under Geomagnetic Disturbances,» 2015.
- [18] V. D. A. a. J. M. Thorson, «Power system disturbances during a K8 geomagnetic storm,» *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 1025-1030, 1974.
- [19] D. H. Boteler, «Geomagnetically Induced Currents: Present Knowledge and Future Research,» *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 9, pp. 50-58, 1994.
- [20] CENTRO NACIONAL DE CONTROL DE ENERGIA, PROCEDIMIENTO PARA LA PREPARACION DE SESIONES DE CAPACITACION Y/O ENTRENAMIENTO, MEXICO, 2017.
- [21] A. G.-E. C. R. P. M. S. 1. S. L. I. d. G. U. M. U. N. A. d. M. (. 2. C. I. d. G. U. M. (. 3. C. G. Ramón Caraballo1*, «Estimates of Geomagnetically Induced Currents on the Mexican Power Grid,» 2019.
- [22] SENER, PRODESEN 2018 2032, MEXICO, 2018.
- [23] S. d. C. E. México, «Servicio de Clima Espacial México,» GEOFISICA UNAM, [En línea]. Available: <http://www.sciesmex.unam.mx/>. [Último acceso: 1 10 2019].
- [24] N. P. a. R. Midence, «Methods to detect transformer saturation due to Geomagnetic Induced currents (GIC),» *Life of a Transformer Seminar*, pp. 1-10, 2019.
- [25] D. BEDOYA, METODOLOGIA PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN MEDIANTE LA DIVISION DE REDES EN ÁREAS DE CONTROL, COLOMBIA: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2014.
- [26] G. SULLIVAN, «INCREASING POWER SYSTEM SITUATIONAL AWARENESS THROUGH DATA VISUALIZATION,» *Structure Magazine TM*, pp. 2-5, 2012.
- [27] SENER, PROSPECTIVA DEL SECTOR ELECTRICO 2015 - 2029, MEXICO, 2015.
- [28] P. PWC, RESUMEN DEL PROGRAMA DE DESARROLLO DEL SISTEMA ELECTRICO NACIONAL (PRODESEN) 2016-2030, MEXICO, 2016.
- [29] H. R. Lopez, «Simulador avanzado para adiestramiento de operadores de centros de control de energía,» *Boletín IIE*, vol. 20, nº 2, pp. 51-53, 1996.
- [30] J. S. Forcada, «El enigmático ciclo de actividad del Sol,» *Revista Astronómica*, pp. 30-37, 2013.
- [31] M. H. S. a. G. R. Caredot, «Tormentas geomagnéticas y evaluación de su impacto en el ámbito de las tecnologías e infraestructuras en España y Portugal,» *Seguridad y medio ambiente*, pp. 18-34, 2014.
- [32] D. Boteler, «Geomagnetic Effects on Power Systems,» *IEEE Electrification magazine*, pp. 4-7, 2015.



“EFECTOS Y ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ANTE EVENTOS SOLARES INTENSOS EN LA RED ELÉCTRICA NACIONAL, UTILIZANDO RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULADORES DE GIC’S Y FLUJOS DE POTENCIA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN SESIONES DE ENTRENAMIENTO PARA OPERADORES”
