

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ANÁLISIS DEL SOBREVOLTAJE DE MANIOBRA EN LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN SANTO DOMINGO – ESMERALDAS A 230 kV

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

LUIS ANDRÉS JARA MORALES

DIRECTOR: DR.-ING. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI

DMQ, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Luis Andrés Jara Morales, declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Luis Andrés Jara Morales

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por LUIS ANDRÉS JARA MORLES, bajo mi supervisión.

Dr.-Ing. Fabián Ernesto Pérez Yauli
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como los productos resultantes del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

LUIS ANDRÉS JARA MORALES

DR.-ING. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI

DEDICATORIA

“No a nosotros, oh YHWH, no a nosotros, sino a tu nombre da gloria, por tu misericordia, por tu verdad.”

Salmo 115:1

Y a quienes pueda beneficiar directa o indirectamente este trabajo, pues la razón de vivir es conocerle, y que esto sea evidente en las obras.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a YHWH, Dios, Padre y Rey de todo cuanto soy y conozco. Por su incansable aliento en cada paso. Por su mano extendida en cada caída. Y su fuerza en cada victoria. A Aquel que me conoce y ama tan profundamente que no creo llegar a comprender ni en el último de mis días.

A mis padres Mónica y Luis, mi hermano Edwin, mi cuñada Karen y a amigos por su apoyo constante.

A mis primos por ser ese lugar de alegría y sosiego, y a toda mi familia.

Al pastor Robin Contreras por siempre estar pendiente de mí y mi familia.

Al Dr.-Ing. Fabián Pérez por su consejo, dirección y sobre todo por el gran ejemplo de persona y de profesional que me ha brindado a mí y a todos cuantos conozco.

Al Msc.-Ing. Luis Dután por su paciencia, guía y consejo a lo largo de este trabajo.

Y profundamente gracias a Zoe y Emmanuel, por ser el motivo visible de todo esfuerzo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ALCANCE	2
1.4 MARCO TEÓRICO.....	3
2 METODOLOGÍA.....	19
2.1 ESTRUCTURA.....	19
2.2 DESCRIPCIÓN GENERAL	20
2.3 DESCRIPCIÓN ESPECÍFICA	20
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	24
3.1 RESULTADOS.....	24
3.2 CONCLUSIONES.....	42
3.3 RECOMENDACIONES	43
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
5 ANEXOS.....	47
ANEXO I.....	48
ANEXO II.....	50

RESUMEN

Las redes eléctricas experimentan constantes cambios en su topología debido a la conexión y desconexión de equipos o circuitos que la conforman. Estos cambios provocan eventos transitorios en el comportamiento normal del sistema y que, a su vez pueden producir daños a corto o largo plazo en los equipos que los experimentan. Un caso de estos transitorios es el producido por maniobra o conmutación de líneas de transmisión, lo cual provoca sobrevoltajes y corrientes elevadas que ponen a prueba la soportabilidad de los elementos de protección y maniobra de las bahías de las subestaciones que conectan las líneas, es decir, pararrayos, interruptores, etc.

El presente Trabajo de Integración Curricular tiene la finalidad de proporcionar un recurso que sirva de criterio para la toma de decisiones sobre la operación de líneas de transmisión como elementos de compensación frente a escenarios de demanda pico, mediante el modelamiento y simulación de posibles casos de esta maniobra en el software ATP/EMTP de uno de los circuitos de la línea de transmisión de doble circuito Santo Domingo – Esmeraldas a 230 kV. Los resultados de estas simulaciones se comparan con las propiedades de soportabilidad y los requerimientos de normas asociadas a los equipos de interés en estas maniobras, es decir: interruptores, seccionares by-pass y pararrayos de la bahía de línea de una o ambas subestaciones; para así identificar si alguno de estos equipos no está diseñado para este tipo de operación.

PALABRAS CLAVE: ATP/EMTP, TRV, Sobrevoltaje, Maniobra, Soportabilidad, Línea en Vacío.

ABSTRACT

Electrical networks experience constant changes in their topology due to the connection and disconnection of equipment or circuits that comprise it. These changes cause transient events in the normal behavior of the system and, in turn, can cause short-term or long-term damage to equipments that experience them. One case of these transients is produced by switching no-load transmission lines, which causes overvoltages and high currents that test the supportability of protection and switching elements from bays of the substations these lines connect, for example surge arresters, circuit breakers, and so on.

The purpose of this Curriculum Integration Work is to provide a resource that serves as a criterion for decision-making on the operation of transmission lines as compensation elements against peak demand scenarios, through the modeling and simulation of possible cases of this maneuver in the ATP/EMTP software of one of the circuits of the 230 kV Santo Domingo – Esmeraldas double circuit transmission line. The results of these simulations are compared with the support properties and the requirements of standards associated with the equipment of interest in these maneuvers, that is: switches, by-pass disconnectors and line bay surge arresters of one or both substations; in order to identify if any of this equipment is not designed for this type of operation.

KEYWORDS: ATP/EMTP, TRV, Overvoltage, Switching, Capability, No-load line.

1 INTRODUCCIÓN

El componente que será desarrollado abarca todo el Proyecto de Trabajo de Integración Curricular, es decir que contempla la recopilación de información asociada a transitorios por maniobra, su modelamiento y simulación en el programa ATP/EMTP, y el respectivo análisis de los resultados obtenidos.

Para este fin es importante conocer previamente que, para controlar el voltaje en la subestación Esmeraldas, el operador nacional del sistema eléctrico solicitó a CELEC EP TRANSELECTRIC la disponibilidad para que uno de los circuitos de la línea de transmisión Santo Domingo – Esmeraldas 230 kV sea empleado como elemento de compensación capacitivo, energizado únicamente desde la subestación Esmeraldas, lo cual permitió mantener perfiles de voltaje adecuados en este nodo del Sistema Nacional de Transmisión ecuatoriano. Ante esta condición operativa y al realizar las maniobras de eventual apertura en vacío de este circuito (ya como elemento de compensación), y posterior cierre para restablecimiento del mismo, se ha registrado que el pararrayos de esta bahía realiza el conteo de operaciones por sobrevoltaje, razón por la cual se suspendió esta forma de operación y, adicionalmente, se originó la necesidad de un estudio que indique si es adecuado o no emplear un circuito de esta línea como compensador capacitivo; lo cual implica:

- Definir si la capacidad del pararrayos logrará soportar la energía que está disipando.
- Determinar si la curva característica de soportabilidad del interruptor permitirá operar de forma correcta ante la maniobra descrita.
- Establecer si la distancia en aire del seccionador by-pass es suficiente para que no se produzca un arco sostenido entre sus polos durante la realización de la maniobra.

Estos puntos a ser estudiados contribuirán como elementos referenciales para definir si esta forma de operación de la línea Santo Domingo – Esmeraldas 230 kV no representa un riesgo para el normal funcionamiento del sistema, ya que un caso real de una maniobra similar tomó lugar al realizar la apertura de una de las líneas Pomasqui-Jamondino, dónde un arco sostenido en aire, se produjo en el seccionador by-pass energizando nuevamente a la línea, lo que provocó el disparo de las barras de 230 kV de la subestación Pomasqui.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio de sobrevoltajes de maniobra en la bahía de línea hacia Santo Domingo de 230 kV de la subestación Esmeraldas, a través de simulación en ATP/EMTP que permita determinar si es posible usar esta línea de transmisión como compensador de potencia reactiva.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar un análisis bibliográfico que permita un adecuado modelamiento y simulación de la subestación Esmeraldas y la línea de transmisión hacia Santo Domingo para el estudio de sobrevoltajes de maniobra.
2. Analizar el sobrevoltaje en el pararrayos de la bahía Santo Domingo 230 kV perteneciente a la subestación Esmeraldas después de la operación de maniobra para determinar si ésta es la causa de la operación del pararrayos.
3. Determinar la energía que es disipada por el pararrayos en la operación de maniobra, a fin de que se pueda concluir si corresponde con su capacidad de diseño.
4. Determinar si la distancia mínima en aire del seccionador by-pass y la soportabilidad del interruptor de línea ante la operación de apertura en vacío es la adecuada para evitar que se genere un arco eléctrico sostenido.

1.3 ALCANCE

El alcance de este componente comprende en primera instancia el análisis de información bibliográfica obtenida de papers, libros y demás literatura técnica acerca de sobrevoltajes de maniobra por apertura y cierre de interruptores de potencia.

Se realizará la modelación y simulación del sistema eléctrico bajo análisis ante maniobras de cierre y apertura en el software ATPDraw. Sobre el sistema modelado se realizará el análisis comparativo de sobrevoltajes debido a la conexión de la línea de transmisión Esmeraldas – Santo Domingo y se determinará su afectación al pararrayos de línea asociado. En caso de que el pararrayos actúe, se analizará la energía disipada y, con base a datos del fabricante, se determinará si el descargador actual es capaz de soportar ese manejo de energía.

En lo que se refiere a apertura de la línea de transmisión operando en vacío, se analizará el Voltaje Transitorio de Recuperación (TRV), tanto para el interruptor como para el seccionador by-pass, obtenido en condiciones de extinción ideal de corriente, es decir en un cruce por cero, y se comparará con la curva de soportabilidad del interruptor actual y con las distancias en aire del seccionador by-pass.

1.4 MARCO TEÓRICO

En este apartado se encuentran los fundamentos y conceptos teóricos que sirvieron de base para la realización de este estudio, tales como, las características de los sobrevoltajes provocados por maniobra, la conmutación de líneas sin carga y la capacidad de ciertos equipos para soportar estas operaciones.

1.4.1 SOBREVOLTAJE DE MANIOBRA

De forma relativamente frecuente los sistemas eléctricos experimentan cambios en su topología debido a la presencia de fallas o maniobras, los cuales generan eventos llamados transitorios, y que como su nombre lo indica, son sucesos con cierto tiempo de duración en el cual se presenta un comportamiento anormal en las variables eléctricas del sistema, hasta que éste último alcance un nuevo estado estable de operación. De manera que, la literatura técnica ha clasificado a estos eventos de 3 formas: según su origen, según el modo en que se genera y según su frecuencia [1].

- Según el origen del transitorio: pueden ser causados por descargas atmosféricas o por maniobras realizadas en el sistema, es decir, operaciones de conmutación, las cuales a su vez pueden darse por cierres o aperturas programadas, rechazo de carga o despeje de fallas.
- Según el modo de generación del transitorio: se tienen dos formas de producción de los transitorios.
 - Transitorios Electromagnéticos: son aquellos generados por la interacción entre los campos eléctricos de las capacitancias y los campos magnéticos de las inductancias de los sistemas.
 - Transitorios Electromecánicos: son aquellos generados por la interacción entre la energía eléctrica almacenada en el sistema y la energía mecánica acumulada en la inercia de las máquinas rotativas del sistema.

- Según la frecuencia: dependiendo de la frecuencia que presenten los transitorios se los agrupa en 4 rangos, como se puede observar en la Tabla 1.1, donde también se incluyen los eventos principales que los generan [1].

Tabla 1.1 Clasificación de transitorios según su frecuencia [1]

Forma de onda	Rango de Frecuencia	Eventos Representativos
Oscilaciones de baja frecuencia	0.1Hz - 3kHz	Sobrevoltajes temporales
Ondas de frente lento	50/60Hz - 20kHz	Sobrevoltajes por maniobra
Ondas de frente rápido	10kHz - 3 MHz	Sobrevoltajes por descarga
Ondas de frente muy rápido	100kHz - 50MHz	Sobrevoltajes por reencendido

Como se puede ver en la tabla anterior los sobrevoltajes de maniobra, en los cuales se centrará este trabajo, presentan ondas de frente lento, las cuales se producen por:

- Energización y re-energización de líneas.
- Fallas y su respectivo despeje.
- Rechazo de carga.
- Conmutación de circuitos capacitivos e inductivos.
- Descargas distantes al conductor de líneas aéreas.

En este estudio se tomarán en cuenta dos de las causas mencionadas para los sobrevoltajes de maniobra: la energización o conexión de líneas y la conmutación de circuitos capacitivos [1].

1.4.2 CONEXIÓN DE LÍNEAS Y DESCONEXIÓN DE LÍNEAS SIN CARGA

Las líneas de transmisión tienen capacitancias entre fases, y entre cada fase y tierra debido a las diferencias de voltaje existentes entre cada una de éstas, razón por la cual las líneas sin carga o en vacío se consideran circuitos capacitivos [2].

La conmutación de líneas en vacío tiene un comportamiento transitorio capacitivo, tanto en voltaje como en corriente, lo cual puede provocar [2]:

- Degradación del aislamiento y posible falla del equipamiento de la subestación.
- Operación de pararrayos.
- Interferencia en el cableado de control de la subestación.

- Incremento de potenciales de paso en la subestación.
- Disparos no deseados o daño en equipo electrónico sensible.

También se debe indicar que la razón por la que la maniobra de circuitos capacitivos produce sobrevoltajes de frente lento, es la interrupción de corrientes capacitivas, las cuales se encuentran desfasadas del voltaje aproximadamente 90° , es decir, que al interrumpir la corriente en el cruce por cero, el voltaje se encuentra en el pico de su onda, lo que produce un transitorio [3].

1.4.2.1 Conexión de líneas de transmisión

Cuando se conecta una línea a un sistema energizado se impone una onda de voltaje sobre ésta, la cual será reflejada a su terminal lejano, y si éste se encuentra abierto, la onda reflejada será del doble de la amplitud, como se muestra en la Figura 1.1.

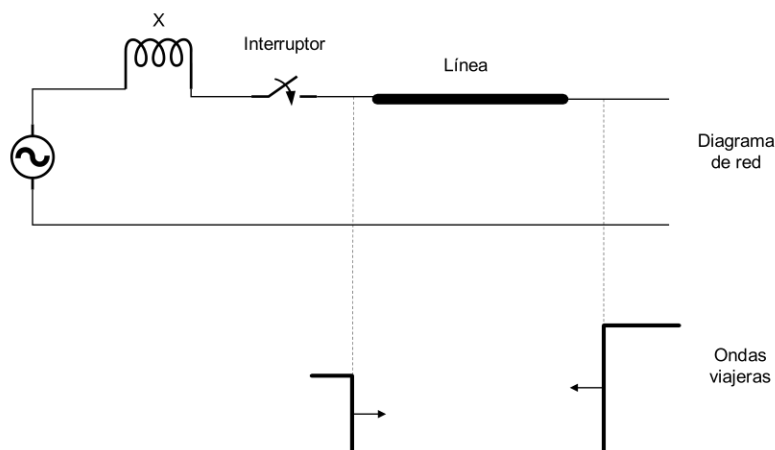


Figura 1.1. Onda reflejada por energización de línea sin carga [2].

La onda reflejada de la Figura 1.1 puede ser más elevada si la línea tuvo carga atrapada previo a su energización, ya que el voltaje de la línea podría tener polaridad opuesta al del sistema [2].

1.4.2.2 Desconexión de líneas de transmisión sin carga

Partiendo del comportamiento capacitivo de las líneas en vacío, la apertura de dichas líneas implica la interrupción de corrientes capacitivas, para lo cual se considera la corriente de carga, la cual depende de la capacitancia entre las fases de la línea. Una representación general de una línea sin carga se puede observar en la Figura 1.2 [2].

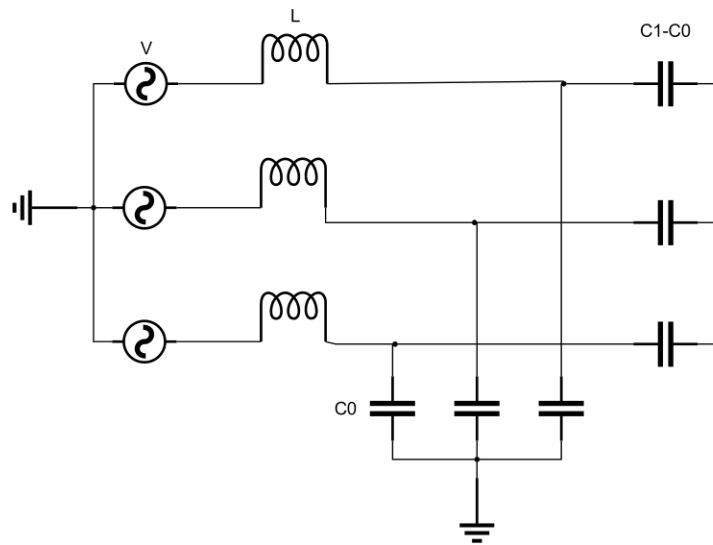


Figura 1.2. Circuito general de línea sin carga [2].

La figura anterior puede tomarse como referencia para el análisis del voltaje de recuperación que se presenta durante la apertura de este tipo de circuitos en cada una de sus fases [2].

El voltaje de recuperación aparece entre los polos del disyuntor después de la interrupción y se puede entender como 2 intervalos consecutivos, primero en donde existe un voltaje transitorio, y a continuación aparece un voltaje a frecuencia de red [4], como se muestra en la Figura 1.3.

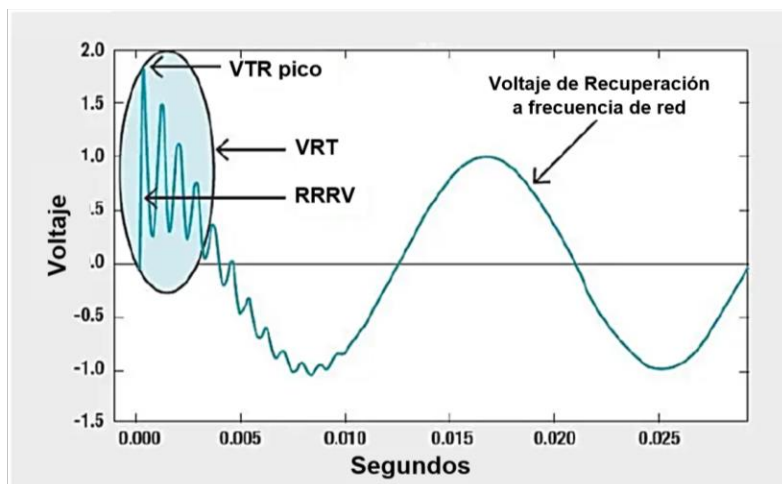


Figura 1.3. Partes del Voltaje de Recuperación [5]

La Figura 1.3 permite observar que el voltaje transitorio tiene un pico más elevado que el voltaje de frecuencia de red, razón por la cuál es estudiado en mayor detalle a continuación.

1.4.2.2.1 Voltaje Transitorio de Recuperación

El Voltaje Transitorio de Recuperación (VTR) o TRV por sus siglas en inglés (Transient Recovery Voltage) es la diferencia de voltajes existente entre el lado de la fuente y el lado de la carga del disyuntor, como respuesta a la separación de sus polos.

Las características que el TRV presenta, como su forma de onda, amplitud y duración, dependen del tipo de circuito interrumpido, es decir, si éste es resistivo, inductivo, capacitivo o alguna mezcla de estos, como se muestra en la Tabla 1.2 [6].

Tabla 1.2 TRV típicos bajo condiciones normales de operación [6].

Caso		Circuito	Onda de TRV
Cargas normales			
Reactores shunt			
Transformador sin carga			
Bancos de capacitores, líneas sin carga y cables	Capacitancias aterrizadas		
	Capacitancias no aterrizadas		

La Tabla 1.2 resume brevemente las formas de onda que puede presentar el TRV según el circuito que lo origine en condiciones normales de operación o sin fallas, siendo los casos de mayor amplitud los que se asocian a desconexión de elementos capacitivos [6].

La forma de onda de un TRV también está en función del tipo de falla que lo origina, como se muestra en las Figura 1.4, 1.5 y 1.6 [4].

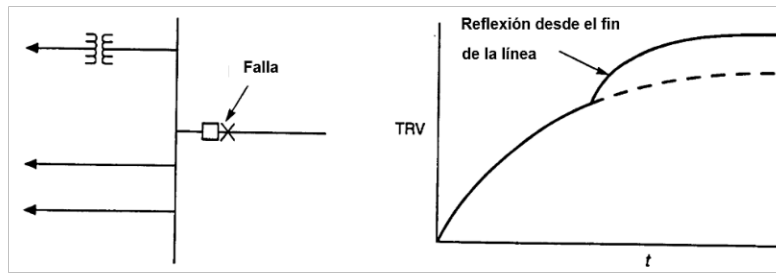


Figura 1.4. Característica del TRV exponencial

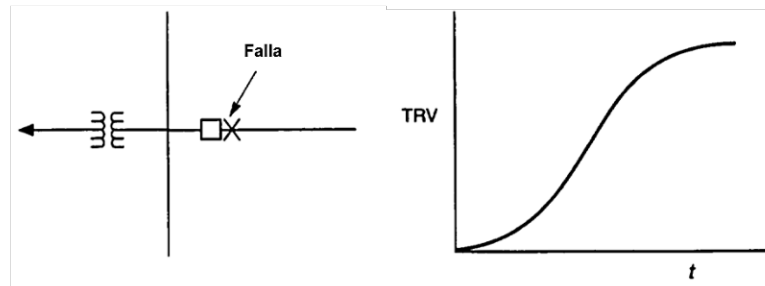


Figura 1.5. Característica del TRV oscilatorio

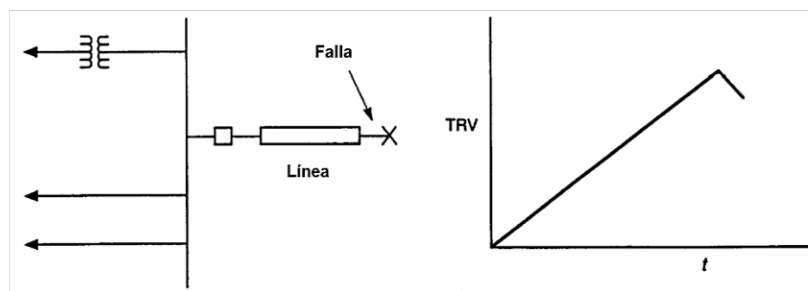


Figura 1.6. Característica del TRV triangular

Como se puede observar en la Figura 1.4, los TRV exponenciales usualmente se originan cuando al menos una línea y un transformador se encuentran del lado no fallado al despejar una falla trifásica en los terminales del interruptor. Por otro lado, la Figura 1.5 muestra que los TRV de forma oscilatoria típicamente se producen cuando la falla terminal es limitada por un elemento inductivo, como un reactor en serie o transformador, y en ausencia de un cable o línea que amortigüen la onda. Y la Figura 1.6 permite ver que los TRV triangulares generalmente son provocados por fallas de línea corta. Cabe indicar que el caso de los de tipo oscilatorio y exponencial, los voltajes de recuperación más severos tienden a ocurrir en el primer polo en abrirse de un disyuntor que se encuentra despejando una falla trifásica terminal, cuando el voltaje del sistema está en su pico [4].

Si el TRV de un circuito supera el límite de la envolvente se pueden precisar algunas opciones [4]:

- Se usa un interruptor de mayor voltaje nominal.
- Se usa un interruptor de mayor corriente de cortocircuito nominal.
- Se conectan capacitores a la línea, a la barra o a alguno de los lados del interruptor, o ambos, para disminuir el TRV del sistema.

1.4.3 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS

Dado que los equipos de las subestaciones que experimentan estos transitorios son elementos con limitaciones físicas reales, a continuación, se mencionan aquellas asociadas a la parte eléctrica de los elementos del sistema bajo análisis.

1.4.3.1 Interruptor de potencia

El disyuntor o interruptor de potencia es el elemento de conmutación mecánico encargado de establecer, sostener y cortar corrientes bajo condiciones normales del circuito y, durante cierto tiempo, en condiciones anormales, por ejemplo, un cortocircuito. Estas funciones se emplean para aislar o conectar un equipo o circuito al sistema, a través del movimiento de sus polos.

Un interruptor ideal presenta las siguientes características frente a sus estados de operación:

- Cerrado: Actúa como conductor que soporta corrientes menores o iguales a la de cortocircuito nominal y que también puede interrumpirlas de forma rápida y segura.
- Abierto: Actúa como aislante que soporta el voltaje entre sus contactos, el voltaje a tierra y a otras fases. Además, puede cerrar de forma rápida y segura en condiciones de carga o inclusive en cortocircuito.

Por otra parte, un interruptor real experimenta la formación de un arco eléctrico después de que sus contactos empiezan a separarse, y normalmente se extingue cuando la corriente cruza por cero. La extinción del arco se acompaña de un mecanismo que lo alargue para aumentar su resistencia y limitar su corriente [6]. Este mecanismo o tecnología empleada para la extensión del arco depende del tamaño, rango y aplicación del interruptor, como se muestra en la Figura 1.7.

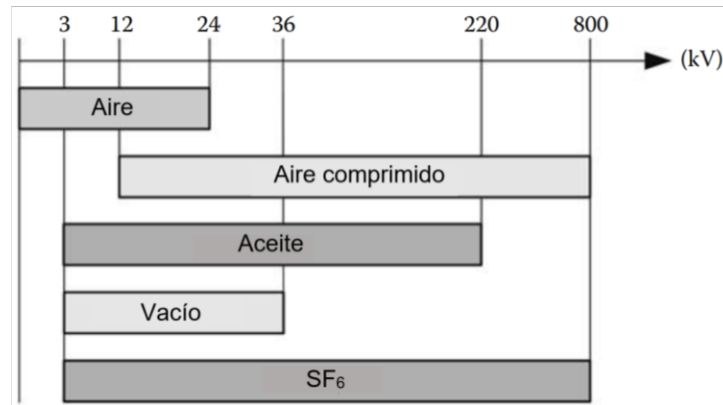


Figura 1.7. Tecnologías de corte según su rango de voltaje [6]

La Figura 1.7 permite notar que el medio de extinción con un rango más amplio es el SF₆, un gas de características apropiadas para aplicaciones de aparamenta [6].

1.4.3.1.1 Curva de soportabilidad frente a TRV

Uno de los escenarios que pone a prueba la capacidad de corte del interruptor es la desenergización de circuitos o equipos, de manera que la apertura es considerada exitosa si el disyuntor es capaz de soportar el TRV y el voltaje de recuperación a frecuencia de red [4].

El criterio para establecer la capacidad del disyuntor con respecto a la soportabilidad de este transitorio, se encuentra en la comparación del TRV con la curva de soportabilidad del disyuntor. Esta curva es una envolvente construida con 2 o 4 parámetros dependiendo del nivel de voltaje del sistema y si se encuentra aterrizado o no, como se muestra en las Figura 1.8.

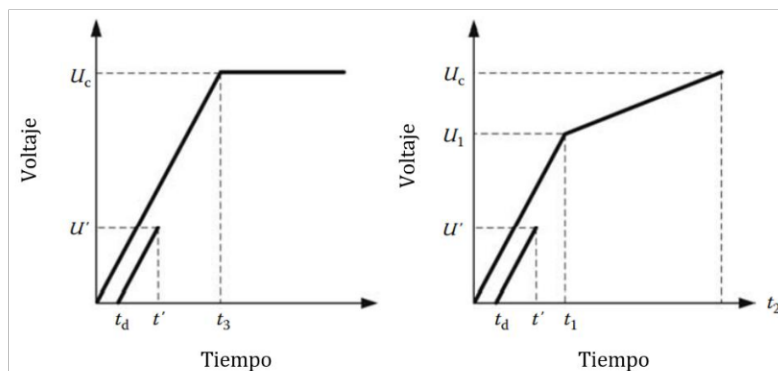


Figura 1.8. Curvas de soportabilidad del interruptor de 2 y 4 parámetros [6]

La figura anterior muestra las envolventes de 2 y 4 parámetros del interruptor, las cuales deben ser mayores que la del TRV provocado en el circuito para que se considere que el disyuntor soporta la onda originada por esa maniobra o falla.

Los parámetros de estas envolventes han sido determinados por pruebas realizadas en líneas, las cuales consisten en la aplicación de un tipo de falla a voltaje máximo del sistema, por ejemplo, la Figura 1.9 muestra los parámetros para un interruptor, obtenidos de la aplicación de fallas terminales a voltaje máximo en sistemas aterrizados [7].

Standard values of TRV represented by four parameters (test duties T100, T60) and two parameters (test duties T30, T10).												
Line No.	Rated maximum voltage (1) U_r kV, rms	Test duty	Amplitude factor k_{af} p.u.	First reference voltage u_1 kV	Time t_1 μ s	TRV peak value (4) (8) u_c kV	Time (2) t_2 μ s	Time t_3 μ s	Time delay (5) t_d μ s	Voltage u' kV	Time (5) t' μ s	RRRV u_1/t_1 or u_c/t_3 kV/ μ s
	Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11	Col 12
1	123	T100	1.40	98	49	183	196	—	2 [14]	49	27 [8]	2
2	123	T60	1.50	98	33	196	99	—	2 [10]	49	18 [26]	3
3	123	T30	1.54 (7)	—	—	201	—	40	6	67	19	5
4	123	T10	1.76 (7)	—	—	230	—	33	5	77	16	7
5	145	T100	1.40	115	58	215	232	—	2 [16]	58	31 [45]	2
6	145	T60	1.50	115	38	231	114	—	2 [12]	58	21 [31]	3
7	145	T30	1.54 (7)	-	-	237	-	47	7	79	23	5
8	145	T10	1.76 (7)	-	-	272	-	39	6	91	19	7
9	170	T100	1.40	135	68	253	272	—	2 [19]	68	36 [53]	2
10	170	T60	1.50	135	45	271	135	—	2 [14]	68	25 [36]	3
11	170	T30	1.54 (7)	—	—	278	—	56	8	93	27	5
12	170	T10	1.76 (7)	—	-	320	—	46	7	106	22	7
13	245	T100	1.40	195	98	364	392	—	2 [7]	98	51 [76]	2
14	245	T60	1.50	195	65	390	195	-	2 [20]	98	35 [52]	3
15	245	T30	1.54 (7)	—	-	400	-	80	12	133	39	5
16	245	T10	1.76 (7)	—	-	459	-	66	10	153	32	7
17	362	T100	1.40	288	144	538	576	—	2 [40]	144	74 [112]	2
18	362	T60	1.50	288	96	576	288	—	2 [29]	144	50 [77]	3
19	362	T30	1.54 (7)	—	—	592	—	118	18	197	57	5
20	362	T10	1.76 (7)	—	-	676	-	97	15	226	47	7

Figura 1.9. Valores preferidos de TRV para interruptores de 1000 V y superiores en sistemas efectivamente aterrizados [7].

En la Figura 1.9 se puede notar que, dependiendo del esfuerzo de la prueba, es decir, del porcentaje de la corriente de cortocircuito en falla terminal (T100, T60, T30 y T10), se tienen diferentes valores para cada parámetro.

De acuerdo con evaluaciones de varias configuraciones de sistemas actuales, se dibuja la envolvente con 2 parámetros en interruptores con voltajes menores a 100 kV para todo rango de corriente. También se emplea la envolvente de 2 parámetros para voltajes mayores o iguales a 100 kV pero con corrientes entre el 10% y 30% de la corriente de falla de terminal. Mientras que la curva de 4 parámetros se emplea para niveles de voltaje mayores o iguales a 100 kV con corrientes de despeje mayores al 30% de la corriente de falla de terminal [4].

Cabe mencionar que los parámetros con los que se construyen las envolventes consideran que el interruptor es ideal, es decir no existe la formación de arco y por tanto no afecta la forma del TRV.

Adicionalmente, se debe indicar que se considera que los sistemas con voltajes superiores a 170 kV se operan efectivamente aterrizados, mientras que los interruptores de sistemas con voltajes entre 100 kV y 170 kV se considera que pueden operar efectivamente aterrizados o no aterrizados, y por último que los sistemas con voltajes menores a 100 kV son operados no aterrizados. Los sistemas efectivamente aterrizados emplean un factor de despeje de primer polo (k_{pp}) de 1.3 y los no aterrizados un k_{pp} de 1.5 [4].

El factor de despeje de primer polo contempla que la primera fase en ser despejada presenta un voltaje más elevado que en sus dos restantes, razón por la cual este factor se emplea en el cálculo del voltaje pico de las envolventes de soportabilidad (u_c), como se muestra en la ecuación 1.1.

$$u_c = k_{af} \cdot k_{pp} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_r \quad (1.1)$$

Donde k_{af} es el factor de amplitud transitorio y U_r es el voltaje rms máximo nominal del sistema [7].

1.4.3.2 Seccionador

Los seccionadores de alto voltaje son equipos electromecánicos usados para la conexión y desconexión sin carga de dos circuitos o elementos del sistema. Al igual que el disyuntor, el seccionador funciona como un elemento aislante entre dos partes del sistema, pero con la diferencia de que utiliza únicamente la separación en aire entre sus polos para ello [8].

Los seccionadores se pueden clasificar según su rango de aislamiento, estos pueden ser de Gamma I o Gamma II. Los equipos de Gamma I son diseñados para soportar el voltaje de tipo impulso y el voltaje de corta duración a frecuencia industrial, mientras que los de Gamma II deben soportar el voltaje de tipo maniobra aparte del voltaje de tipo impulso [9]. Estos rangos están diferenciados por el nivel de voltaje que manejan los equipos, como se muestra en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Voltajes soportados para equipos de Gamma I [10].

Voltaje más elevado para el material V_m kV (valor eficaz)	Voltaje soportado normalizado de corta duración a frecuencia industrial kV (valor eficaz)	Voltaje soportado normalizado a los impulsos tipo rayo kV (valor cresta)
3.6	10	20
		40
7.2	20	40
		60

Voltaje más elevado para el material V_m kV (valor eficaz)	Voltaje soportado normalizado de corta duración a frecuencia industrial kV (valor eficaz)	Voltaje soportado normalizado a los impulsos tipo rayo kV (valor cresta)
12	28	60
		75
		95
17.5	38	75
		95
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
52	95	250
72.5	140	325
100	150	380
	185	450
123	185	450
	230	550
145	185	450
	230	550
	275	650
170	230	550
	275	650
	325	750
245	275	650
	325	750
	360	850
	395	950
	460	1050

La capacidad para soportar un grupo de voltajes (tipo impulso y a frecuencia industrial) definen el nivel de aislamiento del seccionador.

La distancia en aire que funciona como aislamiento de los seccionadores depende del nivel de voltaje y rango o gamma del equipo como se muestra en la Tabla 1.4 [9].

Tabla 1.4 Voltajes soportados para equipos de Gamma I [9].

Voltaje soportado estándar de impulso tipo rayo kV	Espacio mínimo Mm	
	Varilla-estructura	Conductor-estructura
20	60	

Voltaje soportado estándar de impulso tipo rayo kV	Espacio mínimo Mm	
	Varilla-estructura	Conductor-estructura
40	60	
60	90	
75	120	
95	160	
125	220	
145	270	
170	320	
200	380	
250	480	
325	630	
380	750	
450	900	
550	1100	
650	1300	
750	1500	
850	1700	1600
950	1900	1700
1050	2100	1900
1175	2350	2200
1300	2600	2400
1425	2850	2600
1550	3100	2900
1675	3350	3100
1800	3600	3300
1950	3900	3600
2100	4200	3900

La Tabla 1.4 permite reconocer que para cada voltaje soportado por tipo impulso, se tienen dos distancias mínimas que el seccionador debe mantener para evitar la producción de arcos, la distancia entre varilla y estructura, y entre varilla y conductor. Cabe mencionar que se toma en cuenta al voltaje de tipo impulso para marcar la distancia mínima de separación, porque representa un mayor esfuerzo de aislamiento para el seccionador, ya que es más elevado que el de corta duración a frecuencia industrial y por ende la separación es más rigurosa [9].

Para cumplir con la separación de aislamiento requerida, los seccionadores son fabricados con distintos modelos de operación horizontal o vertical, tales como:

- De cuchillas giratorias.

- De cuchillas deslizantes.
- De columnas giratorias.
- Pantógrafo.
- Semipantógrafo.

Uno de los usos que se le da al seccionador, es como un equipo que pueda proveer un camino de corriente alterno al del disyuntor dentro de la configuración de elementos de una subestación, este seccionador se conoce como by-pass, y dado que se encuentra en paralelo con el disyuntor, experimentará el mismo voltaje que este [11].

1.4.3.3 Pararrayos

El pararrayos o supresor de rayos es un elemento de protección frente a sobrevoltajes de maniobra o tipo rayo que se conecta en paralelo con los equipos que se desee salvaguardar de estos transitorios.

El pararrayos de la bahía de línea de una subestación actúa como elemento de protección para los demás equipos de ésta, al derivar parte de la onda de sobrevoltaje a tierra y dejando pasar el nivel de voltaje esperado para su normal funcionamiento. [12]

En la actualidad, los pararrayos son fabricados de carburo de silicio (SiC) o de óxido de zinc (ZnO), siendo este último el más común debido a que su material tiene un importante comportamiento no lineal frente al voltaje. El principio de funcionamiento de estos pararrayos se resume de forma visible en la Figura 1.10 [6].

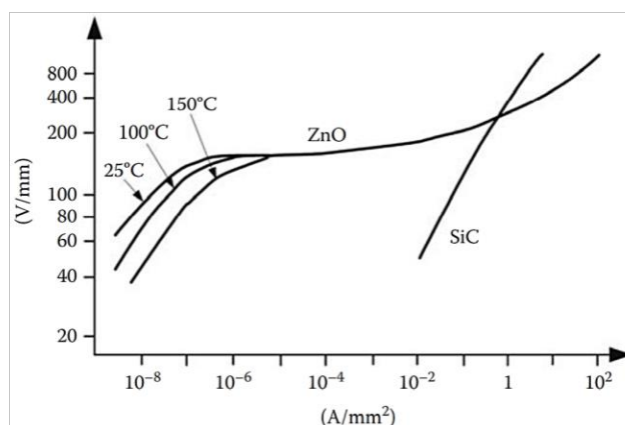


Figura 1.10. Característica V-I de pararrayos de ZnO y SiC [6].

Como se puede observar la característica de V-I del ZnO presenta una curva con mayor no linealidad que la correspondiente al SiC, razón por la cual este material se encuentra en más aplicaciones [6].

La curva característica del ZnO se puede observar en la Figura 1.11 marcada por regiones en las que el pararrayos tiene distintos comportamientos debido al material que lo compone.

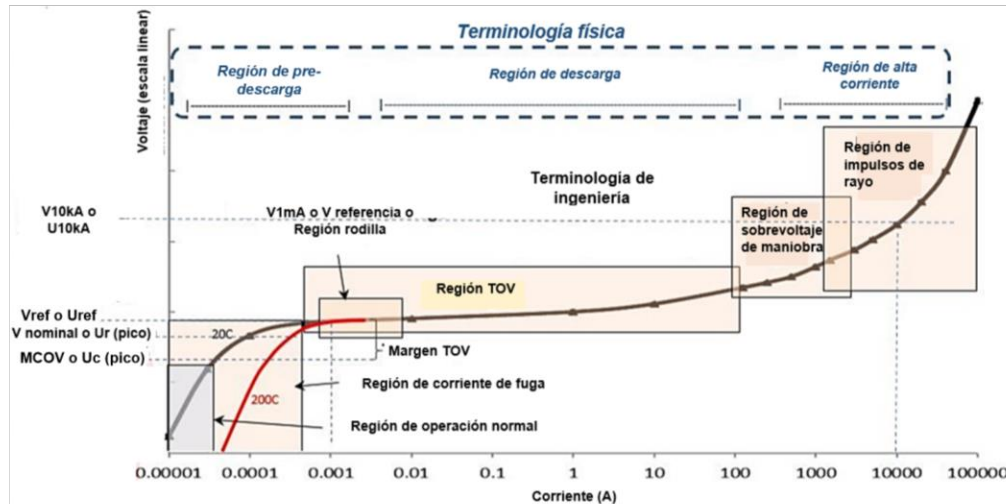


Figura 1.11. Regiones de la curva característica V-I [13].

Se puede notar en la figura anterior que las regiones o zonas están delimitadas por el voltaje y la corriente que experimenta el pararrayos de ZnO que se comporta como un varistor sensible al voltaje. En la primera zona o región, de pre-descarga, el pararrayos se comporta como una resistencia muy alta, es decir prácticamente un circuito abierto que permite el paso de corrientes en el orden de micro amperios hasta 1 mA. Por otro lado, en la región de descarga o no linealidad, el pararrayos decremента su resistividad a medida que aumenta el voltaje; debido a que frente a altas variaciones (de 1 mA a 1000 A) de corriente el voltaje varía muy poco. Finalmente, la región de alta descarga se caracteriza por las altas corrientes (de 1 kA a 100 kA) que experimenta el pararrayos pudiendo incluso llegar a su destrucción [13].

En la Figura 1.11 también se pueden observar valores característicos que se consideran como referencias o límites para pasar de una región de funcionamiento a otra. Algunos de estos valores son:

- Voltaje Máximo de Operación (MCOV): Es el valor rms permitido de voltaje a frecuencia de red que puede ser aplicado de forma continua en el pararrayos.
- Voltaje de referencia (V_{ref} o U_{ref}): Es el voltaje DC medio de un pararrayos medido cuando se aplica la corriente DC de referencia sumado al voltaje pico a frecuencia de red dividido para $\sqrt{2}$.

- Voltaje nominal (V_r o U_r): Es el valor rms máximo permitido de voltaje a frecuencia designado para la operación correcta en condiciones de sobrevoltajes temporales (Temporary Overvoltages - TOV).
- Voltaje residual (V_{res} o U_{res}): Valor pico de voltaje que aparece en los terminales del pararrayos durante el paso de corriente de descarga [14].

Como elemento de monitoreo del pararrayos usualmente se adiciona a este equipo un dispositivo contador de descargas, que puede ser de funcionamiento analógico o digital como el que se muestra en la Figura 1.12.



Figura 1.12. Contador de descargas análogo [15].

La Figura 1.12 permite ver que, de forma general este dispositivo muestra la corriente de fuga dentro de un cierto rango, usualmente en el orden de los miliamperios, y adicionalmente, lleva un conteo de las veces que la corriente del pararrayos ha superado un valor referencial, con lo que considera que se ha realizado una derivación o descarga a tierra [15].

Como consecuencia de que el pararrayos experimenta diversas elevaciones de voltajes y corrientes, ya que sus formas de onda dependen del evento que los originó, también deberá soportar el manejo de la energía asociada a estos. De manera que, la energía que puede disipar un pararrayos durante un sobrevoltaje, conocida como capacidad de soportabilidad de energía, se expresa en kJ/kV; ya que depende de la magnitud, forma de onda y duración del sobrevoltaje. Este dato suele ser el único publicado por los fabricantes, aunque no expresa un criterio de manejo de energía como tal, solamente la soportabilidad frente a un sobrevoltaje específico, como se observa en la Tabla 1.5. Esto se debe principalmente a que no hay pruebas estandarizadas del manejo de energía para los pararrayos [6].

Tabla 1.5 Capacidad de soportabilidad de energía en pararrayos ABB [16].

Tipo de pararrayos	Clase de descarga de línea	Capacidad de energía (2 impulsos) kJ/kV (Ur)	Rango normal de aplicación (Um)
EXLIM R	2	5	≤170 kV
PEXLIM R	2	5.1	≤170 kV
EXLIM Q	3	7.8	170 - 420 kV
PEXLIM Q	3	7.8	170 - 420 kV
EXLIM P	4	10.8	362 - 550 kV
PEXLIM P	4	12	362 - 550 kV
HS PEXLIM P	4	10.5	362 - 550 kV
EXLIM T	5	15.4	420 - 800 kV
HS PEXLIM T	5	15.4	420 - 800 kV

La Tabla 1.5 permite observar que la capacidad de manejo de energía de los pararrayos, aumenta con el rango de voltaje que a estos se les aplica, para lo cual se los fabrica con carcasas que soporten estos esfuerzos, bien sean de porcelana (EXLIM) o de silicón (PEXLIM o HS PEXLIM).

2 METODOLOGÍA

2.1 ESTRUCTURA

La estructura que ha seguido la metodología aplicada en el presente Trabajo de Integración Curricular, se ve representada en el diagrama de flujo de la Figura 2.1.

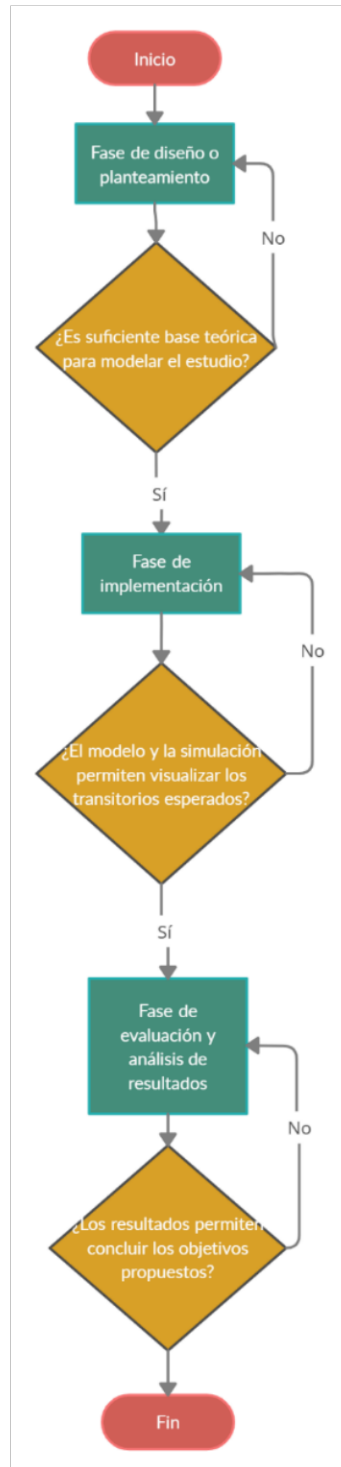


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la metodología empleada.

Cada uno de estos bloques se describe en el siguiente apartado, primero de forma general y luego de manera específica.

2.2 DESCRIPCIÓN GENERAL

La metodología de este trabajo incluye las siguientes fases:

- Fase de diseño o planteamiento: En esta fase se recopila la información necesaria para el sustento teórico de este estudio, es decir aquella referente a sobrevoltajes de maniobra por interruptores de línea, a los modelos para su análisis y sobre la herramienta computacional para su simulación. También se contempla la selección del modelo y el software para el estudio.
- Fase de Implementación: Esta fase consta del modelamiento de los elementos que forman parte del sistema bajo análisis, según el detalle necesario encontrado en la fase anterior, dentro del software seleccionado.

También se realiza la simulación de los casos de estudio necesarios tomando en cuenta los parámetros adecuados para la misma, como tiempo de simulación, tiempos de operación y variables a ser observadas.

- Fase de evaluación y análisis de resultados: En esta fase se analizan la forma de onda y amplitud de voltajes y corrientes en los equipos de interés, con el fin de compararlas con sus capacidades eléctricas actuales, para lo cual se recurre a sus especificaciones técnicas y normas consultadas en la primera fase.

2.3 DESCRIPCIÓN ESPECÍFICA

2.3.1 FASE DE DISEÑO

En esta fase se buscó información referente a los sobrevoltajes, en específico a aquellos producidos por maniobras, para lo cual se recurrió a normas, libros y varios textos técnicos asociadas a este tema.

La información recopilada permitió identificar los modelos apropiados para este estudio, para lo cual se dividió esta actividad de búsqueda en la apertura, desenergización o desconexión de líneas de transmisión en vacío o sin carga, y en el cierre, energización, conexión o reestablecimiento de las mismas.

Como siguiente punto se buscaron los datos necesarios para modelar los elementos que componen el sistema bajo estudio, es decir, resistencias, inductancias, capacitancias, voltajes y corrientes específicos de los equipos. Para este fin se investigó la información

técnica de los equipos que forman parte del sistema de estudio, es decir, la línea de transmisión Santo Domingo – Esmeraldas a 230 kV, las subestaciones que ésta conecta y los equipos que conforman su bahía de línea.

Finalmente, la información recabada viabilizó definir y escoger el modelo y los casos de estudios necesarios para el cumplimiento de los objetivos propuestos de este trabajo. Así que para el modelo se consideró que:

- Es necesario detallar únicamente las capacitancias, inductancias y resistencias de los equipos de la bahía de línea de la subestación Esmeraldas en el caso de apertura, de manera que se requieren dos casos de estudio, la apertura y el cierre de los interruptores, ya que la topología entre estos cambia y por ende también sus ondas de voltaje y corriente [10].
- Es necesario considerar como fuente de alimentación del sistema antes mencionado, únicamente los equivalentes Thévenin de la red en el punto de cada subestación, es decir una fuente de voltaje en serie con un elemento RLC [10].
- Dado que se quiere conocer la respuesta de cada uno de los pararrayos de las bahías de línea frente a los sobrevoltajes de maniobra, se deben considerar elementos monofásicos.
- La línea de transmisión debe ser modelada de tal manera que se consideren sus capacitancias (propias y mutuas) e inductancias, razón por la cual se eligió el modelo J. Martí [17].

2.3.2 FASE DE IMPLEMENTACIÓN

En este punto se conocen tanto el modelo como los casos de estudio a usarse, de manera que se procede a seleccionar un medio para implementarlos. En el caso de este trabajo fue pertinente simular las maniobras de este sistema en el software ATP/EMTP dado que permite representar y calcular eventos con el detalle necesitado para este caso, es decir, en un rango de frecuencias entre 60 Hz y 20 kHz como se observó previamente en la Tabla 1.1. Otro factor que se tomó en cuenta es la disponibilidad de esta herramienta computacional, ya que es de libre acceso, es decir no requiere un pago de licencia.

Una vez seleccionado el programa a usarse se procedió a la familiarización con la interfaz de usuario del mismo, a través de tutoriales en línea, manuales de usuario y ejemplos asociados a los casos de estudio de este trabajo, es decir, la apertura y cierre de circuitos capacitivos como líneas y bancos de capacitores.

Posteriormente, se procedió a implementar el sistema en el software seleccionado de acuerdo con modelo escogido en la fase anterior. En este punto se colocan los elementos de tal manera que representen un circuito conformado por una línea de doble circuito que conecta una barra de la subestación Santo Domingo con una barra de la subestación Esmeraldas. Luego se editaron sus valores requeridos en la simulación según los datos de placa de cada equipo.

Se simuló el caso de apertura suponiendo que se ha superado la de demanda pico, es decir con un nivel de voltaje superior al de operación normal (mayor a 240 kV), y el caso de cierre se simuló suponiendo que el nivel de voltaje ya descendió al de operación nominal (230 kV).

Para el caso de apertura también se implementó un código en MATLAB que procese los datos de los TRV de cada fase del interruptor de la subestación Esmeraldas a fin de ordenarlos de tal manera que, al graficarlos junto con la envolvente de soportabilidad del interruptor tripolar de la bahía de línea Santo Domingo en la subestación Esmeraldas, los ejes de sus orígenes coincidan al superponerse, y así se logre representar si se supera o no la capacidad de este equipo.

Por último, se verificó que esta fase fue realizada de manera adecuada, al visualizar que las formas de onda obtenidas para cada caso y equipo sean similares a las encontradas en los recursos teóricos de la fase anterior.

2.3.3 FASE DE EVALUACIÓN Y ANÁLISIS

Una vez simulados los casos de estudio propuestos se procede a analizar los resultados, que en este caso las formas de onda de voltaje, corriente y también la energía.

Posteriormente, se buscaron los valores máximos de cada curva obtenida, ya que este trabajo se enfoca en la posibilidad de existencia de algún escenario en donde se superen los límites de soportabilidad eléctrica de los equipos frente a los sobrevoltajes provocados por maniobras de la línea en estudio.

Después de identificar los valores más elevados se procede a enlistarlos en una tabla para compararlos con los límites de cada equipo, así:

- El TRV en el interruptor obtenido en la simulación, comparado con el TRV pico de la curva de soportabilidad del mismo equipo.
- El TRV en el seccionador obtenido en la simulación, comparado con el voltaje soportado de corta duración del mismo equipo.

- El voltaje y la corriente más elevado de los pararrayos, comparados con los valores límites de su curva característica, es decir, voltaje de referencia y el rango de corrientes en región de operación, respectivamente.
- La energía más elevada de los pararrayos, encontrada en la simulación, comparada con la capacidad de soportabilidad de este equipo.

Adicionalmente, tanto en el caso de apertura como en el caso de cierre, se comparó la corriente más elevada experimentada de entre los pararrayos de ambas subestaciones en cada escenario de operación, con la corriente de disparo del contador de descargas conectado a este equipo.

Esta fase fue validada después de que el análisis antes mencionado proveyó de un criterio para concluir si esta forma de operación provoca o no, la superación de los límites de soportabilidad del interruptor, seccionar o pararrayos.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS

3.1.1 SISTEMA DE ESTUDIO

El sistema bajo estudio está compuesto de la línea de transmisión Santo Domingo – Esmeraldas 230 kV, los equipos de bahía de línea de la subestación Esmeraldas y los equivalentes del sistema en ambas subestaciones.

La línea de transmisión estudiada es de doble circuito, transpuesta y tiene una longitud de 157 Km de conductor ACAR 1200. Uno de los circuitos de esta línea se operó en vacío (como elemento de compensación conectado a la subestación Esmeraldas), lo cual implica un comportamiento capacitivo que genera un TRV de aproximadamente el doble del voltaje en por unidad, como se observó previamente en la Tabla 1.2.

La bahía de línea de la subestación Esmeraldas tiene una configuración de doble barra con seccionador by-pass, como se observa en la Figura 3.1. Adicionalmente, el conductor que conecta los equipos de esta bahía es un AAC BLUEBELL 1033.5 MCM.

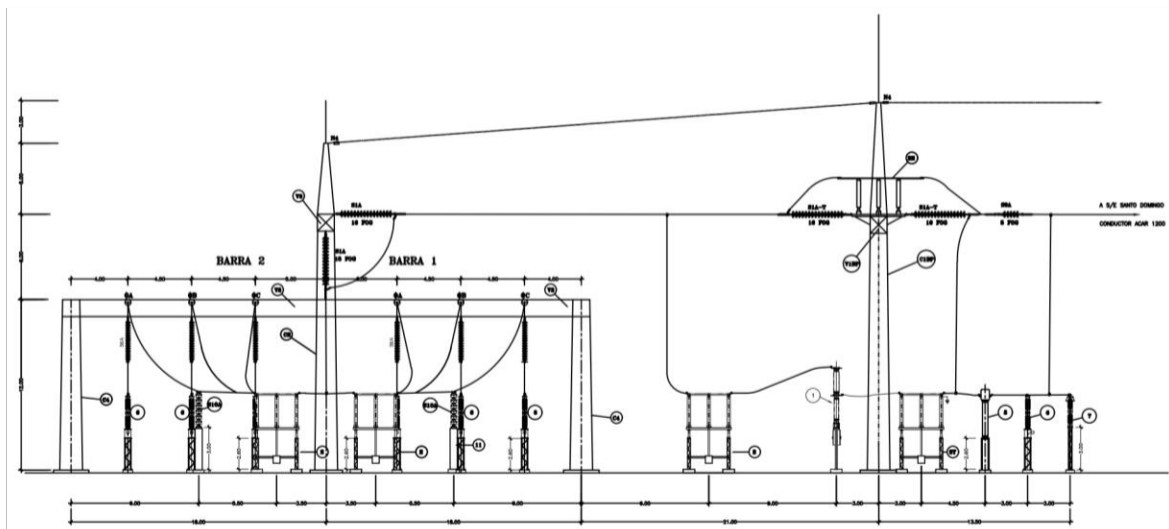


Figura 3.1. Corte de bahía de línea Santo Domingo 230 kV de la subestación Esmeraldas.

El interruptor de la bahía es un ASLTOM tripolar, aislado en SF₆, de voltaje nominal de 245 kV y 160 A de corriente nominal de corte de línea con carga capacitiva, como se muestra en la Figura 3.2.

ALSTOM

SF6 CIRCUIT BREAKER **GL314**

Rated voltage	<input type="text" value="245"/>	kV	Standard No.	<input type="text" value="IEC62271-100"/>
Rated lightning impulse withstand voltage	<input type="text" value="1050"/>	kV		
Rated switching impulse withstand voltage	<input type="text" value="--"/>	kV		
Rated current	<input type="text" value="2000"/>	A	Rated frequency	<input type="text" value="60"/>
Rated duration of short-circuit	<input type="text" value="1"/>	s		
Rated short-circuit breaking current	<input type="text" value="31.5"/>	kA		
Rated line-charging breaking current	<input type="text" value="160"/>	A		
Rated operating sequence	<input type="text" value="O-0.3s-CO-180s-CO"/>			
First-pole-to-clear factor	<input type="text" value="1.3"/>			
Rated SF6 gas absolute pressure (at 20°C)	<input type="text" value="0.75"/>	MPa		
Mass of SF6 gas	<input type="text" value="18"/>	kg	Mass of the circuit breaker	<input type="text" value="2745"/>
Temperature grade	<input type="text" value="-30...+40"/>	°C	Classification	<input type="text" value="M2"/>
Year of manufacture	<input type="text"/>		Serial number	<input type="text" value="None"/>
Creepage distance	<input type="text" value="6125"/>	mm	Contract No.	<input type="text" value="016-2016"/>
Client	<input type="text" value="CELEC EP-TRANSELECTRIC"/>			


ALSTOM Suzhou High Voltage Switchgear co., Ltd.

Figura 3.2. Dato de placa del interruptor de las bahías de línea en las subestaciones Esmeraldas y Santo Domingo [18].

La figura anterior permitió identificar el tipo de envolvente que este disyuntor debe usar para el análisis de soportabilidad de TRV, al observar los datos de placa de: el voltaje nominal de 245 kV, la corriente nominal de 2000 A, la corriente nominal de corte de carga de línea de 160 A y el factor de despeje de primer polo de 1.3. De acuerdo con estos datos, además de que el nivel de voltaje es mayor a 100 kV (230 kV) y que las corrientes capacitivas están en el orden de cientos de amperios, se pudo concluir que la envolvente correspondiente a este disyuntor debe ser de 2 parámetros, es decir que deben usarse los valores para T10 y que se muestran en la Figura 1.9.

Esta envolvente se construyó a través de un código desarrollado en la herramienta computacional MATLAB. En este código también se importaron los datos de las curvas de sobrevoltaje simulados en ATPDraw para superponer ambas curvas, de tal manera que se pueda observar si el TRV de alguna de las fases supera el límite de capacidad del interruptor.

El seccionador by-pass es tipo S3C tripolar de apertura horizontal, de 245 kV de voltaje nominal como se muestra en la Figura 3.3.



CLIENTE: CELEC EP-TRANSELECTRIS
 CONTRATO: 016-2016
 No. de serie: [G... ÷ G...]

Norma: IEC 62271-102 Mes/Año: 06/2017

Seccionador tipo: S3C			Mando tipo: CMM		
Ur: 245 kV	Ir: 2000 A	fr: 60 Hz	Ua: 125 V	fa: / Hz	Ia: 0,05 A
Up: 1050 kV	Ik: 31,5 kA	tk: 1 s	Um: 125 V	fm: / Hz	Im: 5,7 A
Us: kV	Ip: 82 kA	Er: /	Uh: 127 V	fh: 60 Hz	Ih: 0,35 A
Ud: 460 kV		Mr: M2	m: 60 kg		
m: 2165 kg	F: 1500/330/1250 N				

ALSTOM GRID S.p.A. Noventa di Piave Via Meucci 22 -VE- ITALIA

Figura 3.3. Datos de placa de los seccionadores de las bahías involucradas perteneciente a las subestaciones Esmeraldas y Santo Domingo [19].

Al observar los datos de placa de la figura anterior se pudo identificar que, de acuerdo con el voltaje soportado tipo impulso de 1050 kV, este seccionador corresponde al grupo de Gamma I.

El pararrayos es un XIAN XD tipo Y10W5 de óxido metálico, monopolar, de 192 kV de voltaje nominal como se muestra en la Figura 3.4.



Type Y10W5-192/500	RATED FREQUENCY	60 Hz
RATED VOLTAGE 192 kV	CREEPAGE DISTANCE	7812 MM
CONTINUOUS OPERATING VOLTAGE 152 kV	PRESSURE RELIEF RATED LARGE CURRENT	40kA
NOMINAL DISCHARGE CURRENT 10 kA	LINE DISCHARGE CLASS	3
CONTINUOUS CURRENT 0-350 µA	UNIT QUANTITY	2 UNIT
INTERIOR GAS PRESSURE 0.035-0.05 MPa	MEDIUM GAS	N ₂ BIL 1050KV
CUSTOMER CELEC EP-TRANSELECTRIC	DATE	No.
STANDARD IEC 60099-4	CONTRACT NO.	016-2016

西安西电避雷器有限责任公司
 XIAN XD ARRESTER CO., LTD. R4

Figura 3.4. Datos de placa del pararrayos de las subestaciones Esmeraldas y Santo Domingo [20].

Los datos de placa de la figura anterior permiten identificar que el pararrayos es de clase 3 y 152kV de voltaje de operación continua, lo cual permitió construir su curva característica

Voltaje-Corriente a través de un recurso en línea que genera los datos de esta curva en una tabla de Excel, como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Valores obtenidos de la característica V-I de los pararrayos de las bahías de la línea en las subestaciones Esmeraldas y Santo Domingo [21].

Clase de Pararrayos	
Seleccione Tipo de Pararrayos	Class 3
Pararrayos Uc o MCOV (rms)	
Ingrese Uc or MCOV requerido (rms) ----->	152
Corriente [A]	Voltaje Pico [V]
0.000015	36190.5
0.000045	180952.4
0.00015	253333.3
0.00075	280476.2
0.015	289523.8
1.5	304000.0
15	321190.5
187.5	356476.2
375	367333.3
750	380000.0
1500	401714.3
2250	416190.5
4500	437904.8
7500	459619.0
15000	492190.5
30000	541047.6
60000	608000.0
150000	760000.0

Estos datos se importaron al modelo simulado del pararrayos en ATPDraw para que tenga la característica deseada.

3.1.2 MODELO IMPLEMENTADO

Este trabajo se dividió en dos casos de estudio, la apertura de la línea en vacío y el cierre de la línea, cada uno con su respectivo modelo. A continuación, se presentan las consideraciones que tienen en común los modelos de ambos casos.

- Tanto en la apertura como en el cierre se empleó el modelo J. Martí para la línea de transmisión Santo Domingo – Esmeraldas 230 kV, ya que éste es dependiente de la frecuencia.
- Se modeló la línea como doble circuito segmentada en 3 partes para incluir su naturaleza transpuesta. La geometría de la línea modelada se puede encontrar en el ANEXO I.
- En ambos casos se modeló el mismo equivalente del sistema en cada subestación, compuesto de una fuente de voltaje en serie con un elemento RL en secuencias positiva y cero.
- Los pararrayos se modelaron como resistores no lineales monofásicos en ambos casos de operación.

3.1.2.1 Apertura en vacío del circuito de la línea

El modelo implementado en el caso de apertura incluye el detalle de las inductancias y capacitancias de los equipos de la bahía de línea en la subestación Esmeraldas 230 kV y de los tramos de conductor que los conectan, como se puede ver en la Figura 3.5.

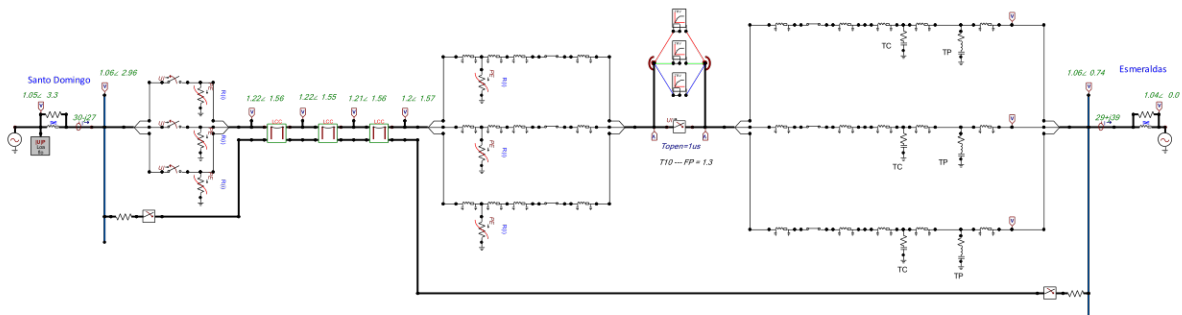


Figura 3.5. Sistema Esmeraldas – Santo Domingo modelado para el caso de apertura en ATPDraw.

La modelación a detalle de los elementos de bahía de línea que se pueden ver en la Figura 3.5, corresponde a la necesidad de observar la influencia inductiva y capacitiva de estos equipos en el TRV del disyuntor.

3.1.2.2 Cierre del circuito de la línea

El modelo diseñado en ATPDraw para el caso de cierre se muestra en la Figura 3.6.

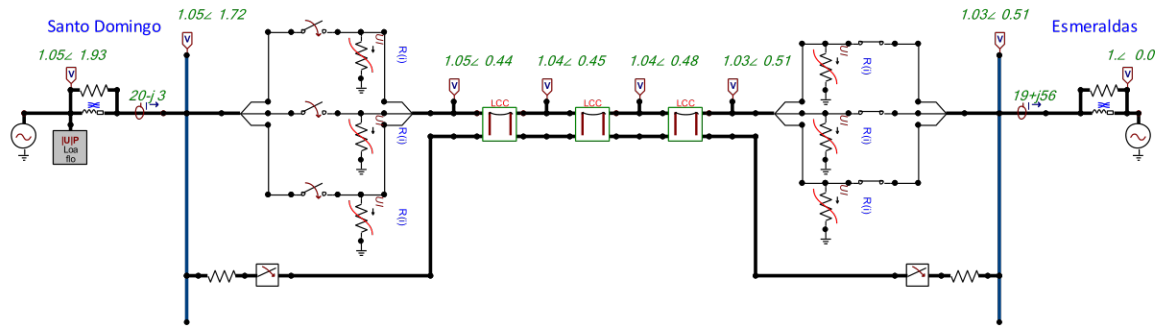


Figura 3.6. Sistema Esmeraldas – Santo Domingo modelado para el caso de cierre en ATPDraw.

Con diferencia al caso de la apertura, el cierre no requiere el nivel de detalle de la bahía de la subestación, como se puede observar en la Figura 3.6, dado que no se analiza si el sobrevoltaje supera la curva de soportabilidad, ya que no se produce un TRV durante el cierre.

3.1.3 SIMULACIÓN

Dado que este estudio busca establecer si la operación del pararrayos se debe a las maniobras de apertura o cierre de la línea en análisis operando como compensador capacitivo, no se ha utilizado una simulación probabilística, sino que se han simulado varios escenarios con distintos tiempos de operación de los disyuntores de línea de ambas subestaciones para determinar si alguno de estos provoca el conteo (operación) del pararrayos.

3.1.3.1 Apertura en vacío del circuito de la línea

La apertura en vacío del circuito de línea consideró varios escenarios de operación de los disyuntores de ambas subestaciones, los cuales se muestran en la Tabla 3.2. Es importante resaltar que, esta operación es considerada en vacío, pues en todos los casos el circuito se desenergiza con la apertura final del interruptor ubicado en la subestación Esmeraldas; es decir, cuando el circuito opera como elemento de compensación capacitivo.

Como se puede observar, cada escenario se distingue por el tiempo de apertura de cada disyuntor, de entre los cuales destacan los resaltados en amarillo ya que presentan aquellos sobrevoltajes que superan a la envolvente de soportabilidad del disyuntor, tanto el perteneciente a la subestación de Santo Domingo como el de Esmeraldas. Es importante mencionar que la medición del TRV del disyuntor de Santo Domingo se realizó para identificar si alguno de los interruptores de las dos subestaciones, que conecta la línea en

estudio, presentan TRVs que superen su soportabilidad, y también para identificar si alguno de los pararrayos de ambas subestaciones opera frente a estos sobrevoltajes.

Tabla 3.2 TRV pico en interruptores de las subestaciones Esmeraldas y Santo Domingo

Escenarios en Demanda máxima	Tiempo de operación [s]		TRVpico ESM		TRVpico STD		Vmáx Curva Soportabilidad [kV]	¿Supera la capacidad del interruptor?
	STD	ESM	[kV]	Polo	[kV]	Polo		
1	-1*	0.001	425.21	C	419.53	C	459	Ninguno
2	-1*	0.007	459.54	A	452.37	A		Sí, ESM
3	-1*	0.012	470.82	B	467.43	B		Ambos
4	-1*	0.025	424.02	C	419.51	C		Ninguno
5	0.001	0.002	425.21	C	419.55	C		Ninguno
6	0.001	0.005	471.6	B	467.41	B		Ambos
7	0.001	0.013	470.58	B	467.41	B		Ambos
8	0.001	0.02	471.37	B	467.42	B		Ambos
9	0.007	0.012	470.82	B	467.43	B		Ambos
10	0.007	0.02	471.37	B	467.41	B		Ambos
11	0.01	0.016	458.64	A	452.41	A		Ninguno
12	0.01	0.02	470.59	B	467.37	B		Ambos
13	0.01	0.034	423.51	C	419.54	C		Ninguno

* Interruptor abierto al inicio y durante la simulación.
 STD: Subestación Santo Domingo.
 ESM: Subestación Esmeraldas.

Algunos de estos escenarios se han considerado importantes para superponer el TRV formado en el interruptor de Esmeraldas sobre su envolvente de soportabilidad, como se muestra en las Figuras 3.7-3.11. Cabe mencionar que los datos que forman las curvas de sobrevoltaje, aparte de ser exportados como un archivo .mat desde ATPDraw y llamados en MATLAB dentro de un código .m, también fueron procesados para eliminar aquellos que contenían valores de 0 en los voltajes de cada fase previo a la apertura del primer polo en maniobrar. Esto se realizó con la finalidad de facilitar la comparación de la curva de TRV con la envolvente de soportabilidad, ya que se empató el inicio de esta primera curva con el inicio de la segunda, y para que al quitar el tiempo previo a la operación se pueda visualizar únicamente el evento de sobrevoltaje.

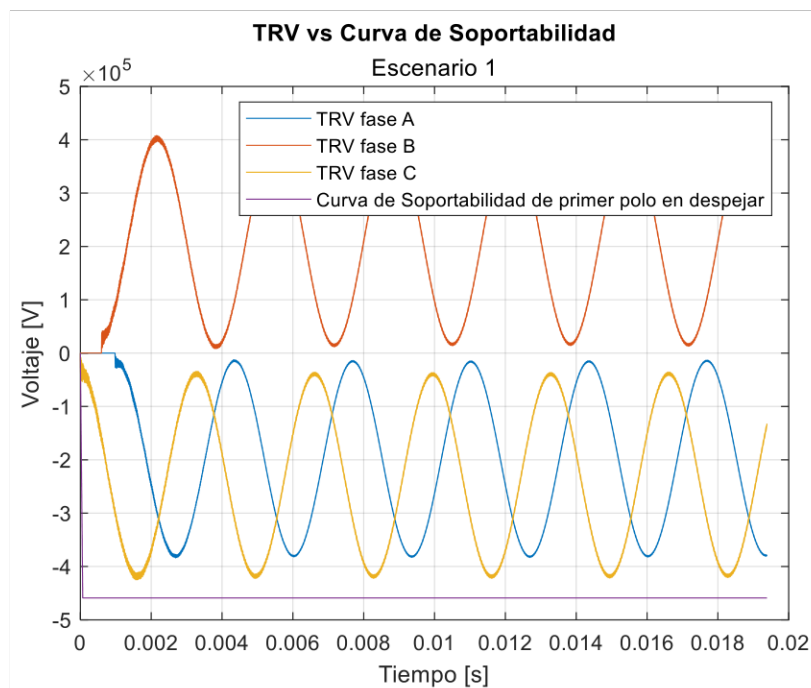


Figura 3.7 TRV del interruptor de la bahía de línea en S/E Esmeraldas, comparado con la curva de soportabilidad del interruptor en el escenario 1.

En la Figura 3.7 se puede observar que el sobrevoltaje de apertura en el escenario 1 no supera la curva de soportabilidad del interruptor, por lo que no representa un riesgo de encendido de arco.

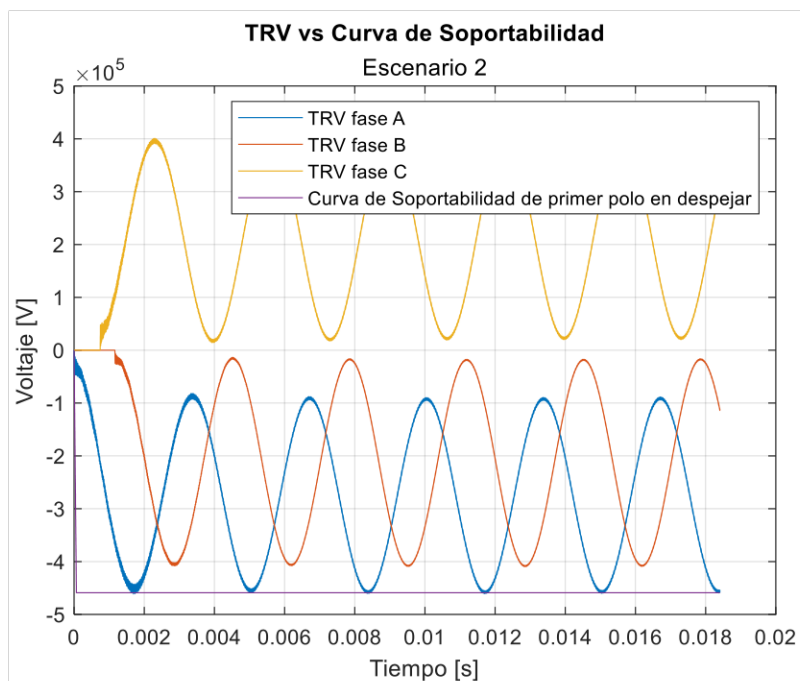


Figura 3.8. TRV del interruptor de bahía de línea de la S/E Esmeraldas, comparado con la curva de soportabilidad del interruptor en el escenario 2.

En la Figura 3.8 se observa que el sobrevoltaje de la fase A producido en la apertura en el escenario 2, alcanza la curva de soportabilidad lo que podría ocasionar la generación de un arco sostenido entre los polos de esta fase.

Es importante mencionar que en este escenario la capacidad del interruptor se ve superada únicamente por el sobrevoltaje de primer polo.

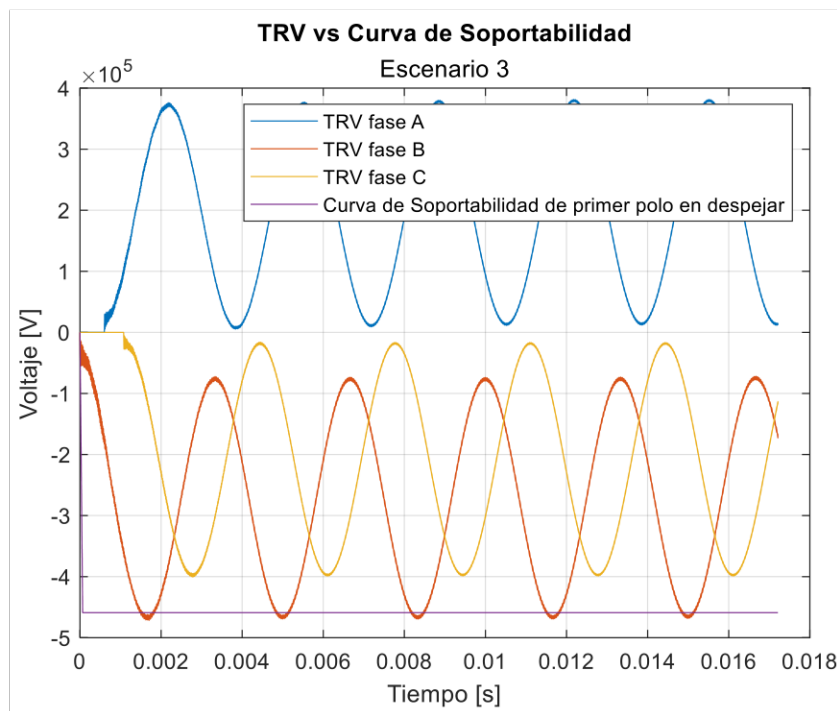


Figura 3.9. TRV del interruptor de bahía de línea de la S/E Esmeraldas, comparado con la curva de soportabilidad del interruptor en el escenario 3.

En la Figura 3.9 se ve que la curva de soportabilidad es superada, incluso en mayor medida que el anterior escenario, por el sobrevoltaje de la fase B provocado por la apertura del circuito en el escenario 3, por lo que también se podría provocar un arco entre los terminales de esta fase.

Cabe mencionar que el voltaje de la fase B del interruptor de la subestación Santo Domingo también supera el límite de soportabilidad, aunque en menor medida que en el lado de Esmeraldas, lo que implica que de igual manera se produciría un arco entre los polos de esta fase.

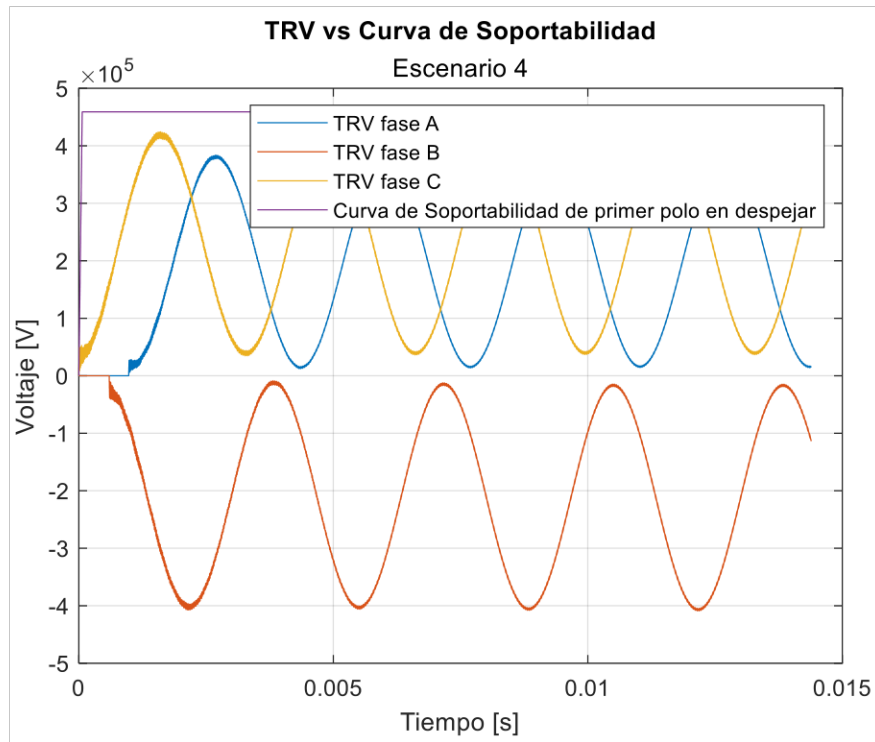


Figura 3.10. TRV del interruptor de bahía de línea de la S/E Esmeraldas, comparado con la curva de soportabilidad del interruptor en el escenario 4.

La Figura 3.10 permite observar que el escenario 4 provoca un sobrevoltaje de maniobra que no supera la curva de soportabilidad del interruptor, lo que indica que no se produce un arco entre sus terminales.

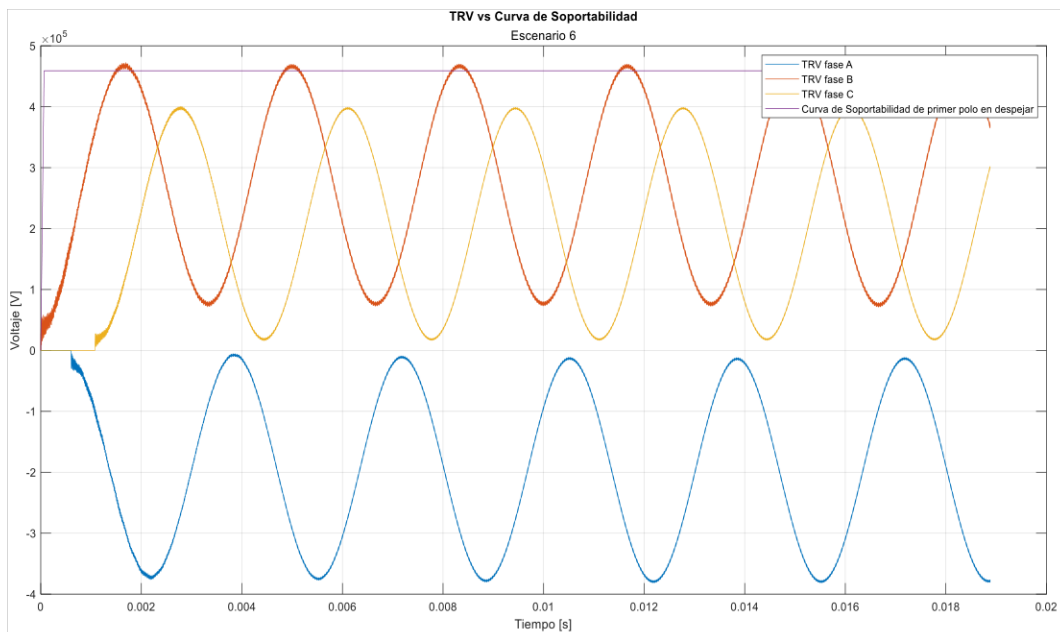


Figura 3.11. TRV del interruptor de bahía de línea de la S/E Esmeraldas, comparado con la curva de soportabilidad del interruptor en el escenario 6.

La Figura 3.11 muestra el escenario 6 con el TRV más elevado que se obtuvo en el caso de apertura, el cual sucede en la fase B (tanto en Esmeraldas como en Santo Domingo), superando ampliamente el límite de soportabilidad del interruptor, por lo que entre los polos de esta fase podría aparecer un arco.

Como se puede ver en la Tabla 3.2, los escenarios 7, 8, 9, 10 y 12 producen sobrevoltajes similares al sexto, es decir que también superan la envolvente de los interruptores del lado de Santo Domingo y Esmeraldas.

En cuanto a la capacidad del seccionador by-pass para soportar el sobrevoltaje de maniobra, se tomaron en cuenta los mismos escenarios de simulación y se los comparó con el aislamiento en aire de este equipo, lo cual se puede observar en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 TRV pico comparado con el aislamiento de los seccionadores by-pass de las bahías de 230 kV de las subestaciones Esmeraldas y Santo Domingo.

Escenarios en Demanda máxima	Tiempo de operación [s]		TRVpico ESM		TRVpico STD		¿Soporta el aislamiento del Seccionador by-pass?
	STD	ESM	[kV]	Polo	[kV]	Polo	V tipo impulso soportado 1050kV
1	-1	0.001	425.21	C	419.53	C	Sí
2	-1	0.007	459.54	A	452.37	A	Sí
3	-1	0.012	470.82	B	467.43	B	Sí
4	-1	0.025	424.02	C	419.51	C	Sí
5	0.001	0.002	425.21	C	419.55	C	Sí
6	0.001	0.005	471.6	B	467.41	B	Sí
7	0.001	0.013	470.58	B	467.41	B	Sí
8	0.001	0.02	471.37	B	467.42	B	Sí
9	0.007	0.012	470.82	B	467.43	B	Sí
10	0.007	0.02	471.37	B	467.41	B	Sí
11	0.01	0.016	458.64	A	452.41	A	Sí
12	0.01	0.02	470.59	B	467.37	B	Sí
13	0.01	0.034	423.51	C	419.54	C	Sí

Como se observa, ningún sobrevoltaje supera el voltaje tipo impulso soportado de 1050 kV del seccionador by-pass. Esto determina que la distancia en aire requerida para este seccionador, de 2.1 m de acuerdo con la Tabla 1.4, es suficiente para evitar la generación de un arco eléctrico entre sus polos, la cual es suplida según el plano de implantación de este seccionador by-pass, como se puede constatar en la Figura 3.12.

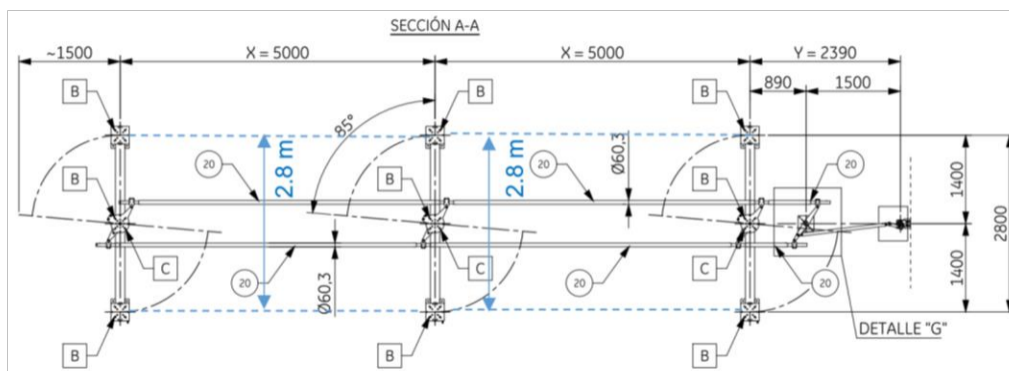


Figura 3.12. Plano de las dimensiones de los seccionadores S3C 245 kV de las subestaciones Santo Domingo y Esmeraldas [22]

La Figura 3.12 permite ver que la distancia en aire entre los polos del seccionador es de 2.8 m, la cual es incluso mayor a las solicitadas en la Tabla 1.4 correspondiente al nivel de aislamiento de este equipo (1050 kV).

Los escenarios pintados en verde muestran los sobrevoltajes que superan el voltaje de corta duración a frecuencia industrial de 460 kV mostrado en la Tabla 1.4. Sin embargo, este límite de voltaje no es considerado para establecer la distancia mínima de separación en aire.

En las Tablas 3.4 y 3.5 se pueden observar los sobrevoltajes, corrientes y energía que experimentan los pararrayos de la bahía de línea de la subestación Esmeraldas. Cabe indicar que en estas tablas se muestran únicamente las mediciones del pararrayos que presentó los mayores valores antes mencionados, de entre las 3 fases.

Tabla 3.4 Voltaje y corriente máximos de los pararrayos de la S/E Esmeraldas en cada escenario de apertura.

Escenarios en Demanda máxima	Tiempo de operación [s]		Voltaje de mayor amplitud del pararrayos		Corriente de mayor amplitud del pararrayos		¿Opera el pararrayos?	¿Operación del contador de descargas?
	STD	ESM	[kV]	S/E-Fase	[mA]	S/E-Fase	Curva característica V-I	I > 40 A
1	-1	0.001	237.36	ESM-C	12.67	ESM-C	SÍ	No
2	-1	0.007	290.12	ESM-A	80.37	ESM-A	SÍ	No
3	-1	0.012	269.99	ESM-B	67.65	ESM-B	SÍ	No
4	-1	0.025	238.02	ESM-C	0.128	ESM-C	No	No
5	0.001	0.002	238.04	ESM-C	0.128	ESM-C	No	No
6	0.001	0.005	277.08	ESM-B	0.672	ESM-B	No	No

Escenarios en Demanda máxima	Tiempo de operación [s]		Voltaje de mayor amplitud del pararrayos		Corriente de mayor amplitud del pararrayos		¿Opera el pararrayos?	¿Operación del contador de descargas?
	STD	ESM	[kV]	S/E-Fase	[mA]	S/E-Fase	Curva característica V-I	I > 40 A
7	0.001	0.013	276.88	ESM-B	0.676	ESM-B	No	No
8	0.001	0.02	277.02	ESM-B	0.672	ESM-B	No	No
9	0.007	0.012	276.79	ESM-B	0.672	ESM-B	No	No
10	0.007	0.02	277.03	ESM-B	0.675	ESM-B	No	No
11	0.01	0.016	287.32	ESM-A	11.88	ESM-A	Sí	No
12	0.01	0.02	276.72	ESM-B	0.671	ESM-B	No	No
13	0.01	0.034	237.32	ESM-C	0.128	ESM-C	No	No

La Tabla 3.4 muestra que ninguno de los escenarios simulados provoca la operación del contador de descargas de ninguno de los pararrayos. Además, se observa en esta tabla que los valores más elevados de corriente en el pararrayos se presentaron en la apertura del lado de la subestación Esmeraldas mientras que en la subestación Santo Domingo estaba previamente abierto.

Tabla 3.5 Energía disipada por los pararrayos de la S/E Esmeraldas en cada escenario de apertura.

Escenarios en Demanda máxima	Tiempo de operación [s]		Energía de mayor amplitud del pararrayos		¿Supera la capacidad de diseño? 7.8kJ/kV * (Uc) 2 descargas
	STD	ESM	[J]	S/E - Fase	E>11856 kJ
1	-1	0.001	0.23	ESM-C	No
2	-1	0.007	20	ESM-A	No
3	-1	0.012	1.77	ESM-B	No
4	-1	0.025	0.69	ESM-C	No
5	0.001	0.002	0.428	ESM-C	No
6	0.001	0.005	1.64	ESM-B	No
7	0.001	0.013	1.76	ESM-B	No
8	0.001	0.02	1.83	ESM-B	No
9	0.007	0.012	1.74	ESM-B	No
10	0.007	0.02	1.85	ESM-B	No
11	0.01	0.016	6.94	ESM-A	No
12	0.01	0.02	1.85	ESM-B	No
13	0.01	0.034	0.73	ESM-C	No

En la Tabla 3.5 se puede ver que, en ningún escenario de apertura simulado, que presentó los valores más elevados, se supera la capacidad de manejo de energía del pararrayos, ya que incluso el valor más alto de 20 J es muy inferior a los 11856 kJ, lo cual permite concluir que tampoco superan dicha capacidad los pararrayos de las fases restantes.

Las gráficas obtenidas de voltaje, corriente y energía en los pararrayos de ambas subestaciones para todos los escenarios se presentan en el ANEXO II.

3.1.3.2 Cierre del circuito de la línea

Para el cierre de uno de los circuitos de la línea Santo Domingo – Esmeraldas 230 kV, se consideraron diferentes tiempos de operación de los interruptores de ambas subestaciones, como se muestra en las Tabla 3.6 y 3.7, las cuales indican el voltaje, corriente y energía del pararrayos que presentó los valores más elevados de ambas subestaciones para cada escenario.

Tabla 3.6 Voltaje y corriente máximos de los pararrayos de la bahía de línea en cada escenario de cierre.

Posterior al pico de demanda	Escenarios	Tiempo de operación (s)		Corriente de mayor amplitud en pararrayos		Voltaje de mayor amplitud en el pararrayos		Operación del contador de descargas	Operación del pararrayos
		STD	ESM	[mA]	Fase	[kV]	Fase	I > 40 A	Curva V-I
Cierre en STD mientras está energizado ESM	1	0.001	-1	0.07	STD-B	197	STD-B	No	No
	2	0.007	-1	0.069	STD-C	197.66	STD-C	No	No
	3	0.015	-1	0.068	STD-B	197.32	STD-B	No	No
Conexión del circuito previamente abierto en su totalidad	4	0.003	0.001	26974	STD-C	322.9	STD-C	No	Sí
	5	0.008	0.001	513960	ESM-A	371.44	ESM-A	Sí	Sí
	6	0.02	0.007	48552	ESM-C	328.03	ESM-C	Sí	Sí
	7	0.0346	0.02	4864.1	STD-B	308.16	STD-B	No	Sí
	8	0.001	0.003	62396	ESM-C	330.8	ESM-C	Sí	Sí
	9	0.001	0.007	450380	STD-A	369.92	STD-A	Sí	Sí
	10	0.003	0.015	261.49	STD-B	360.67	STD-B	No	Sí
	11	0.009	0.025	37007	ESM-C	325.63	ESM-C	No	Sí
	12	0.0346	0.05	75095	ESM-C	333.68	ESM-C	Sí	Sí

En la Tabla 3.6, los escenarios 1, 2 y 3; los cuales muestran el cierre desde el lado de la subestación Santo Domingo mientras el interruptor de la subestación Esmeraldas se encuentra cerrado, permiten ver que no se produjo conteo de descargas, ya que la corriente obtenida fue considerablemente menor a los 40 A (aproximadamente 70 mA). Además, que los valores más altos, tanto de voltaje como de corriente, se produjeron en los pararrayos de la subestación Santo Domingo, como se puede observar en las Figuras 3.13 y 3.14.

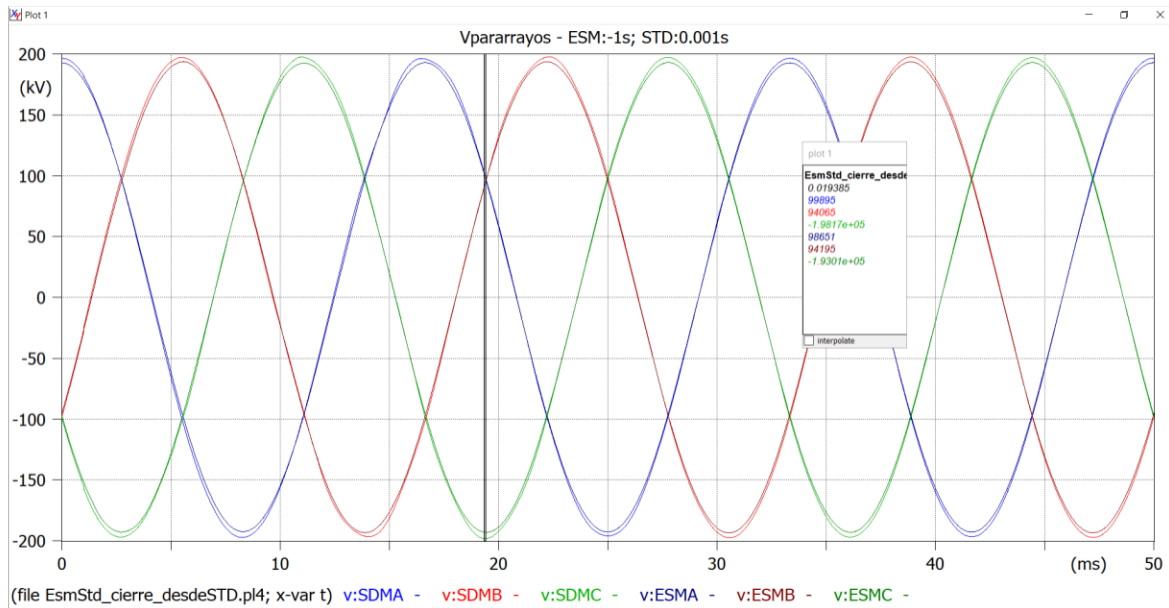


Figura 3.13. Voltaje en los pararrayos de las subestaciones Esmeraldas y Santo Domingo en el escenario de cierre 1.

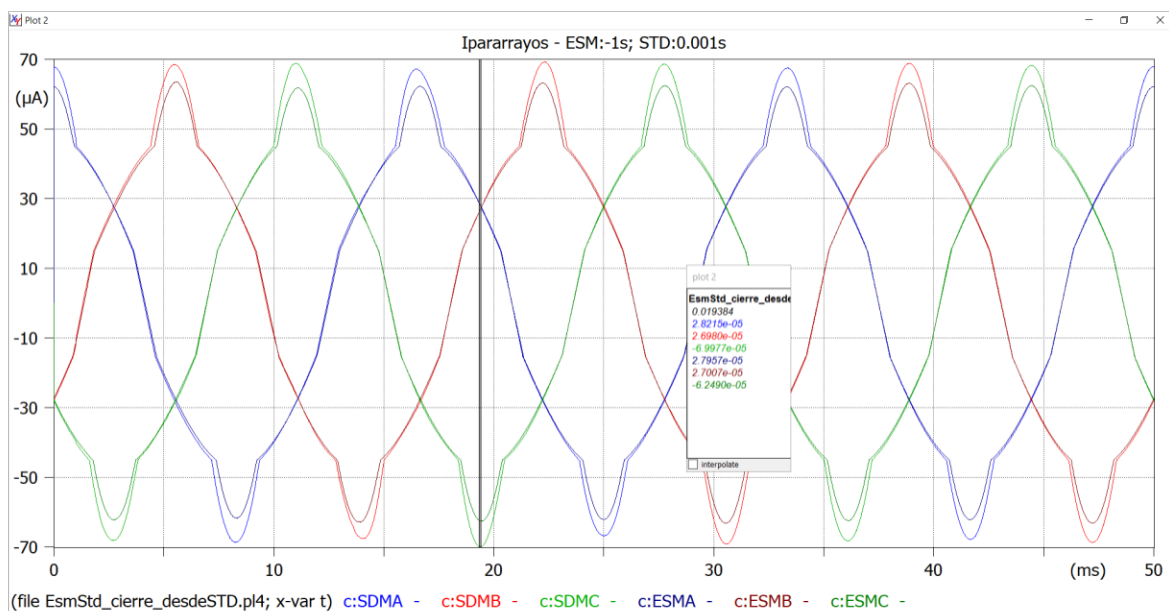


Figura 3.14. Corriente en los pararrayos de las subestaciones Esmeraldas y Santo Domingo en el escenario de cierre 1.

Las Figuras 3.13 y 3.14 muestran el voltaje y corriente de los pararrayos en el primer escenario de cierre de la línea bajo estudio, los cuales muestran el comportamiento esperado del pararrayos en condiciones de operación normal, es decir sin la ocurrencia de descargas, puesto que el voltaje presenta una onda sinusoidal que oscila muy próximo a su valor nominal (192 kV) y que la corriente se encuentra en el orden de las decenas de microamperios.

Por otro lado, se observan resaltados en amarillo los escenarios que provocaron la operación del pararrayos y del contador de descargas, evidente en que el voltaje del pararrayos en dichos escenarios es superior a 300 kV, y en que su corriente está en el orden de las decenas y cientos de amperios. Estos escenarios, del 4 al 12, corresponden a la conexión del circuito de línea que previamente estuvo abierto en ambas subestaciones.

Los escenarios 4 al 7 simularon el cierre en primera instancia del interruptor de la subestación Esmeraldas y posteriormente el cierre del interruptor perteneciente a Santo Domingo. La situación opuesta ocurre en los escenarios 8 al 12, es decir la simulación del cierre de Santo Domingo y milisegundos después el cierre en Esmeraldas.

En las Figuras 3.15 y 3.16 se presentan los sobrevoltajes y corrientes obtenidos en la simulación del escenario de cierre 5.

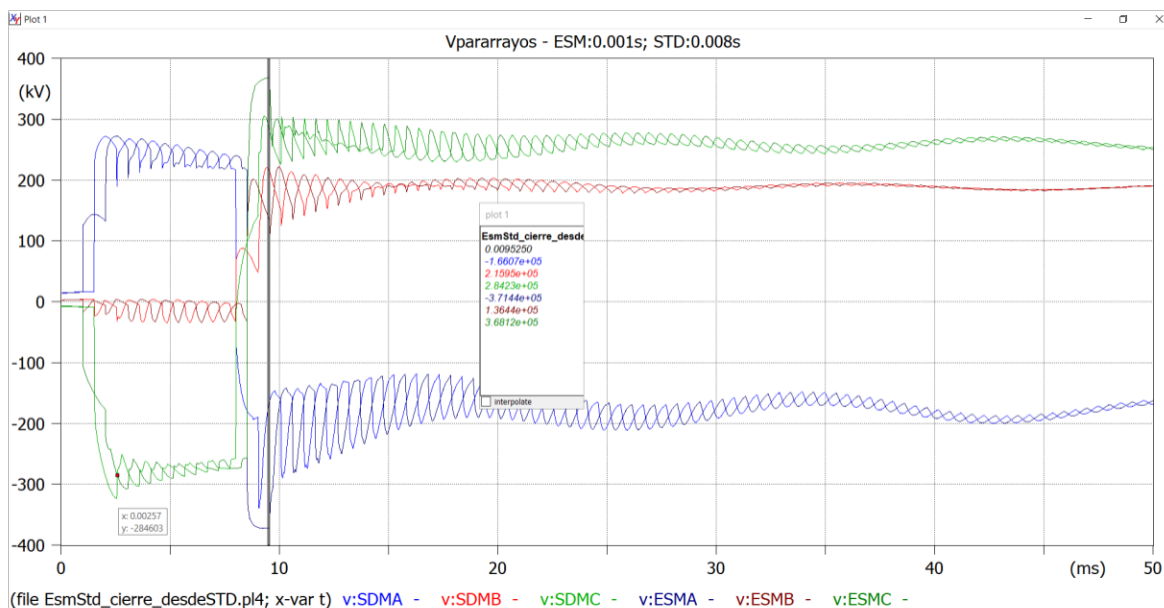


Figura 3.15. Voltajes en los pararrayos de las subestaciones Esmeraldas y Santo Domingo en el escenario de cierre 5.

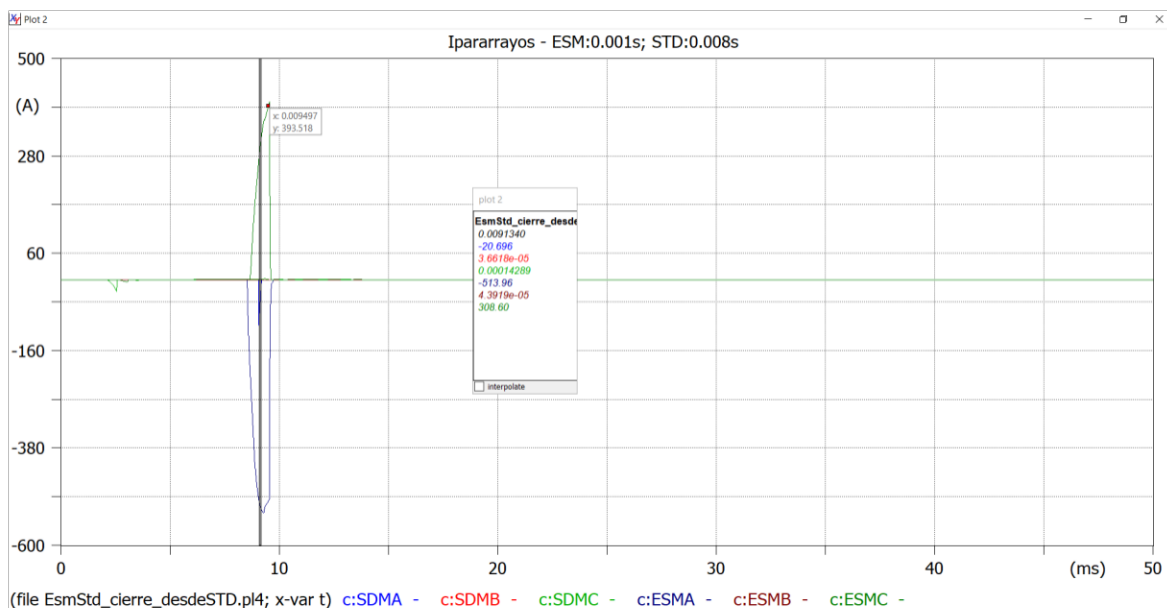


Figura 3.16. Corrientes en los pararrayos de las subestaciones Esmeraldas y Santo Domingo en el escenario de cierre 5.

Las Figuras 3.15 y 3.16 permiten observar la respuesta del pararrayos frente a la operación del escenario 5, el cuál produjo los mayores picos de voltaje y corriente, lo que implicaría un eventual daño del aislamiento de dichos equipos, y que en consecuencia no cumplan con su función de protección para los demás dispositivos en las bahías de línea de ambas subestaciones.

Los demás resultados de voltaje y corriente de los demás escenarios simulados, se presentan en el ANEXO II.

Finalmente, la Tabla 3.7 muestra la energía disipada por el pararrayos que presentó los valores más elevados en cada escenario de cierre.

Tabla 3.7 Energía más elevada disipada por los pararrayos de la bahía de línea en cada escenario de cierre.

Posterior al pico de demanda	Escenarios	Tiempo de operación [s]		Energía manejada		¿Supera la capacidad de diseño? 7.8kJ/kV (Uc) - 2 descargas
		STD	ESM	[J]	Fase	
Cierre de STD mientras está	1	0.002	-1	0.072	STD-B	No
	2	0.007	-1	0.164	STD-C	No

Posterior al pico de demanda	Escenarios	Tiempo de operación [s]		Energía manejada		¿Supera la capacidad de diseño? 7.8kJ/kV (Uc) - 2 descargas
		STD	ESM	[J]	Fase	1185600
energizado ESM	3	0.015	-1	0.137	STD-B	No
Conexión del circuito previamente abierto en su totalidad	4	0.003	0.001	1482.4	STD-C	No
	5	0.008	0.001	158880	ESM-A	No
	6	0.02	0.007	9791	ESM-C	No
	7	0.0346	0.02	145.74	STD-B	No
	8	0.001	0.003	5916	ESM-C	No
	9	0.001	0.007	107440	STD-A	No
	10	0.003	0.015	53426	STD-B	No
	11	0.009	0.025	2487.5	ESM-C	No
	12	0.0346	0.05	10939	ESM-C	No

Se puede observar que los 3 primeros escenarios provocaron que el pararrayos maneje menos de 1 J, mientras que en los restantes eventos simulados se presentaron cantidades de energía en el orden de kJ, siendo el mayor de ellos el generado por el escenario 5 con 158.88 kJ. Sin embargo, ninguno de los escenarios superó la capacidad de energía del pararrayos.

Cabe resaltar que los escenarios 4, 5, 6, 8, 9 y 10 mostraron varias descargas del pararrayos, como se muestra en la Figura 3.17.

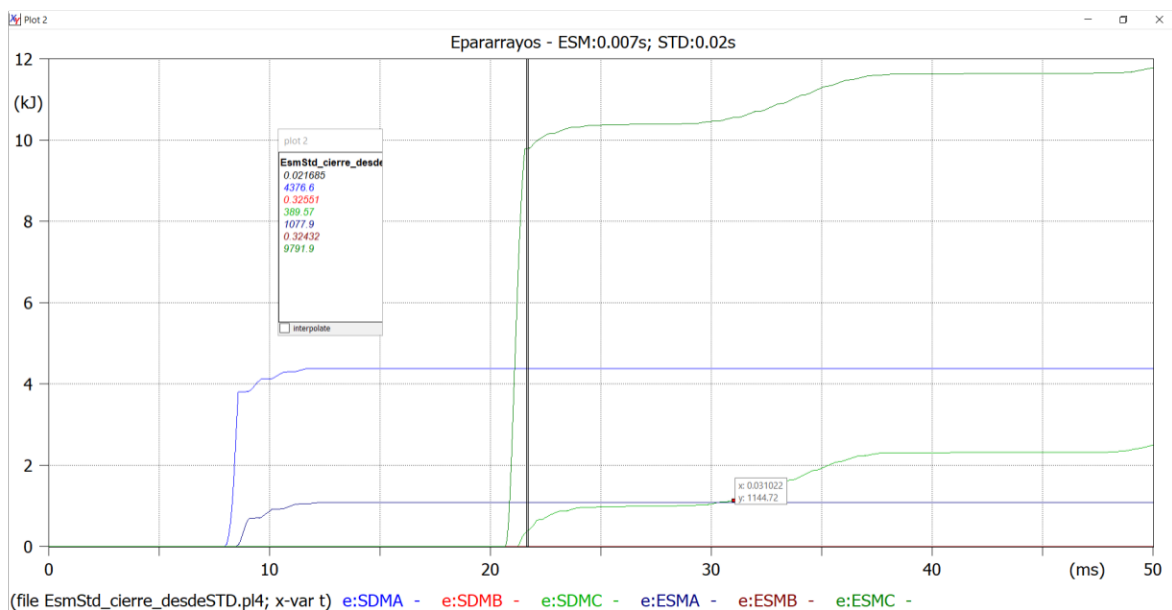


Figura 3.17. Energía del pararrayos de las subestaciones Esmeraldas y Santo Domingo en el escenario de cierre 6.

La Figura 3.17 permite visualizar la energía de los pararrayos de la fase A de ambas subestaciones y la subsecuente descarga de los pararrayos de la fase C, perteneciente a la maniobra del escenario 6.

Las gráficas de los demás escenarios se muestran en el ANEXO II.

3.2 CONCLUSIONES

- A través de la recopilación y presentación de información acerca de sobrevoltajes de maniobra en este trabajo, se pudo identificar que el modelo J. Martí es el más adecuado para la línea de transmisión Esmeraldas – Santo Domingo 230 kV, ya que éste es dependiente de la frecuencia, la cual es una característica necesaria para la simulación de ondas de frente lento.
- Con el análisis bibliográfico realizado se pudieron identificar los modelos adecuados para representar los elementos de la bahía de línea de la subestación Esmeraldas; es decir, los interruptores deben ser considerados ideales y de operación determinista o bien probabilística, los pararrayos deben considerarse resistores no lineales monofásicos, y tanto los transformadores de voltaje y corriente como el conductor usado dentro de la subestación deben ser considerados elementos RLC.
- De acuerdo con los resultados de las simulaciones realizadas se pudo determinar que las maniobras que produjeron sobrevoltajes y corrientes elevadas suficientes para provocar la operación de uno o más pararrayos y del contador de descargas, fueron las pertenecientes a escenarios de conexión del circuito previamente abierto en sus dos extremos.
- Además de provocar la descarga de alguno de los pararrayos de bahía de línea en la subestación Esmeraldas, la maniobra de cierre de uno de los circuitos de la línea estudiada, también causó niveles de voltaje y corriente en la subestación de Santo Domingo que llevó a uno o más de sus pararrayos a descargar la energía generada por estas ondas, y su correspondiente conteo.
- Las simulaciones de apertura y cierre de uno de los circuitos de la línea Santo Domingo – Esmeraldas 230 kV permiten concluir, de acuerdo con lo especificado

por la norma y por los datos del fabricante, que la energía que disipa el pararrayos de ambas subestaciones no excede su capacidad.

- Dado que se observó que la energía disipada por los pararrayos de ambas subestaciones en los escenarios de cierre es generalmente muy superior a la disipada en los eventos de apertura, se puede concluir que el caso de conexión de este circuito de línea representa un mayor esfuerzo para los equipos.
- En función de los escenarios simulados en el caso de apertura de uno de los circuitos de la línea estudiada, se pudo concluir que de acuerdo con los requerimientos de la norma IEC 60071-1, las especificaciones técnicas del fabricante y el detalle del plano de dimensiones, la distancia en aire correspondiente al voltaje tipo impulso del seccionador by-pass es suficiente para soportar los voltajes transitorios que estos eventos producen.
- A pesar de que algunos eventos de apertura de uno de los circuitos de la línea bajo estudio produjeron TRVs que superaron la envolvente de soportabilidad de los interruptores de la subestación Esmeraldas, se debe tomar en cuenta que esta curva de voltaje depende de la corriente que debe interrumpirse; en este caso 10% de la corriente de cortocircuito nominal del disyuntor, también que mientras menor sea esta corriente más elevado será el voltaje límite de la envolvente, y que la corriente capacitiva es menor al 5% de la corriente de cortocircuito, se puede deducir que el límite de voltaje para la envolvente de este estudio está subdimensionado, razón por la cual se infiere que los sobrevoltajes obtenidos no superarían una curva graficada con parámetros asociados a la corriente capacitiva propia de este caso.
- Con las simulaciones realizadas en este trabajo se pudo concluir que, de acuerdo con los requerimientos actuales de las normas asociadas a los casos de estudio, la operación de uno de los circuitos de la línea de transmisión Santo Domingo – Esmeraldas 230 kV como compensación reactiva es posible sin provocar generación o reencendido de arcos, ni daño del aislamiento de seccionares by-pass, interruptores y pararrayos.

3.3 RECOMENDACIONES

A continuación, se presentan recomendaciones que son producto del alcance propuesto de este trabajo:

- Realizar el análisis de la disipación de energía del pararrayos en función de pruebas específicas para el tipo de estrés que presenta la operación de conmutación, ya que actualmente los fabricantes especifican la energía soportada de un pararrayos únicamente como aquella que experimenta el pararrayos durante un sobrevoltaje (kJ/kV).
- Analizar los métodos de mitigación de los sobrevoltajes de maniobra existentes; por ejemplo, el uso de: resistencias de pre-inserción, interruptores de cierre controlado, etc., y si alguno de ellos es favorable para su aplicación para el caso de estudio de este trabajo.
- Investigar sobre métodos de cálculo de la distancia mínima en aire necesaria entre los polos del seccionador by-pass para evitar la generación de un arco sostenido debido al TRV.

En cuanto a la operación del sistema analizado se puede recomendar:

- Realizar el cierre del circuito de la bahía de línea mientras se encuentra conectado el lado de la subestación Esmeraldas, ya que estos presentaron los menores valores de voltaje, corriente y energía en el pararrayos.
- Tanto para el caso de apertura como para el cierre del circuito de línea, se debería procurar que se realicen de forma controlada a fin de evitar los picos de onda de voltaje; para lo cual se puede emplear interruptores con cierre controlado, ya que en dichos casos se presentaron los voltajes, corrientes y por ende energía más elevados.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. C. Das, *Transients in Electrical Systems - Analysis, Recognition and Mitigation*, New York: McGraw-Hill, 2010.
- [2] IEEE Power and Energy Society, «IEEE Guide for the Application of Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers above 1000 V,» IEEE Standards Association, New York, 2014.
- [3] D. P. Landázuri, M. Rumipamba y L. Ruales, *Artists, Estudio y Propuesta de un Tipo de Interruptor a ser implementado*. [Art]. Escuela Politécnica Nacional.
- [4] IEEE Power and Energy Society, «IEEE Guide for the Application of Transient Recovery Voltage fo AC High-Voltage Circuit Breakers,» IEEE Standards Association, New York, 2011.
- [5] G. Olgún, «Electricidad - La revista energética de Chile,» B2B Media Group SPA, 9 mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.revistaei.cl/reportajes/voltaje-transitorio-recuperacion-trv/>. [Último acceso: 14 enero 2022].
- [6] J. A. Martínez, *Power System Transients-Parameter Determination*, Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [7] IEEE Power and Energy Society, «IEEE Standar for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis - PREFERRED Ratings and Related Required Capabilities for Voltages Above 1000 V,» IEEE, New York, 2009.
- [8] «Generando WATTS,» Cronozz, [En línea]. Available: <https://www.generandowatts.com/productos/seccionadores/>. [Último acceso: 23 enero 2022].
- [9] International Standar, «Insulation Co-ordination - Part1:Definitions, principles and rules,» IEC, Geneva, 2006.
- [10] J. A. Martínez, *Coordinación de Aislamiento en Redes Eléctricas de Alta Tensión*, Madrid: McGraw-Hill, 2008.
- [11] «Sector Electricidad,» [En línea]. Available: <https://www.sectorelectricidad.com/20135/seccionadores/>. [Último acceso: 23 enero 2022].
- [12] J. Woodworth, «ArresterWorks,» agosto 2016. [En línea]. Available: http://www.arresterworks.com/arresterfacts/pdf_files/what_is_an_arrester.pdf. [Último acceso: 6 septiembre 2021].
- [13] J. Woodworth, «Arrester Works,» marzo 2017. [En línea]. Available: http://www.arresterworks.com/arresterfacts/pdf_files/ArresterFacts_003_Understanding_Arrester_Voltage-Current_Characteristic_Curves.pdf. [Último acceso: 6 septiembre 2021].

- [14] Metal Oxide Surge Arresters without Gaps for AC Systems, China: National Standards of People's Republic of China, 2011.
- [15] «Orient Electric,» Orient Electric International Group Limited, [En línea]. Available: <http://www.oeipower.com/Jc-Monitor-for-Surge-Arrester-pd6339733.html>. [Último acceso: 2 enero 2022].
- [16] ABB Surge Arresters, «ABB Library,» 2008. [En línea]. Available: <https://library.e.abb.com/public/f5bca70c527f7005c1257b130057b818/Surge%20Arrester%20Buyers%20Guide%20Edition%206.pdf>. [Último acceso: 10 septiembre 2021].
- [17] A. Santano, Artist, *Formas de Onda de la Tensión Transitoria de Restablecimiento en un Disyuntor*. [Art]. Universidad Carlos III de Madrid, 2018.
- [18] Lu, Wang y Xin, «Interruptor 230 kV ALSTOM Suzhou,» 2017.
- [19] «Placas de las características SO 225165 (016-2016) - Proyecto S.E. Esmeraldas,» ALSTOM Grid S.p.A, Venezia, 2017.
- [20] Yang, Lu, Zhang y Zhu, «Xian XD 230 kV arrester,» 2016.
- [21] J. Woodworth, «ArresterWorks,» 4 agosto 2011. [En línea]. Available: <http://www.arresterworks.com/arresterfacts/arresterfacts.php>. [Último acceso: 12 noviembre 2020].
- [22] Berlese y Ferrarese, «Seccionador Tripolar Tipo S3C 245 kV,» 2016.

5 ANEXOS

ANEXO I. Geometría de la línea de transmisión Esmeraldas – Santo Domingo 230 kV simulada en ATPDraw.

ANEXO II. Gráficas de formas de onda obtenidas de la simulación en ATPDraw.

ANEXO I

A continuación, se presentan los parámetros ingresados en el modelo de línea simulado, en los que resaltan la resistencia y radio externo del conductor, así como su ubicación geométrica tomando en la que se toma como referencia la base de la torre y la mitad o centro vertical de la misma.

Line/Cable Data: T1

Model | **Data** | **Nodes**

System type: Template Embed
 Single ph. icon

Name: T1

Overhead Line #Ph: 6

Standard data:
 Rho [ohm*m]: 51.92
 Freq. init [Hz]: 0.01
 Length [km]: 50
 Set length in icon

Transpose
 Auto bundling
 Skin effect
 Segmented ground
 Real transf. matrix

Units:
 Metric
 English

Model Type:
 Bergeron
 PI
 JMarti
 Noda
 Semlyen

Data:
 Decades: 8 Points/Dec: 10
 Freq. matrix [Hz]: 1800 Freq. SS [Hz]: 60
 Use default fitting

Comment: _____ Order: 0 Label: _____ Hide

Buttons: OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

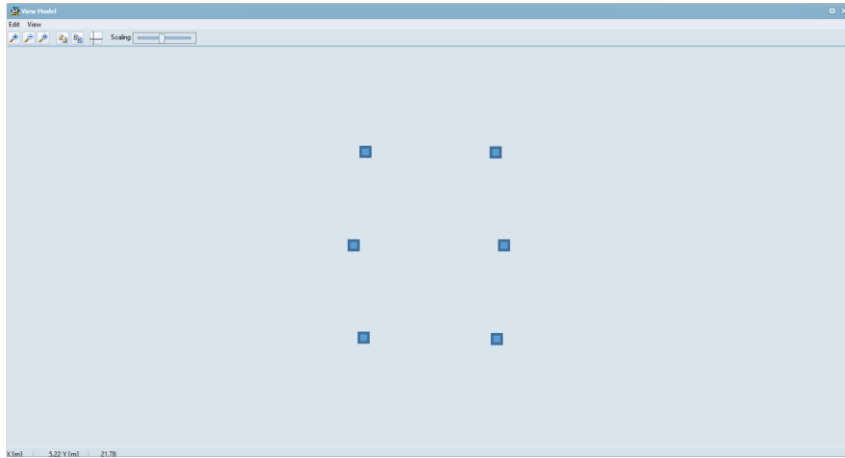
Line/Cable Data: T1

Model | **Data** | **Nodes**

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0	1.6	0.082	4	37.5	19
2	2	0	1.6	0.082	4.5	31	14
3	3	0	1.6	0.082	4	24.5	9
4	4	0	1.6	0.082	-4	37.5	19
5	5	0	1.6	0.082	-4.5	31	14
6	6	0	1.6	0.082	-4	24.5	9

Buttons: Add row Insert copy row Delete last row Delete this row Move (up/down arrows)

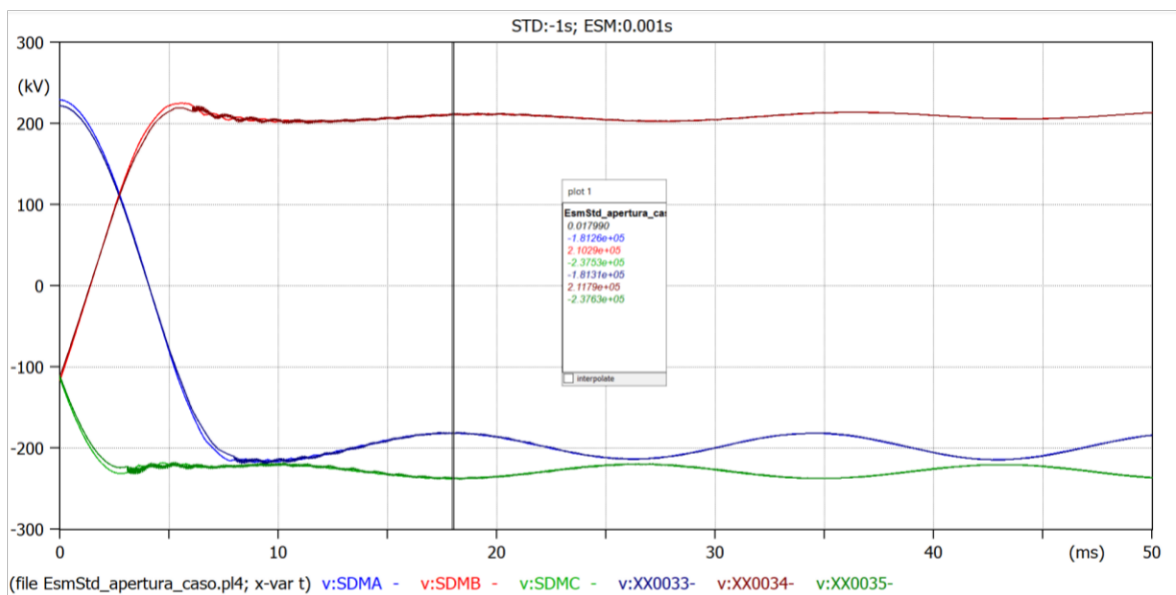
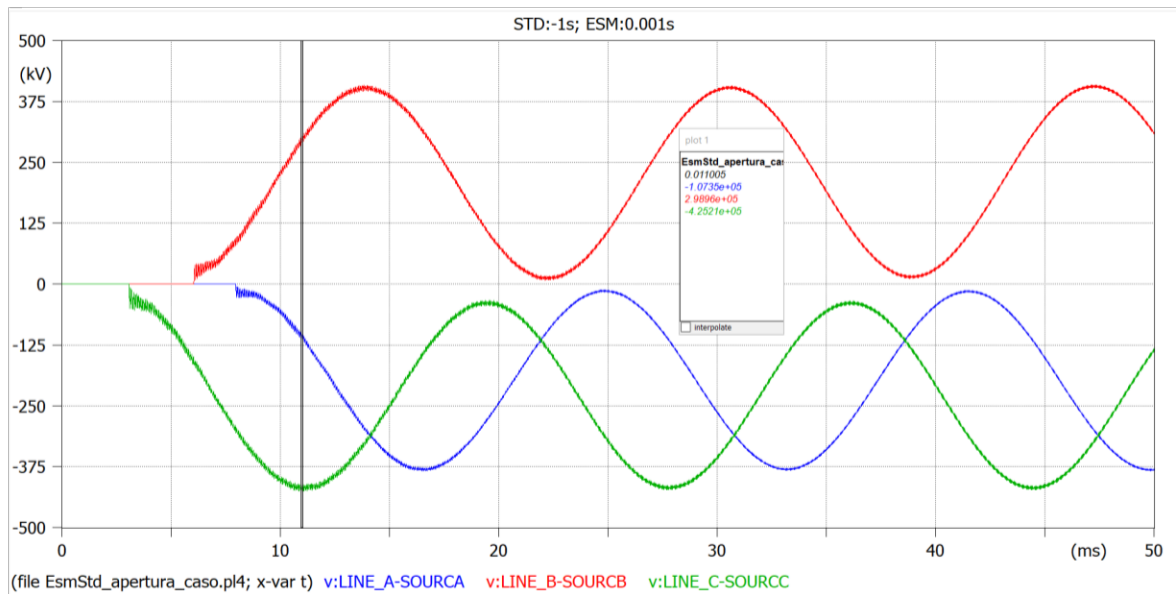
Buttons: OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

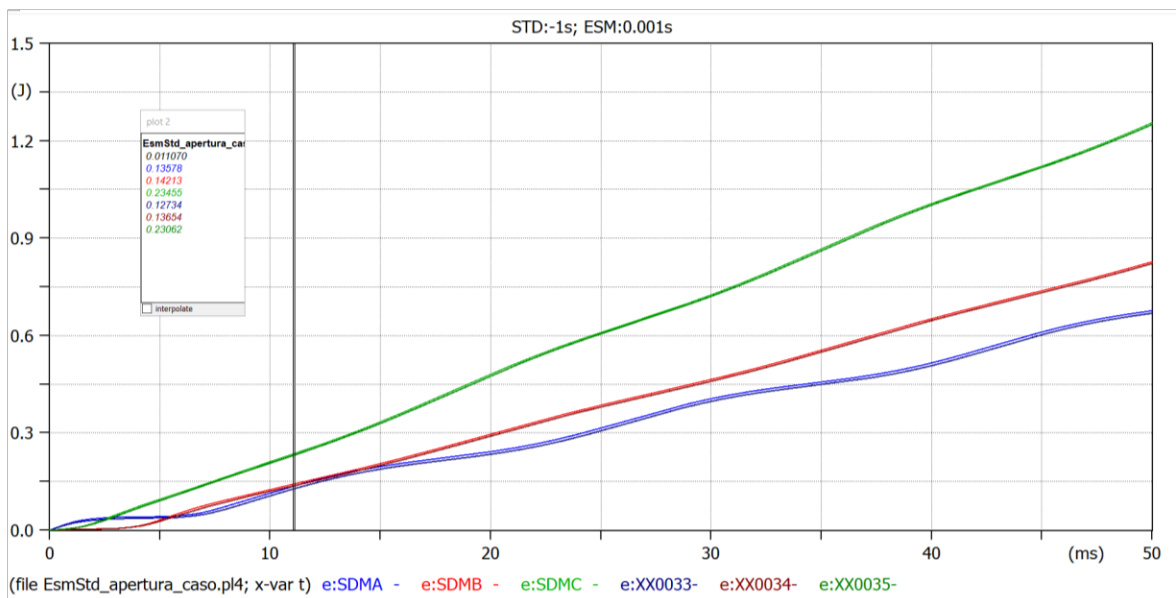
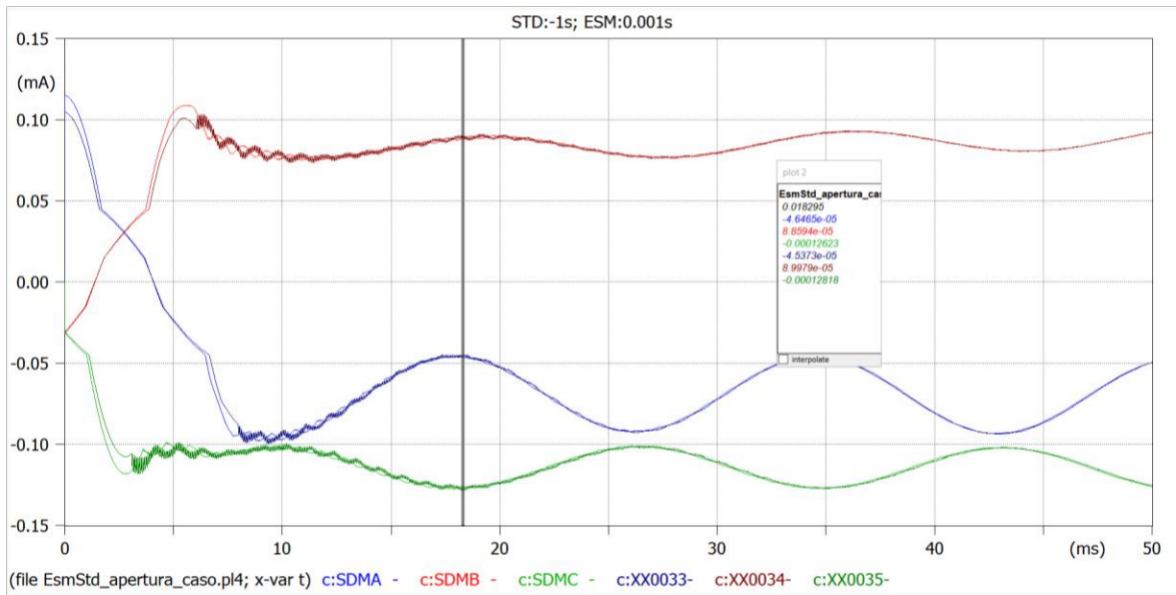


ANEXO II

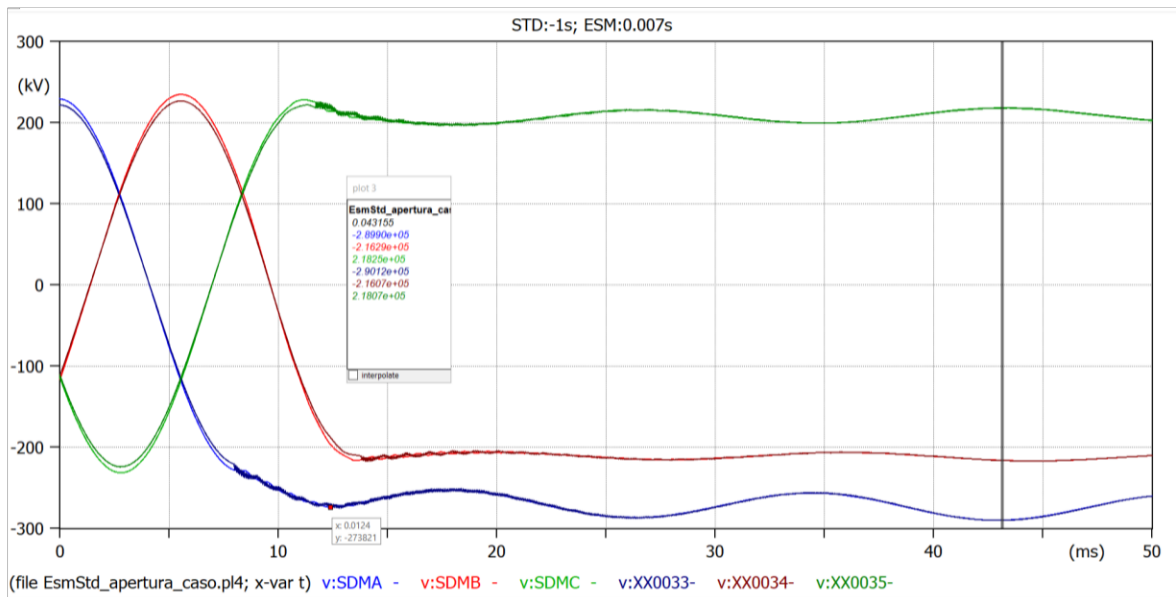
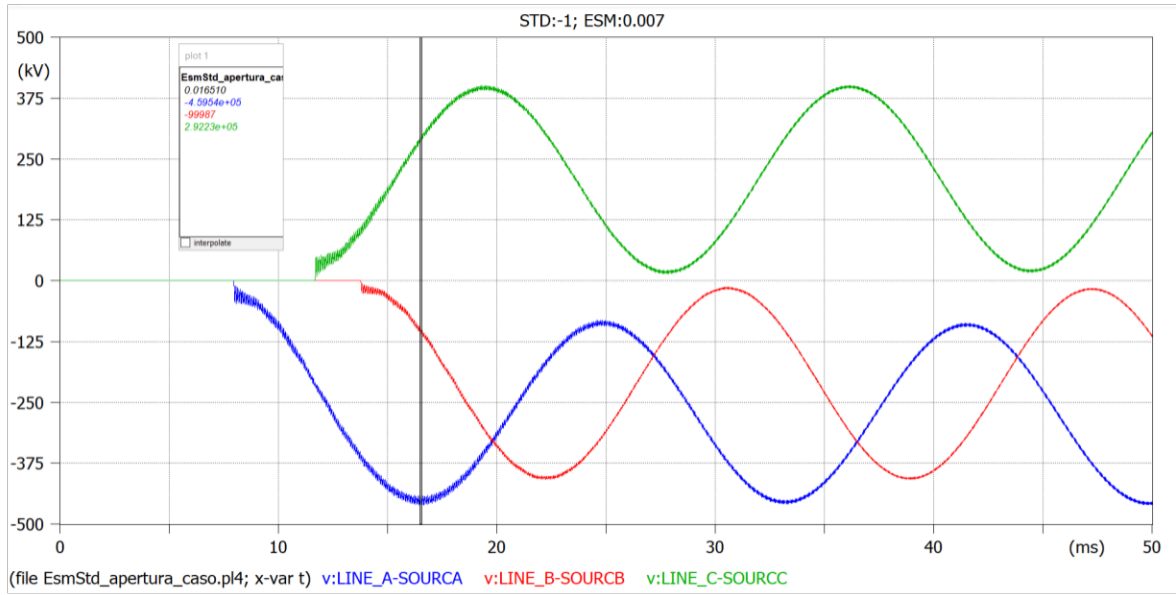
A continuación, se presentan los resultados de los escenarios simulados en el software ATPDraw para el caso de la apertura de uno de los circuitos de la línea de transmisión Esmeraldas – Santo Domingo a 230 kV según los tiempos de simulación mostrados en la Tabla 3.2 Las gráficas presentadas corresponden a las curvas del TRV del interruptor de la subestación Esmeraldas, el voltaje, la corriente y la energía de los pararrayos de ambas subestaciones.

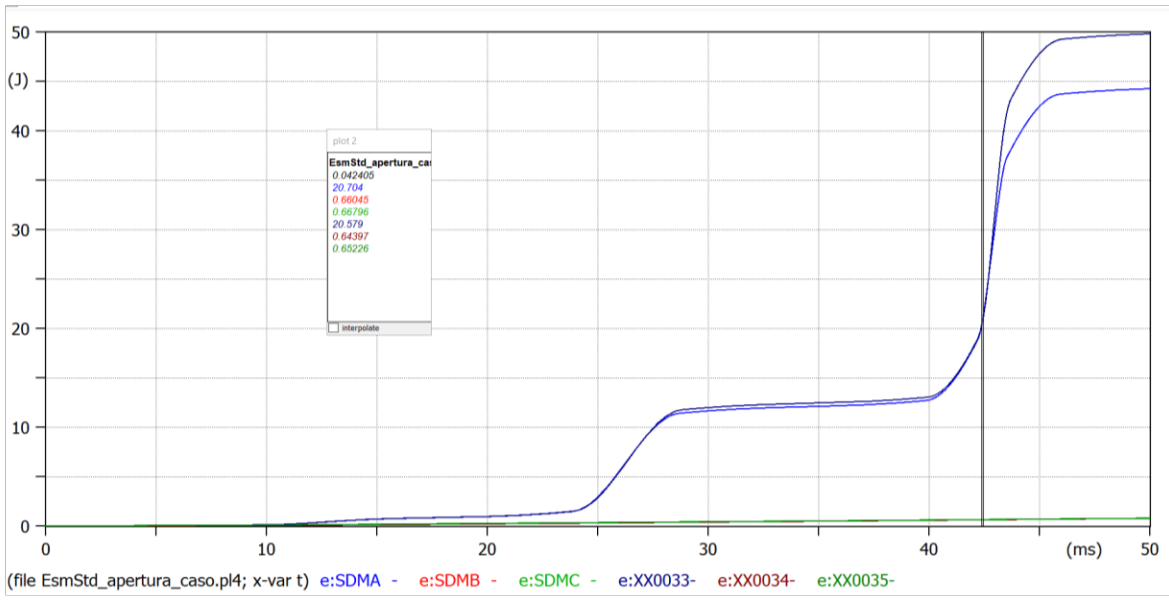
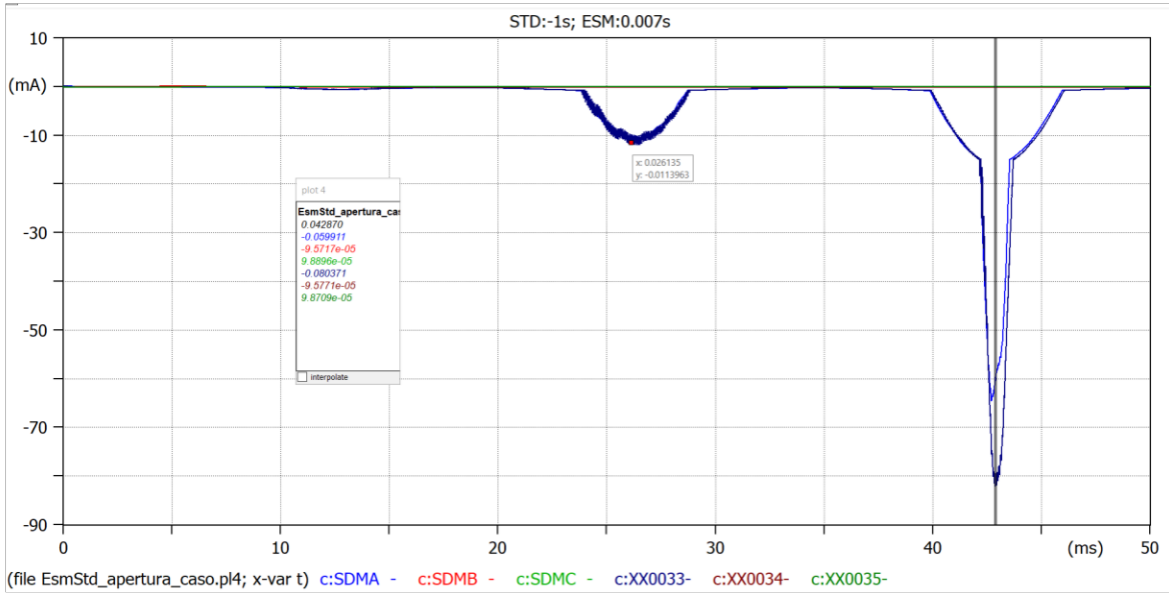
Escenario 1



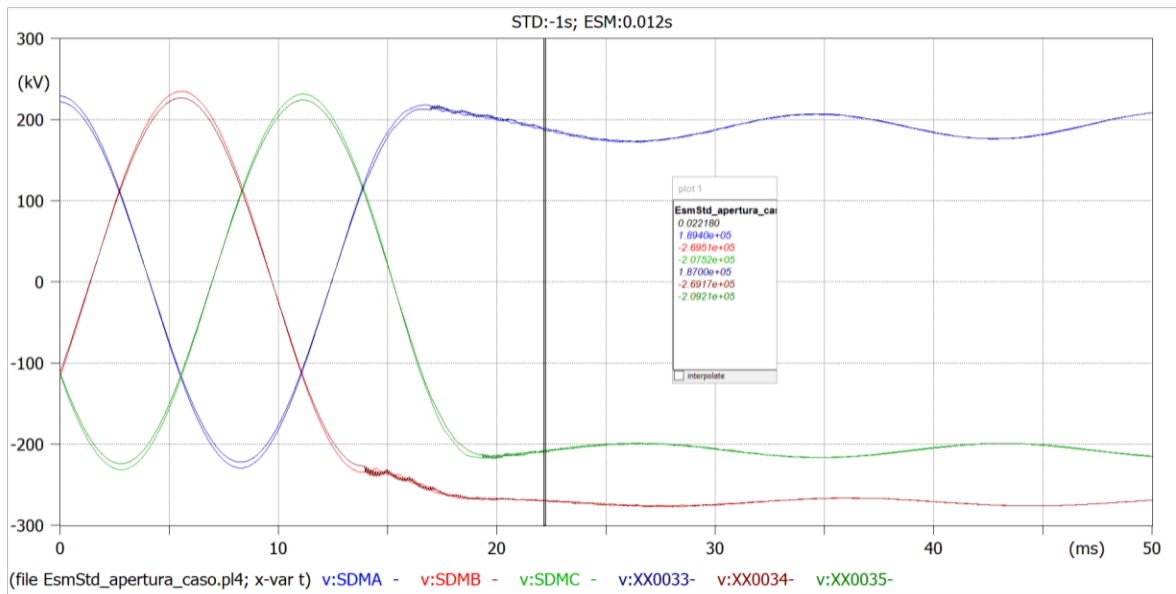
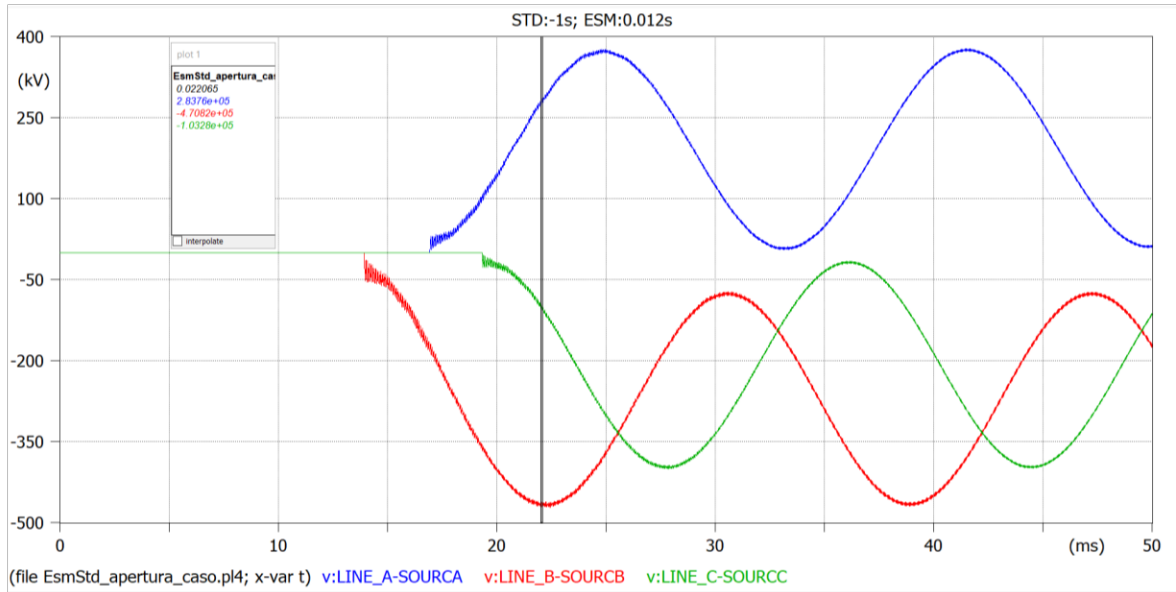


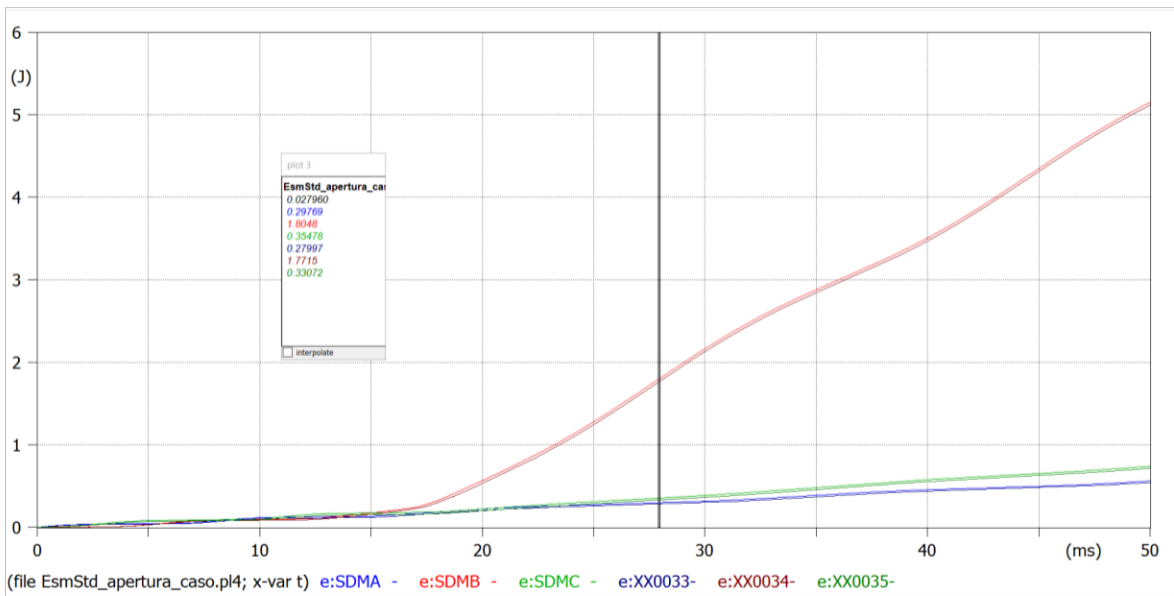
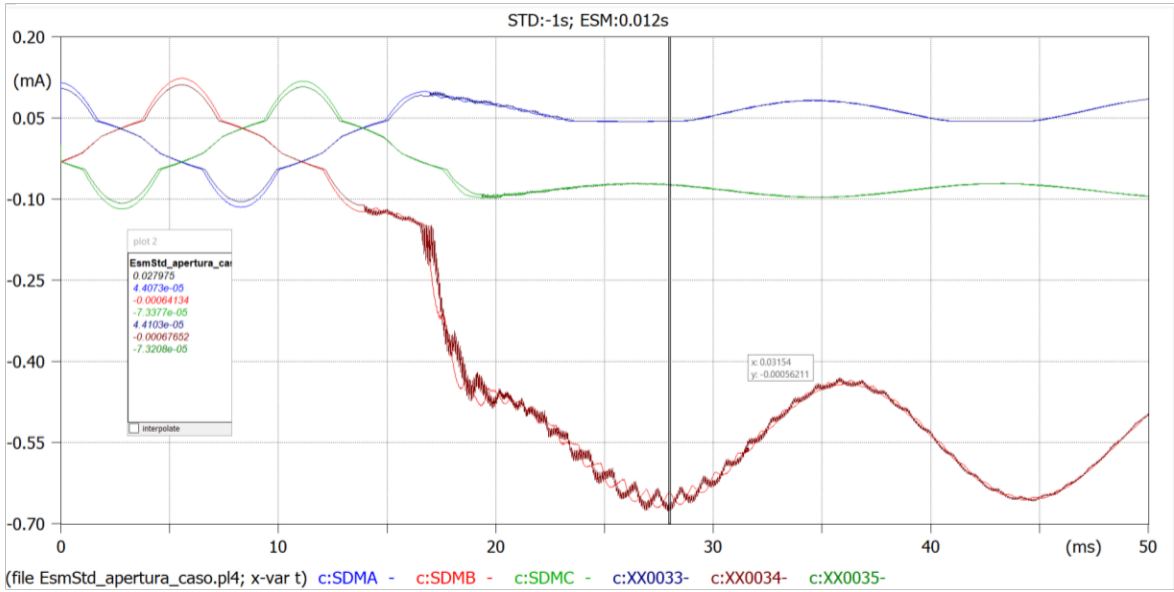
Escenario 2



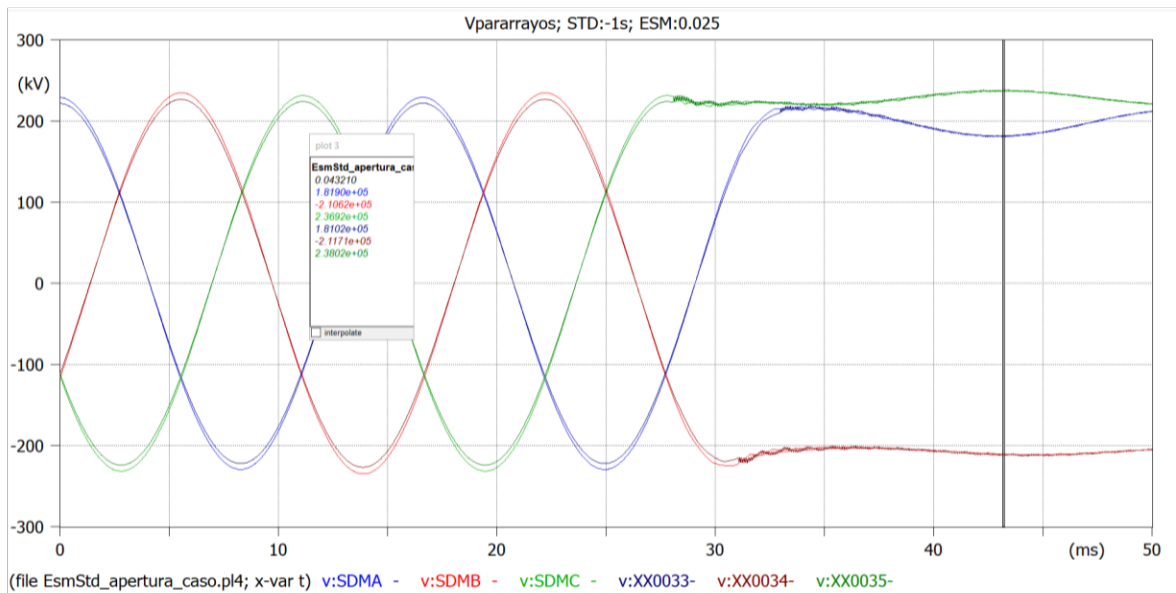
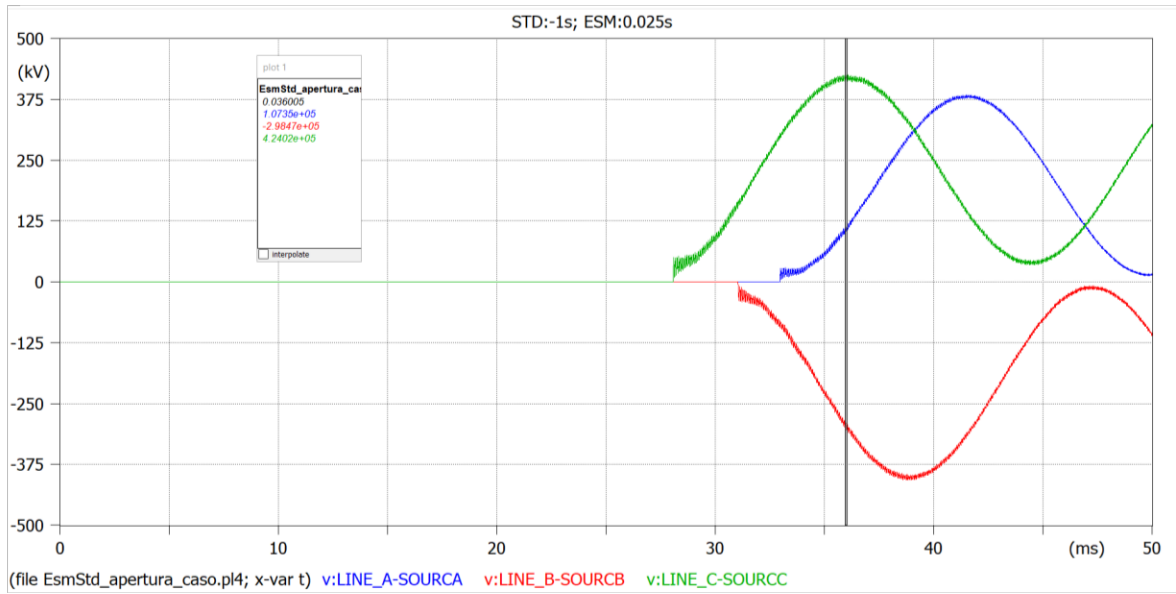


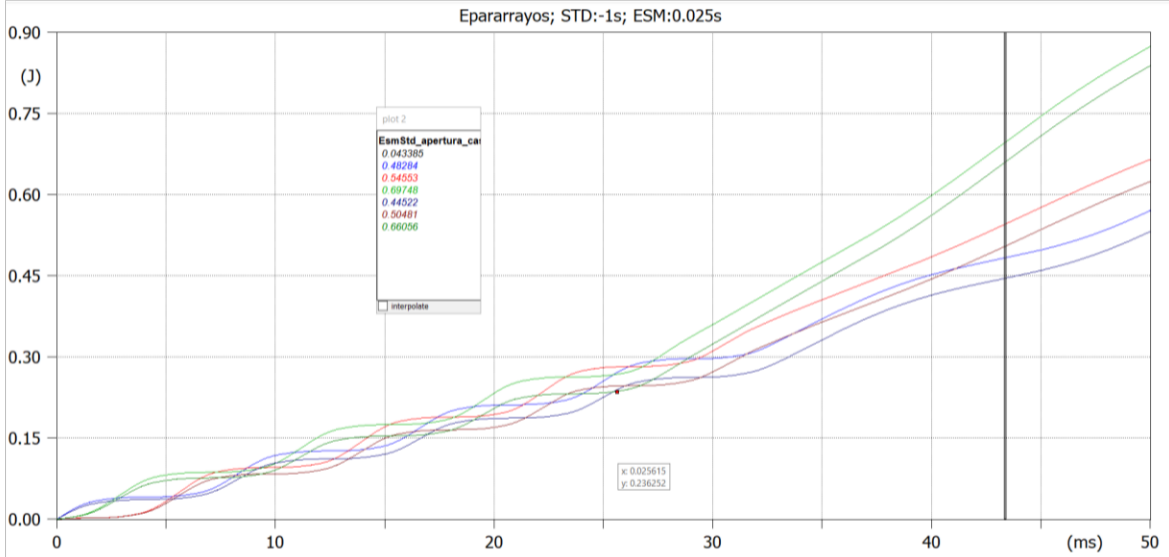
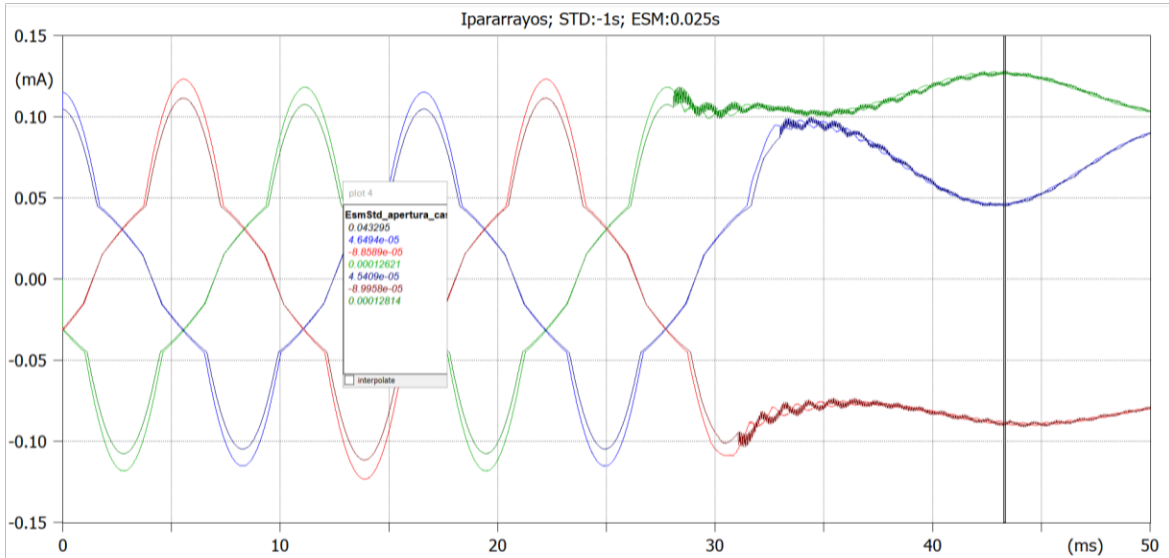
Escenario 3



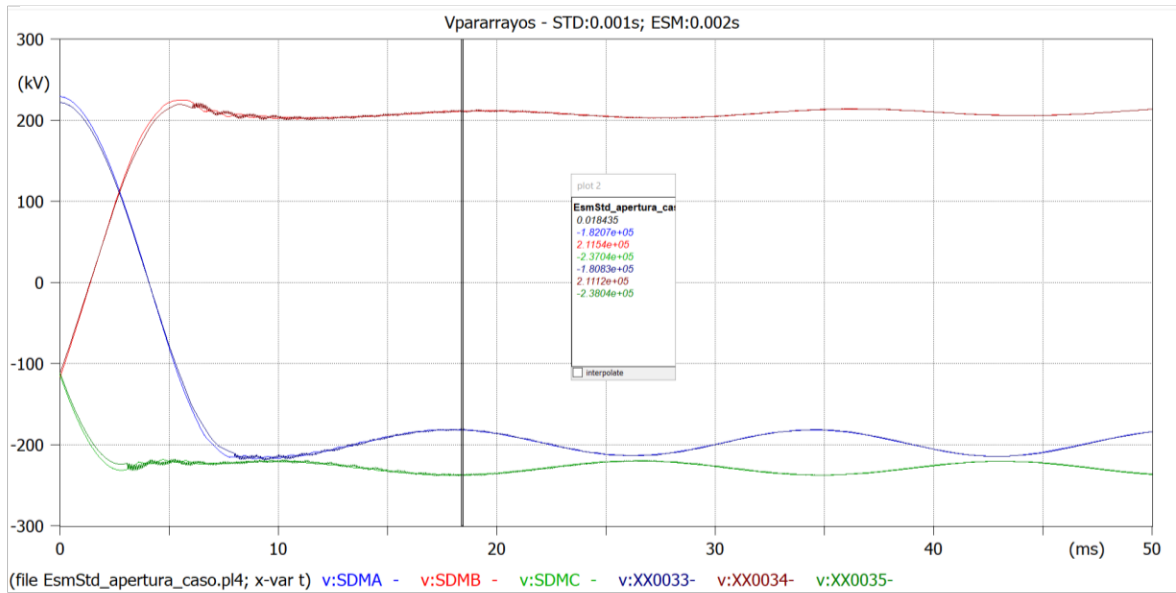
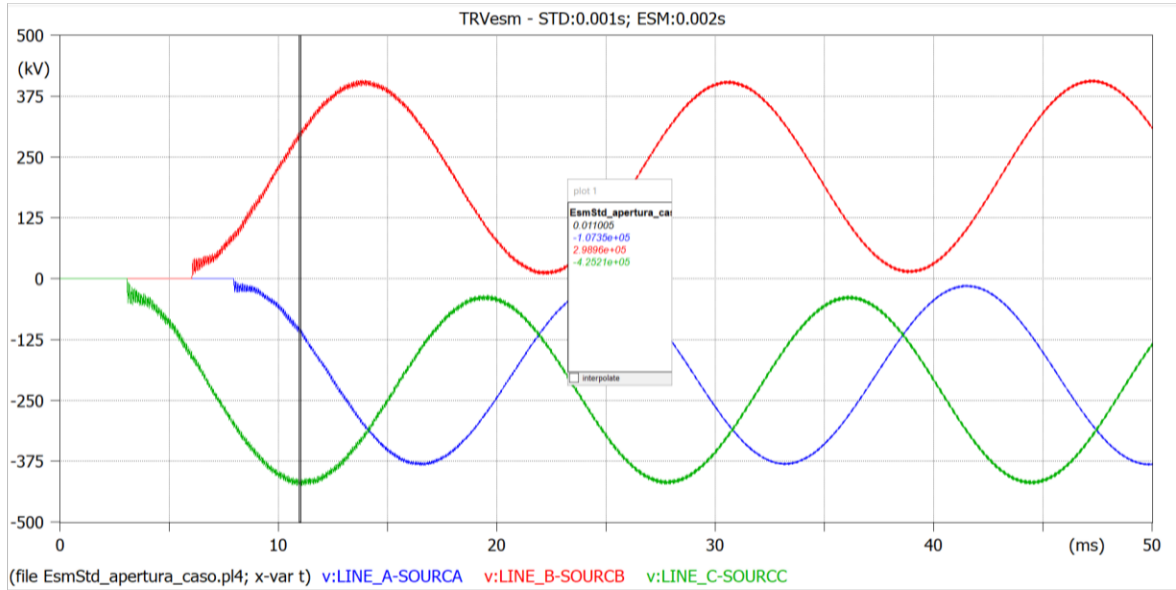


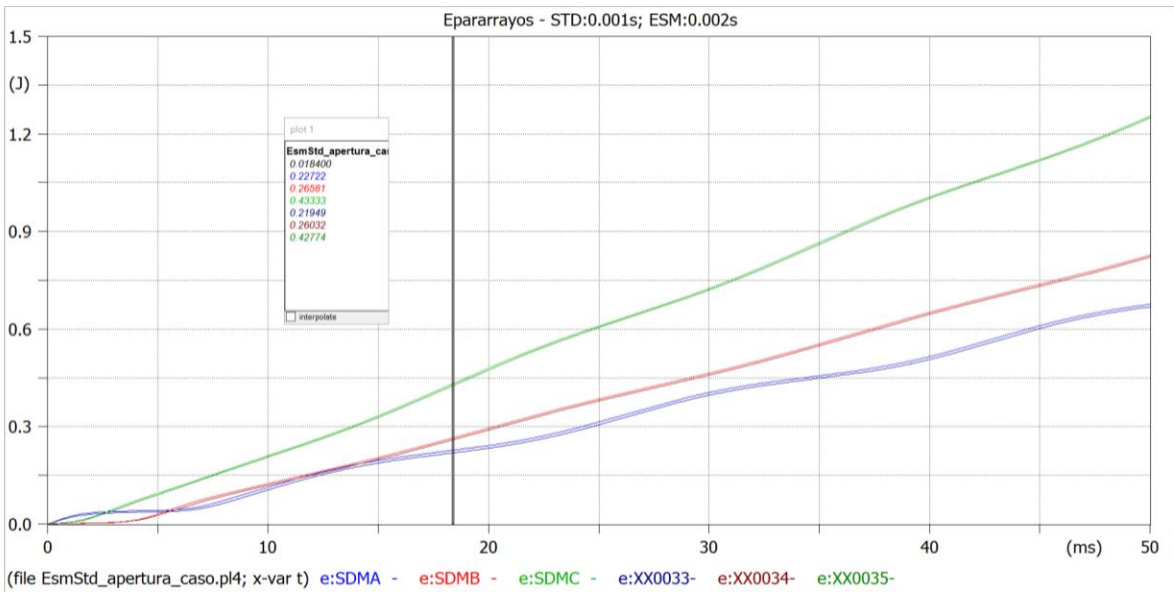
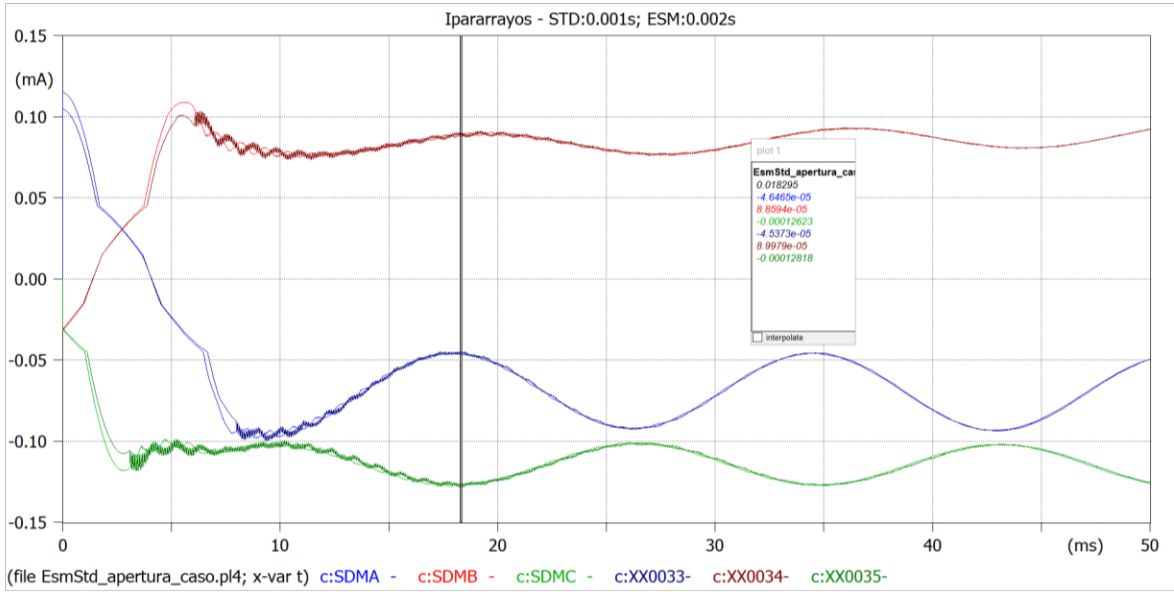
Escenario 4



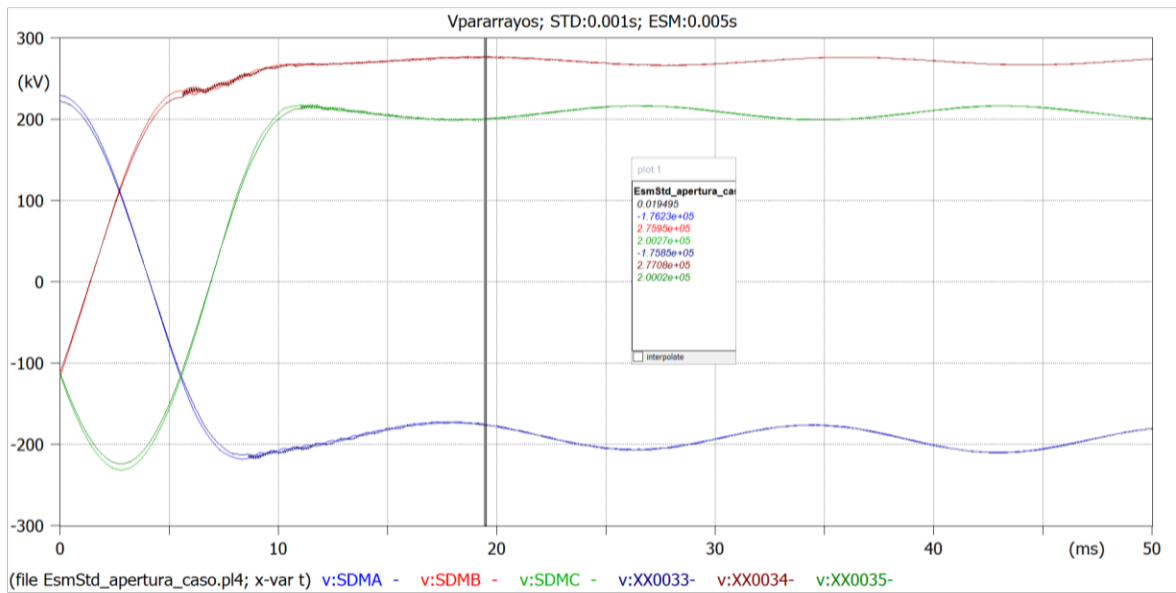
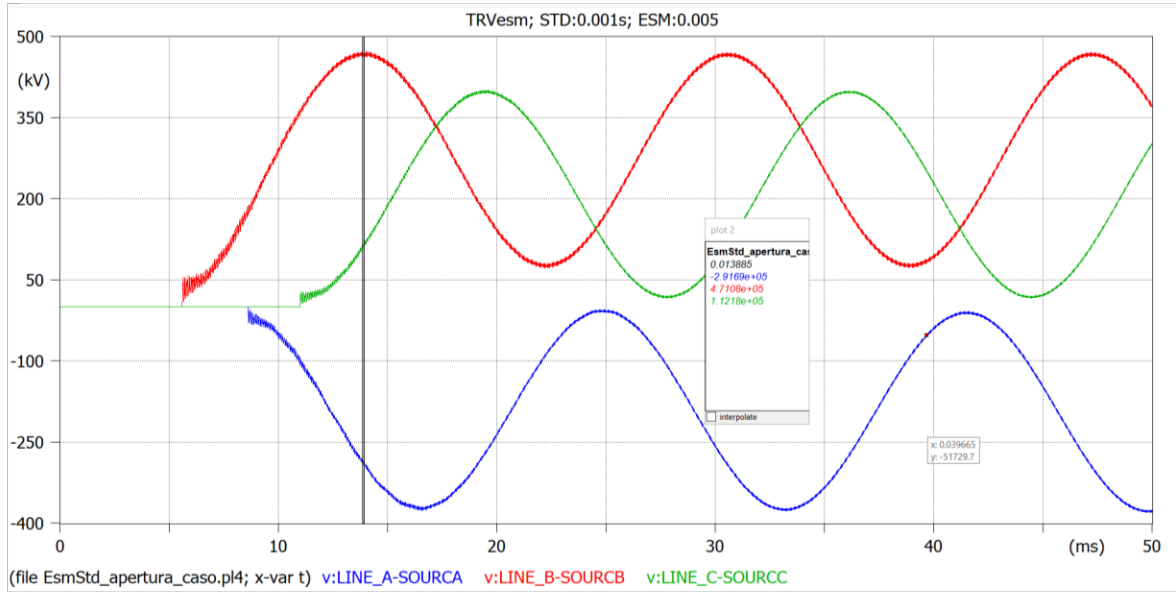


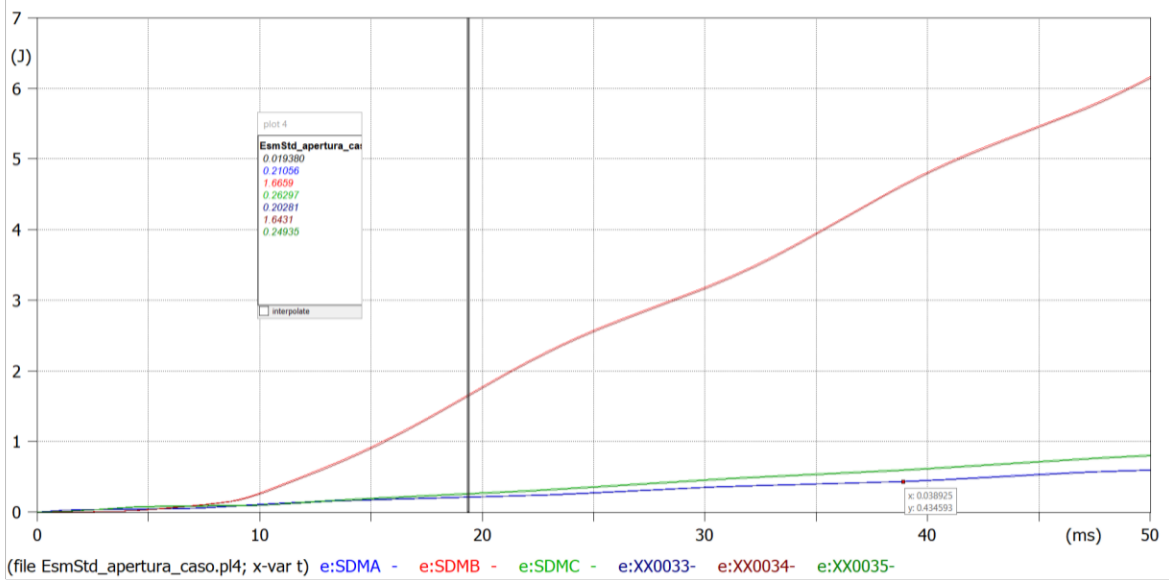
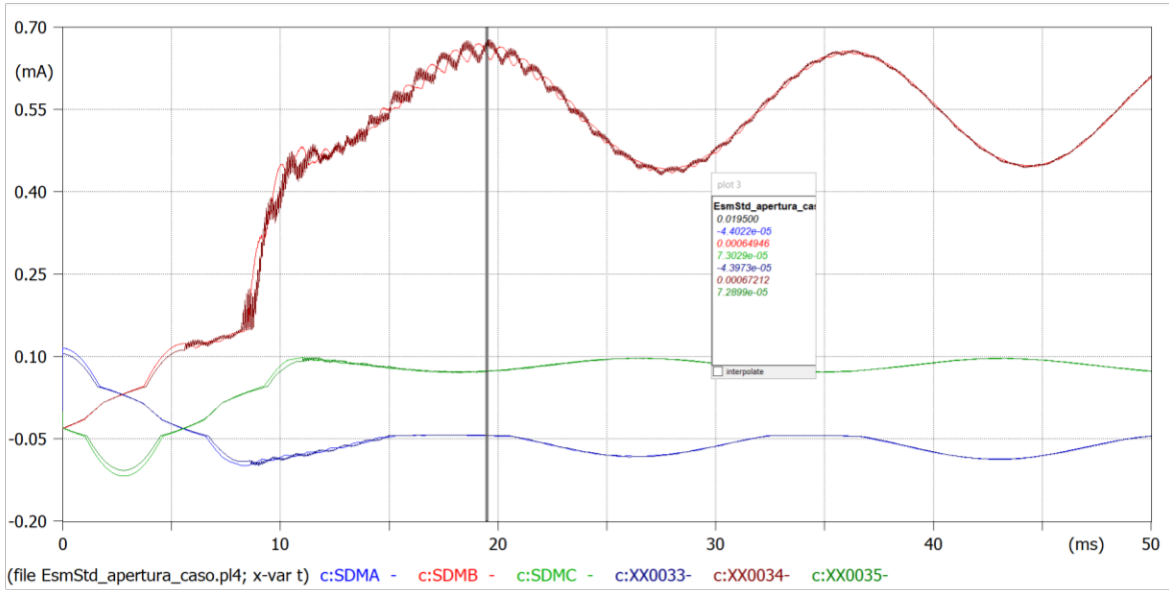
Escenario 5



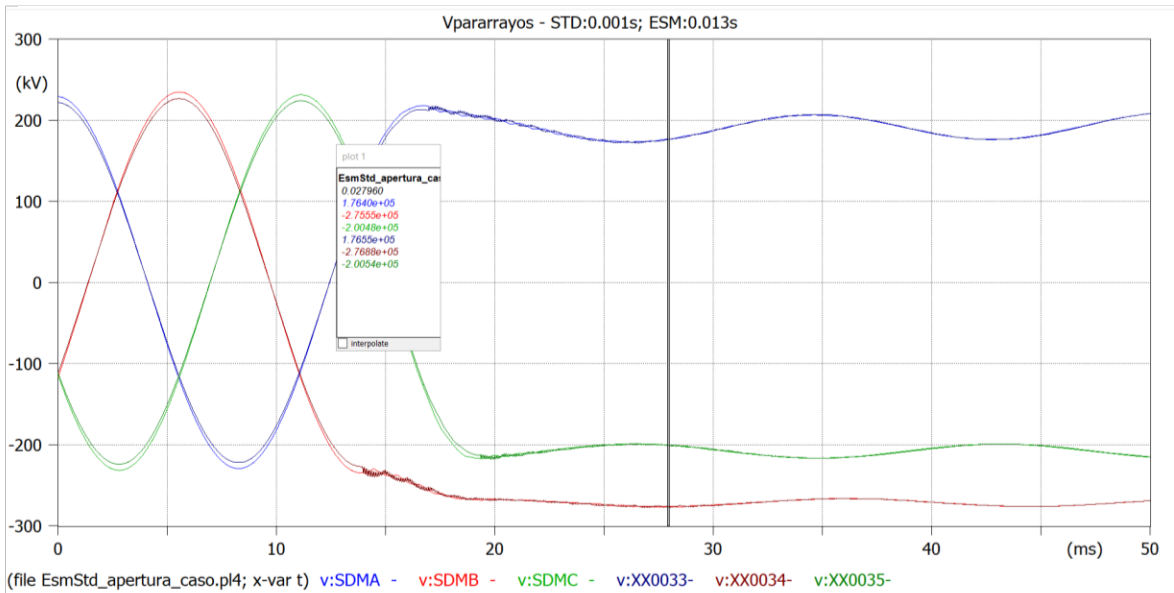
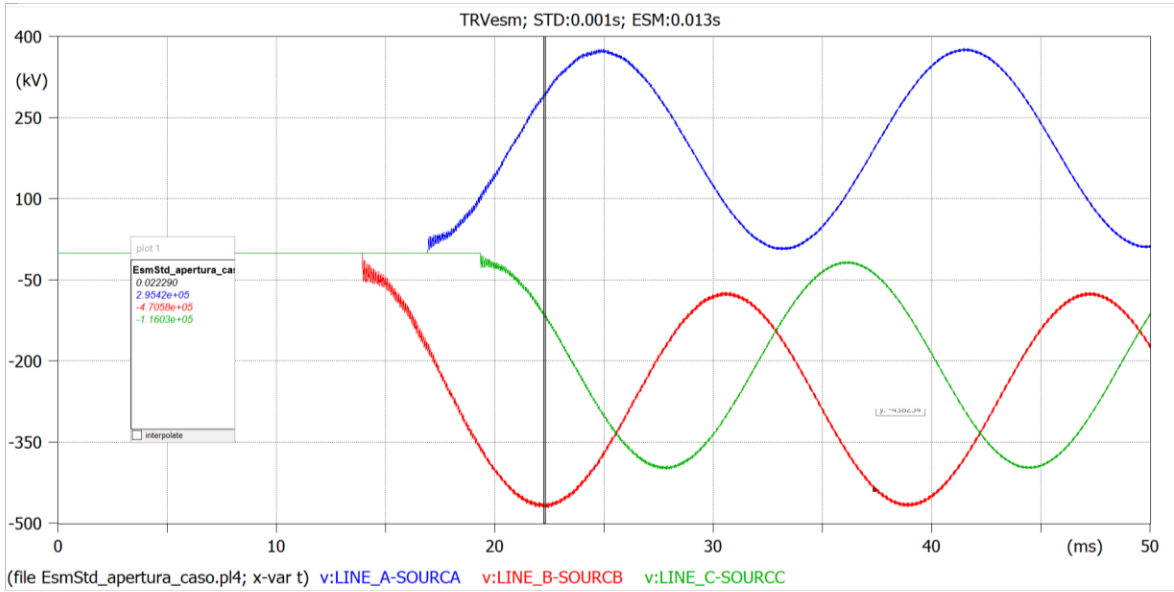


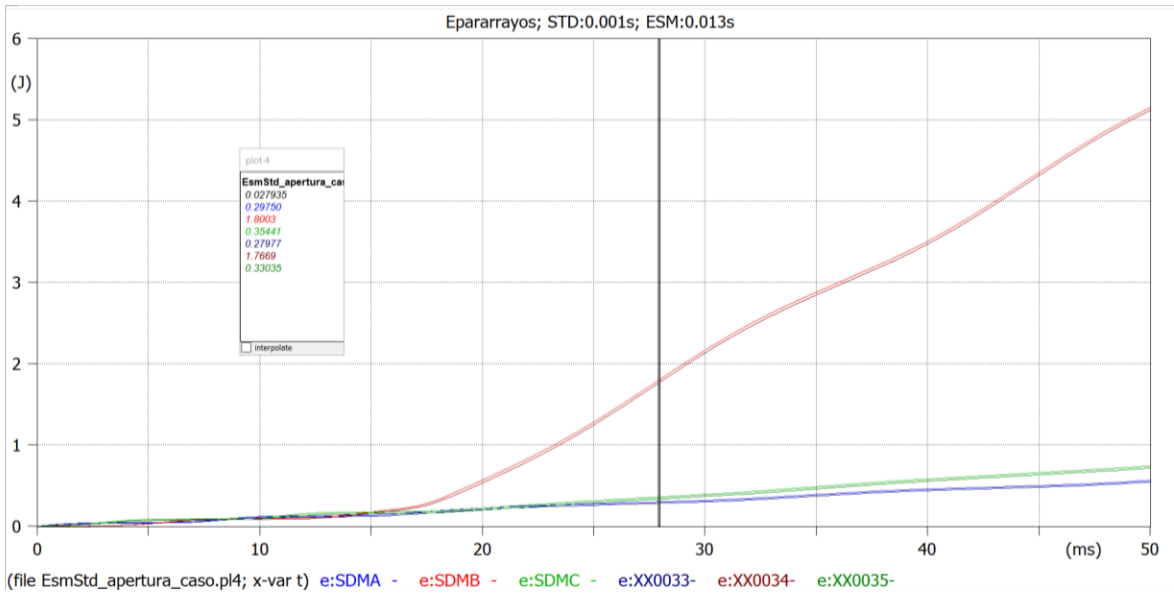
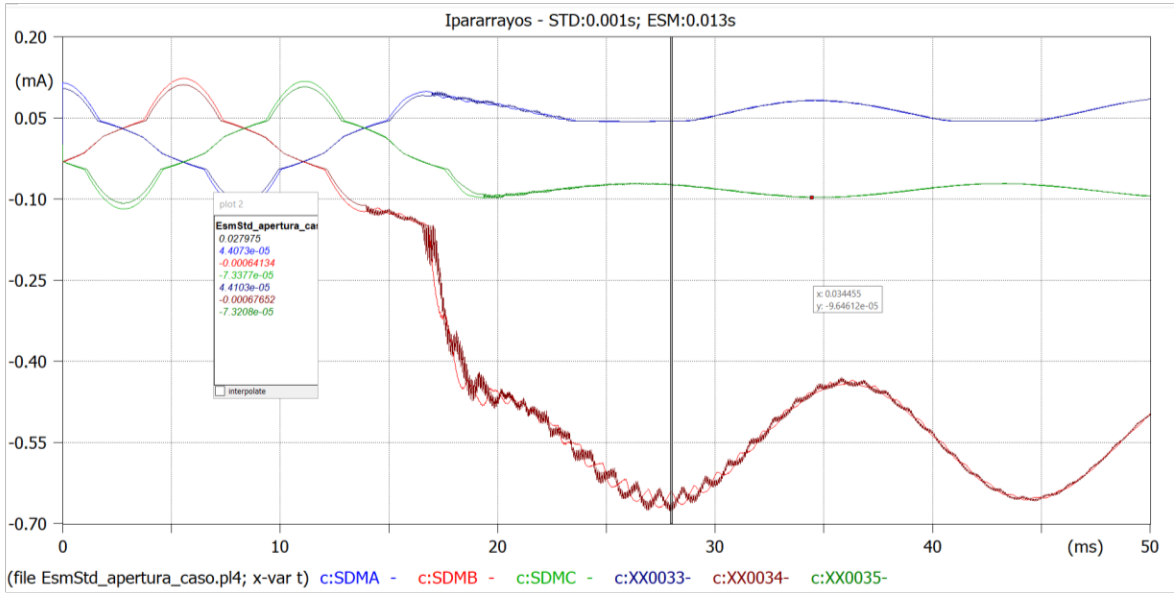
Escenario 6



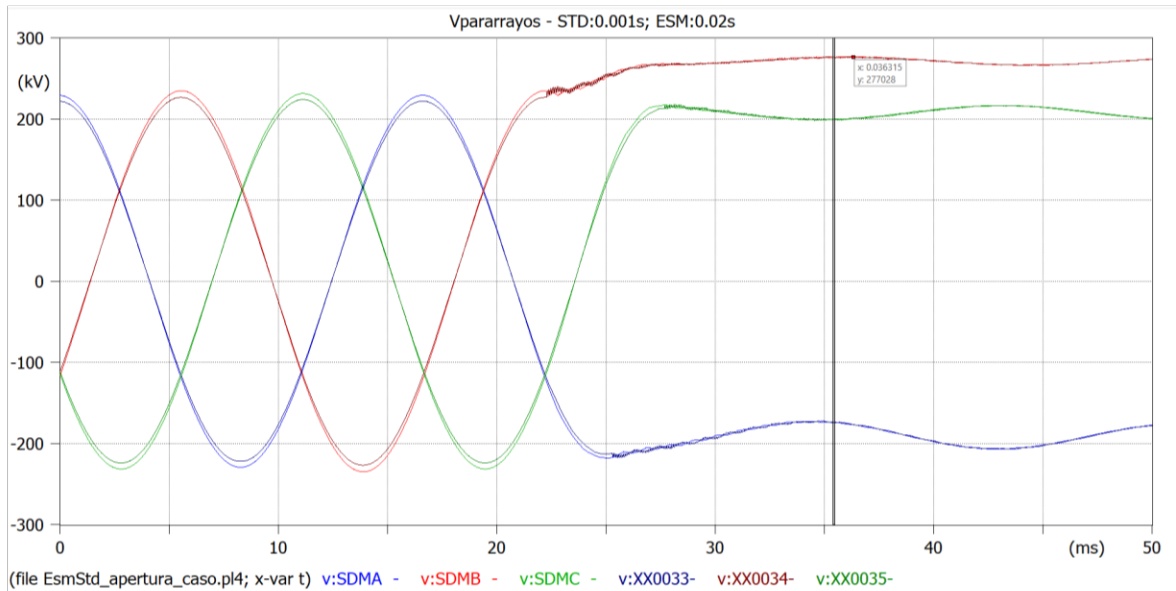
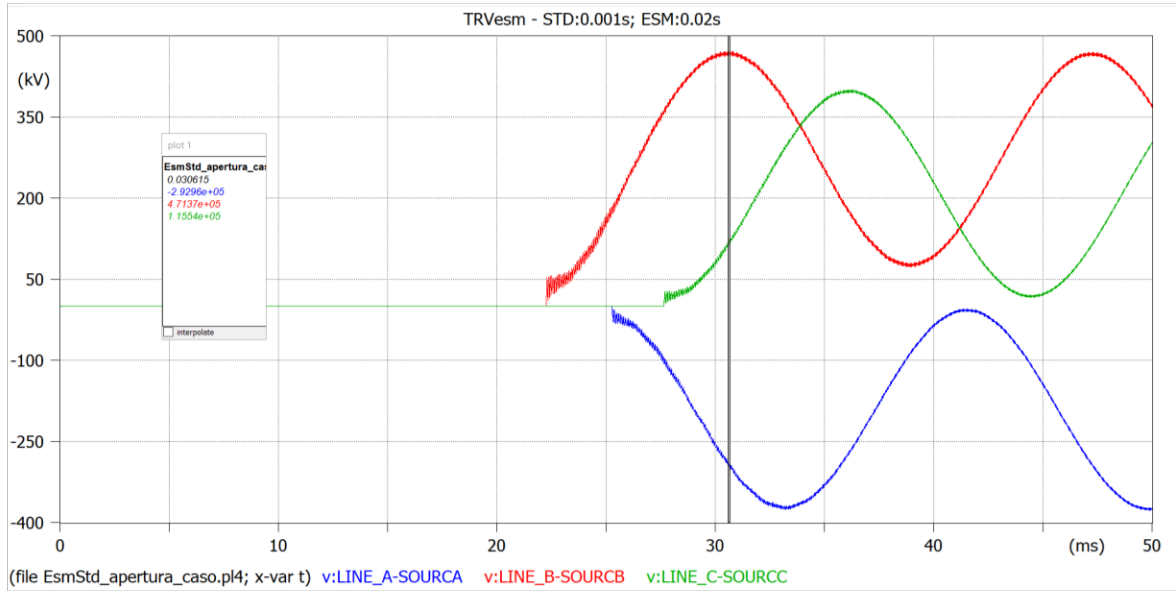


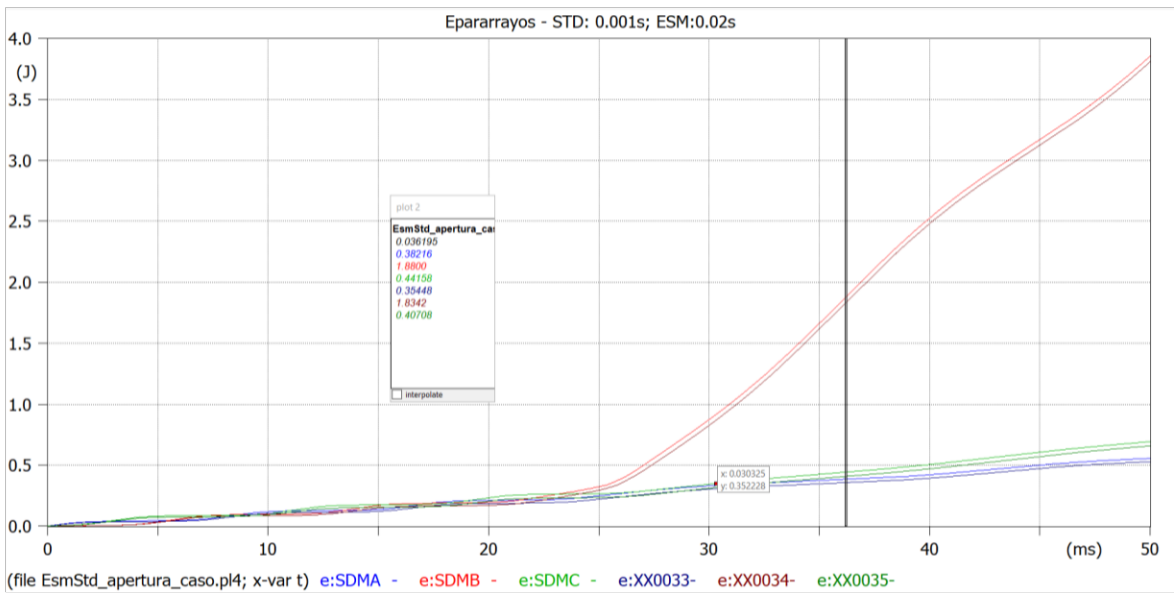
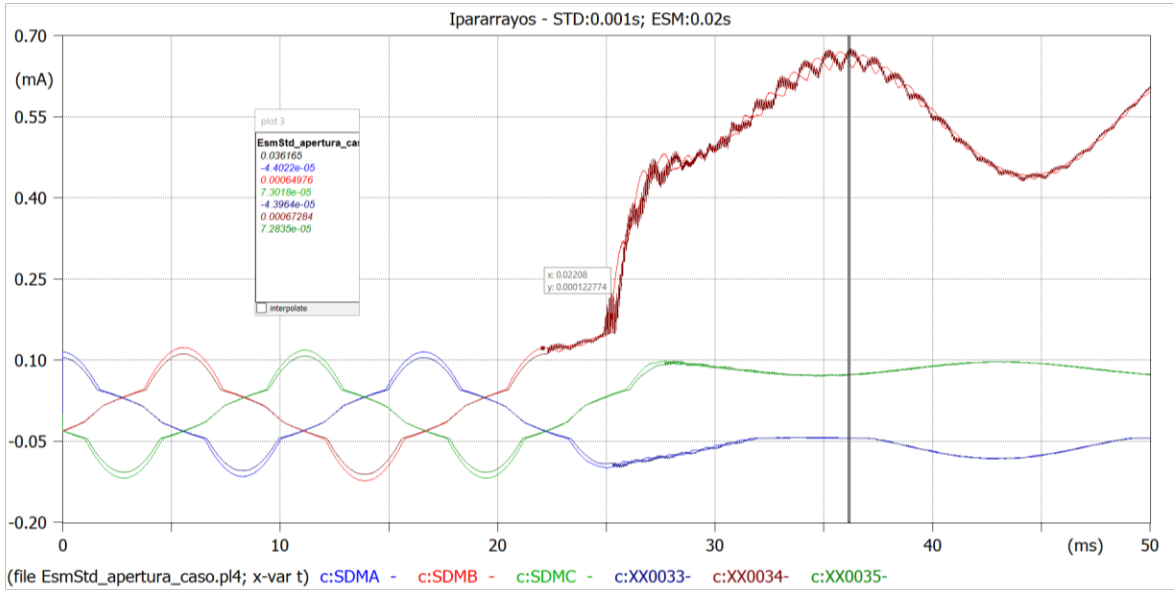
Escenario 7



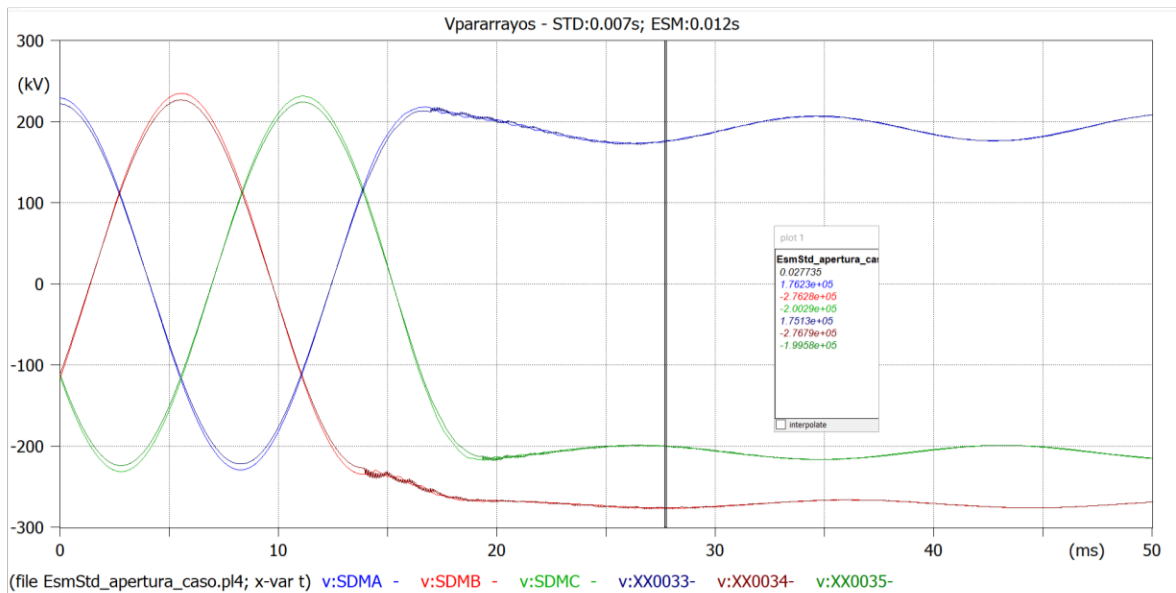
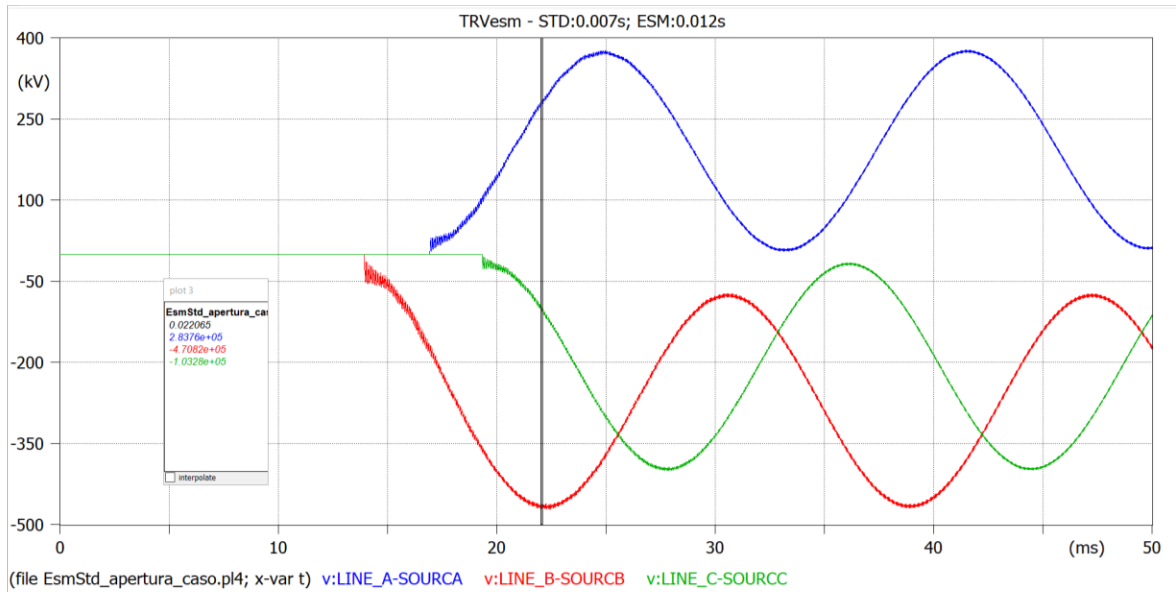


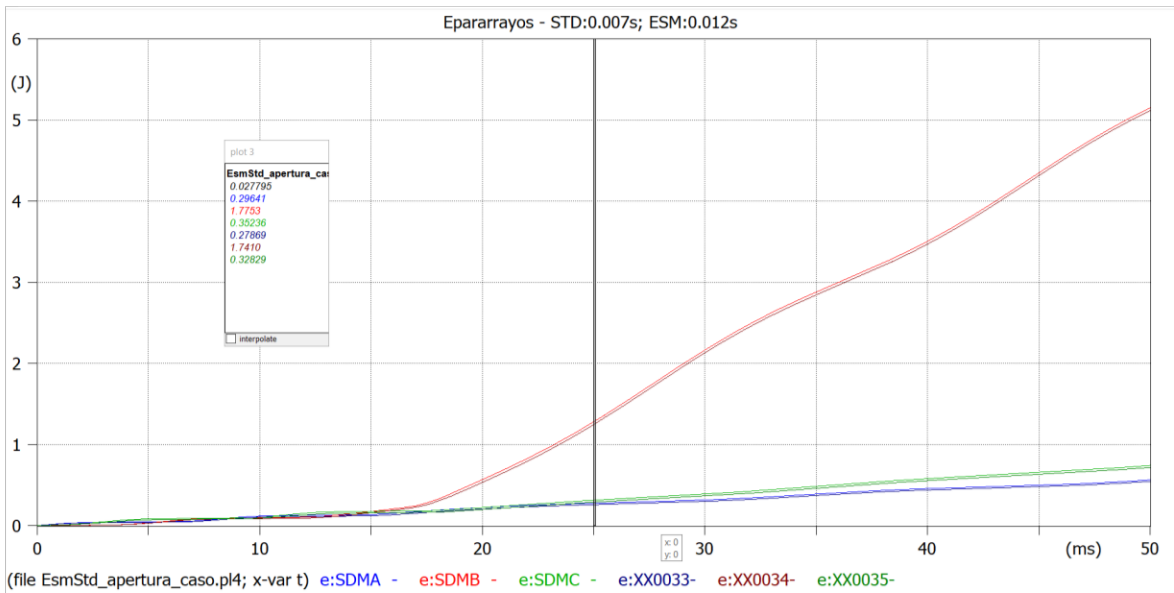
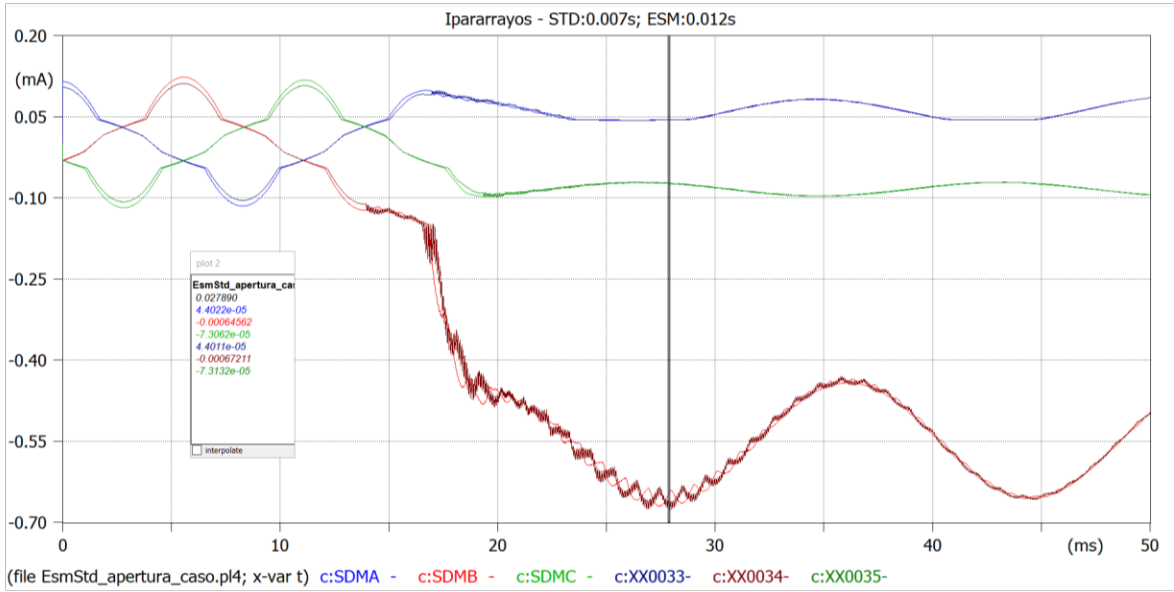
Escenario 8



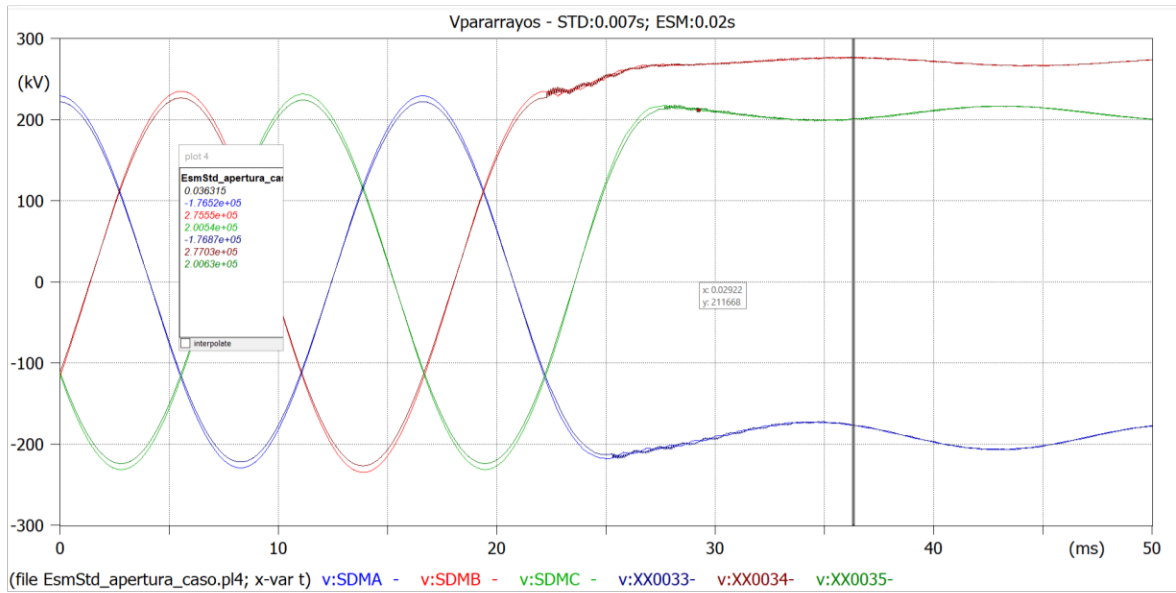
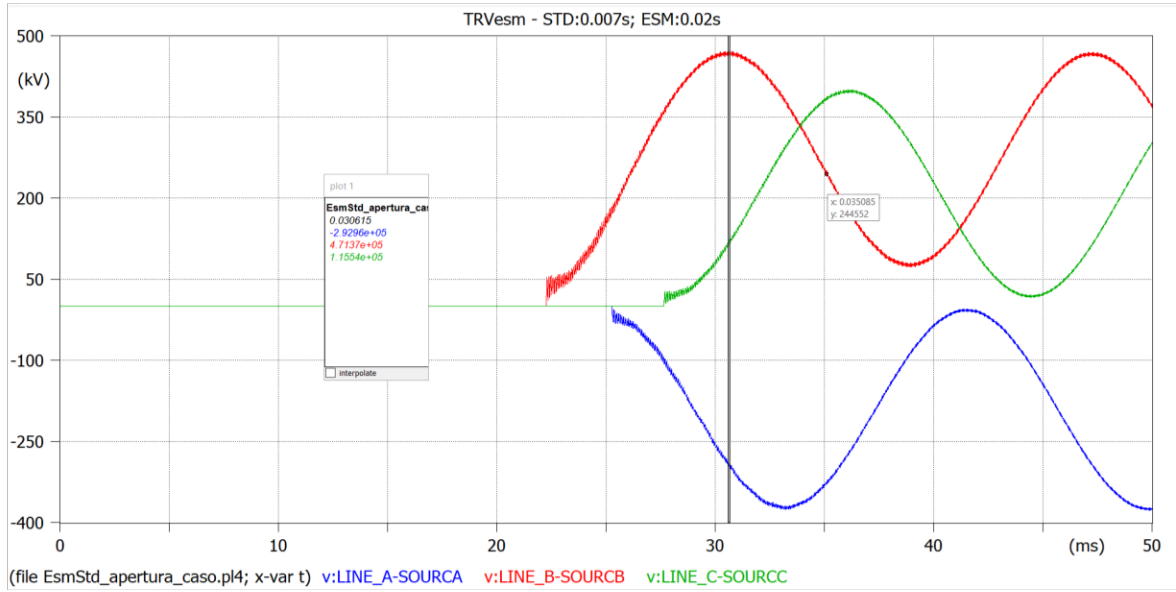


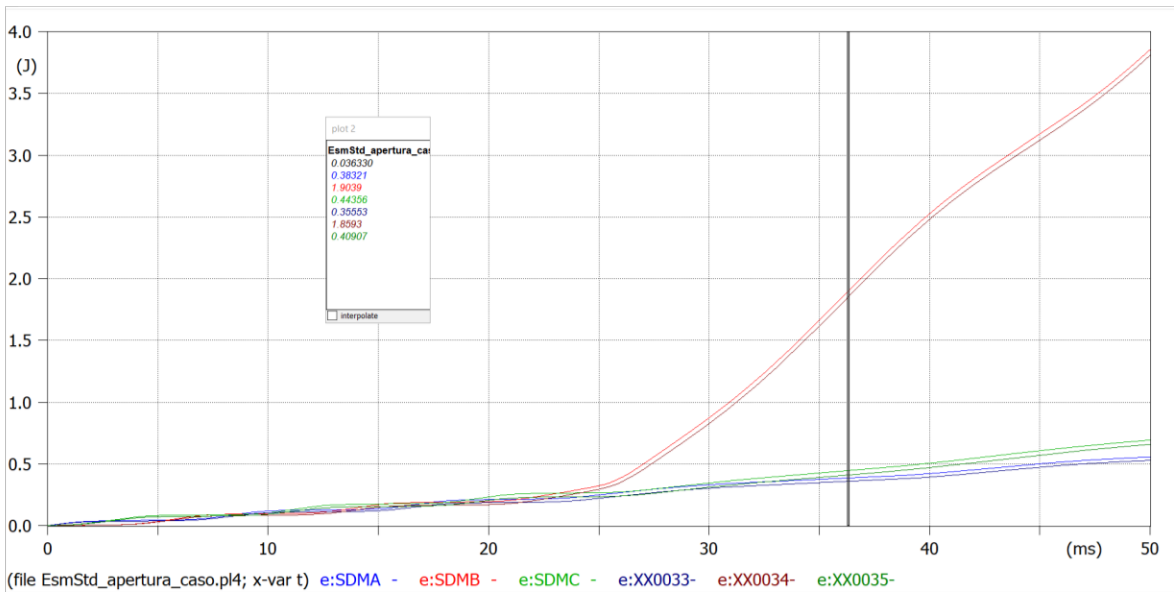
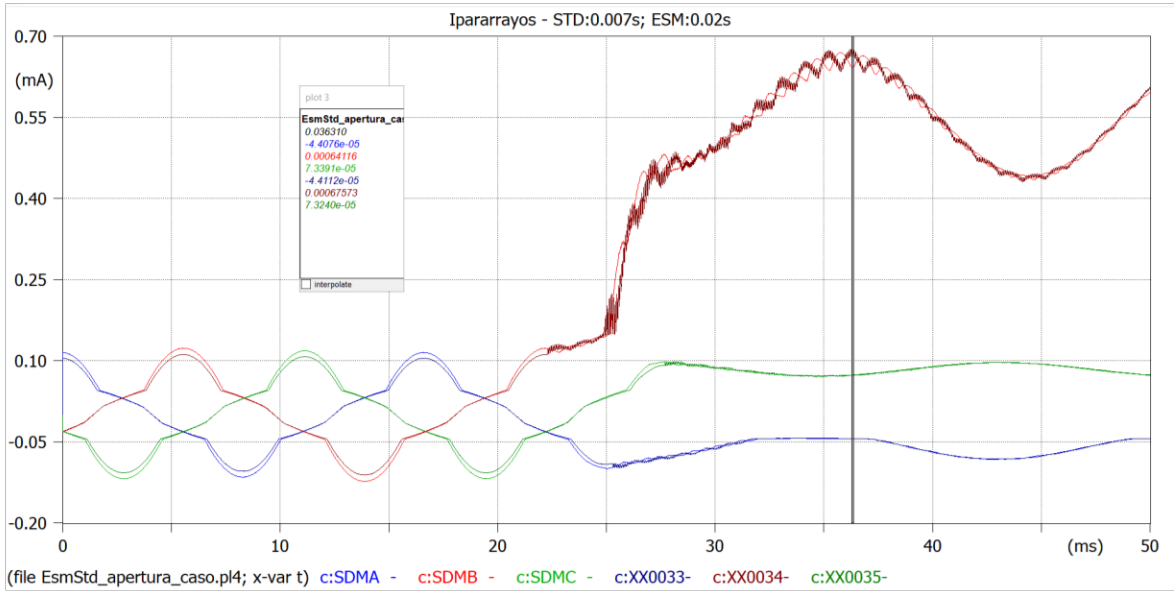
Escenario 9



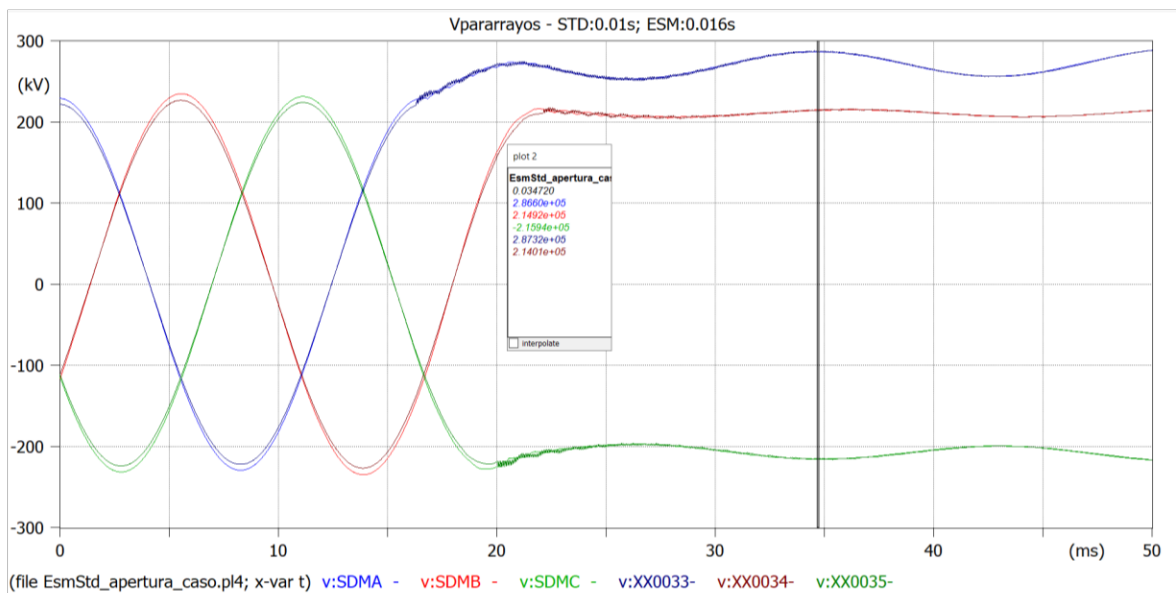
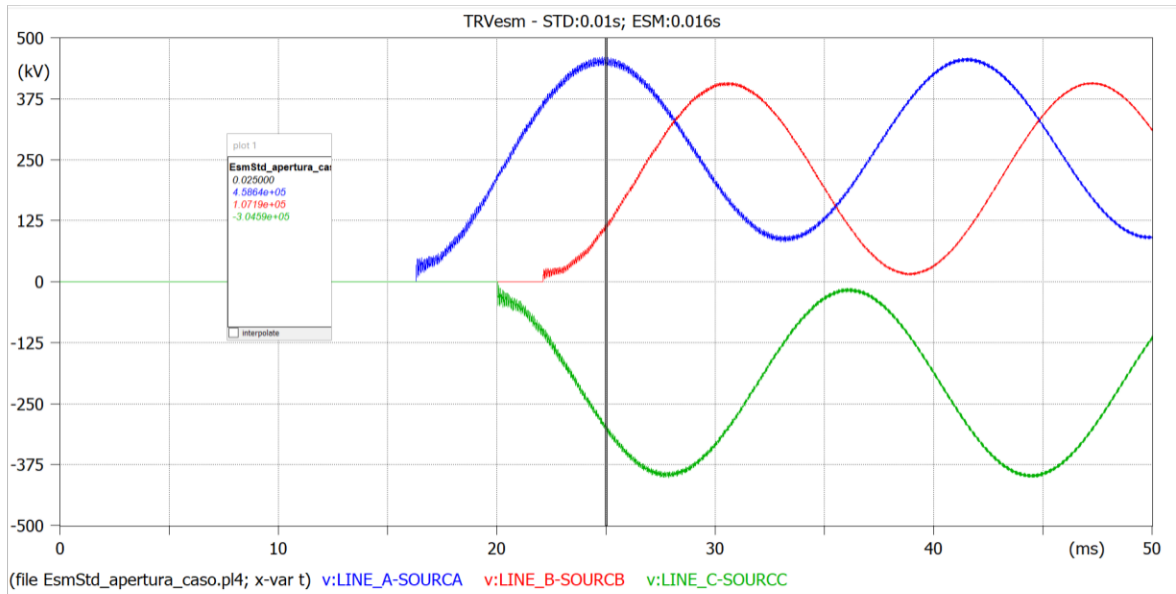


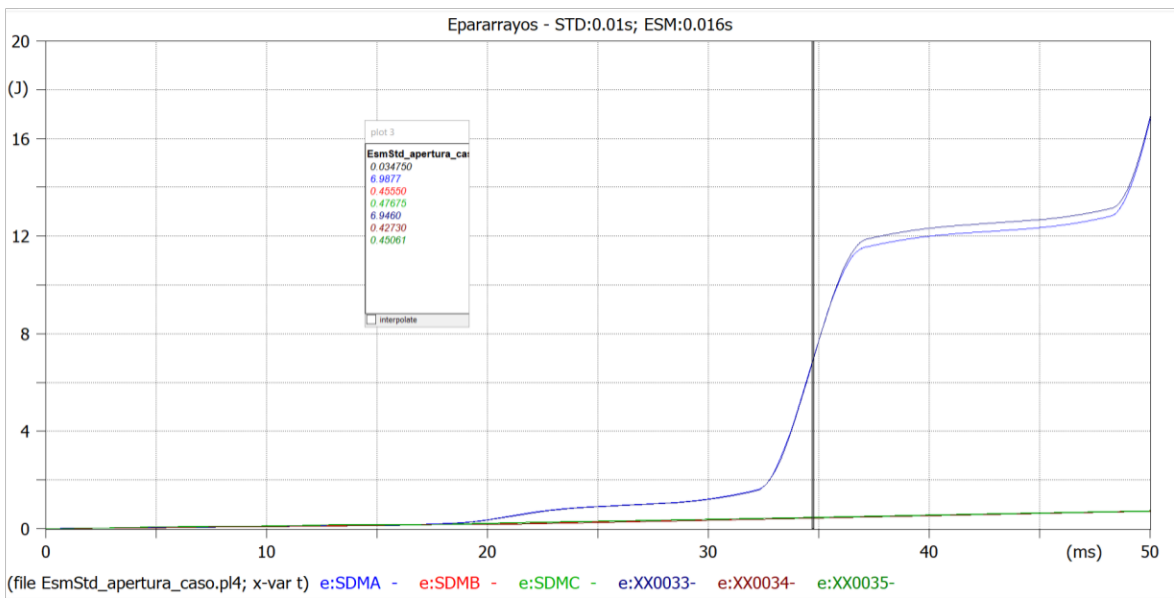
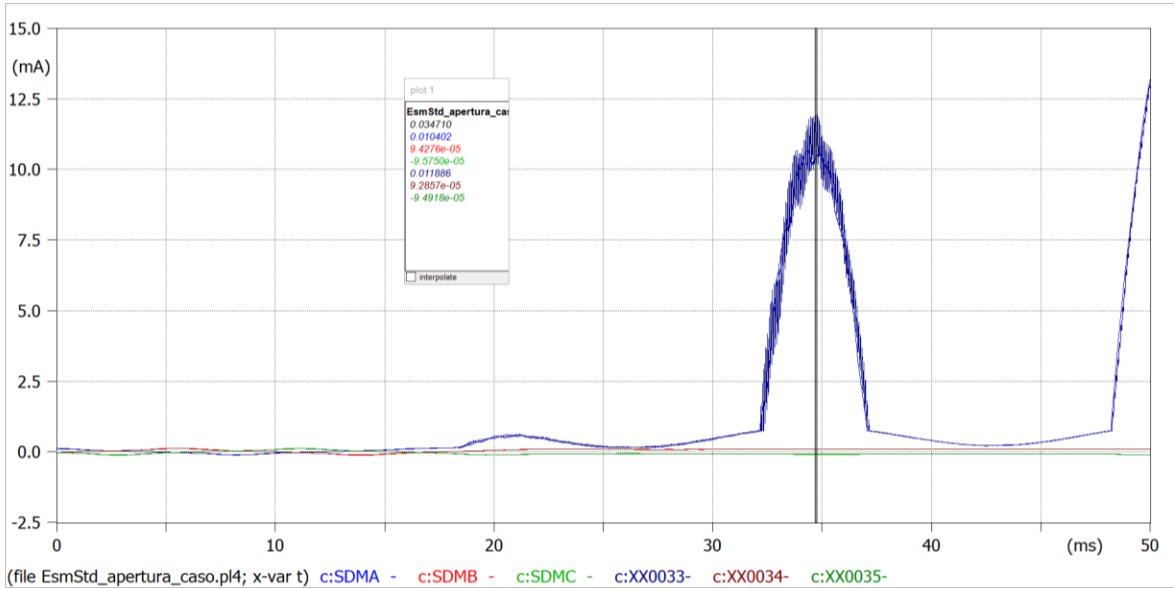
Escenario 10



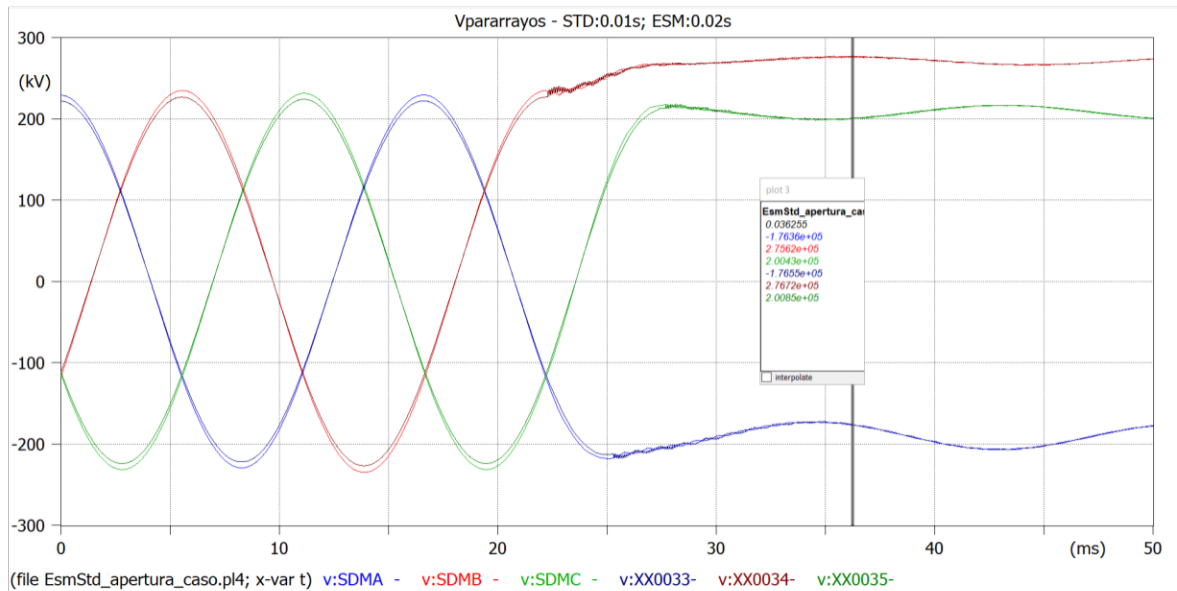
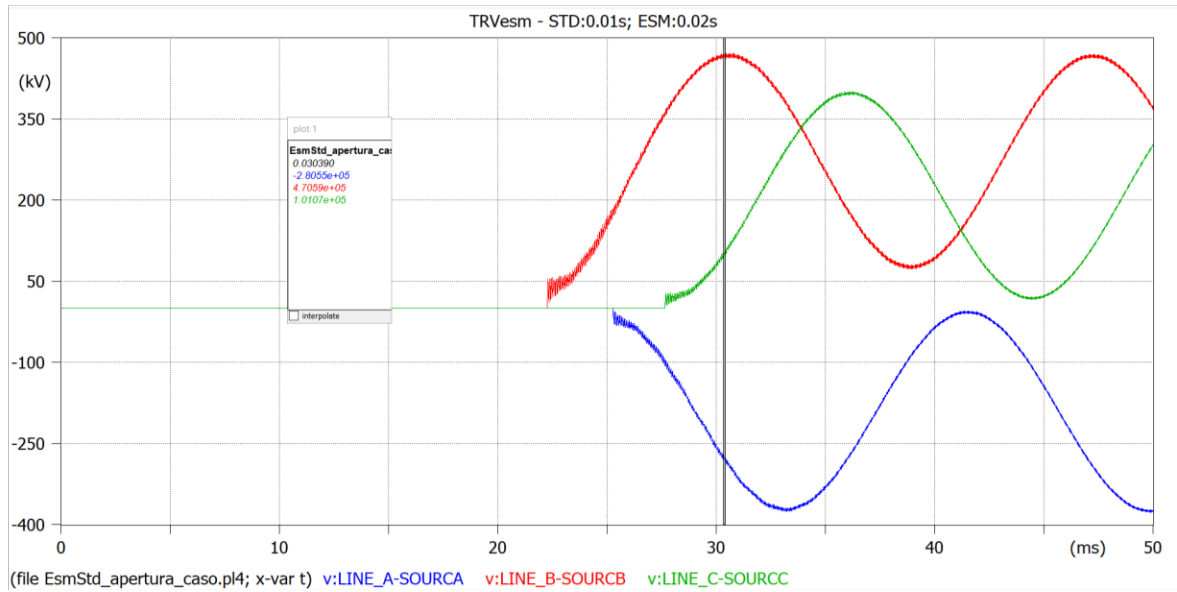


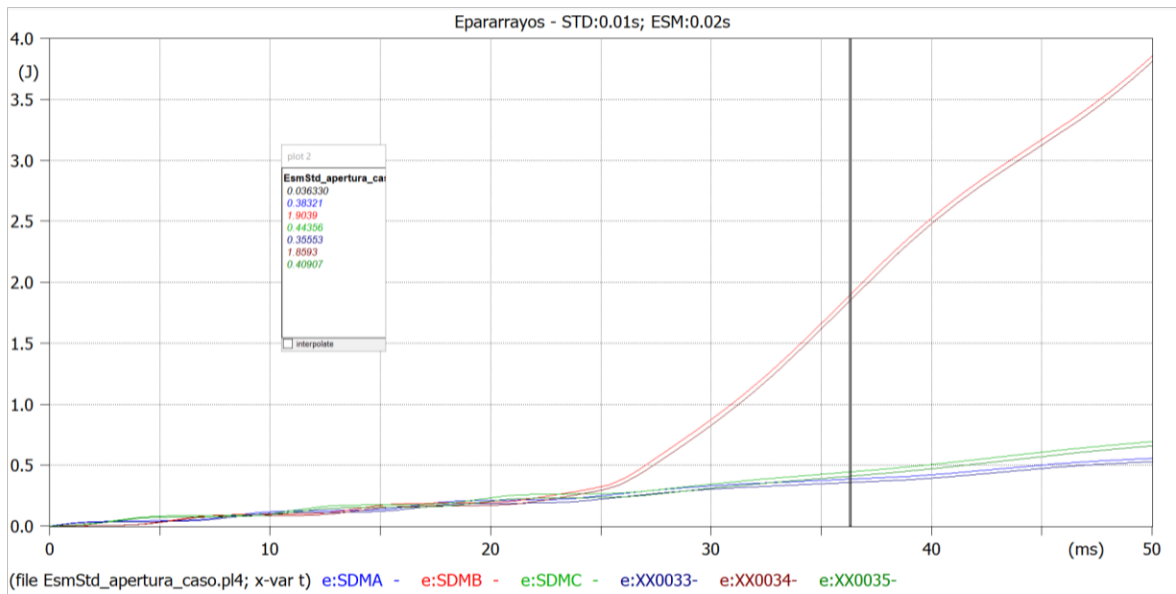
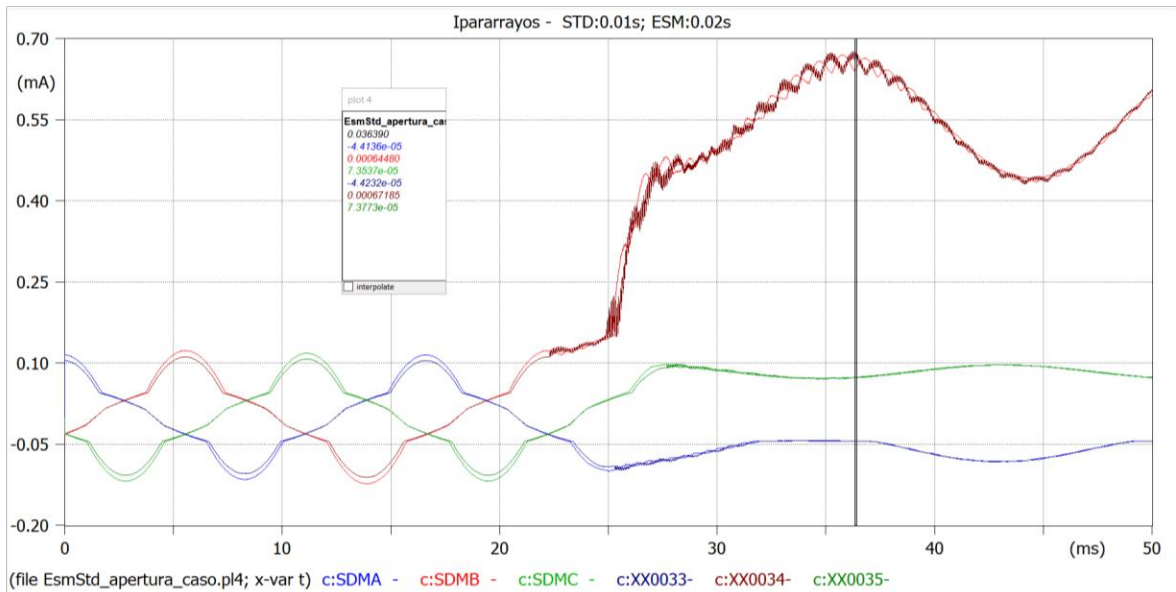
Escenario 11



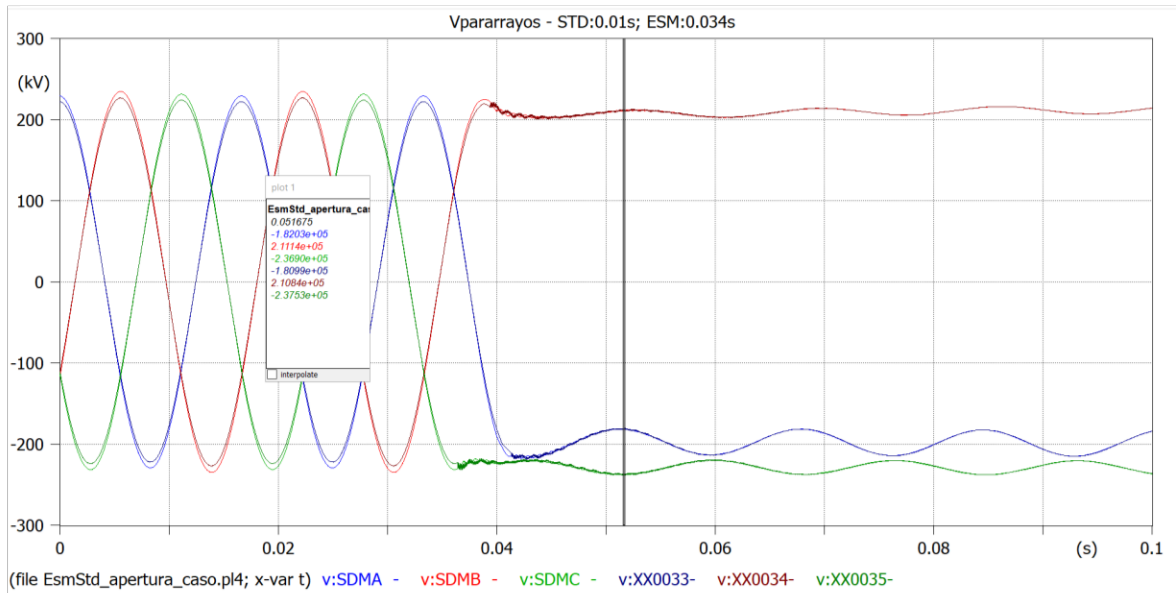
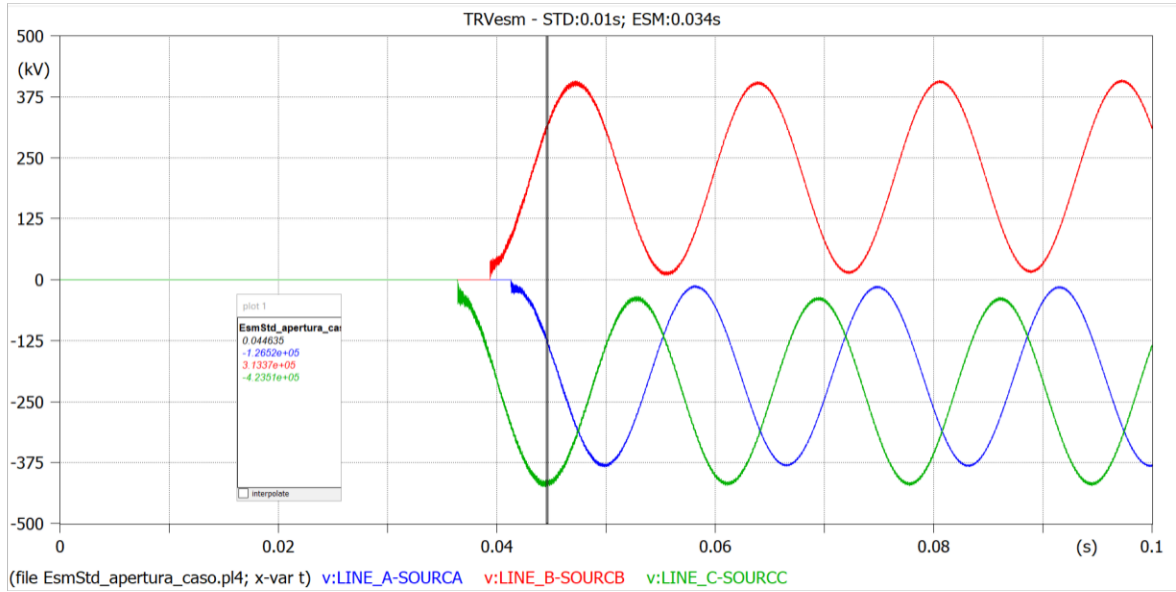


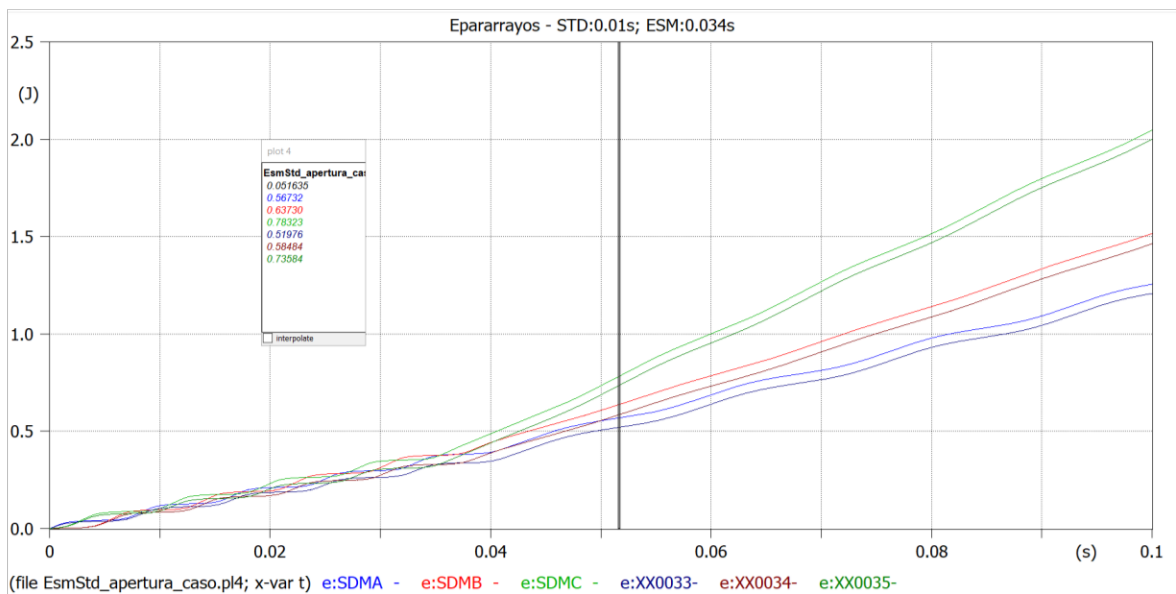
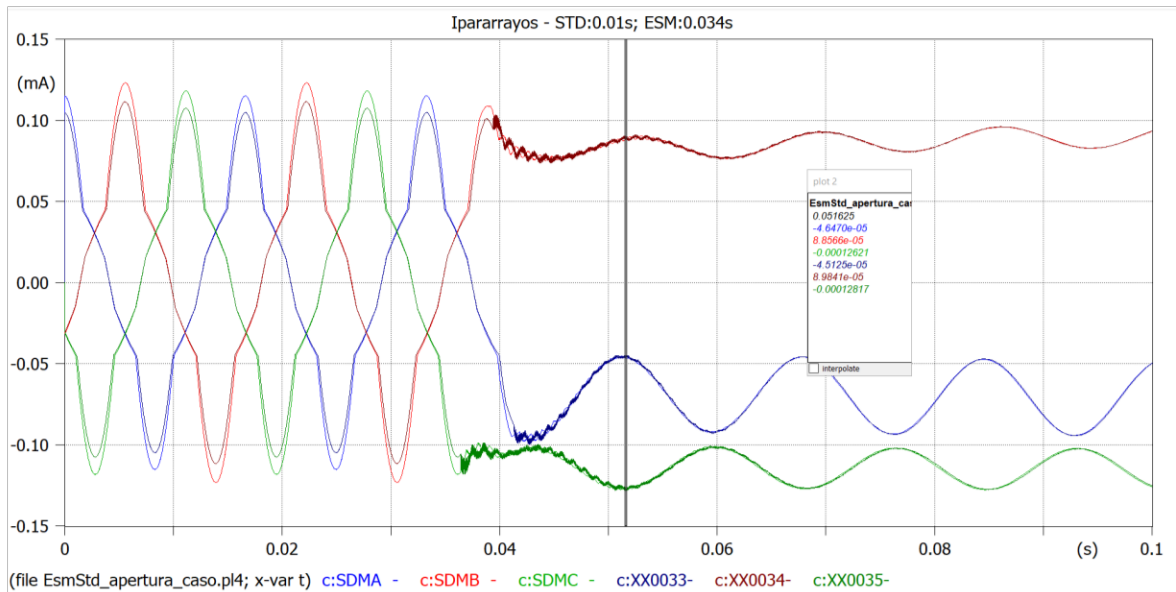
Escenario 12





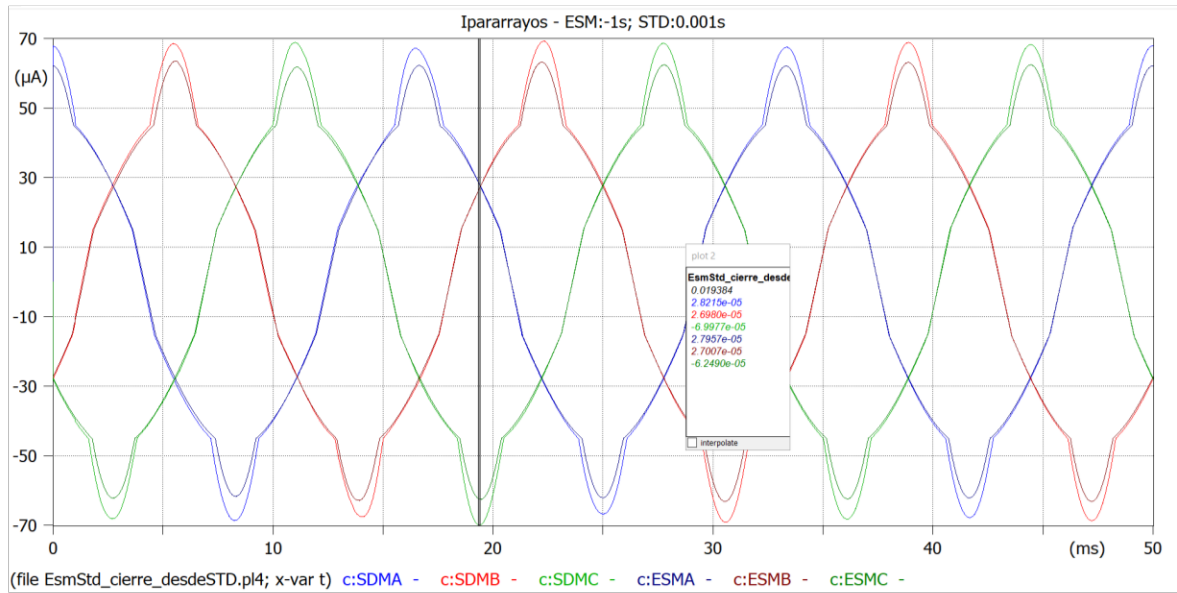
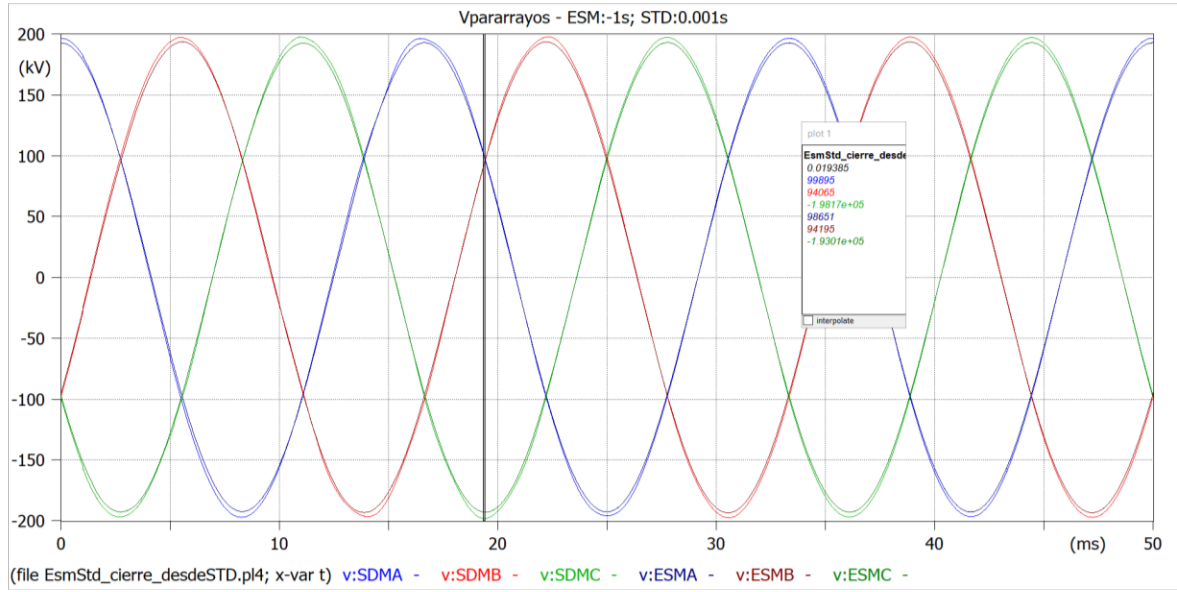
Escenario 13

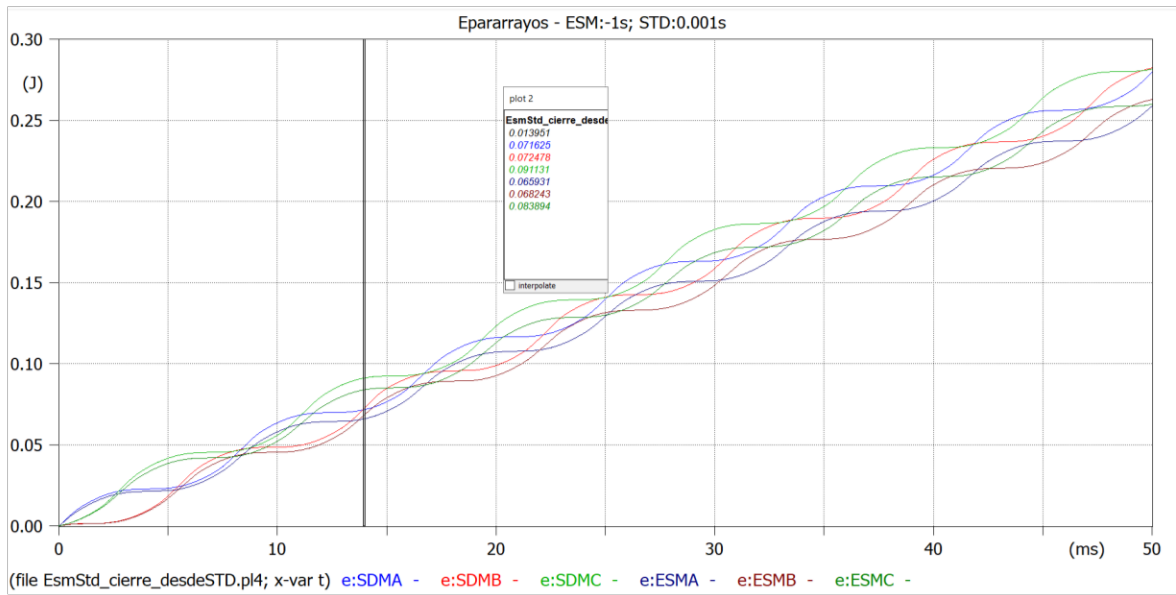




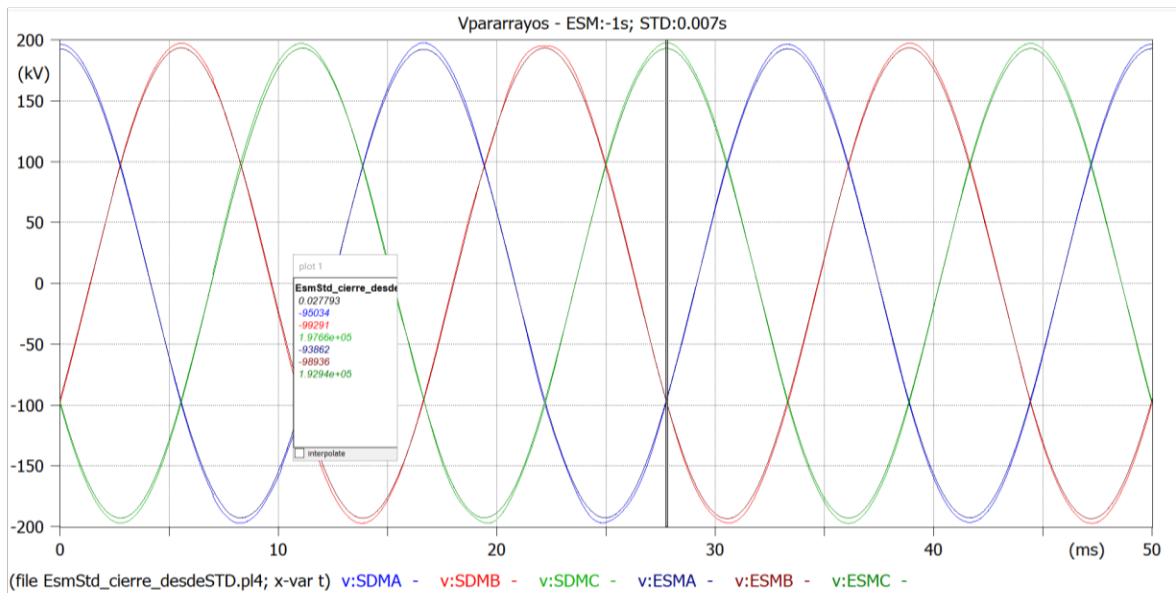
Para el caso del cierre del circuito de línea estudiado se presentan los escenarios simulados de acuerdo con los tiempos de operación detallados en la Tabla 3.6. Las gráficas que se muestran a continuación corresponden al voltaje, corriente y energía experimentados por los pararrayos de bahía de línea de las subestaciones Esmeraldas y Santo Domingo.

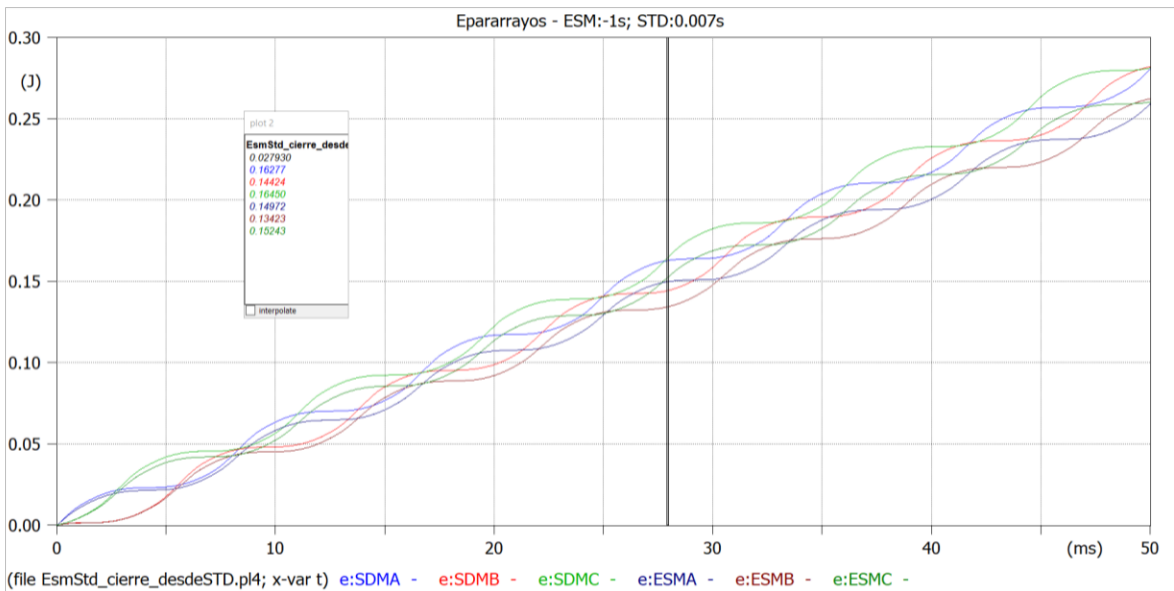
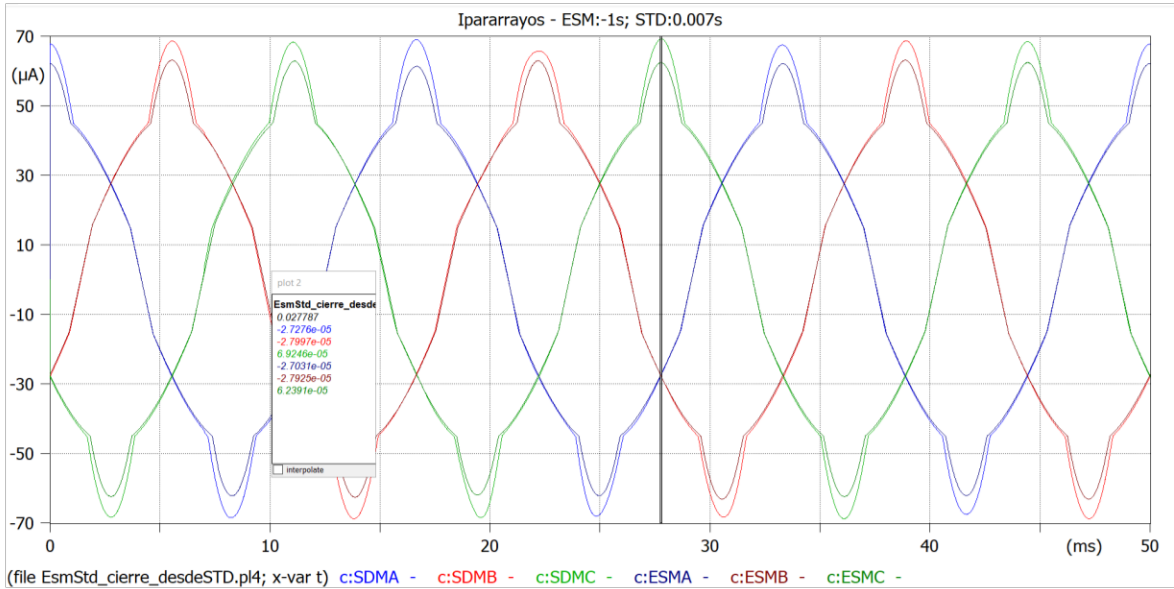
Escenario 1



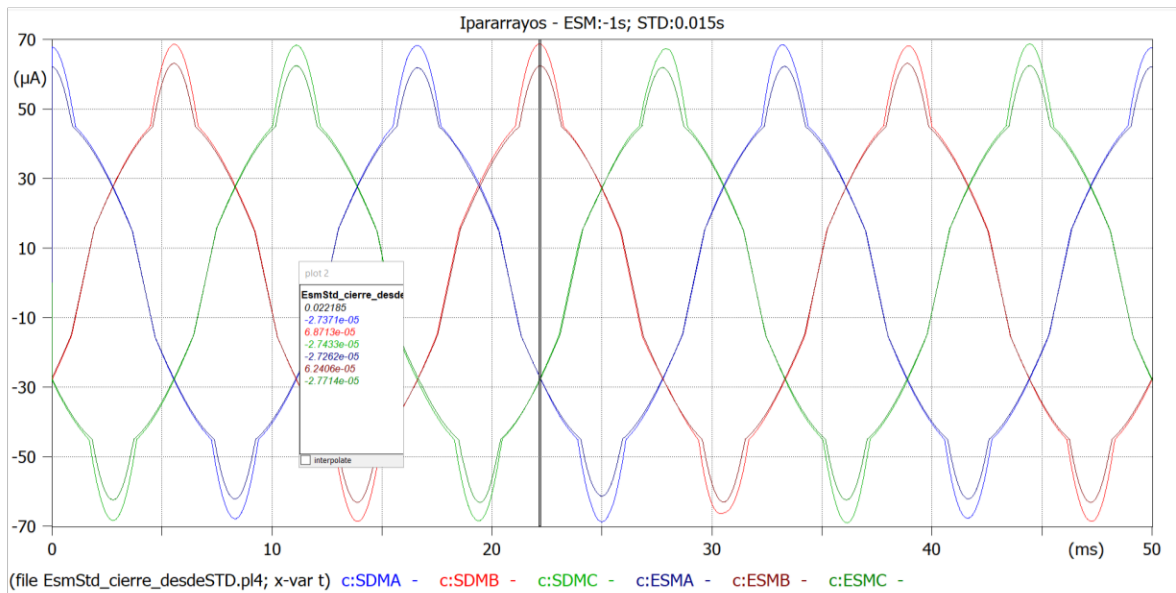
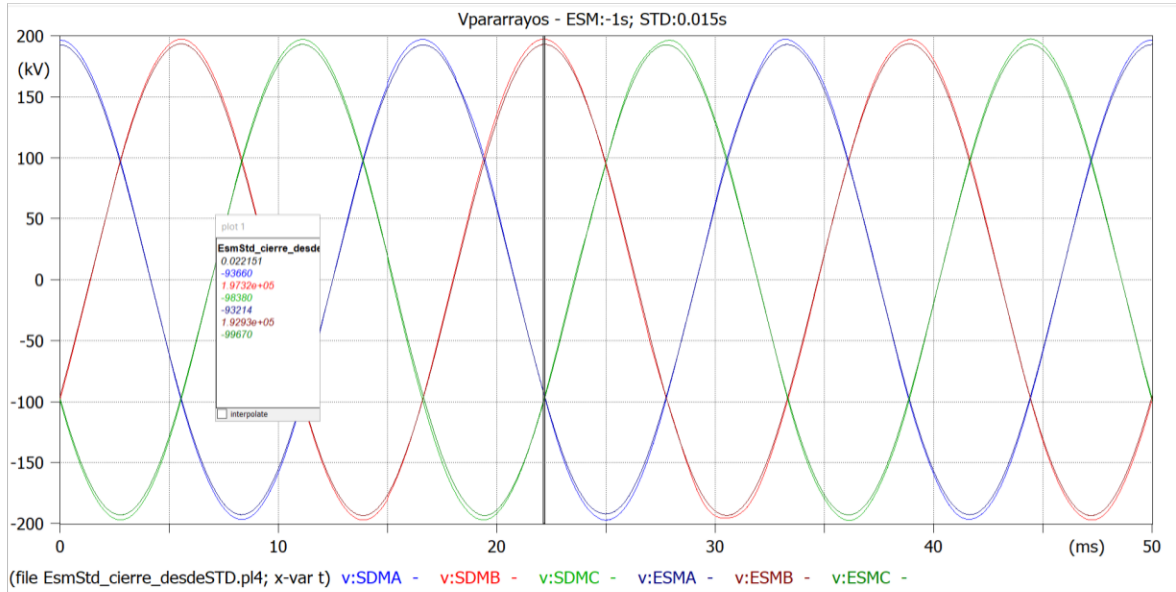


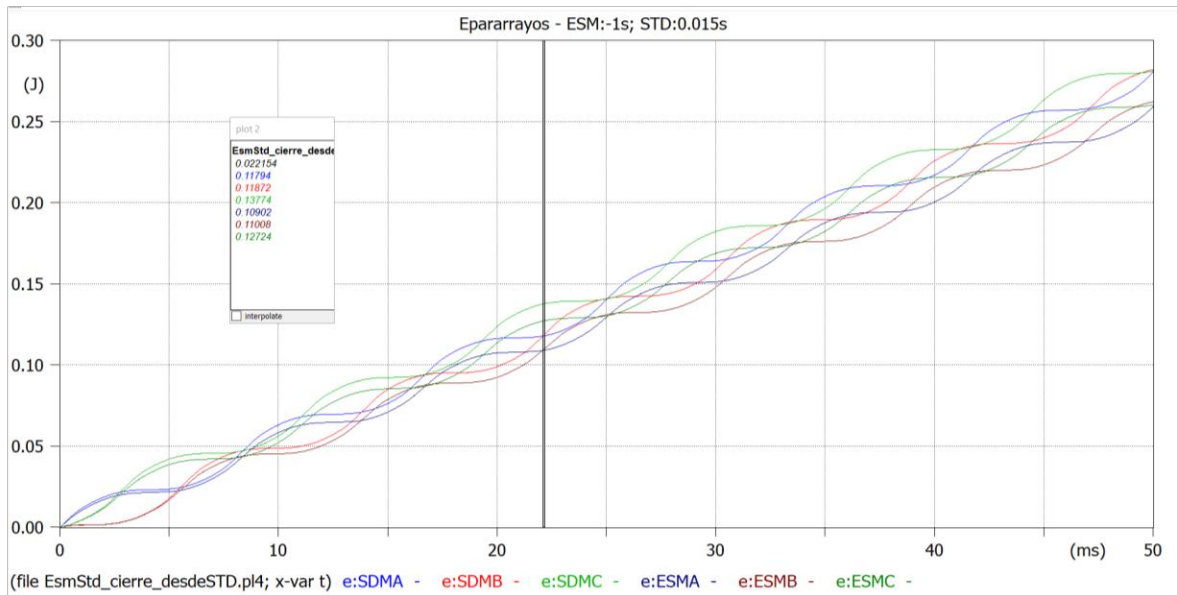
Escenario 2



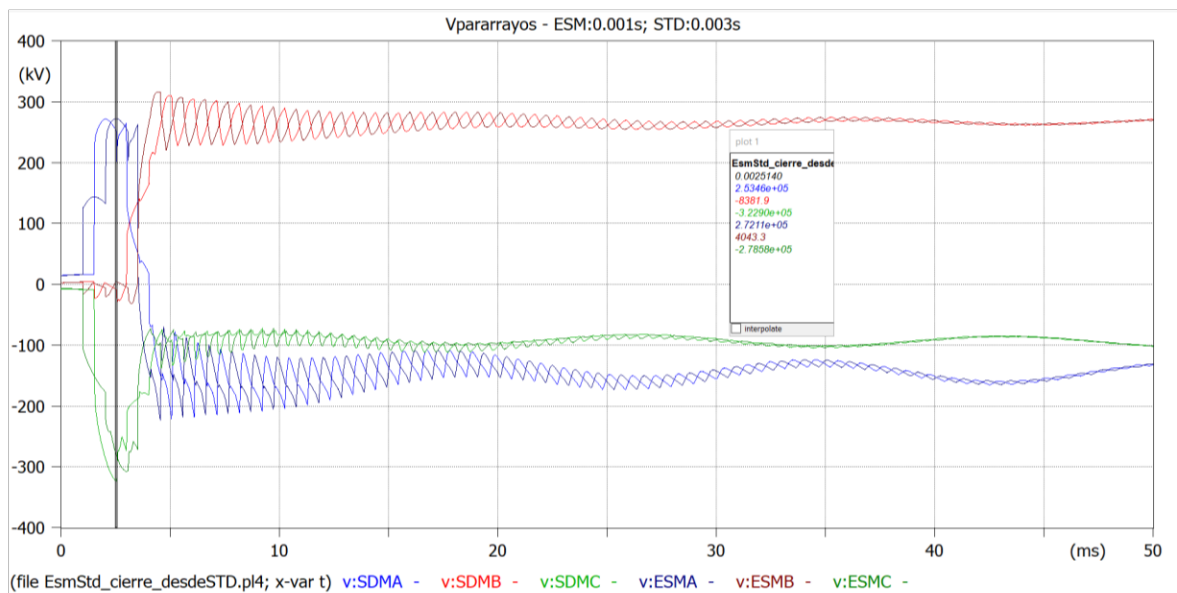


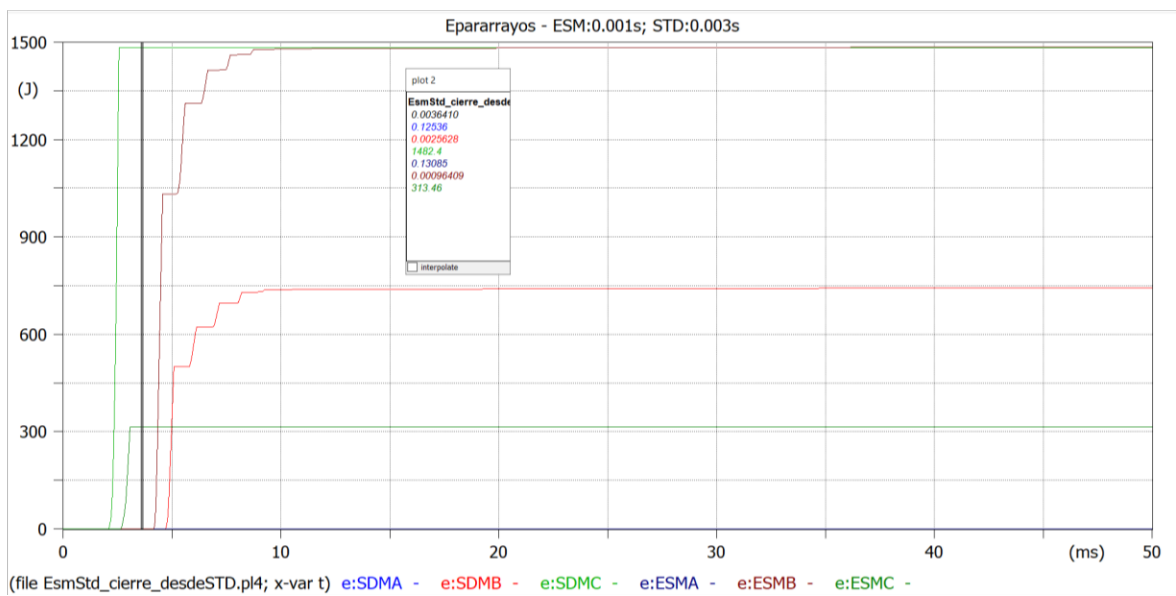
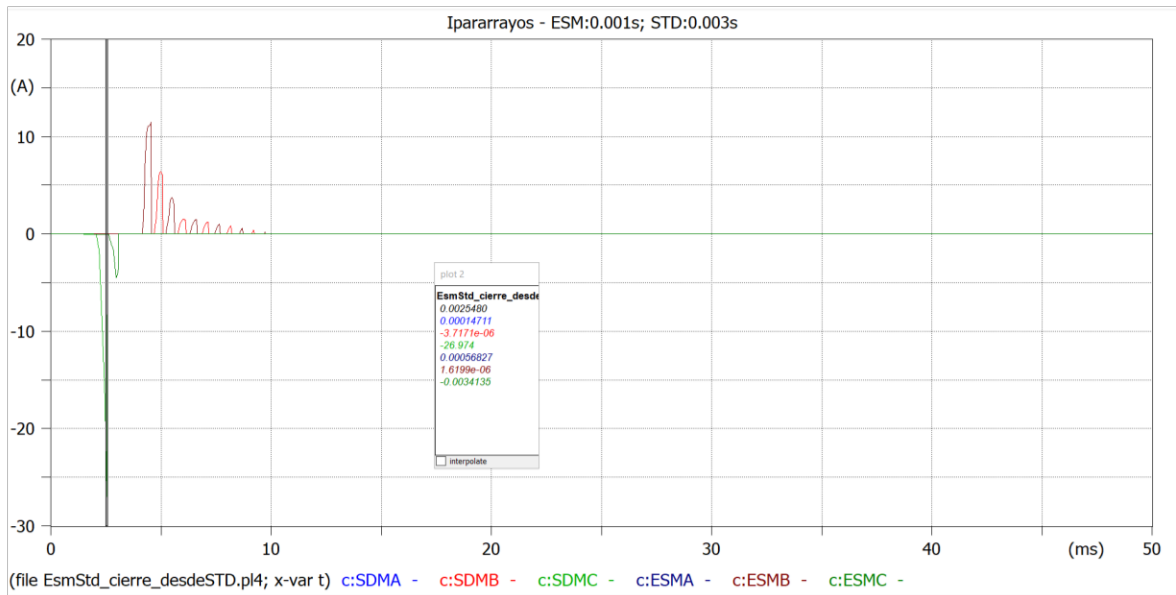
Escenario 3



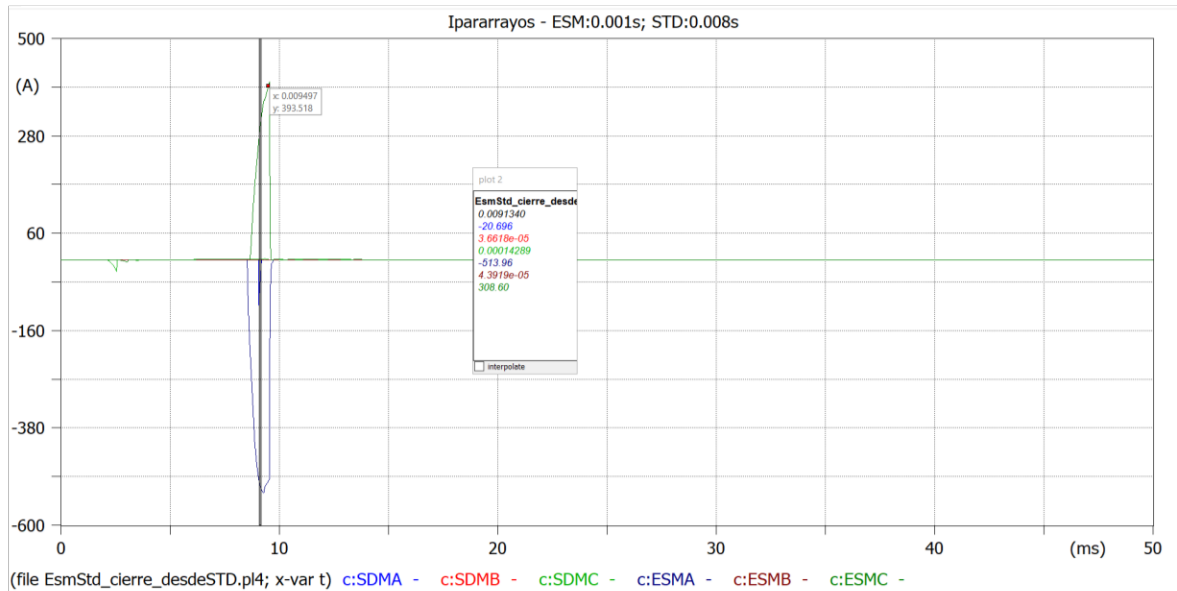
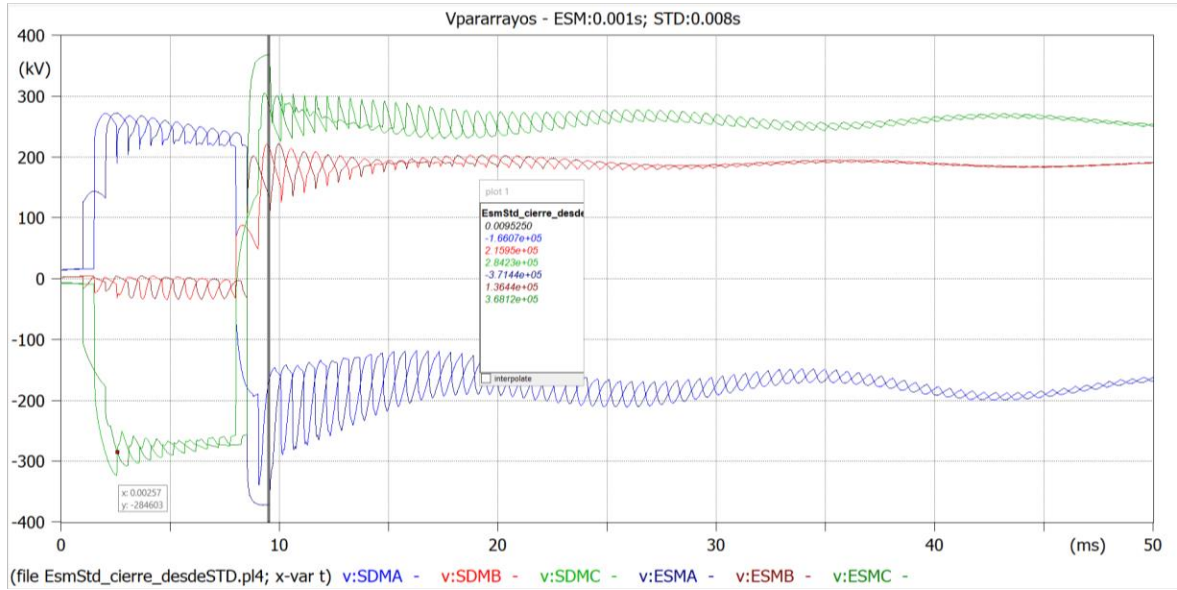


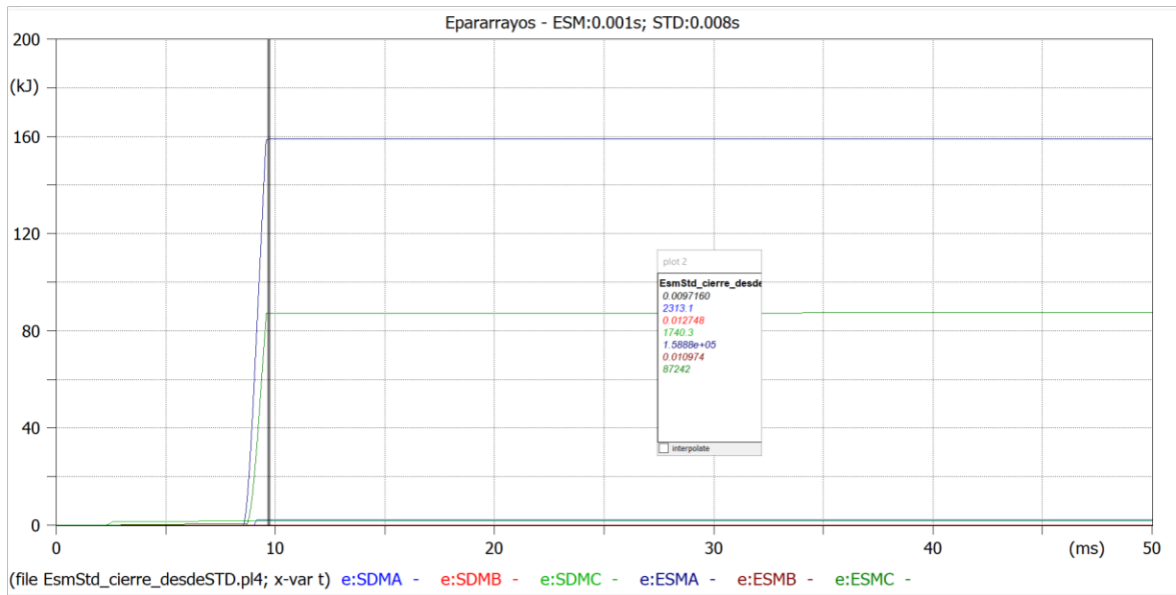
Escenario 4



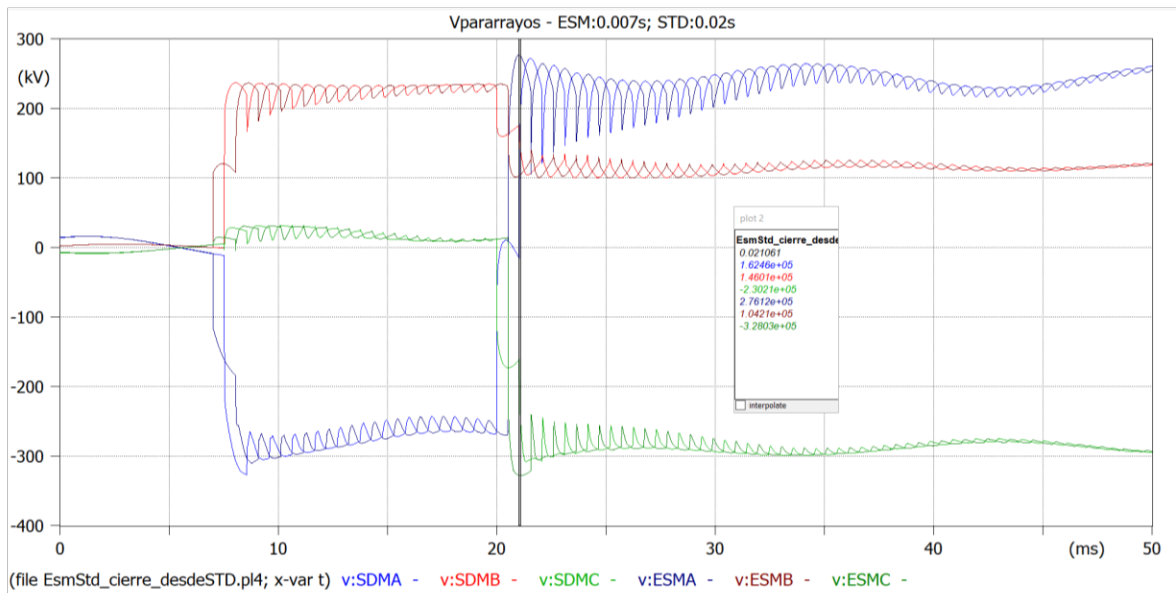


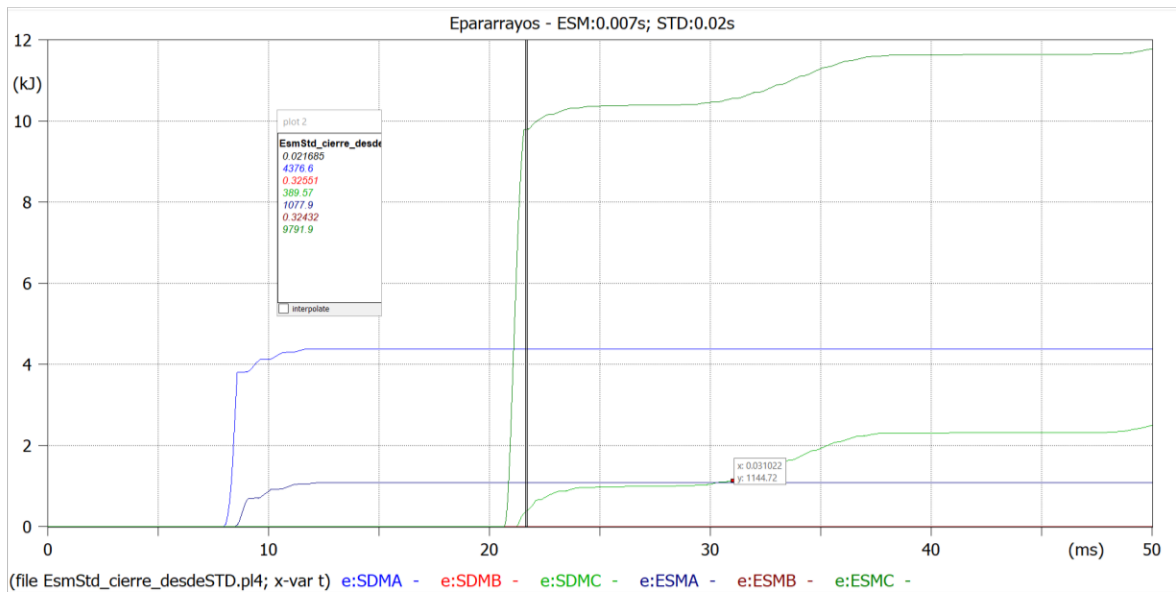
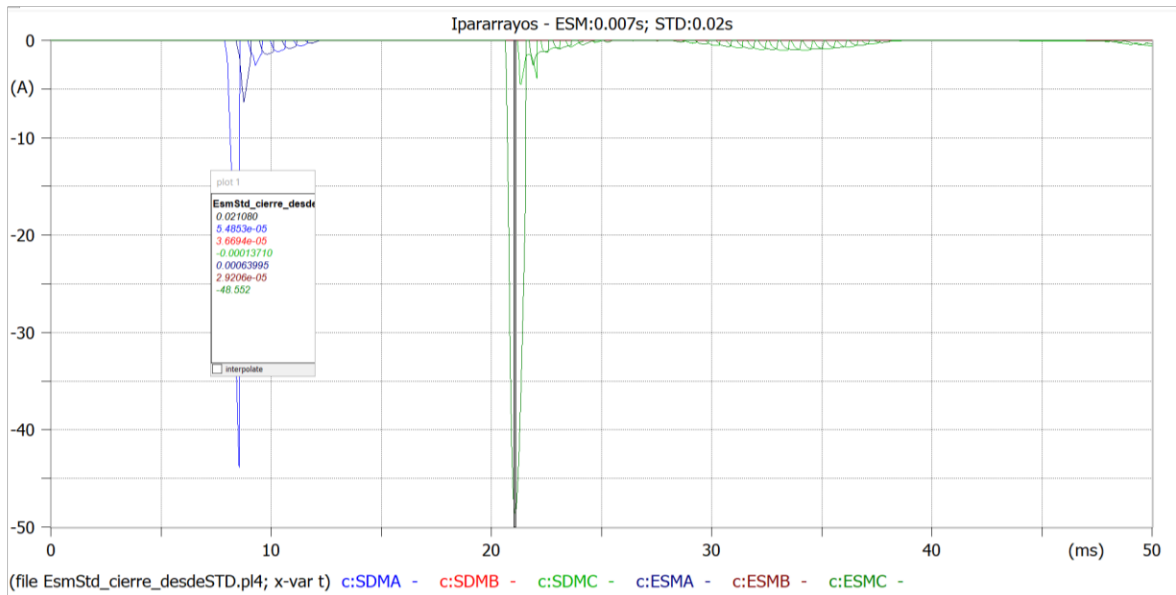
Escenario 5



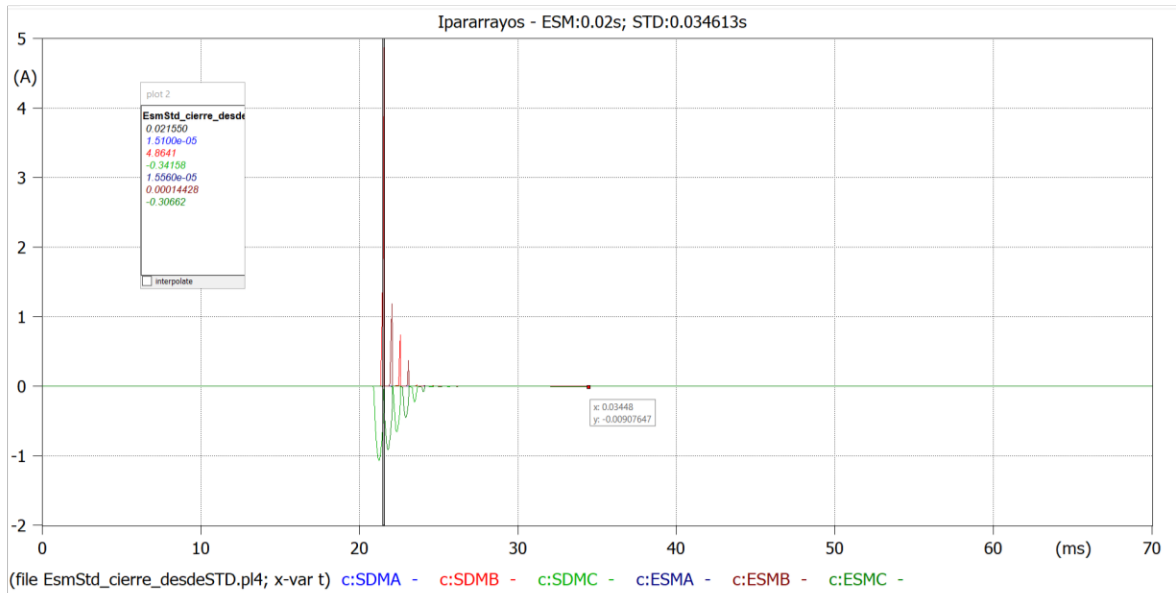
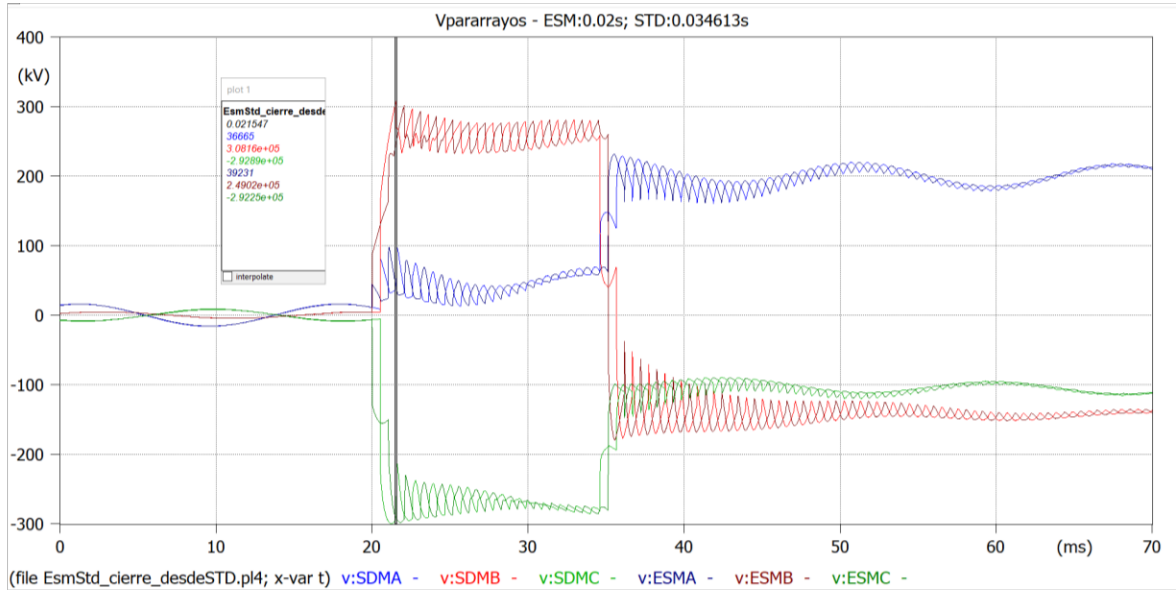


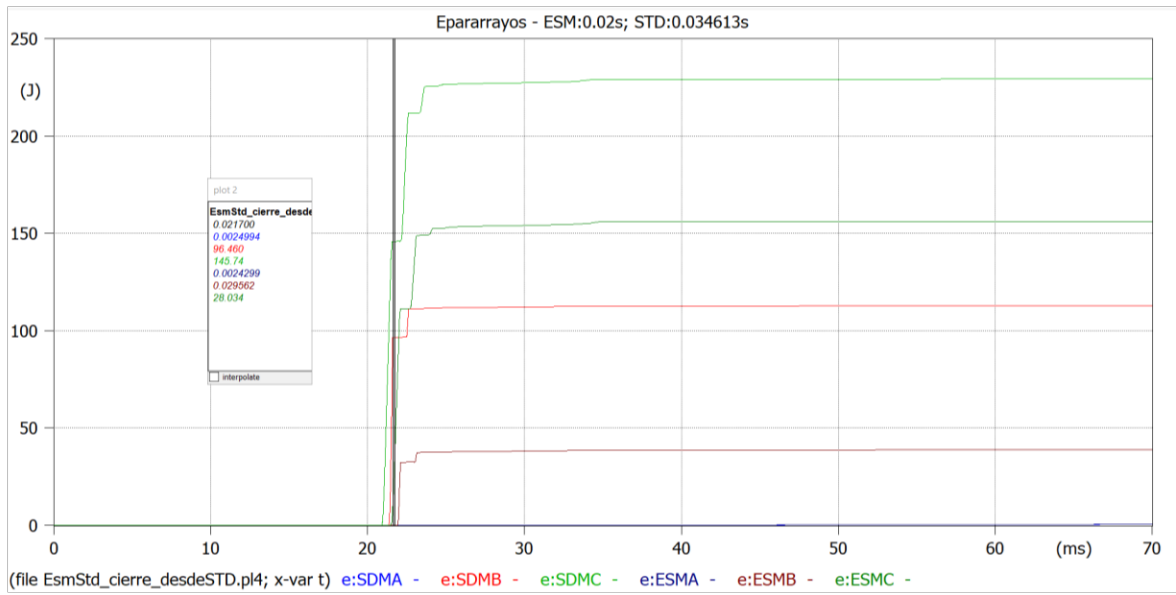
Escenario 6



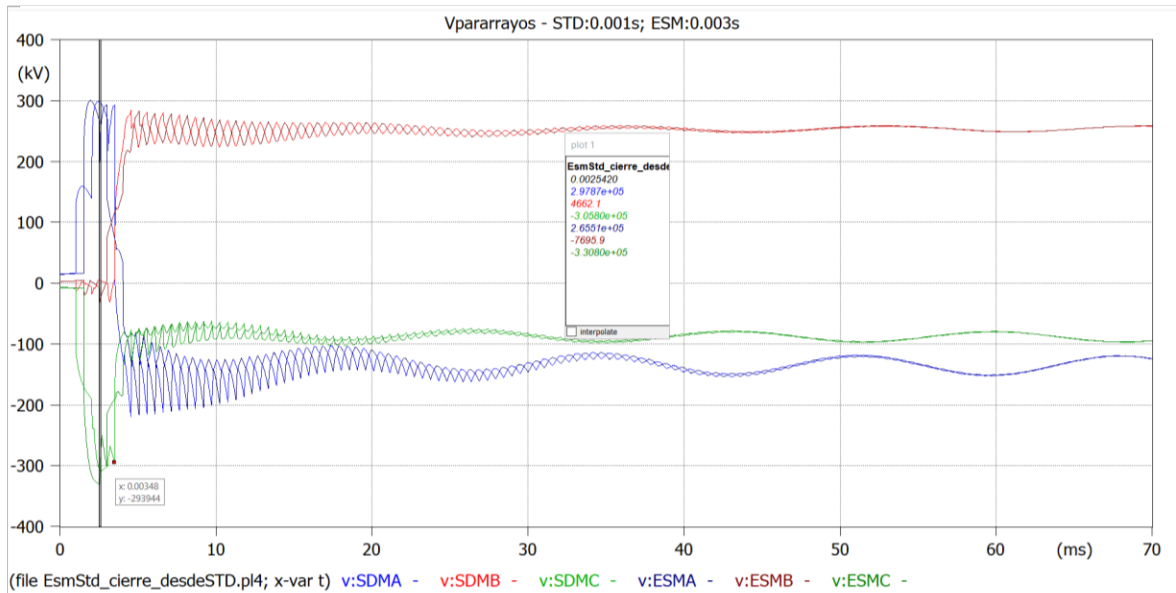


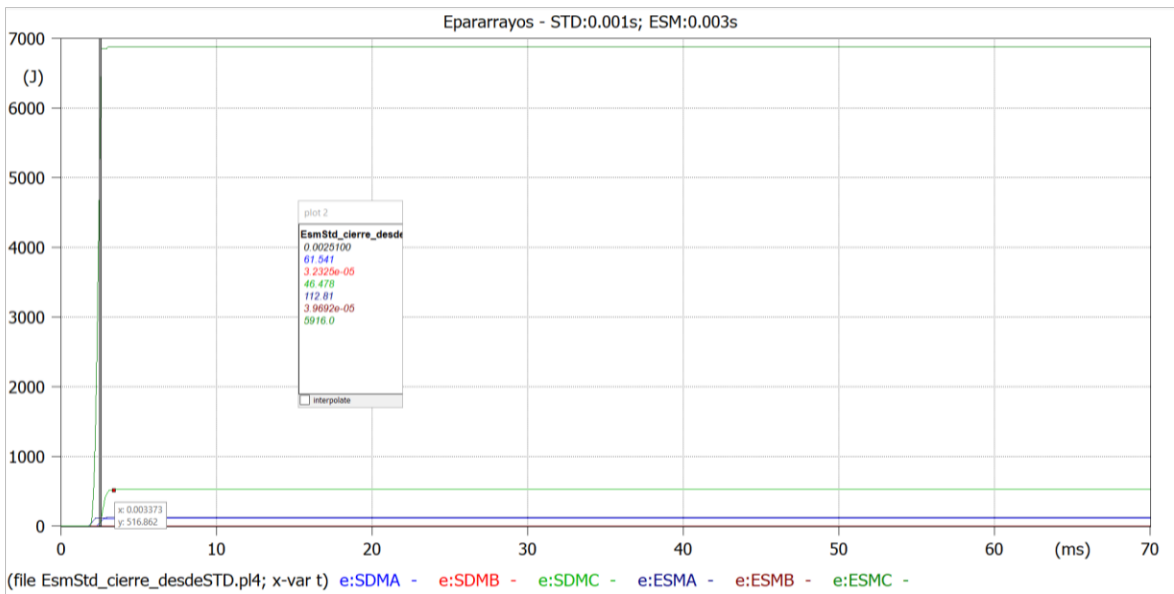
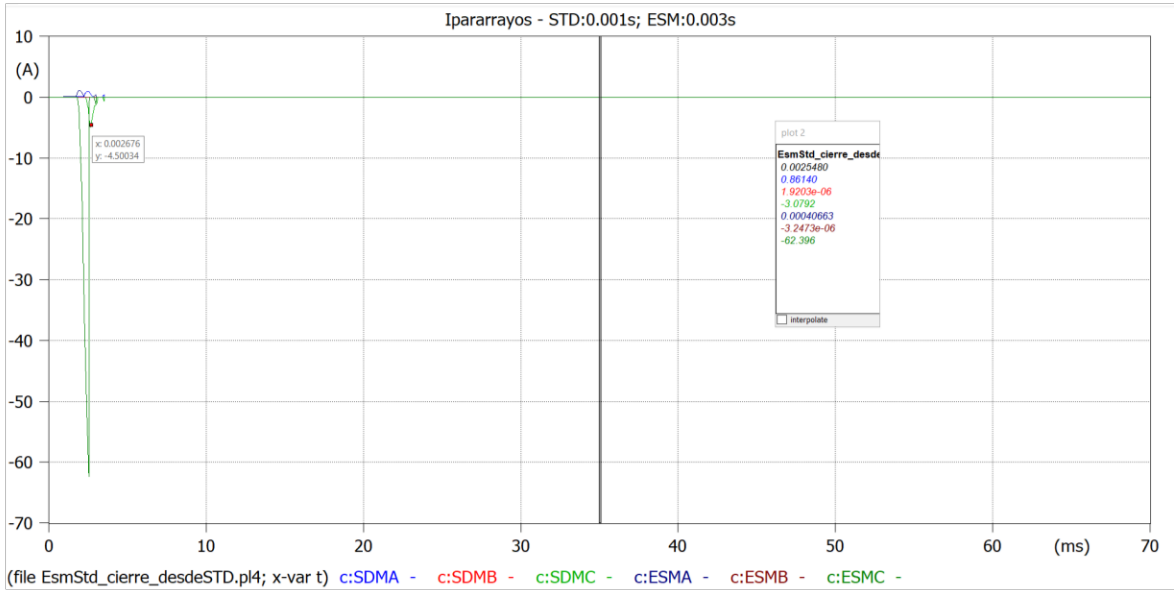
Escenario 7



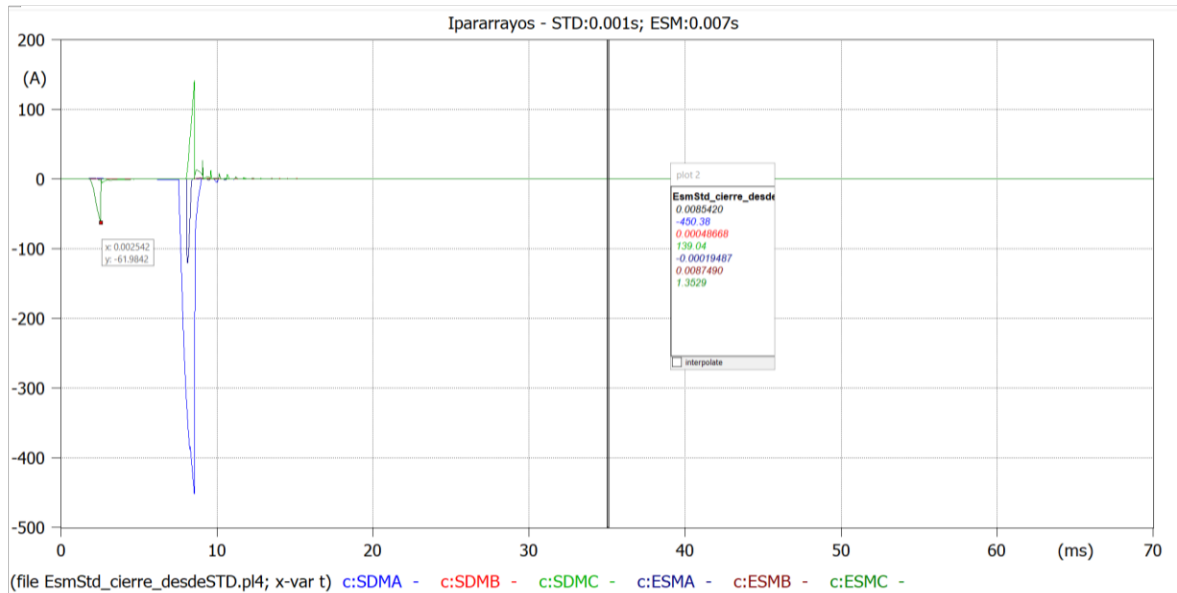
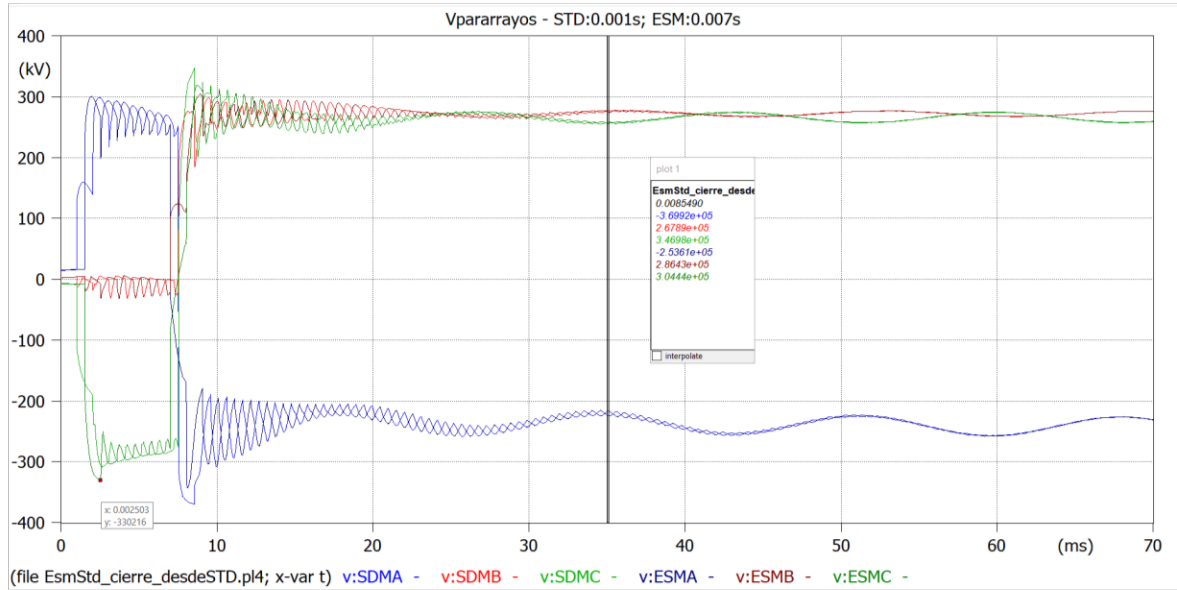


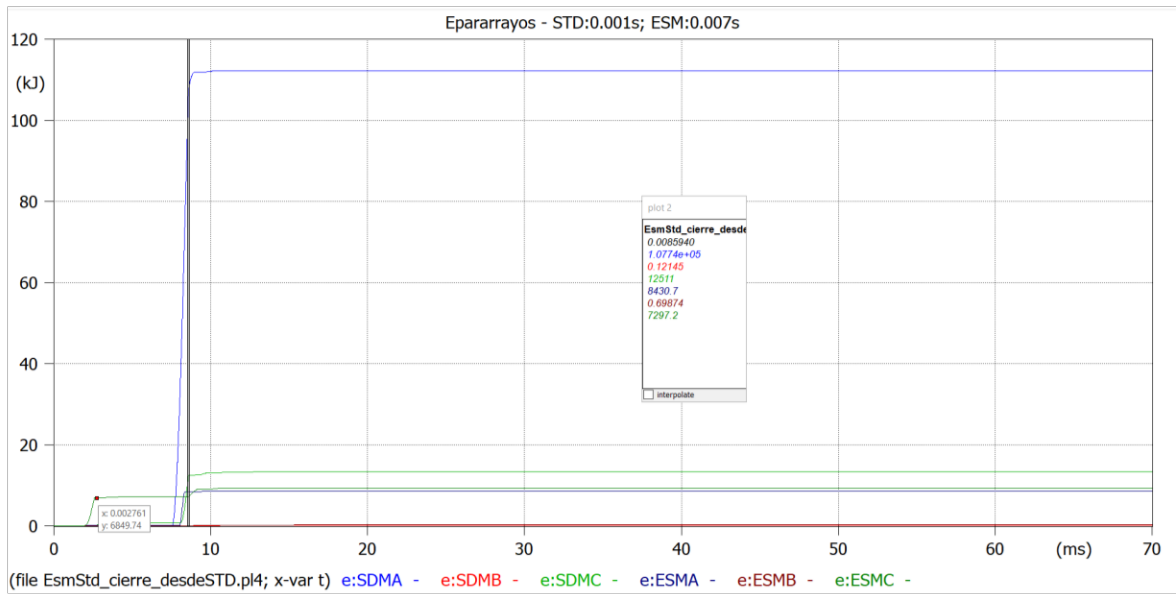
Escenario 8



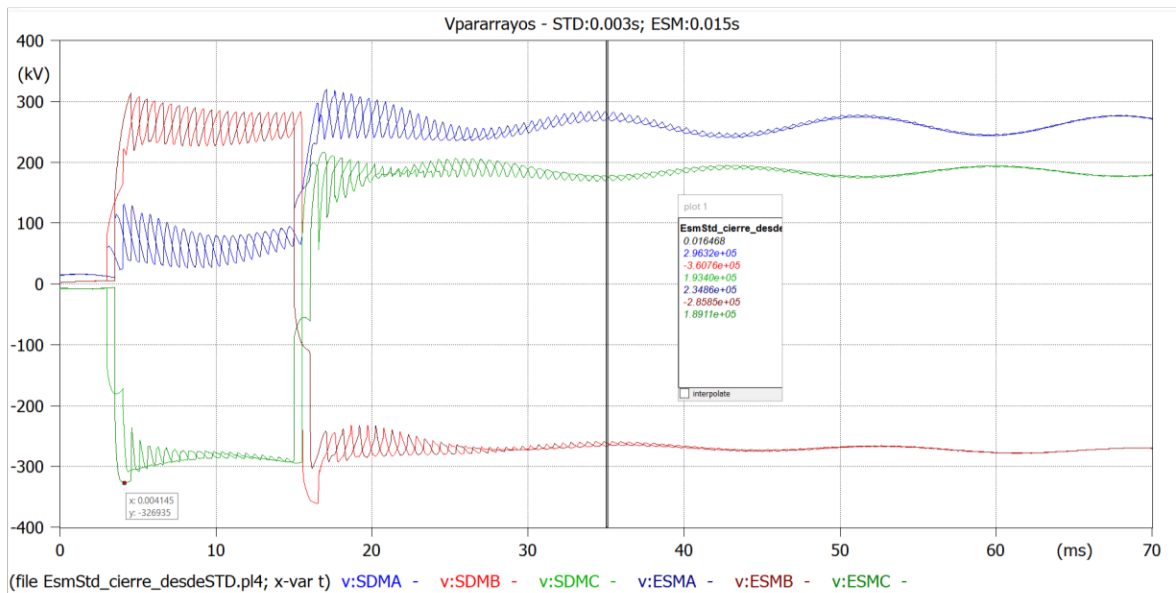


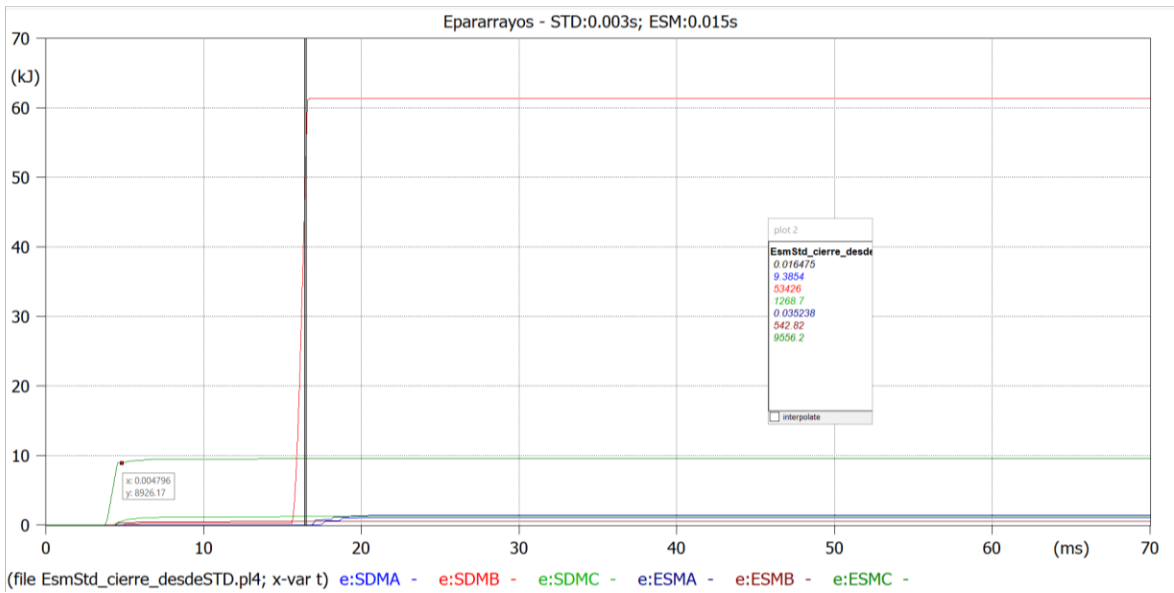
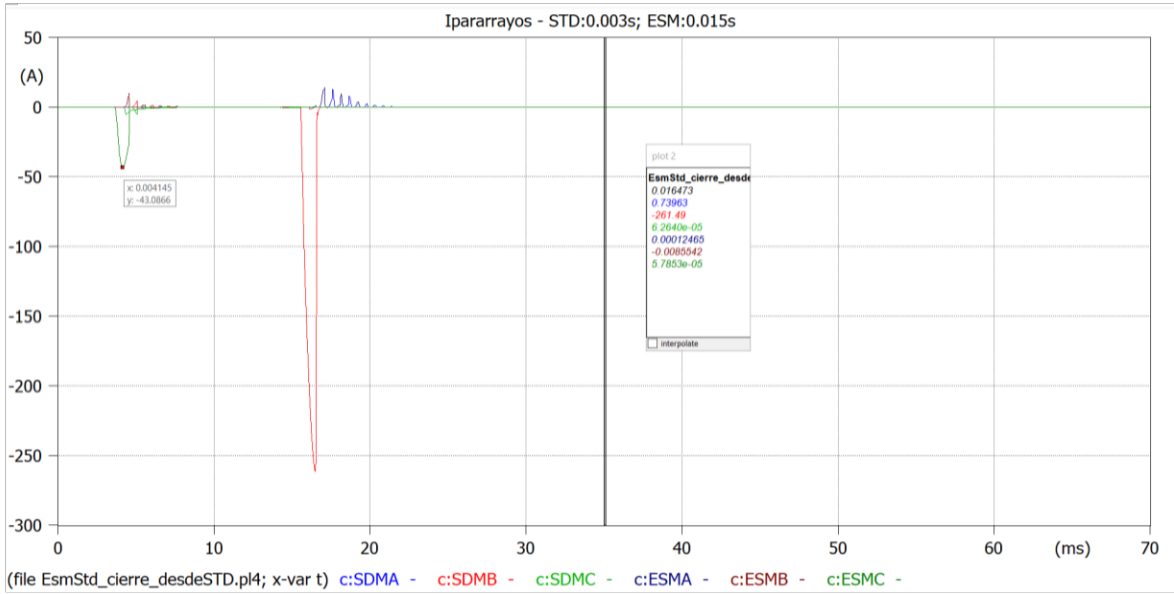
Escenario 9



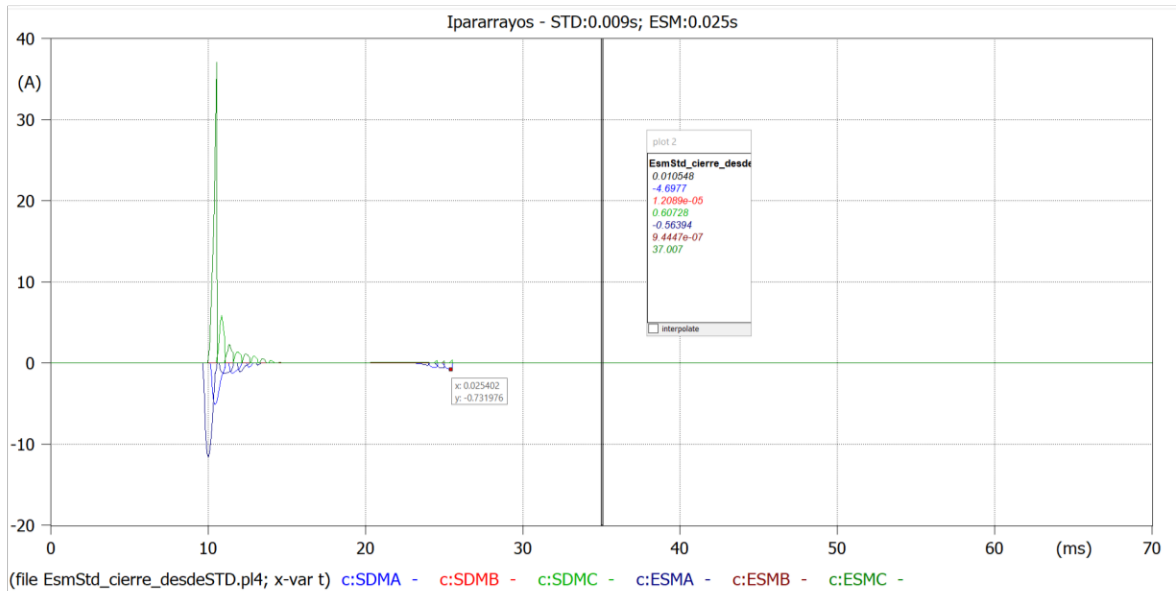
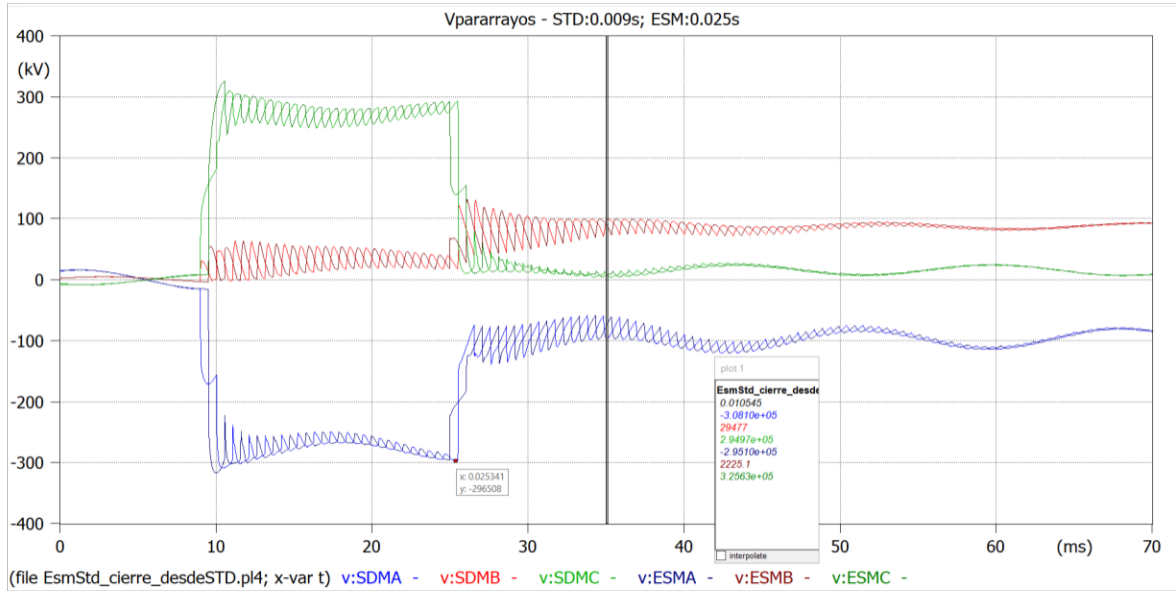


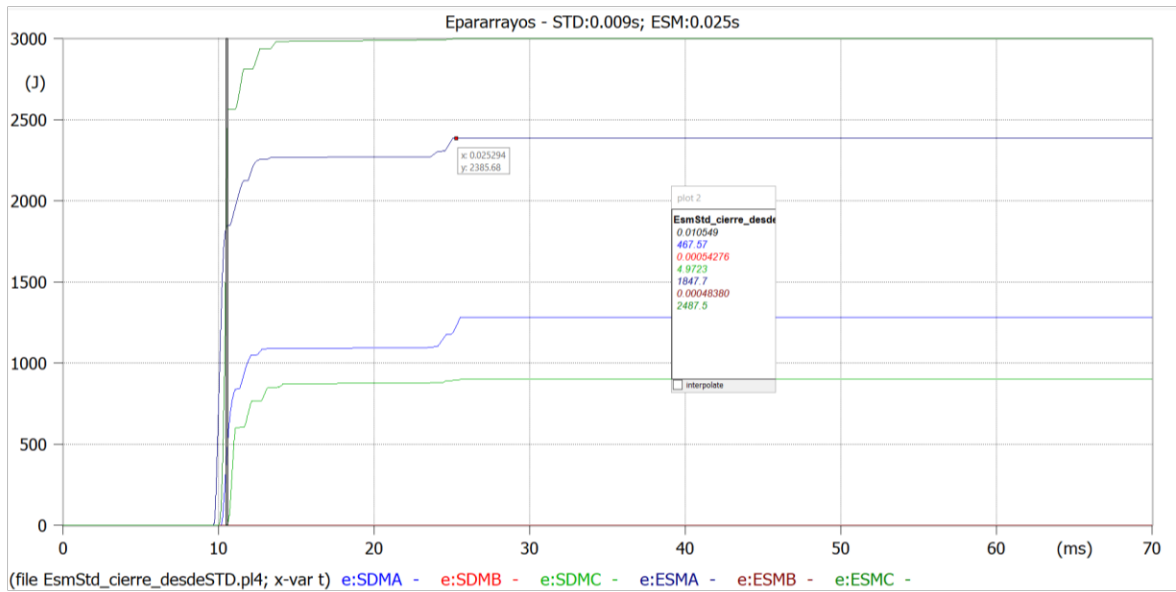
Escenario 10





Escenario 11





Escenario 12

