

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS RECONECTADORES EN LA TASA DE
FALLAS PROVOCADAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN.**

**LEIDY JOHANA RETAMOZO TRIANA
JHON FREDY VELÁSQUEZ MANTILLA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2020

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS RECONECTADORES EN LA TASA DE
FALLAS PROVOCADAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN.**

**LEIDY JOHANA RETAMOZO TRIANA
JHON FREDY VELÁSQUEZ MANTILLA**

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

**EDISON ANDRÉS SOTO RÍOS
PhD. en Ingeniería - Línea Automática**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2020

Dedicatoria

A mi familia, Martha, Jaime y Francis, por nunca dejar de confiar ...

*A todos los amigos que alguna vez se cruzaron en mi camino, por todo el cariño, las risas,
los momentos de angustia, las caídas, y momentos en que estuvimos ahí los unos para los
otros...*

A mis colegas de Centro de estudios, por la maravillosa experiencia...

*A la selección de Rugby por abrirme las puertas y enseñarme todo el compañerismo y
disciplina que hay detrás de este maravilloso deporte...*

*Gracias infinitas a este proyecto por enseñarme lo perseverante y paciente que puedo ser, por
darme la confianza de que puedo llegar a hacer posible lo que siempre creí imposible...*

Siempre se puede...

Leidy Johana Retamozo Triana

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. MODELADO DE LA LÍNEA Y RECONECTADOR EN ATP.	17
1.1 MODELADO DE UNA LÍNEA DE MEDIA TENSIÓN.	17
1.1.1 Construcción del modelo de línea.....	18
1.2 MODELADO DEL RECONECTADOR MEDIANTE MODELS.....	26
1.3 PASOS DE APLICACIÓN	34
2. EFECTO DEL RECONECTADOR EN EL ANÁLISIS DE IMPACTOS DIRECTOS.	40
2.1 DESARROLLO DE PRUEBAS	43
2.2 CÁLCULO DE FALLAS.....	50
3. EFECTO DEL RECONECTADOR EN EL ANÁLISIS DE IMPACTOS INDIRECTOS.....	55
3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	67
4. EVALUACIÓN.....	70
5. RECOMENDACIONES.....	72
BIBLIOGRAFÍA.....	73

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Línea A sencilla con impacto de rayo. Fuente. Elaboración propia.	18
Figura 2. Configuración en ATPDraw de la Línea B (seis tramos).....	19
Figura 3. Configuración de la línea A.....	20
Figura 4. Datos usados en la línea sencilla A.	21
Figura 5. Configuración tramo 1 - Línea Ostrich.	22
Figura 6. Configuración Línea Wren de cargas.....	25
Figura 7. Datos de cargas del sistema- línea B.	26
Figura 8. Diagrama de bloques funcionamiento Reconectador.	28
Figura 9. Reconectador en interfaz ATPDraw	29
Figura 10. Herramienta DPS interfaz ATP.	30
Figura 11. Herramienta TACS SOURCES 91 interfaz ATP.	30
Figura 12. Herramienta TACS devicetype 66: Root Mean Square (RMS) interfaz ATP.....	30
Figura 13. Curvas de acción del reconectador IEC 60255	31
Figura 14. Constantes de curvas IEEE.	32
Figura 15. Configuración MODEL (modelreconec).	33
Figura 16. Modelo sencillo – Línea A.....	34
Figura 17. Data del caso 1, modelo sencillo-línea A.	35
Figura 18. Reconectador despejando impacto de rayo a 0,2s.....	35
Figura 19. Gráfica de Tensión en el sistema, impacto de rayo y despeje inmediato	36
Figura 20. Gráfica de Corriente en el sistema, impacto de rayo y despeje inmediato.	37
Figura 21. Línea con reconectador instalado en tramo 3.....	38
Figura 22. Tensión en Línea B ante impacto de rayo	38

Figura 23. Características del Aislador seleccionado.	41
Figura 24. Primera prueba, tramo 1 SIN reconectador, impacto en tramo 2 fase A.	44
Figura 25. Segunda prueba, tramo 1 CON reconectador, impacto en tramo 2 fase A.	45
Figura 26. Datos obtenidos para Sección 1	46
Figura 27. Primera prueba, tramo 3 CON reconectador, impacto en tramo 4 fase A. [R3-4DA1].	47
Figura 28. Primera prueba, tramos SIN reconectador, impacto en tramo 4 fase A. [R3-4DA1].	47
Figura 29. Datos obtenidos para Sección 3.	48
Figura 30. Primera prueba, tramo 6 CON reconectador, impacto en tramo 5 fase C. [R6-5DC3].	49
Figura 31. Datos obtenidos para Sección 6.	49
Figura 32. Fallas vs. CFO (TRAMO 1).	51
Figura 33. Fallas vs. CFO (TRAMO 3).	52
Figura 34. Fallas vs. CFO (TRAMO 6).	53
Figura 35. Línea de diez tramos con Reconectador.	56
Figura 36. Componente trifásico de configuración de línea.	56
Figura 37. Entorno YALUKDRAW.	57
Figura 38. Configuración disposición conductores.	57
Figura 39. Línea de distribución sin reconectador	58
Figura 40. Configuración de impactos y coordenadas de la descarga.	60
Figura 41. Impacto de rayo 800m sobre línea de trabajo.	61
Figura 42. Gráfica Tensión vs. Tiempo, sistema sin reconectador, nodo 1.	62
Figura 43. Gráfica Tensión vs. Tiempo, sistema con reconectador, nodo 1.	62
Figura 44. Gráfica Corriente vs. Tiempo, sistema sin reconectador, nodo 1.	63
Figura 45. Gráfica Corriente vs. Tiempo, sistema con reconectador, nodo 1.	63
Figura 46. Gráfica Tensión vs. Tiempo, sistema sin reconectador, nodo 2.	64
Figura 47. Gráfica Tensión vs. Tiempo, sistema con reconectador, nodo 2.	65

Figura 48. Gráfica Corriente vs. Tiempo, sistema sin reconectador, nodo 2.	66
Figura 49. Gráfica Corriente vs. Tiempo, sistema con reconectador, nodo 2.	66
Figura 50. Índice de fallas (Flashovers/100km/año vs. CFO).	68

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Configuración LCC "Model" tramos 2-6.	23
Tabla 2. Configuración LCC "Data" tramos 2-6.....	24

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS RECONECTADORES EN LA TASA DE FALLAS PROVOCADAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN*

AUTORES: LEIDY JOHANA RETAMOZO TRIANA
JHON FREDY VELÁSQUEZ MANTILLA**

Palabras Clave: ATP, reconectador, impactos de rayo.

En el presente documento, se busca consignar una guía del proceso de modelado en ATP de una línea típica de media tensión y un reconectador como método de protección; se hace no solo el análisis del funcionamiento del reconectador si no su programación en lenguaje Models para incorporarlo a la librería de ATPDraw. Con base en la creación de estos modelos, se busca establecer diferentes puntos de instalación del reconectador con el fin de observar el correcto funcionamiento del modelo creado y la posición óptima donde debe ser instalado. Se realiza el estudio de impactos de rayos directos e indirectos, con el fin de determinar la influencia de la instalación de reconectadores en la tasa de fallas ocasionadas por estos impactos en dicha red. Este análisis se realiza de la mano del programa YalukDraw, el cual ofrece un estudio probabilístico basado en el método de Monte Carlo, que se encarga de realizar la simulación de una cierta cantidad de eventos atmosféricos excluyendo aquellos cercanos a la línea para obtener una tasa de fallas enfocada únicamente en eventos indirectos siendo este el objetivo principal de estudio del presente proyecto.

A partir de las tasas de fallas obtenidas en los casos de estudio, y el material bibliográfico consultado, se presentarán los respectivos análisis y conclusiones.

* Proyecto de grado

** Facultad De Ingenierías Fisicomecanicas Escuela De Ingenierías Eléctrica, Electrónica Y De Telecomunicaciones Director: Edison Andrés Soto Ríos PhD. en Ingeniería - Línea Automática

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE EFFECT OF RECONNERS IN THE RATE OF FAILURES CAUSED BY ATMOSPHERIC DOWNLOADS IN DISTRIBUTION NETWORKS *

AUTHORS: LEIDY JOHANA RETAMOZO TRIANA
JHON FREDY VELÁSQUEZ MANTILLA**

Keywords: ATP, recloser, lightning impacts.

In this document, the intention is to provide a guide to the ATP design process of a typical medium-voltage line and a recloser as a protection method; the operation of the recloser is analyzed, as well as its programming in Models language to be incorporated into the ATPDraw library. Based on the creation of these models, it is necessary to establish different recloser installation points in order to observe the correct operation of the created recloser and the optimum position where it should be installed. The study of direct and indirect lightning impacts is performed in order to determine the influence of the recloser installation on the failure rate caused by these impacts on the network. This analysis is carried out by the YalukDraw program, which offers a probabilistic study based on the Monte Carlo method, which is responsible for carrying out the simulation of a certain amount of atmospheric events excluding those close to the line to obtain a failure rate focused only on indirect events being this the main objective of the study of this project.

From the failure rates obtained in the case studies, and the bibliographic material consulted, the respective analysis and conclusions will be presented.

* Proyecto de grado

** Facultad De Ingenierías Fisicomecánicas Escuela De Ingenierías Eléctrica, Electrónica Y De Telecomunicaciones Director: Edison Andrés Soto Ríos PhD. en Ingeniería - Línea Automática

INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos en su funcionamiento se ven expuestos a cambios abruptos en su actividad diaria; en su mayoría propiciado por fallas producidas por eventos atmosféricos¹. Con miras a entregar un suministro de energía más estable, encontrar la mejor manera de corregir las salidas momentáneas o permanentes que afecten la calidad de servicio que está recibiendo un usuario es primordial, para ello son considerados varios métodos de protección en las líneas que, si bien no corrigen al 100% las interrupciones de servicio presentadas representan un punto de apoyo para mejorar la velocidad en la reconexión del servicio y la detección temprana de daños. En el caso específico de una falla por rayos, esta suele ser despejada por algún interruptor, descargador o reconectador, haciendo que la red entre en funcionamiento pronta y exitosamente.

En el caso específico del reconectador, este resulta siendo un equipo ideal para mantener control sobre el continuo funcionamiento de la línea, detecta sobrecorrientes y las interrumpe, de modo que permite encontrar más rápida y efectivamente el área en que se ocasionó la falla que, si resulta ser de carácter permanente, se encargará de desconectar la línea totalmente después de cierto número programado de operaciones (generalmente tres o cuatro con un tiempo entre cada intento que también puede ser programado) ².

Pero, pese a las ventajas que pueda ofrecer la instalación de estos equipos de protección, también debe tenerse en cuenta el índice de fallos que estos ingresan a la red que protegen. Por ello, en el presente documento se evaluará el

¹ POWER, I., & SOCIETY, IEEE Std 1410 - 2010. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines. vol. 2010. 2011

² Ibíd

efecto de un reconectador conectado a la línea, es decir, si su comportamiento mejora o empeora respecto a las fallas ocasionadas por impactos directos e indirectos, sino también, la posición específica donde, considerando la presencia de estos eventos, el reconectador podrá prestar un mejor servicio. De esta manera, se presentan cuatro capítulos que plasman claramente, el desarrollo de un reconectador y una línea de estudio mediante el programa ATP, la obtención de sus tasas de fallos, así como la evaluación del efecto de dichos equipos en la tasa de fallos ocasionados por descargas atmosféricas.

A continuación, se describirán brevemente los capítulos presentados en orden de modelado, estudio y evaluación.

MODELADO DEL RECONNECTADOR EN ATP.

A través del software ATP se busca simular el accionar de un reconectador para incorporarlo a una red de distribución previamente diseñada en el mismo programa. Con esto se busca observar el funcionamiento de la línea con y sin reconectador, además de ciertos casos de aplicación para dar más fortaleza al modelo diseñado.

EFECTO DEL RECONNECTADOR EN EL ANÁLISIS DE IMPACTOS DIRECTOS.

En este capítulo, una vez realizados los modelos en ATP, se realizarán una serie de pruebas en busca de analizar el comportamiento del sistema ante impactos de rayo directos en el sistema con y sin reconectador. Una vez se obtengan las tasas de fallas para las pruebas realizadas, se procederá a hacer un estudio y comparación entre estas, teniendo en cuenta los casos de simulación planteados en el capítulo inicial.

EFECTO DEL RECONECTADOR EN EL ANÁLISIS DE IMPACTOS INDIRECTOS.

Inmediatamente después de realizar el estudio con impactos directos, se realizará un enlace con el programa Yaluk Draw, que permitirá realizar pruebas del sistema con impactos indirectos.

EVALUACIÓN

Finalmente, una vez realizadas todas las pruebas de sistema, se buscará plasmar los resultados de la evaluación de los resultados obtenidos para impactos directos e indirectos y de esta manera brindar algunas recomendaciones en cuanto a lo observado en el estudio.

1. MODELADO DE LA LÍNEA Y RECONECTADOR EN ATP.

1.1 MODELADO DE UNA LÍNEA DE MEDIA TENSIÓN.

Una vez se ha determinado la importancia de realizar un modelo de la línea de distribución como del reconectador a analizar, se da preferencia al lenguaje de programación ATP para llevarlo a cabo. Con base en esto, se elige el editor gráfico ATPDraw para realizar las simulaciones planteadas para el proyecto. Los focos principales de observación serían entonces, la selección de la red de media tensión (método y parámetros), la fuente capaz de simular la corriente de rayo necesaria para los análisis y finalmente el reconectador aplicado a la línea.

El modelado de la red se llevará a cabo a través del Modelo de BERGERON. Este método permite considerar la propagación de ondas de corriente y voltaje en el dominio del tiempo, por ello se clasifica como un modelo de parámetros distribuidos. Pese a no considerar pérdidas propias de la línea, efecto por dispersión o efecto piel de manera directa, se considera confiable en el cálculo de líneas aéreas^{3 4}. Aunque ATP posee varios modelos de fuentes para simular transitorios, si se está considerando simular una corriente de rayo, se da preferencia a la fuente de corriente Heidler tipo 15 que, según la norma IEC 61-1 es la fuente que se adaptará con mayor exactitud a la forma de onda tipo rayo⁵. Ω

³ ESCAMILLA J., CANDIA F., ALBINO I., CASTILLO M.. Modelado de Líneas Monofásicas Aplicando el Método de Bergeron, Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, Blvd. Valsequillo y Av. Sn. Claudio, Col. San Manuel, Puebla, México

⁴ ESCAMILLA J., CANDIA F., ALBINO I., LÓPEZ M.. Modelado De Líneas Monofásicas Aplicando El Método De Bergeron, Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

⁵ VASQUEZ K., Cálculo De Sobrevoltajes Originados Por Descargas Atmosféricas En Líneas De Transmisión Utilizando El Atp (AlternativeTransientsProgram) Aplicado A La Línea De Transmisión Santa Rosa - Pomasqu1 a 230 Kv, Escuela de Ingeniería, Quito, 2003

Como el reconector no es una herramienta que actualmente esté disponible en ATP, uno de los objetivos principales de este proyecto consiste en desarrollar un modelo que pueda ser usado fácilmente en la interfaz del programa, como se observará en el capítulo **1.2 MODELADO DEL RECONECTOR MEDIANTE MODELS**

1.1.1 Construcción del modelo de línea. Para la construcción del modelo de línea se seleccionaron dos casos de estudio, una línea simple de un solo tramo (figura 1) y una línea un poco más compleja de seis tramos (figura 2) basada en el modelo planteado en ⁶.

En la figura 1, se observa la línea A (nombre de referencia), ya modelada en la interfaz ATPDraw. Esta está compuesta por una fuente de tensión de 22,863 kV, un módulo LCC, en donde se especifican los datos geométricos y materiales para una línea aérea o cable.

Un impacto de rayo representado en la fuente tipo Heidler mencionada anteriormente, tres medidores de tensión y finalmente una carga de tipo resistiva con un valor de 100 Ω .

Figura 1. Línea A sencilla con impacto de rayo. Fuente. Elaboración propia.

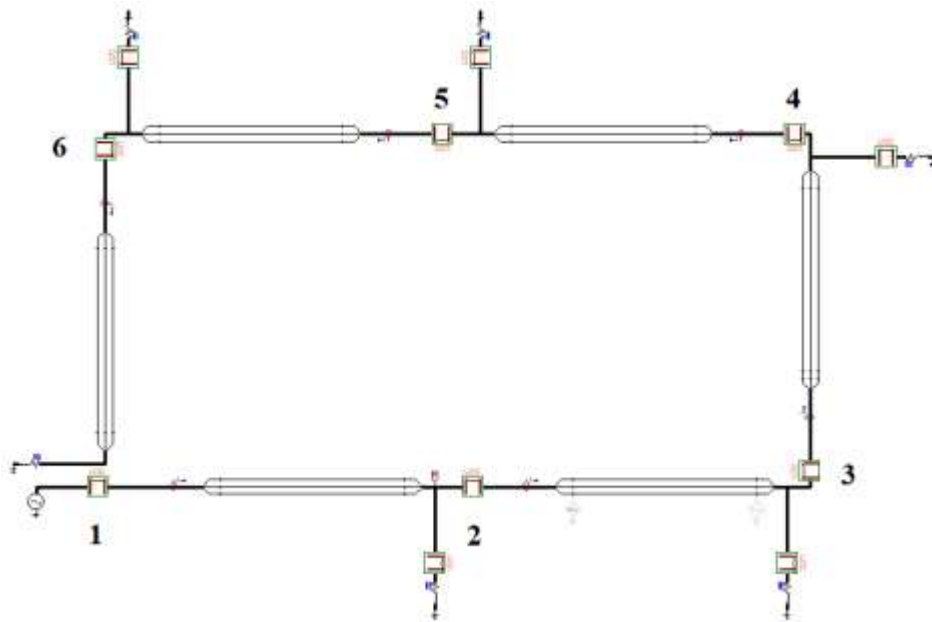


En la *Figura 2*, se observa la línea B (nombre de referencia), donde se tiene inicialmente una fuente de tensión de 22,863 kV. A diferencia de la línea sencilla

⁶ DUNCAN GLOVER J., MULUKUTLA S. SARMA, y OVERBYE Thomas J., Sistemas de Potencia Análisis y Diseño, 3ra edición, PWS Publishers, 1994

anteriormente expuesta, esta vez se tendrá un módulo LCC para especificar los datos de cada uno de los seis tramos que compondrán la línea de estudio; cinco módulos LCC para caracterizar la carga en cada uno de los tramos (que será igual a la carga del tramo final), un medidor de tensión y finalmente una carga de tipo RL con un valor de $214,245 \Omega$ y $579,456 \text{ mH}$.

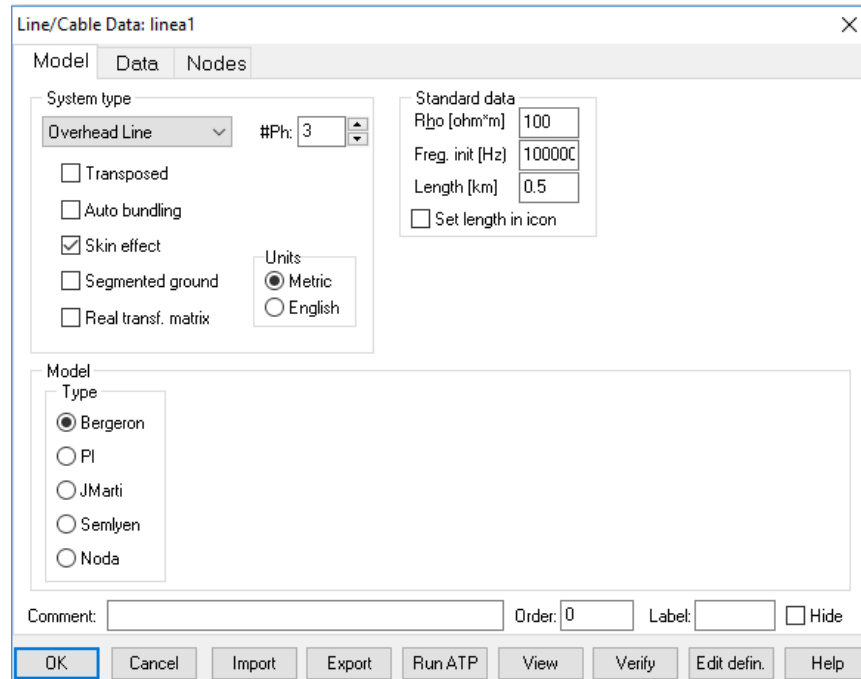
Figura 2. Configuración en ATPDraw de la Línea B (seis tramos).



En el programa ATP, es posible seleccionar el tipo de línea con el que se podrá trabajar, teniendo como posibles opciones BERGERON, PI, JMARTI, SEMLYEN, o NODA; para efectos del trabajo con rayos, dadas las razones del ítem anterior se selecciona el método Bergeron. En referencia a la construcción del tramo denominado A, en el módulo LCC, como se indicó con anterioridad, se especifican las características de funcionamiento de la línea sobre la cual se trabajará; se selecciona entonces el tipo de línea que, para este caso particular será aérea, con tres fases, se tendrá en cuenta el efecto piel (*skin effect*), el tipo de unidad será métrico, contará con una longitud de $0,5 \text{ km}$, la resistividad del terreno será de $100 \Omega \cdot \text{m}$, y la frecuencia (frecuencia inferior) a la que se calculan los parámetros

dependientes de la frecuencia será 100 kHz, tal como se muestra en la *figura 3* tomada directamente de la interfaz de ATPDraw.

Figura 3. Configuración de la línea A.



En esta misma ventana de configuración de datos de línea (*figura 4*), la pestaña “Data”, permite establecer las condiciones de trabajo para cada fase; en este caso, se selecciona para el número de fase el radio interno y externo del conductor a utilizar, con un radio externo de 1,43 cm, resistencia de la línea en corriente continua de 0,27 Ω /km, distancia horizontal de 1,2 m (referencia centro), la altura promedio del cable en la torre corresponderá a 10 m y la altura del cable en la mitad del vano se estimará en 8 m.

Figura 4. Datos usados en la línea sencilla A.

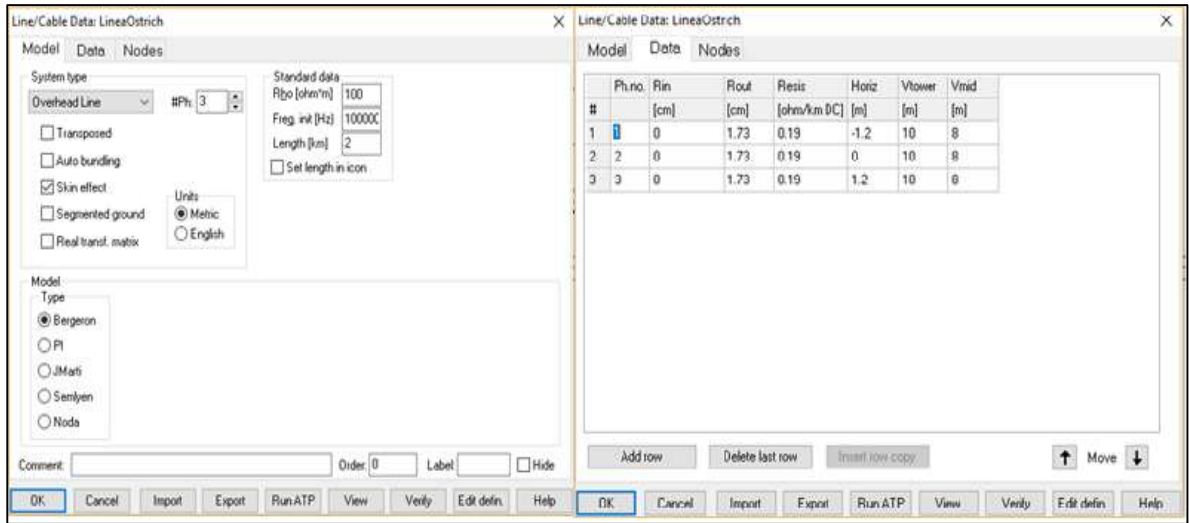
#	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vrid
		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]
1		0	1.43	0.27	-1.2	10	8
2		0	1.43	0.27	0	10	8
3		0	1.43	0.27	1.2	10	8

El modelado de la Línea B, como se mencionó anteriormente, resultará un poco más complejo dado que debe tenerse en cuenta que serán seis tramos de línea. Así pues, tomando en cuenta la manera en que fue configurada la línea A, se procede a modificar el LCC (Linea/Cable configuración) tal como se observa en la figura 5.

Los datos por ingresar en el LCC “LineaOstrich” son los siguientes:

- ✓ línea aérea con 3 fases
- ✓ tipo de unidad: métrico
- ✓ longitud de línea=2km
- ✓ resistividad del terreno= $100 \Omega \cdot m$
- ✓ frecuencia inferior=100 kHz
- ✓ radio externo= 1,73 cm
- ✓ resistencia de la línea en continua= 0,19 Ω/km
- ✓ distancia horizontal= 1,2 m (referencia centro)
- ✓ altura de la torre= 10 m
- ✓ altura en el vano= 8m

Figura 5. Configuración tramo 1 - Línea Ostrich.



Para configurar la pestaña “Model” en los LCC de los tramos 2 al 6, se tendrá en cuenta la información suministrada en la *Tabla 17*.

⁷Los datos LCC-Model de los tramos 1-6 se hallaron mediante un estudio de cargas basado en un modelo de línea implementado en [3] y pueden ser corroborados en la simulación anexa.

Tabla 1. Configuración LCC "Model" tramos 2-6.

TRAMO	LCC- LÍNEA	TIPO DE LÍNEA	NÚMERO DE FASES	TIPO DE UNIDAD	LONGITUD DE LÍNEA (km)	RESISTIVIDAD DEL TERRENO ($\Omega \cdot m$)	FRECUENCIA INFERIOR (Hz)
1	LineaOstrich	Overhead Line	3	métrico	2	100	100
2	LíneaCoyote	Overhead Line	3	métrico	3	100	100
3	LíneaPigeon	Overhead Line	3	métrico	2	100	100
4	LíneaMinorca	Overhead Line	3	métrico	2	100	100
5	LíneaSwallow	Overhead Line	3	métrico	2	100	100
6	LíneaWren	Overhead Line	3	métrico	0,5	100	100

Para configurar la pestaña "Data" en los LCC de los tramos 2 al 6, se tendrá en cuenta la información suministrada en la *Tabla 2*⁸.

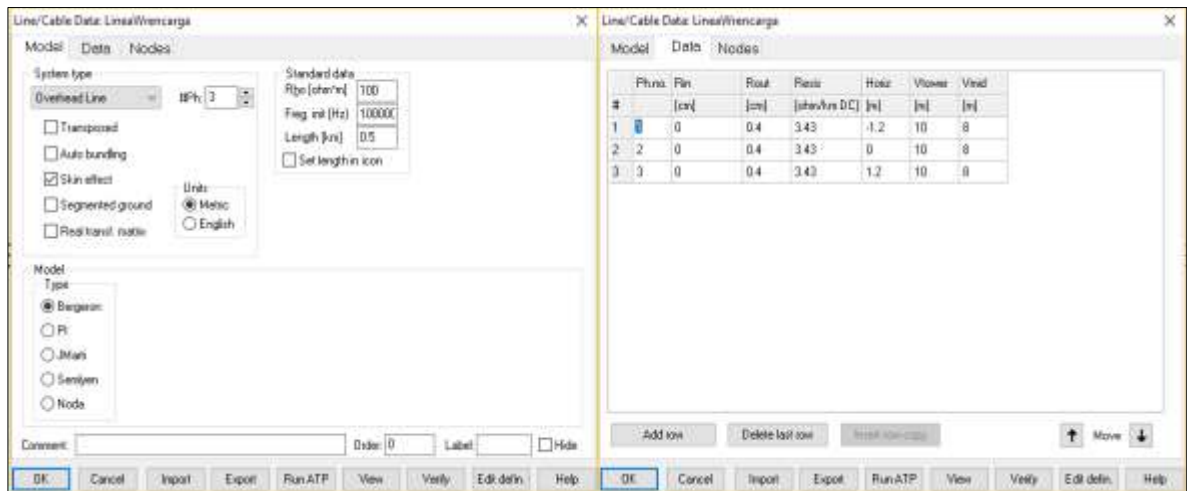
⁸Los datos relativos a LCC-Data de los tramos 1-6 se hallaron mediante un estudio de cargas basado en un modelo de línea implementado en [3] y pueden ser corroborados en la simulación anexa.

Tabla 2. Configuración LCC "Data" tramos 2-6

TRAMO	LCC- LÍNEA	TIPO DE LÍNEA	FASE	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid
1	LineaOstrich	Overhead Line	1,2,3	1,73	0,19	-1,2	10	8
2	LíneaCoyote	Overhead Line	1,2,3	1,61	0,2192	-1,2	10	8
3	LíneaPigeon	Overhead Line	1,2,3	1,48	0,3364	-1,2	10	8
4	LíneaMinorca	Overhead Line	1,2,3	1,22	0,5142	-1,2	10	8
5	LíneaSwallow	Overhead Line	1,2,3	0,71	1,071	-1,2	10	8
6	LíneaWren	Overhead Line	1,2,3	0,4	3,43	-1,2	10	8

La configuración de los LCC relativos a las líneas donde se instala la carga RL se llevará a cabo de acuerdo con lo establecido en las tablas 1 y 2 para la denominada *LíneaWren*, exactamente como se indica en la Figura 6.

Figura 6. Configuración Línea Wren de cargas.



En cuanto a la configuración de la carga RL dispuesta al finalizar cada tramo de la línea B, se tiene una resistencia de 214,245 Ω y una inductancia de 579,456 mH tal como muestra la Figura 7.

Figura 7. Datos de cargas del sistema- línea B.

Component: RLC3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohms	214.245
L_1	mH	579.456
C_1	µF	0
R_2	Ohms	214.245
L_2	mH	579.456
C_2	µF	0
R_3	Ohms	214.245
L_3	mH	579.456

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	X0007
OUT1	ABC	

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output
0 - No

Hide
 \$Vintage.1

Edit definitions OK Cancel Help

De esta manera finaliza lo que se considera el modelado de las líneas de trabajo, donde se realizaron dos construcciones (línea A y línea B), con las cuales, más adelante se presentará detalladamente un análisis de tensiones evidenciadas en los diferentes escenarios de acción de descargas atmosféricas en la interfaz ATPDraw.

1.2 MODELADO DEL RECONECTADOR MEDIANTE MODELS

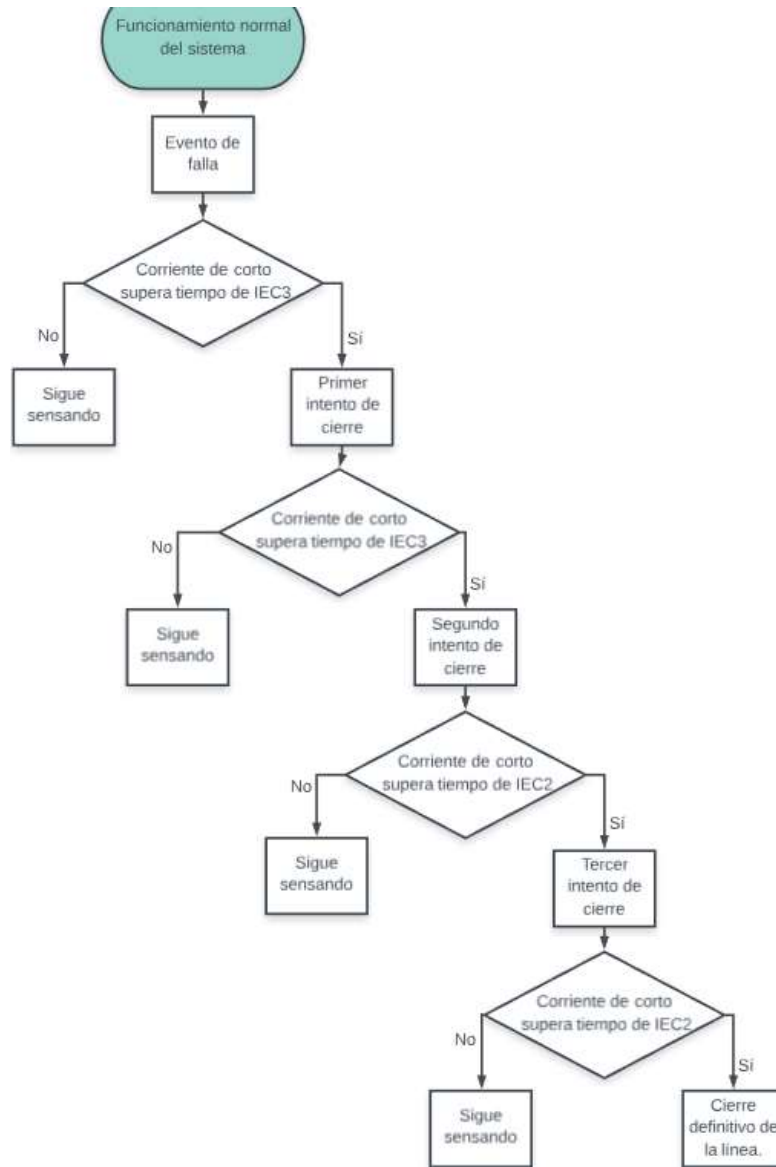
Para llevar a cabo la implementación del reconector en el programa ATP es necesario utilizar el lenguaje de programación MODELS, un lenguaje multipropósito, soportado por una serie de herramientas que facilitan la representación y análisis de sistemas variantes en el tiempo, o, dicho de otro modo, describe con mayor facilidad para el usuario el comportamiento de sistemas físicos complejos. Es usado frecuentemente para detallar la operación de circuitos y componentes de control, ya

que el lenguaje arroja señales de salida que interactúan con otros programas y/o componentes de ATP. Entre las características más importantes tenidas en cuenta para el uso de este lenguaje se encuentra la versatilidad al momento de utilizarlo, esto permite que se pueda usar la cantidad de veces que el usuario lo requiera, sumado a que la sintaxis de MODELS es muy similar al lenguaje de programación Fortran, lo que lo hace muy práctico a la hora de programar⁹.

Teniendo en cuenta que el reconector se debía implementar desde cero, se dio inicio a su programación de la manera más básica, a través del análisis de su funcionamiento mediante sencillos diagramas de bloques (figura 8) para tener una perspectiva más específica del comportamiento que se buscaba.

⁹ *Ibíd.*

Figura 8. Diagrama de bloques funcionamiento Reconectador.¹⁰



Inmediatamente después de conocido el funcionamiento del reconectador, se procede a trabajar en la programación para la interfaz ATP, así como la programación en lenguaje Models. En su representación más básica, el reconectador consta de interruptores automáticos, por ellos, se desea en primera

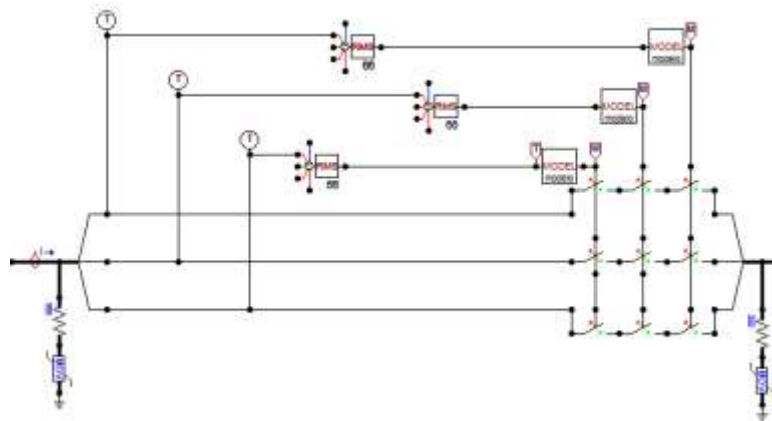
¹⁰Figura 8. Se describe el proceso de funcionamiento de un reconectador mediante diagrama de bloques. (Retamozo, Velásquez, 2019).

instancia automatizar el accionar de éstos para que reaccionen de manera eficiente ante la presencia de picos de corriente, para este caso particular descargas atmosféricas/rayos.

Es así, como inicialmente se realiza un arreglo como el que se muestra en la figura 9 que, de izquierda a derecha contiene los siguientes elementos:

- ✓ TACS Probadores de corriente: (Emtp_out)
- ✓ TACS RMS: (Device66)
- ✓ *El Model a diseñar: (Modelreconec)*
- ✓ Sonda Models
- ✓ Interruptores
- ✓ DPS: (Mov Type 92)

Figura 9. Reconectador en interfaz ATPDraw

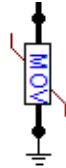


El funcionamiento del reconectador dentro del programa se realiza de la siguiente manera:

- ✓ El componente DPS MOV TYPE 92 (figura 10): dispositivo de protección contra sobretensiones, diseñado para limitar las sobretensiones transitorias y conducir las corrientes de impulso se instala tanto en la entrada como en la salida del

reconector de acuerdo con lo establecido en el numeral 20.14.2 “requisitos de instalación” del RETIE.

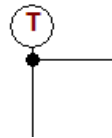
Figura 10. Herramienta DPS interfaz ATP.



Fuente. Interfaz ATPDraw.

- ✓ La corriente del sistema como dato de entrada para el modelo se obtiene a través del componente TACS SOURCES 91 (figura 11), cuyo único objetivo es medir la corriente en cualquier delta de tiempo.

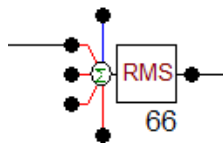
Figura 11. Herramienta TACS SOURCES 91 interfaz ATP.



Fuente. Interfaz ATPDraw.

- ✓ El componente TACS devicetype 66: Root Mean Square -RMS (figura 12) convierte el dato de corriente de entrada a R.M.S. a fin de verificar en qué momento ocurre una variación en el sistema.

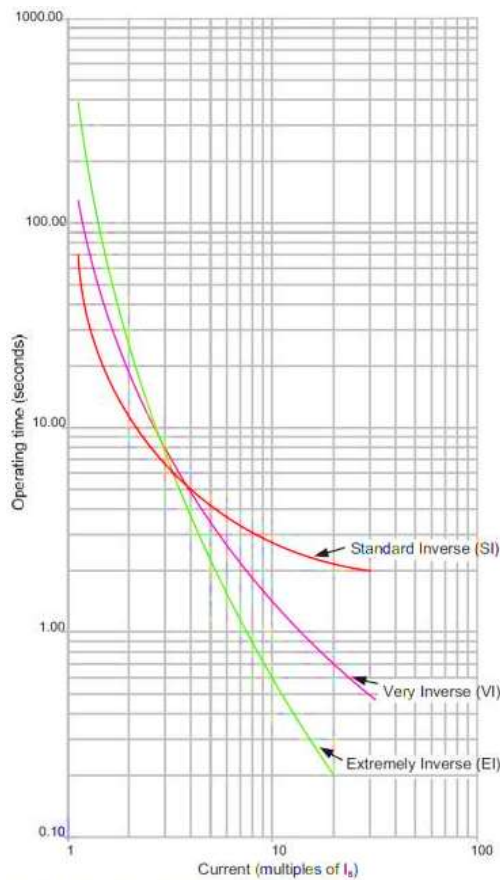
Figura 12. Herramienta TACS devicetype 66: Root Mean Square (RMS) interfaz ATP.



Fuente. Interfaz ATPDraw.

- ✓ Una vez que los valores de corriente previamente mencionados ingresan al modelo desarrollado, se realiza una comparación con los valores establecidos por la curva de acción rápida (extremadamente inversa) y la curva de acción lenta (tiempo inverso largo) mostradas en la figura 13, que rige el comportamiento del reconectador (Curva IEC)^{11 12} tal como se mostró en el diagrama de la figura 8.

Figura 13. Curvas de acción del reconectador IEC 60255¹³ .



¹¹ JIGUPARMAR, "Electrical Engineering Portal", February 2013, [online] Available Julio 2018: <http://electrical-engineering-portal.com/types-and-applications-of-overcurrent-relay-1>.

¹² MCFADYEN S., "Electromechanical Relays", April 2012, [online] Available: <https://myelectrical.com/notes/entryid/159/electromechanical-relays#myID1310033>

¹³Figura 12. Jiguparmar, "Electrical Engineering Portal", February 2013, [online] Available: <http://electrical-engineering-portal.com/types-and-applications-of-overcurrent-relay-1>.

Estas curvas de acción se rigen por la ecuación mostrada en la ecuación 1 y los datos pertinentes mostrados en la figura 14, donde:

t= Tiempo de operación.

a= Constante determinada por la curva tomada.

I= Dato de corriente de entrada.

I_{ref}= Ajuste del umbral de corriente

b= Constante determinada por la curva tomada

K= Ajuste de delta de tiempo.

Ecuación 1. Curva de trabajo extremadamente inversa [C4].

$$t = \frac{K * a}{\left[\frac{I}{I_{ref}} \right]^b - 1}$$

Figura 14. Constantes de curvas IEEE.

Tipo de curva	Descripción	a	b
C1	Inversa estandar 1	0.14	0.02
C2	Inversa estandar 2	0.06	0.02
C3	Muy inversa	13.5	1
C4	Extremadamente inversa	80	2
C5	Tiempo inverso largo	120	1
C6	Tiempo definido	Inst	99.9 Sec

Una vez se tienen claras las variables de trabajo, se declaran en el editor de texto (espacio donde se realiza la programación del model) para que estas aparezcan como variables data en el espacio de configuración del model mostrado en la figura 15.

Figura 15. Configuración MODEL (modelreconec).

The screenshot shows a software window titled "MODEL: modelreconec". It features two data tables. The first table, "Attributes", has columns for DATA, UNIT, and VALUE. The second table has columns for NODE, PHASE, and NAME. Below the tables are buttons for "Copy", "Paste", "entire data grid", and "Reset", along with "Order" and "Label" input fields. A "Comment" text box is also present. The "Models" section includes a "Library" tab, a "Model" dropdown set to "modelreconec", and buttons for "Edit", "Use As: MODELR", and "Record". Checkboxes for "Hide" and "Protect" are on the right. At the bottom are "Edit definitions", "OK", "Cancel", and "Help" buttons.

DATA	UNIT	VALUE
lcc		200
a1		80
a2		120
n1		2
n2		1
tc		1000
tc2		2000

NODE	PHASE	NAME
cte	1	××0032
o1	1	××0009

En el momento en que la corriente censada sobrepasa la corriente nominal del sistema se espera que la corriente que ingresa al sistema sea evaluada en la curva para tomar un tiempo de acción. Entonces, si la corriente es cercana a la corriente nominal el tiempo de actuación será muy grande tal que la falla no será percibida, el sistema seguirá en funcionamiento normal y continuará censando; si, por el contrario, la “falla” percibida es de un valor considerablemente más alto, el sistema la detectará e interrumpirá el paso de corriente dando oportunidad para el restablecimiento después de un delta de tiempo predefinido. El comportamiento predefinido para este modelo da oportunidad para 3 intentos de restablecimiento antes de que se realice un cuarto intento que llevará a una apertura definitiva.

Es así, que las instrucciones básicas para el diseño de un reconectador se reducen a:

- ✓ Verificar variables de entrada y salida.

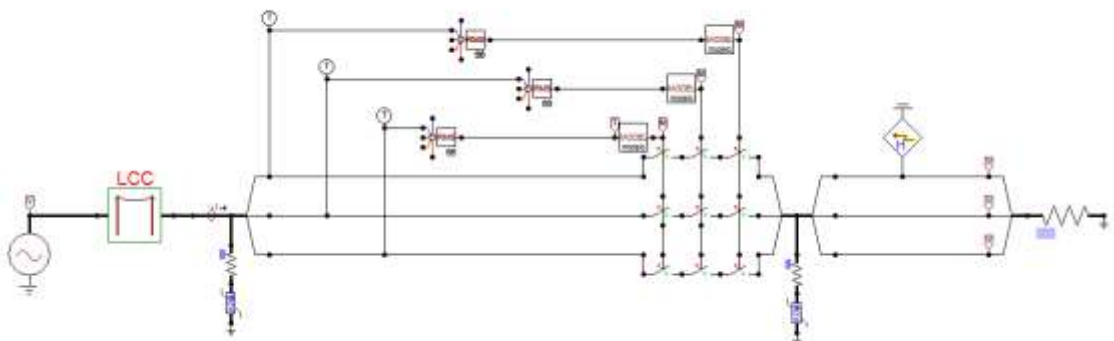
- ✓ Y, de acuerdo con lenguaje de programación FORTRAN, a la estructura de programación analizada en el gráfico figura 8, a la ecuación de la ecuación 1, y a los tiempos definidos por el usuario de acuerdo con el lugar de instalación, estructurar el comportamiento del reconectador.

1.3 PASOS DE APLICACIÓN

Para comprobar que el reconectador programado se encuentra funcionando correctamente para un buen acople a la línea, se decide plantear dos escenarios de simulación.

Como primer caso, se tiene una línea sencilla (*Línea A*) previamente modelada. A ésta se incorpora el modelo de reconectador y se simula el impacto de un rayo con una fuente tipo Heidler (*figura 16*).

Figura 16. Modelo sencillo – Línea A.



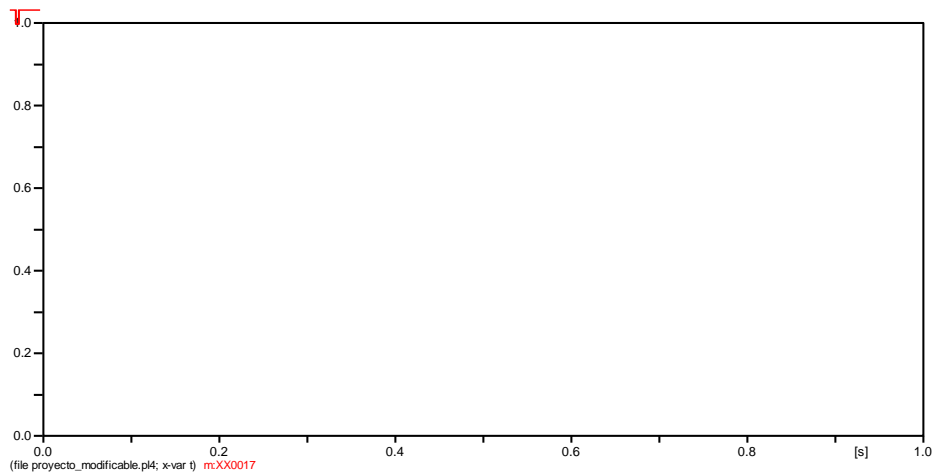
Los tiempos de acción del reconectador son configurados por el usuario de acuerdo con el ambiente donde éste será instalado, se configuran entonces las variables de entrada del reconectador con los valores indicados en la *figura 17*.

Figura 17. Data del caso 1, modelo sencillo-línea A.

DATA	UNIT	VALUE
lcc		200
a1		80
a2		120
n1		2
n2		1
tc		1000
tc2		2000

En la *figura 18* se observa claramente como el reconectador ha despejado la falla ocasionada tras el impacto del rayo en la fase A de la línea de prueba.

Figura 18. Reconectador despejando impacto de rayo a 0,2s



Como se evidencia en la anterior gráfica, el impacto se produce a 0,2s de iniciada la simulación, este tiempo es configurado directamente en la fuente Heidler. El reconectador recibe la información de la corriente RMS enviada por los TACS, evalúa el tiempo de respuesta de acuerdo con la ecuación IEC que actúa de forma casi instantánea provocando la primera apertura del reconectador, este tiempo de desconexión es conocido como tiempo muerto, que, como se mencionó anteriormente puede ser programado (en este caso es de 0,2 s). Pasado el tiempo

definido, el reconectador envía la señal de cierre y el funcionamiento normal del sistema continua.

Se observa también, como este mismo comportamiento se desarrolla en la figura 19 y figura 20 que muestra respectivamente la tensión y corriente del sistema, siendo afectadas por la descarga, reducidas por el reconectador y puestas nuevamente en funcionamiento pasado el tiempo establecido en la configuración del recloser.

Figura 19. Gráfica de Tensión en el sistema, impacto de rayo y despeje inmediato

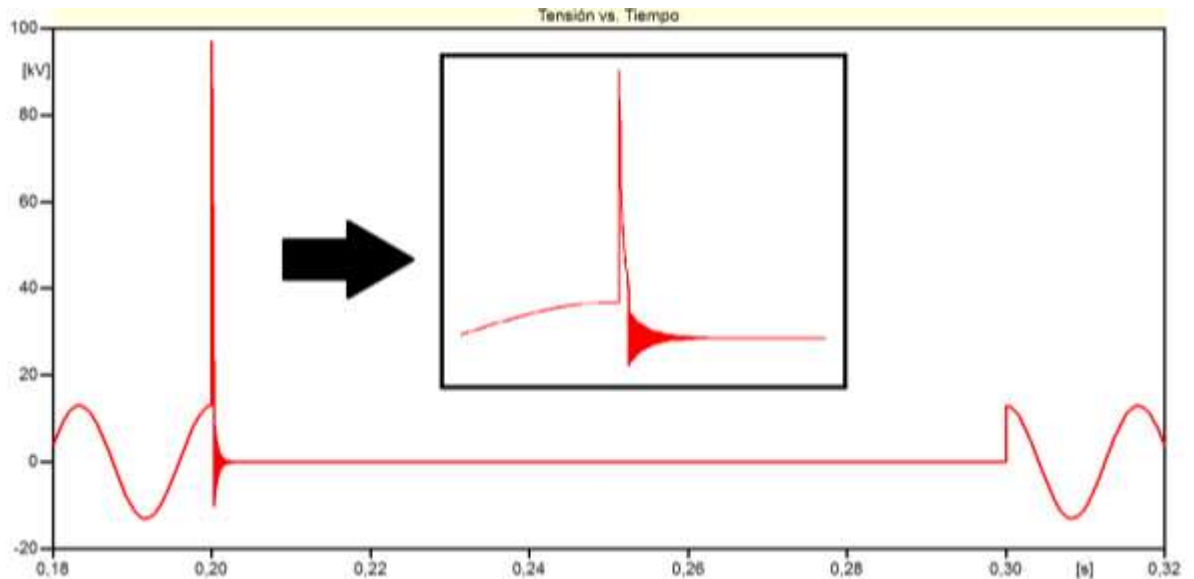
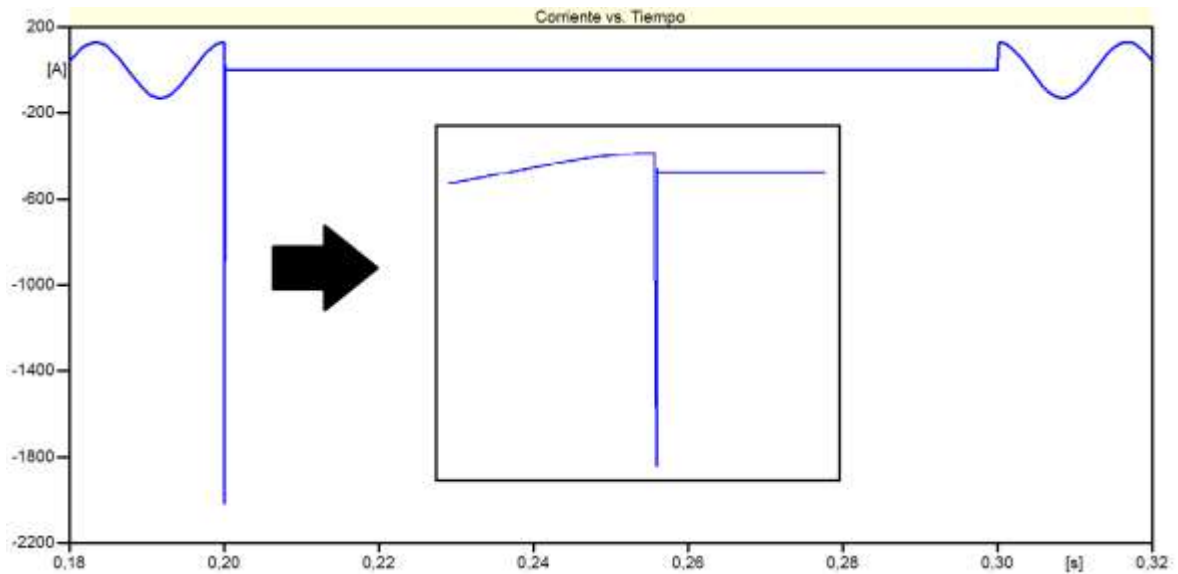


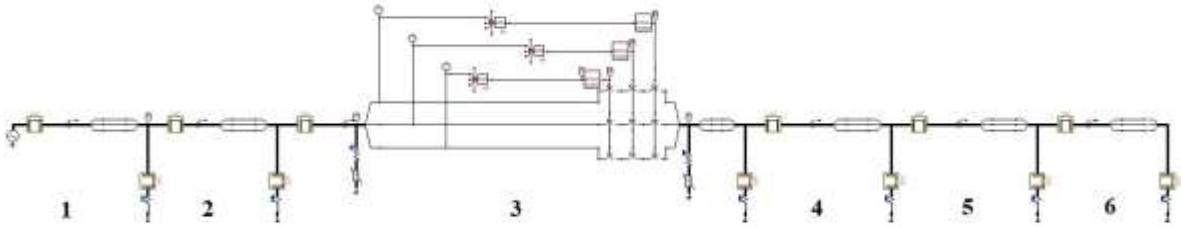
Figura 20. Gráfica de Corriente en el sistema, impacto de rayo y despeje inmediato.



- Como segundo caso, se cuenta con una línea de seis secciones diseñada con anterioridad (Línea B). Para verificar el funcionamiento del reconector diseñado, este se instala en cada uno de los seis tramos de la línea de trabajo, verificando que los cierres programados se efectúen precisamente, de modo que la falla sea despejada casi instantáneamente después de percibir el impacto en cualquiera de las fases del sistema. Una de las seis variaciones de posición¹⁴ propuestas, es la presente en la figura 21, donde se instala el reconector en el tramo 3 (Línea Pigeon).

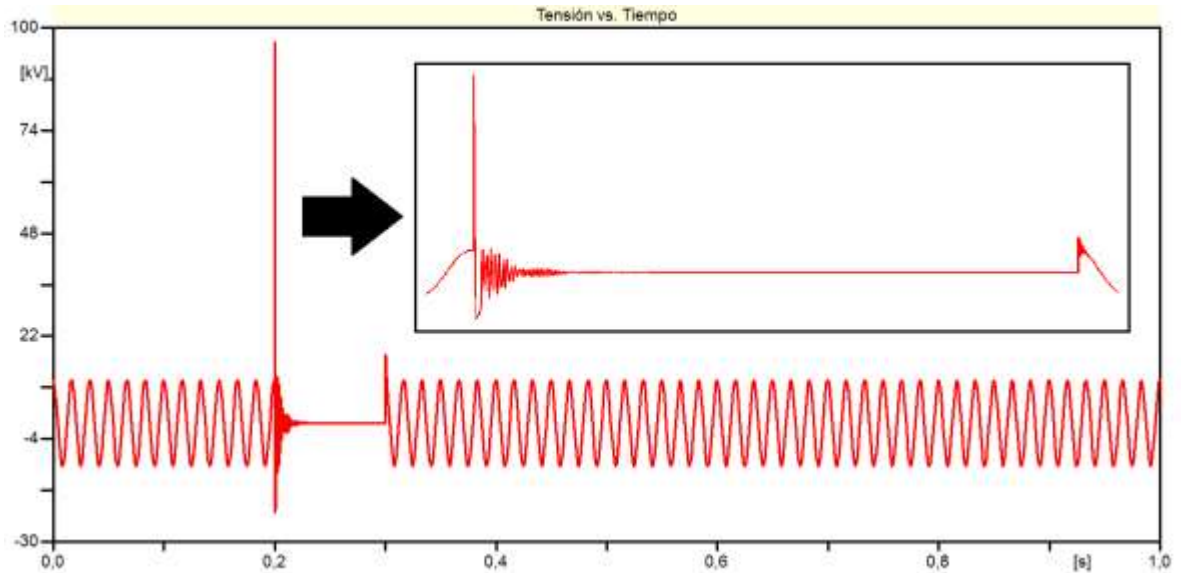
¹⁴ Las seis variaciones de posición posibles (casos de estudio adicionales) pueden encontrarse las simulaciones anexas.

Figura 21. Línea con reconectador instalado en tramo 3.



En la *Figura 22*, se muestra la variación de tensión ante un impacto de rayo en la fase A del sistema en el tramo 4 (inmediatamente posterior al de instalación del reconectador). Se observan dos picos de una tensión realmente significativa donde, al momento de ser sentido este aumento repentino el reconectador actúa realizando el primer intento de cierre para el despeje con tiempo programado para esta falla.

Figura 22. Tensión en Línea B ante impacto de rayo



A diferencia del caso anterior, esta vez se presenta una ligera oscilación en el momento de realizada la salida del sistema, siendo bastante complejo obtener gráficamente una apertura inmediata considerando no solo los transitorios que

afectarán la señal al momento de interrumpir el paso de energía, sino también los tiempos de actuación de los elementos propios de la programación de ATPDraw. La línea de trabajo es expuesta únicamente a un impacto de rayo, se espera entonces que con el primer intento de cierre del reconectador la señal logre estabilizarse.

2. EFECTO DEL RECONECTADOR EN EL ANÁLISIS DE IMPACTOS DIRECTOS.

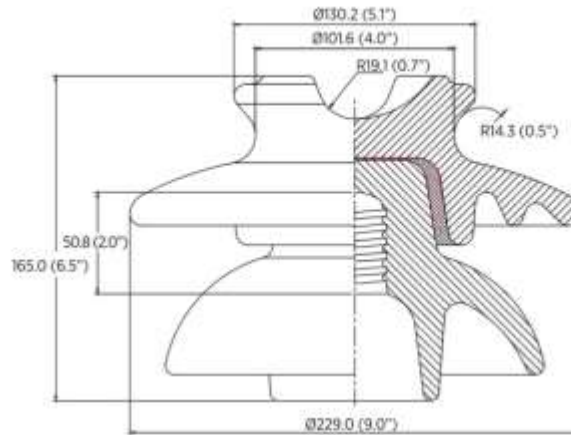
Una vez se ha construido un modelo de línea de distribución, se procede a observar la eficacia de instalar un reconectador sobre ella, por lo cual se establece realizar dos pruebas:

Primera prueba: se tiene una línea de seis tramos sin reconectador, donde sucesivamente en cada tramo se instala una fuente tipo Heidler para simular un impacto de rayo en cada una de las fases del sistema, mientras se toman los datos de tensión y corriente de cada una de las fases de los seis tramos del sistema.

Segunda prueba: se tiene una línea de seis tramos donde se instala un reconectador en un tramo del sistema, donde sucesivamente en cada uno de los cinco segmentos restantes se instala una fuente tipo Heidler para simular un impacto de rayo, mientras se toman los datos de tensión y corriente de cada una de las fases de los tramos donde no está instalado el reconectador.

El objetivo de estas pruebas es no solo comprobar el beneficio de la instalación del reconectador sino verificar cual es la mejor posición para hacerlo, esto va a ser determinado de acuerdo con la tasa de fallas del sistema. El criterio principal de comparación que se tendrá en cuenta es el CFO (tensión crítica de flameo) propio de la línea, por ello, el primer paso es realizar el cálculo de la cantidad de aisladores a instalar como protección, se selecciona el aislador tipo PIN ANSI 56-2 13,4kN 23KV CON RF-8356 (*figura 23*).

Figura 23. Características del Aislador seleccionado.



8355-8356

NÚMERO DE CATÁLOGO	8355	8356
Clase ANSI C29.6	56-2	56-2
DISTANCIAS CRÍTICAS, mm		
Distancia de arco	210	210
Distancia de fuga	432	432
Altura mínima del espigo	178	178
VALORES MECÁNICOS		
Resistencia al cantilever, kN	13.4	13.4
VALORES ELÉCTRICOS, kV		
Voltaje típico de aplicación	23	23
Flameo de baja frecuencia en seco	110	110
Flameo de baja frecuencia en húmedo	70	70
Flameo crítico al impulso positivo	175	175
Flameo crítico al impulso negativo	225	225
Voltaje de perforación a baja frecuencia	145	145
RADIO INFLUENCIA		
Esmalte RF	NO	SI
Voltaje de prueba RMS a tierra, kV	22	22
RIV máximo a 1,000 kHz, µV	12,000	100
DATOS DE EMPAQUE		
Peso neto por unidad, kg	4.80	4.80

CATALOG NUMBER	8355	8356
ANSI Class C29.6	56-2	56-2
CRITICAL DISTANCE, mm		
Dry arcing distance	210	210
Leakage distance	432	432
Minimum pin height	178	178
MECHANICAL VALUES		
Cantilever strength, kN	13.4	13.4
ELECTRICAL VALUES, kV		
Typical application voltage	23	23
Low-frequency dry flashover	110	110
Low-frequency wet flashover	70	70
Critical impulse flashover, positive	175	175
Critical impulse flashover, negative	225	225
Low-frequency puncture voltage	145	145
RADIO INFLUENCE VOLTAGE DATA		
Conductive glaze	NO	SI
Low-frequency test voltage, RMS to ground	22	22
Maximum RIV at 1,000 kHz, µV	12,000	100
PACKING DATA		
Net weight, kg	4.80	4.80

Fuente. Catálogo Aisladores GAMMA. Catálogo Aisladores Gamma. Disponible: <https://www.gamma.com.co/productos/pin-ansi-56-2-13-4kn-23kv-2/>

Teniendo en cuenta que para una cadena de aisladores el valor de tensión crítica de flameo puede ser estimado mediante la fórmula de Anderson (1987):

$$CFO = 0,94 \times 585 \times La \quad (1)$$

CFO: tensión crítica de flameo inverso de los aisladores

L_a : longitud de la cadena de aisladores, en metros.

Se necesitará obtener primero el valor de la longitud de la cadena de aisladores

L_a :

- **Longitud de la cadena de aisladores [L_a]:**

$$L_a = 14,6 * (N - 1) + 20, \text{ cm (2)}$$

L_a : distancia crítica

N: número de aisladores de la cadena

Para encontrar el valor de L_a , es necesario tener el número de aisladores de una cadena:

- **Número de aisladores en una cadena [N]**

$$N = 1,15 * \frac{D_{f\text{mín}}}{d_f} \text{ (3)}$$

$D_{f\text{mín}}$: Distancia de fuga requerida mínima, mm

d_f : Distancia de fuga de una unidad, mm

Conociendo el valor de la distancia de fuga mínima nominal se halla el número de aisladores en una cadena:

- **Distancia de fuga mínima nominal [$D_{f\text{mín}}$]**

$$D_{f\text{mín}}: K_f * U_m * K_d, [\text{mm}] \text{ (4)}$$

K_f : Distancia de fuga específica mínima, tomada de la Tabla

U_m : Tensión más elevada del material, valor fase-fase, kV

K_d : Factor de corrección debido al diámetro; tomas valores dependiendo del diámetro promedio D_m : K_d : 1,0 si $D_m < 300\text{mm}$, 1,1 si $300 \leq D_m \leq 500\text{mm}$, 1,2 si $D_m > 500\text{mm}$

Es así como:

$$D_{f\min} = 31 * 17,5 * 1 = \mathbf{542,5\text{mm}} \quad (4)$$

$$N = 1,15 * \frac{542,5}{432} = 1,4442 \sim \mathbf{2 \text{ Aisladores}} \quad (3)$$

$$L_a = 14,6(2 - 1) + 20 = \mathbf{34,6 \text{ cm}} \quad (2)$$

Para el CFO de la línea, dada la información anterior, se tiene que:

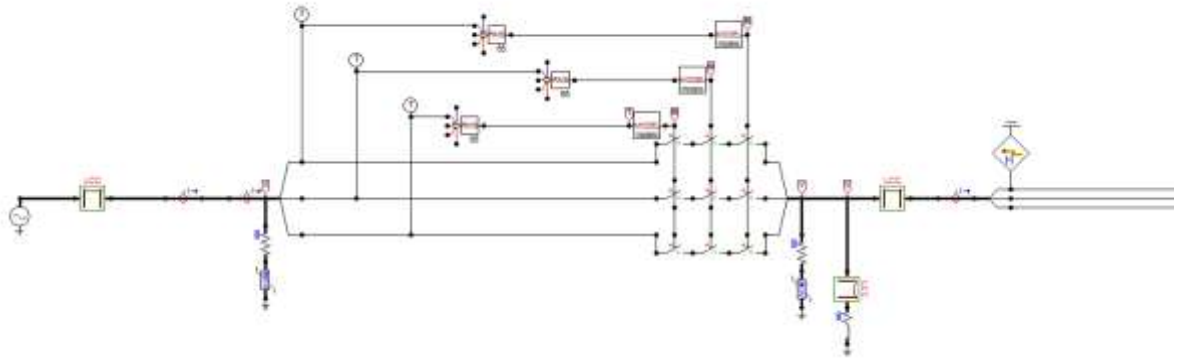
$$CFO_{\text{aislador}} = 0,94 * 585 * 34,6 = \mathbf{120 \text{ kV}} \quad (1)$$

2.1 DESARROLLO DE PRUEBAS

Para simular la descarga del rayo que impactará la línea se trabaja con una fuente de corriente tipo HEIDLER como se mencionó durante la simulación, con una corriente de 400 kA.

Inicialmente se selecciona el tramo uno para la instalación del reconectador. El rayo impactará en la fase A del segundo tramo, y se tomarán los datos de tensión y corriente tanto de la fase donde impactó la descarga como de las dos fases restantes. Seguidamente, manteniendo el reconectador instalado en el tramo uno, una descarga impactará en la fase B del segundo tramo, allí se toma la lectura de

Figura 25. Segunda prueba, tramo 1 CON reconector, impacto en tramo 2 fase A.



Con lo anterior se genera una gráfica de comparación de tensiones, donde, la notación utilizada será la siguiente:

R1-2DA1: El reconector se encuentra instalado en el tramo 1 (R1), mientras la descarga impacta en la fase A del tramo 2 (2DA) dato recopilado de la fase A.

R1-2B1: El reconector se encuentra instalado en el tramo 1 (R1), mientras la descarga impacta en la fase A del tramo 2 (2), dato de la fase B (B1). Se ignora la notación DA dado que el número uno que acompaña la letra B, muestra que es la primera muestra de datos del tramo.

R1-2C1: El reconector se encuentra instalado en el tramo 1 (R1), mientras la descarga impacta en la fase A del tramo 2 (2), dato de la fase C (C1). Se ignora la notación DA dado que el número uno que acompaña la letra C, muestra que es la primera muestra de datos del tramo.

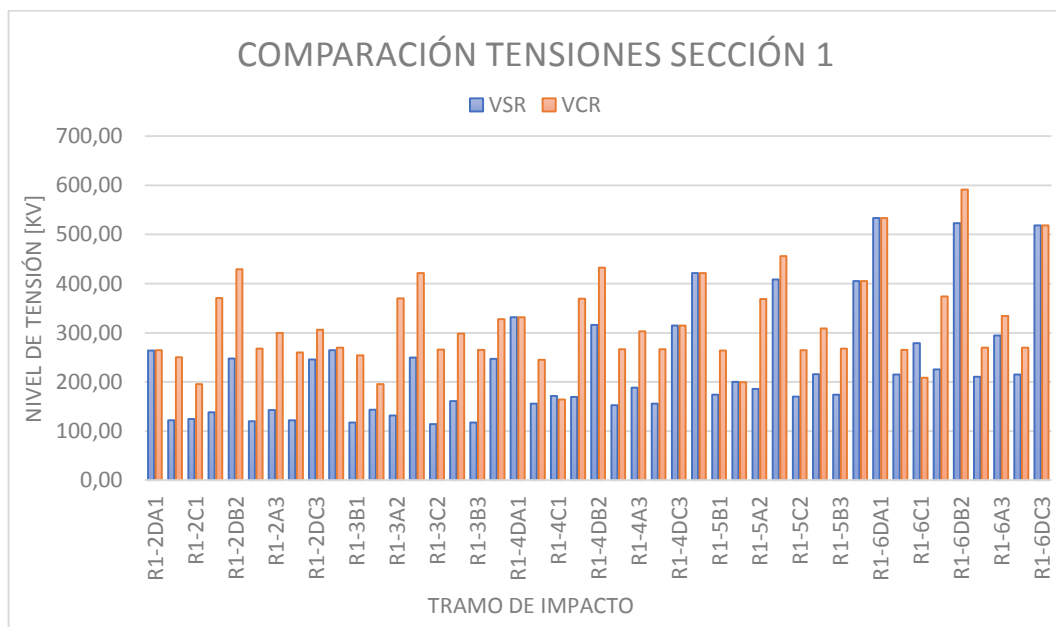
VSR: Tensión sin reconector.

VCR: Tensión con reconector.

En la figura 26, se evidencia un fuerte incremento de la tensión, cuando se lleva a cabo la instalación del reconectador, siendo aún más elevados en el lugar de impacto de la descarga en relación al otro par de fases presente en cada tramo, un resultado esperado dado que se está considerando un impacto directo sobre la fase, lo que también lleva a considerar factores como la construcción de los tramos de línea con diferente conductor y la existencia de tensiones inducidas dentro del sistema que igualmente pueden repercutir en la variación de estos datos.

Gráficamente, también se observa una ligera tendencia en el incremento de la tensión a medida que los impactos se alejan de la posición de instalación del reconectador, dado que entre más cercano sea el impacto este tendrá una mayor oportunidad de actuar sobre la falla momentánea que se genera.

Figura 26. Datos obtenidos para Sección 1



Se realiza la comparación VSR/VCR con los datos obtenidos, donde un resultado unitario (de valor uno) indica que se comparan valores muy cercanos, lo que no se espera en este caso dadas las diferentes condiciones en que fueron tomadas las

pruebas, mostrando efectivamente cambios desde un valor mínimo de 0,36 hasta valores coincidentes con 1, lo que permite reafirmar que los valores de tensión mientras el reconectador esté instalado serán mayores.

- **SECCIÓN 3 (S3).**

Esta vez la instalación del reconectador se realiza en el tramo 3 (*figura 27*), lugar donde se tiene la oportunidad de observar el comportamiento del sistema ante el impacto de rayo tanto a la izquierda (tramos 1 y 2) como a la derecha (tramos 4, 5 y 6) de su instalación. Nuevamente se compara con el sistema sin reconectador instalado (*figura 28*).

Figura 27. Primera prueba, tramo 3 CON reconectador, impacto en tramo 4 fase A. [R3-4DA1].

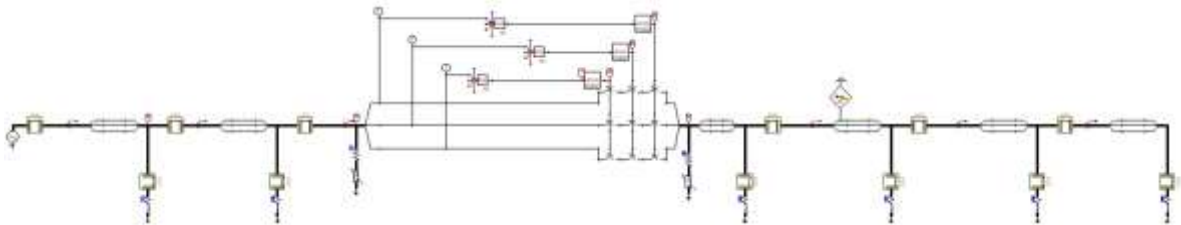
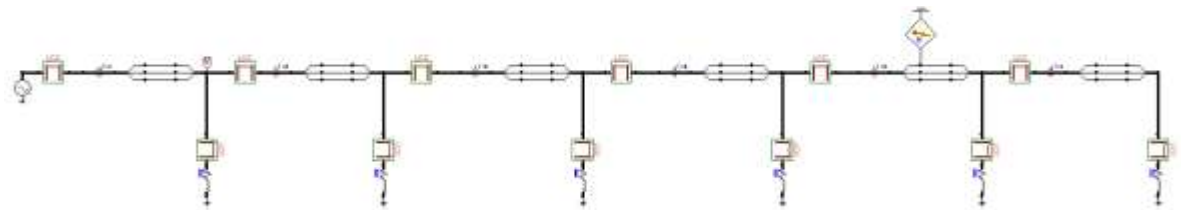


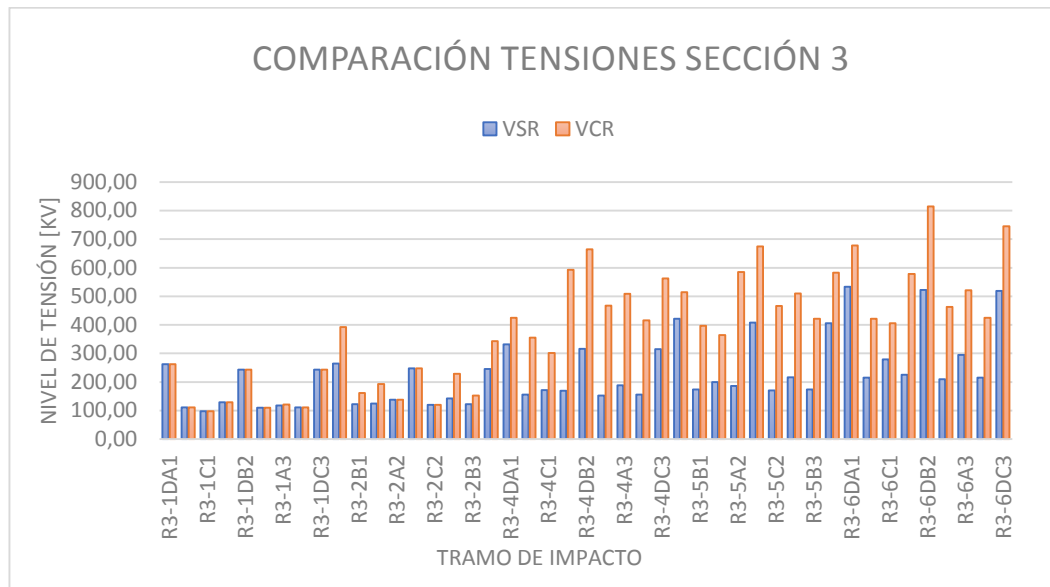
Figura 28. Primera prueba, tramos SIN reconectador, impacto en tramo 4 fase A. [R3-4DA1].



A diferencia de los resultados observados en el análisis de la sección 1, en la sección 3 (*figura 29*) se tienen dos comportamientos diferentes. Inicialmente a la izquierda del lugar de instalación del reconectador las tensiones obtenidas son

bastante reducidas en comparación con las obtenidas en el lado derecho que repiten el comportamiento visto en la sección 1, donde, a medida que los impactos de rayo se alejan de la posición de instalación del recloser son cada vez mayores.

Figura 29. Datos obtenidos para Sección 3.

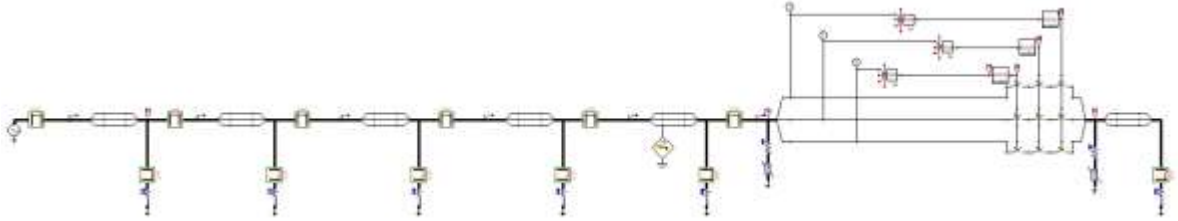


Al notar lo anterior, se hace evidente que en los tramos uno y dos los niveles de tensión son muy similares a los obtenidos cuando no se ha instalado un reconector en el sistema, debido a que la protección de este se limita a percibir y actuar únicamente sobre las fallas que ocurran aguas abajo del reconector.

- **SECCIÓN 6 (S6).**

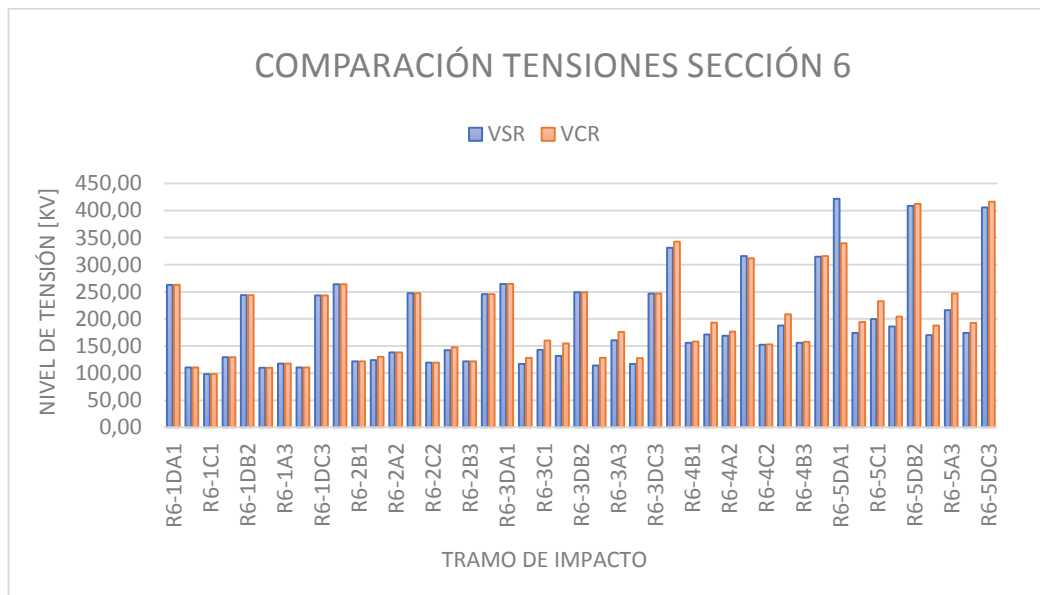
Finalmente, se instala el recloser en el tramo 6 (*figura 30*). En esta prueba únicamente se observarán impactos de rayo a la izquierda del lugar de instalación.

Figura 30. Primera prueba, tramo 6 CON reconector, impacto en tramo 5 fase C. [R6-5DC3].



En el caso de la sección uno, al realizar la instalación en el primer tramo, el reconector tiene mayor campo de trabajo (los 5 tramos siguientes), pero al ser instalado en el tramo final de la línea, su capacidad de actuar es limitada. Los valores de tensión para esta prueba (*figura 31*) coinciden en su mayoría con los vistos en el sistema cuando no existe protección de un reconector, lo que permite afirmar que los reconectores son más eficientes cuando su posición es más cercana a la fuente, lugar donde puede percibir los aumentos de tensión a lo largo de la línea y actuar ante cualquier falla que pueda presentarse.

Figura 31. Datos obtenidos para Sección 6.



Cuando la línea no posee elementos de protección en el sistema, cualquier falla que se presente se considerará de carácter permanente, lo que indica que se tendrán frecuentes y largas interrupciones en el sistema, pero, cuando existe un elemento de protección como el reconectador, el porcentaje de fallas que puedan producirse serán drásticamente reducidas debido a que siempre que detecte algún tipo de falla, esta será eliminada, o en caso de que esto no suceda se tendrá información casi exacta del lugar donde la reparación debe ser ejecutada.

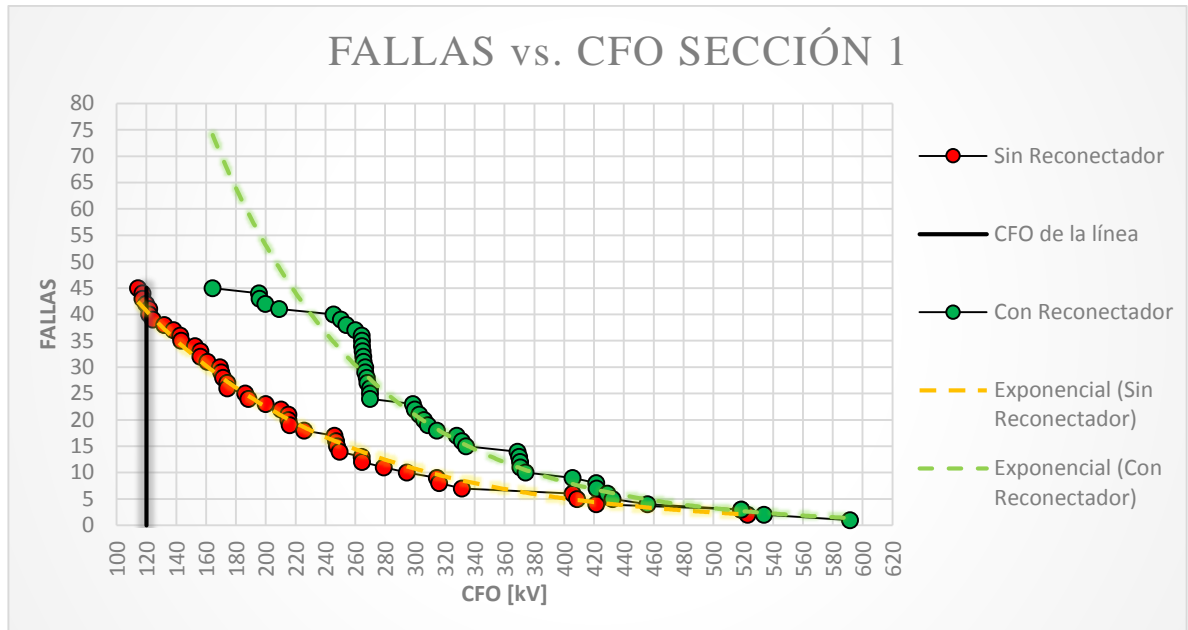
2.2 CÁLCULO DE FALLAS

▪ **SECCIÓN 1 (S1).**

Para este sistema, todo valor de tensión mayor a 120 kV (el valor del cfo propio del sistema) ocasionará falla de carácter permanente como sucede en los casos presentados en las *FIGURAS 32, 33 y 34* donde los puntos rojos representan la cantidad de fallas que ocurren en función del nivel de tensión, siendo en el caso de la sección 1, 45 el mayor número de fallas momentáneas en el sistema (este valor corresponde al total de simulaciones realizadas) para un cfo de 98,4 kV, y 1 falla para un cfo de 533,83 kV . La línea punteada amarilla, corresponde a una línea de tendencia exponencial que muestra con mayor claridad la cantidad decreciente de fallas ante el aumento de cfo.

En la sección 1, a partir del nivel de CFO propio de la línea sin reconectador se presentan 41 fallas, mientras que teniendo un reconectador instalado este podrá disipar hasta 45 interrupciones presentes en el sistema.

Figura 32. Fallas vs. CFO (TRAMO 1).



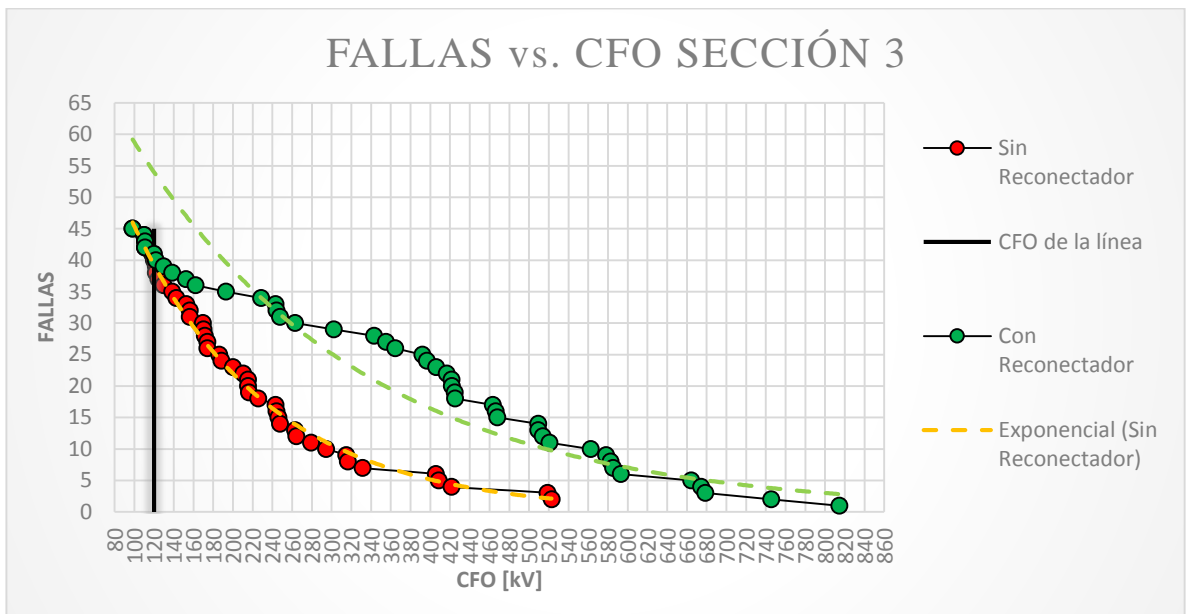
Ahora, en el caso de una línea con reconector y su nivel de aislamiento (CFO), el reconector detectará cualquier sobretensión, disipándola, evitando que se llegue a convertir en falla. Para las *FIGURAS: 32, 33 y 34* los puntos verdes indican los eventos donde el sistema podría fallar al superar el nivel de aislamiento del sistema. A diferencia de la prueba sin reconector, estos eventos serán disipados antes de que puedan considerarse una falla, debido a que el reconector realiza las operaciones de apertura y cierre programadas antes de que la descarga afecte el sistema y pueda dejarlo fuera de servicio.

En el caso del tramo 1 con reconector, los valores de tensión obtenidos en las simulaciones superan el nivel de tensión básico de la línea, esto debido en su mayoría a los transitorios generados por el mismo reconector. Cuando este está ubicado en la primera sección, el nivel de aislamiento se ve totalmente vulnerado ya que no soporta ningún impacto. Si se ubica el reconector en esta posición, se garantiza un aislamiento en el punto de falla y se podría garantizar continuidad en el servicio ya que cualquier falla será despejada.

▪ **SECCIÓN 3 (S3).**

En cualquiera de los casos analizados, debido a que los impactos se realizan directamente sobre los cables de fase, las tensiones obtenidas en las simulaciones presentan un valor elevado. En el caso de la sección 3 sin reconector (Figura 33), a partir del CFO del sistema se generan 39 fallas.

Figura 33. Fallas vs. CFO (TRAMO 3)



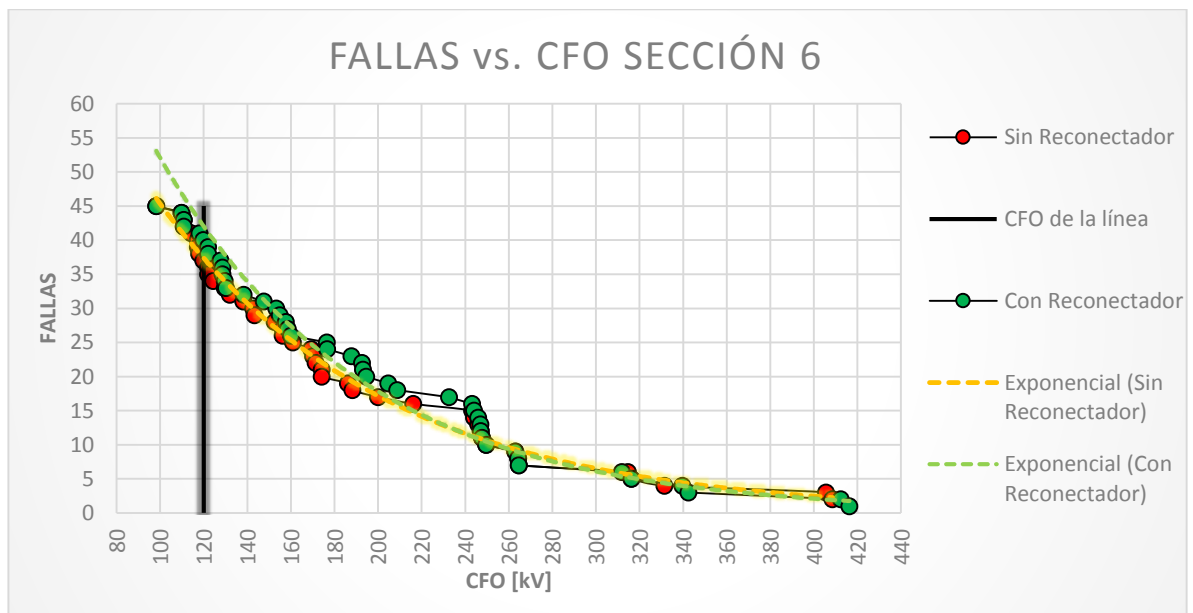
El tramo 3 con reconector (*figura 33*), presenta 40 interrupciones a partir de 120 kV, lo que es un número considerable de sobretensiones que deben ser disipadas por el reconector, pero no mayores a las presentes en el primer tramo, descartando esta sección como el mejor punto de instalación.

▪ **SECCIÓN 6 (S6).**

El tramo 6 es el final del sistema, esta posición es la menos acertada para la instalación del reconectador ya que las descargas que impacten aguas arriba de su instalación no podrán ser disipadas.

De acuerdo con la figura 34, la cantidad de fallas permanentes presentes en la sección 6 para un nivel de 120 kV será de 36. Aunque evidentemente es un valor menor al caso de la sección 3 o la sección 1, en este lugar la utilidad del reconectador se reduce en cuanto a los otros tramos que necesitan un mayor nivel de protección.

Figura 34. Fallas vs. CFO (TRAMO 6).



Una vez se instala el reconectador (*Figura 34*), para un nivel de 120 kV se tienen 39 fallas momentáneas. Con lo anterior se puede afirmar con certeza que la instalación del reconectador debe realizarse en el lugar donde pueda proteger a la línea del mayor número de fallas posibles, haciéndolo cerca a la fuente principal de tensión

el sistema estará protegido de una manera más eficiente que realizando la instalación en cualquier otro punto.

3. EFECTO DEL RECONECTADOR EN EL ANÁLISIS DE IMPACTOS INDIRECTOS.

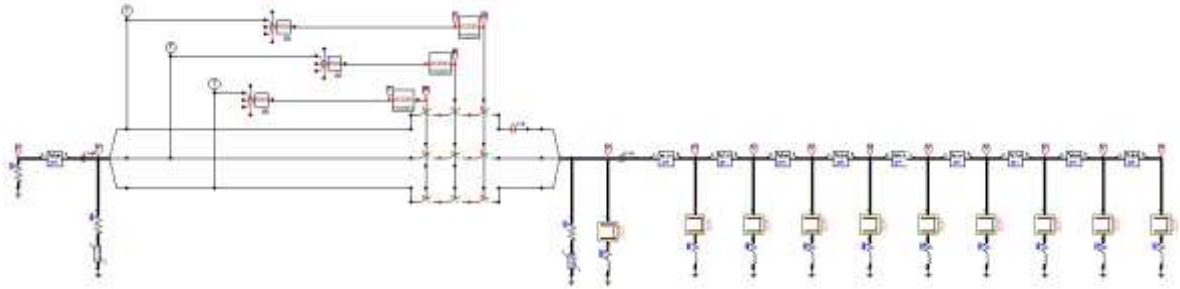
Para llevar a cabo las simulaciones de impactos indirectos se seleccionó la herramienta Yaluk Draw¹⁵, un software diseñado con el fin de calcular tensiones inducidas por rayos en líneas de distribución. con el objetivo de realizar mejoras en sus diseños y funcionamiento. Este programa utiliza librerías propias de ATP relacionadas con métodos de solución matriciales, incorpora nuevos modelos de línea que permiten tener en cuenta la inducción electromagnética propia del rayo y permite la utilización de elementos eléctricos.

La estimación del índice de fallas se basa en el método estadístico de Monte Carlo establecido bajo los parámetros del estándar IEE 1410-2010¹⁶. Yaluk Draw, posee una interfaz amable con el usuario, permite realizar la construcción del sistema a analizar, y la conexión de elementos como puestas a tierra, transformadores y descargadores de sobretensión. Yaluk-ATP es una rutina desarrollada en lenguaje FORTRAN, capaz de considerar la inducción electromagnética en la línea. Una vez se incorpora el reconectador al programa, se realiza el montaje de una línea de diez tramos en ATPDraw (*Figura 35*) para evaluar su comportamiento frente a impactos indirectos. Cuando el reconectador ya ha sido instalado en el sistema, se modifica la configuración interna del TAC RMS66 (*figura 12*), con una frecuencia de 10 MHz debido a que es necesario ampliar la velocidad de muestreo para que en la misma ventana de tiempo la toma de muestras sea mucho mayor y permita detectar el impacto de rayo, así como la acción de apertura del reconectador.

¹⁵ PEREZ E., SOTO E., Yaluk Draw: Software especializado para análisis del desempeño de líneas de distribución ante impacto de rayos, Colombia, 2013

¹⁶ SOTO E., PÉREZ E., DEL RÍO D., Calculation of indirect-lightning flashover rate on distribution lines from indirect lightning in tropical zones, Revista UIS Ingenierías, Colombia, 2018

Figura 35. Línea de diez tramos con Reconectador.



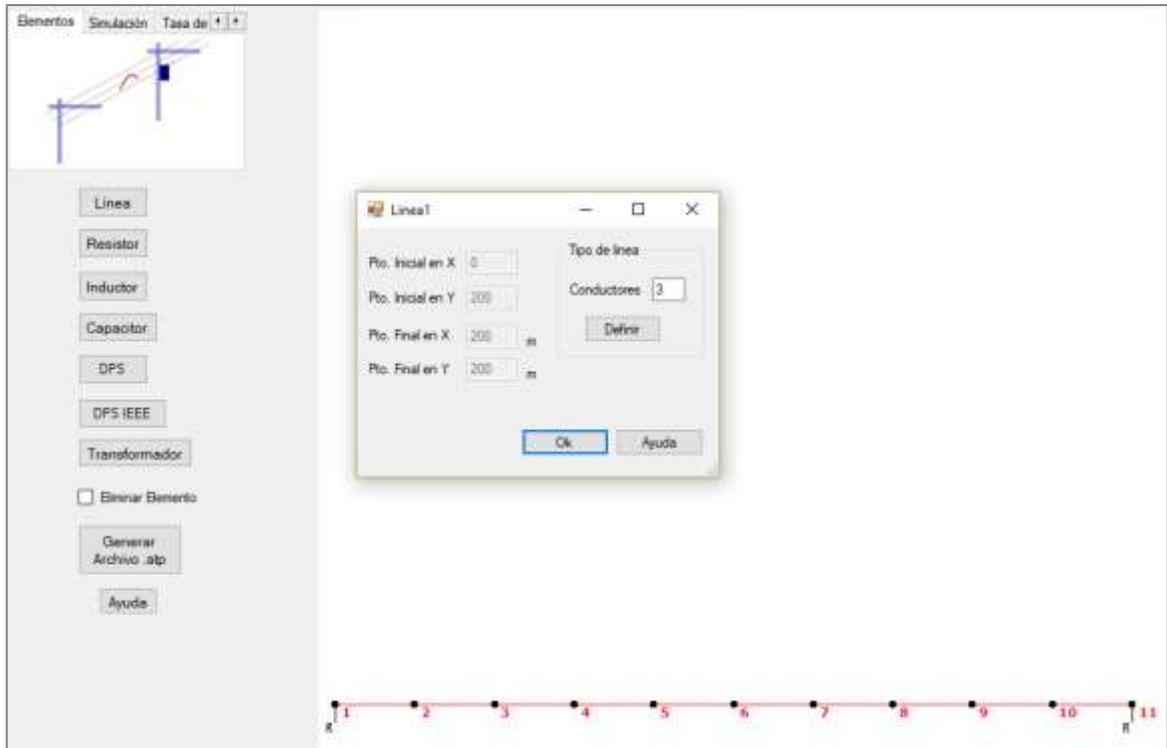
El nuevo componente(Figura 36) instalado en cada segmento, es un módulo trifásico encargado de enlazar los parámetros de línea que posteriormente se configuran en Yaluk Draw.

Figura 36. Componente trifásico de configuración de línea.



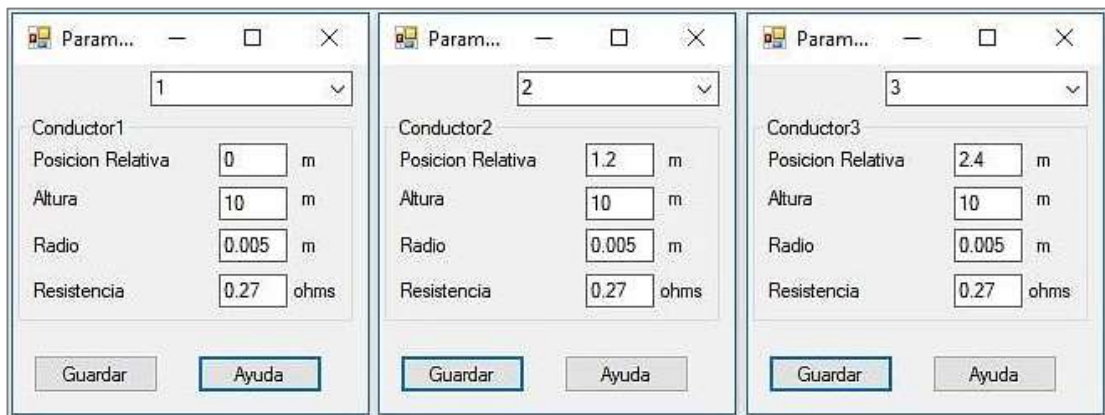
Ya en el entorno Yaluk Draw, es necesaria la configuración de una línea con los mismos segmentos de la creada en ATP. Se configuran los datos directamente en Yaluk Draw para posteriormente importarlos a ATP a través de este módulo de línea trifásico. En cada tramo debe seleccionarse una posición inicial (X, Y) en el espacio de trabajo y número de conductores como se indica en la Figura 37.

Figura 37. Entorno YALUKDRAW.



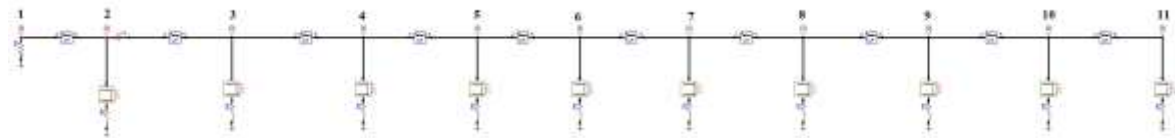
Posteriormente se configura la disposición de cada conductor, así como su altura, radio y resistencia (*Figura 38*). Repitiendo este procedimiento hasta obtener una línea de diez tramos.

Figura 38. Configuración disposición conductores



Como punto de partida se tiene el sistema sin reconectador (*Figura 39*) con el fin de analizar las tensiones y corrientes obtenidas. Seguidamente se contrastarán con las resultantes del sistema con reconectador instalado.

Figura 39. Línea de distribución sin reconectador



En el entorno de trabajo de YALUK existe la pestaña “Simulación”, que contiene las opciones de configuración de dos fuentes Heidler (*figura 40*), que se encargan de generar las descargas atmosféricas solicitadas sobre el sistema. Allí mismo se establece el espacio donde aleatoriamente impactarán los rayos que provocarán en el sistema tensiones inducidas.

Para encontrar el valor de corriente de la descarga en la primera función Heidler que debe ser ingresada en el programa, de acuerdo con ¹⁷ debe ser usada la ecuación de Rusk, tal que:

Ecuación 2. Ecuación de Rusk.

$$V = \frac{38,8 * I_o * h}{y}$$

Fuente: POWER, I., & SOCIETY, IEEE Std 1410 - 2010. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines. vol. 2010. 2011.

Donde:

V: Máxima tensión que puede ser inducida en una línea

¹⁷ POWER, I., & SOCIETY, IEEE Std 1410 – 2010 Op. Cit.

I_0 : corriente pico de la descarga

h : altura promedio de la línea sobre el nivel de tierra

y : distancia más corta entre la línea y la descarga tipo rayo.

Para el valor de “ V ” se asume el valor correspondiente al CFO de la línea (120 kV), “ h ” corresponde a la altura donde fueron ubicados los conductores (10 m), la distancia “ y ” se establece en 1000 m. Entonces:

$$I_0 = 309,278 \sim 309 \text{ kA}$$

Con esto, se establecen los siguientes parámetros de simulación:

- Magnitud de la corriente (primera función de Heidler): 309 kA
- Tiempo de frente (primera función de Heidler): 0,25 μs
- Tiempo de cola (primera función de Heidler): 2,5 μs
- Constante (primera función de Heidler): 2
- Magnitud de la corriente (segunda función de Heidler): 20 kA
- Tiempo de frente (segunda función de Heidler): 2,1 μs
- Tiempo de cola (segunda función de Heidler): 230 μs
- Constante (segunda función de Heidler): 2
- Posición X del rayo: 800 m
- Posición Y del rayo: 1000 m

Figura 40. Configuración de impactos y coordenadas de la descarga.

Elementos Simulación Tasa de

Forma Onda Canal de desc

Tipo de Onda

Triangular

Heidler

Primera función de Heidler

lh1 309 (kA)

tao11 0.25 (us)

tao12 2.5 (us)

n1 2

Segunda función de Heidler

lh2 20 (kA)

tao21 2.1 (us)

tao22 230 (us)

n2 2

Visualizar Forma de Onda

Coordenadas de la descarga

X0 800 (m)

Y0 1000 (m)

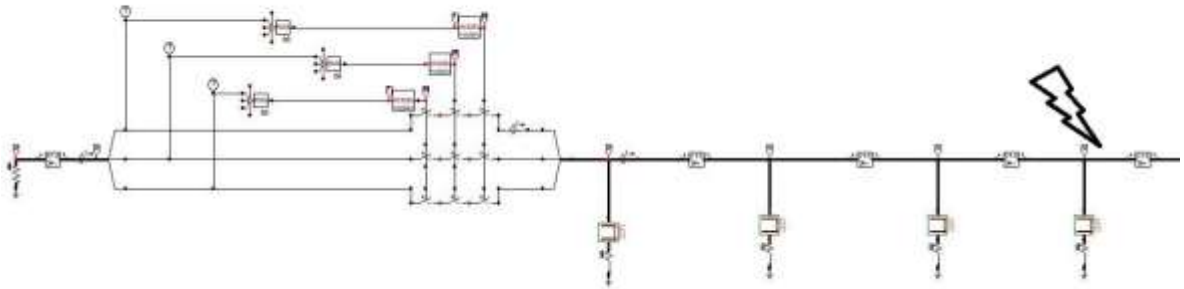
Escoger Punto

Obtener Tensión Inducida

Una vez se ejecuta la simulación, se establecen dos puntos de medición (nodo 1 y 2) para ambos escenarios (sistema con y sin reconectador). Es claro que el reconectador ha sido programado de tal manera que cuando detecte cualquier tipo de sobre corriente se realice una apertura en el circuito, de este modo en las *figura*

42 y 43 se realiza una lectura de tensión en el nodo 1 ante el impacto de rayo ocurrido a 800 m del punto de origen de la línea (*figura 41*).

Figura 41. Impacto de rayo 800m sobre línea de trabajo



Teniendo en cuenta el lugar del impacto, si el sistema no cuenta con protección (reconectador) la perturbación provocada por el impacto viaja a lo largo del sistema a diferencia de la medición en la línea con reconectador, donde se espera que este actúe y brinde protección ante el evento, lo que es claro al contrastar ambas tensiones, a pesar de que se presente una tensión remanente luego del despeje de la falla. Se observa también un ligero retardo en el accionar del reconectador (*figura 35*), resultado de la forma de captación de la corriente en el programa.

Figura 42. Gráfica Tensión vs. Tiempo, sistema sin reconectador, nodo 1.

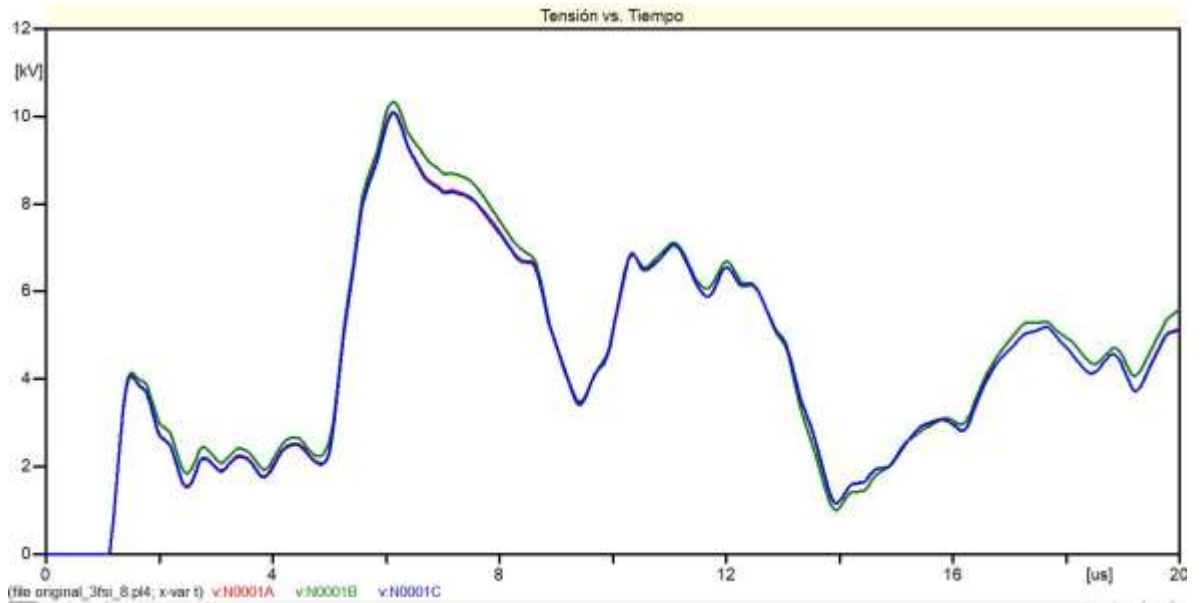
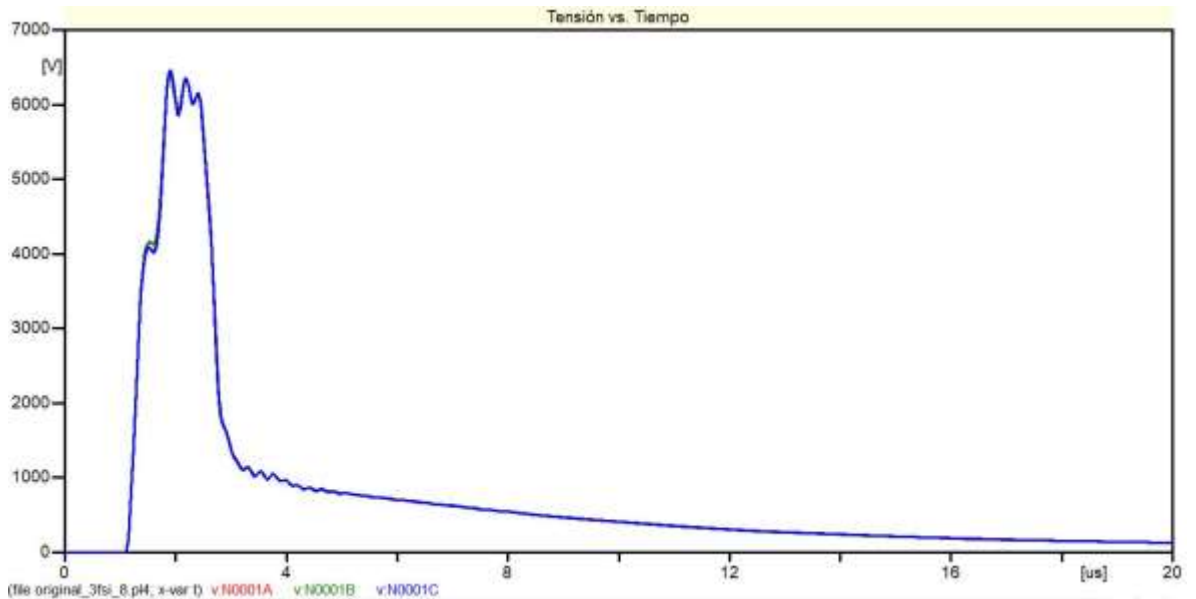


Figura 43. Gráfica Tensión vs. Tiempo, sistema con reconectador, nodo 1.



En cuanto a las corrientes obtenidas en esta medición (*figura 44 y figura 45*), también es claro el momento en el que actúa el reconectador. La forma de onda de corriente obtenida va a depender de la tensión debido a que dependiendo como se induzca la tensión en el sistema la corriente se verá reflejada, así mismo, si el

impacto es cercano al punto de medición se obtendrán valores mucho más altos de corriente que los que se obtendrían de un impacto mucho más lejano.

Figura 44. Gráfica Corriente vs. Tiempo, sistema sin reconector, nodo 1.

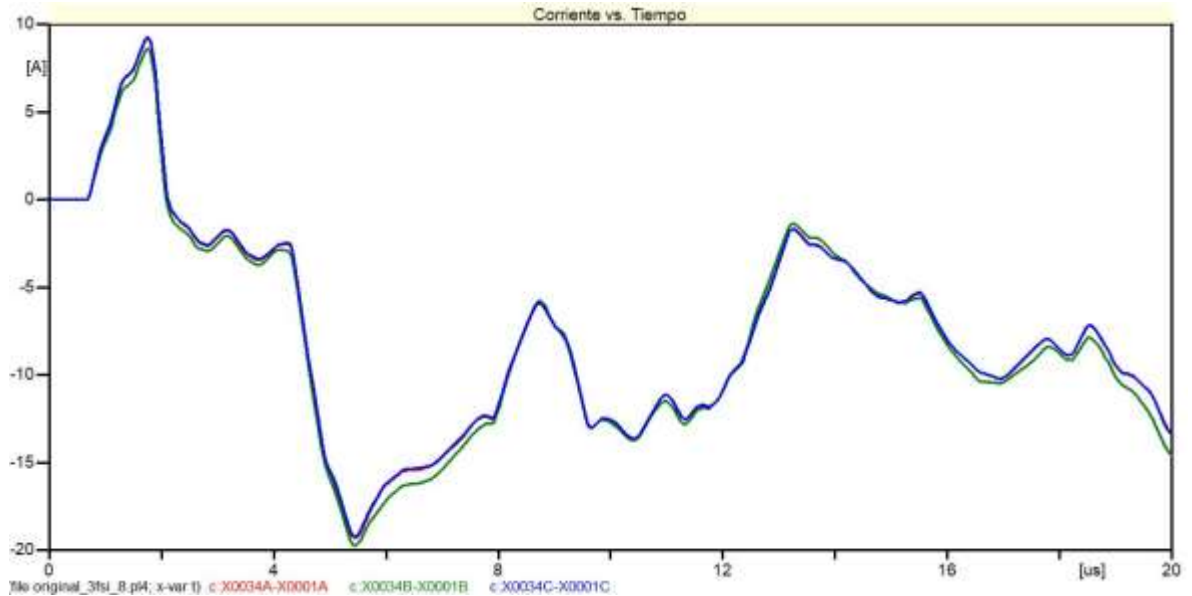
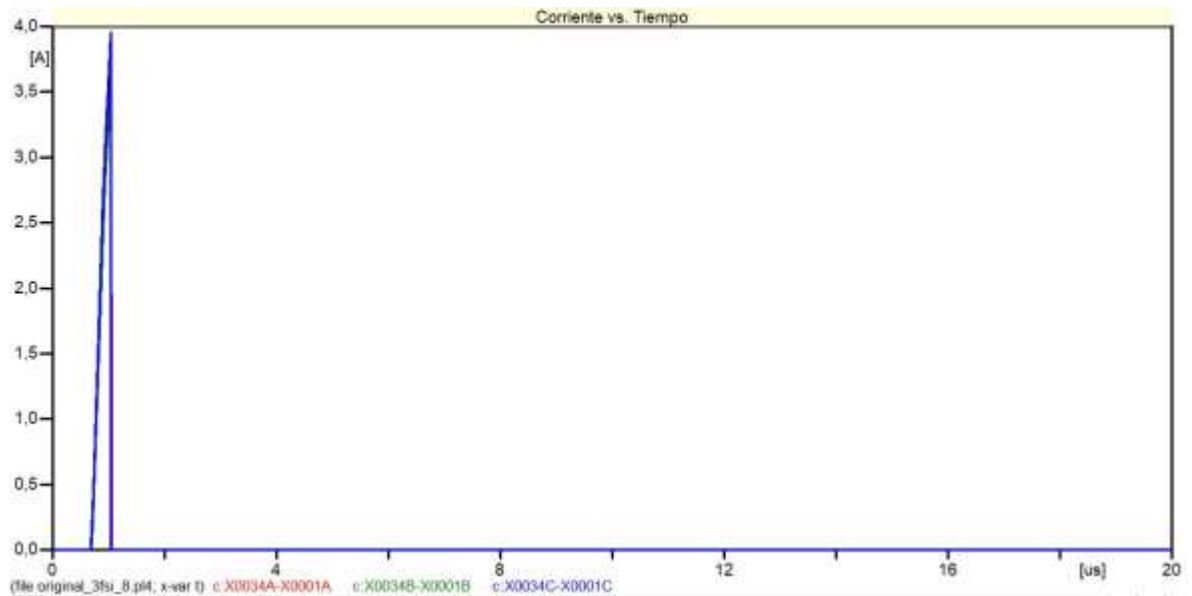


Figura 45. Gráfica Corriente vs. Tiempo, sistema con reconector, nodo 1.



Al analizar las tensiones obtenidas en el nodo 2 (figura 46 y figura 47) se obtienen gráficas típicas de tensiones inducidas, donde también se evidencia que el reconectador lleva a cabo efectivamente su labor de aislar la zona afectada por la descarga, confirmando esto con un incremento en la tensión cuando el reconectador entra en acción, dejando que la perturbación se mantenga en el sistema hasta que se despeje.

Figura 46. Gráfica Tensión vs. Tiempo, sistema sin reconectador, nodo 2.

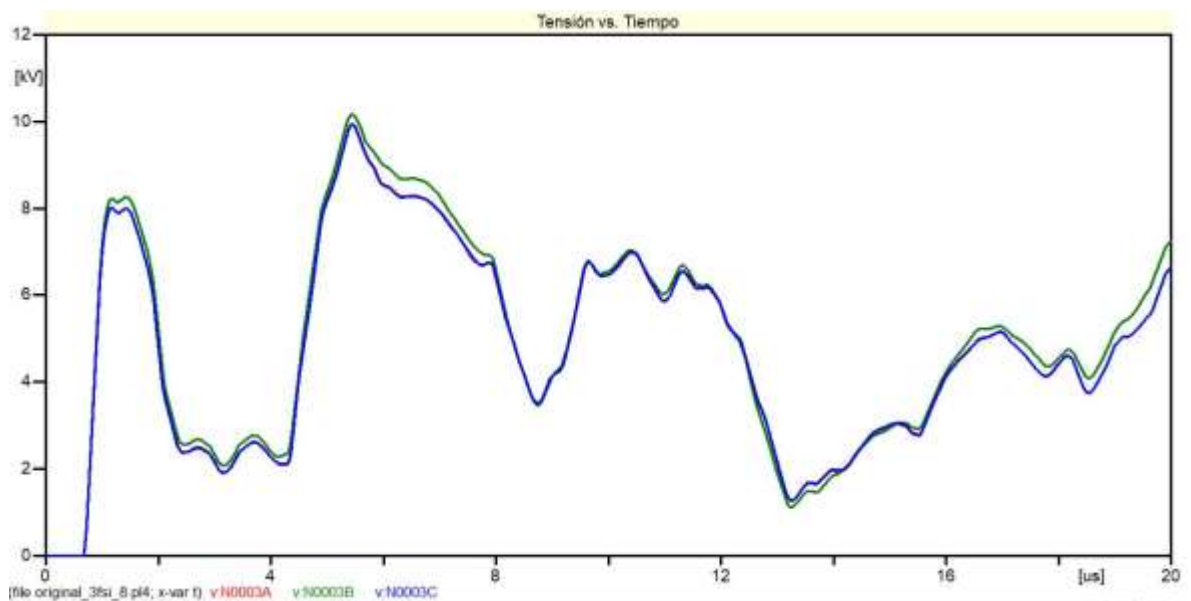
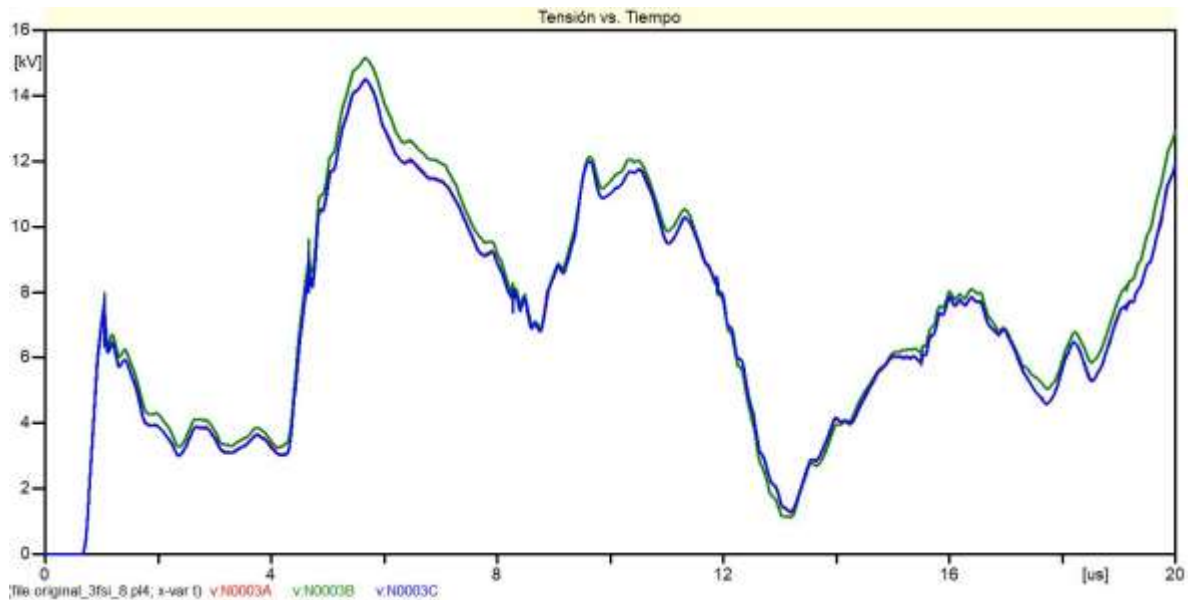


Figura 47. Gráfica Tensión vs. Tiempo, sistema con reconectador, nodo 2.



Para las corrientes obtenidas en el nodo 2 (*figura 48 y figura 49*), se visualiza cierta similitud hasta el momento de apertura del reconectador, en este punto, se presenta una leve perturbación efecto de la apertura de las cuchillas del recloser. Así mismo, cuando el sistema posee reconectador los picos de corriente tienden a ser de menor valor que los obtenidos para un sistema sin protección.

Figura 48. Gráfica Corriente vs. Tiempo, sistema sin reconector, nodo 2.

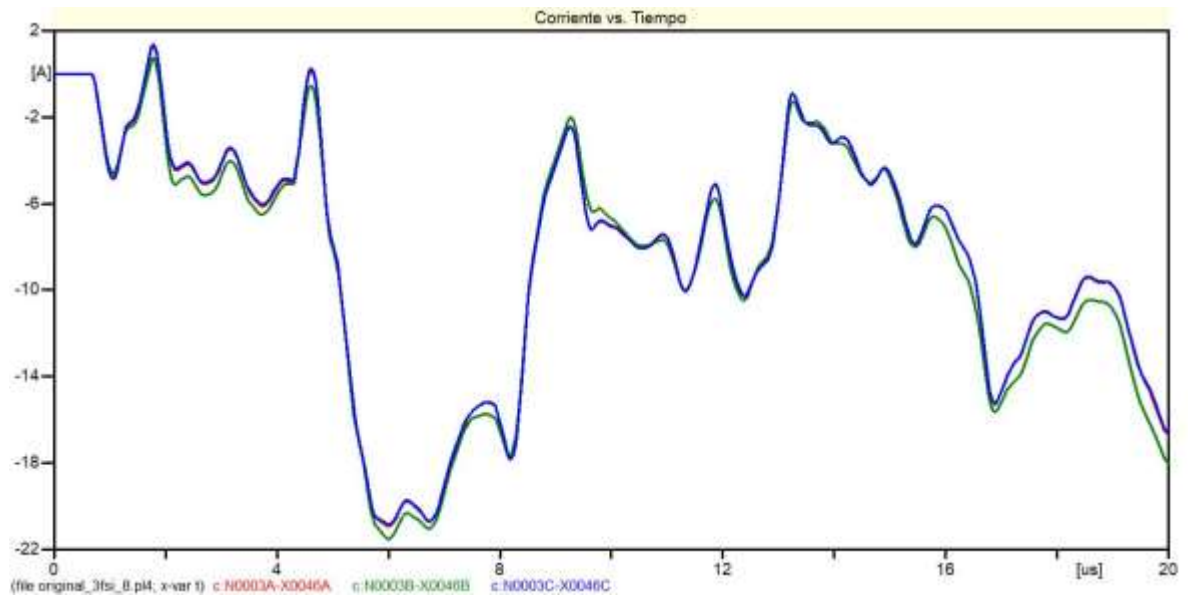
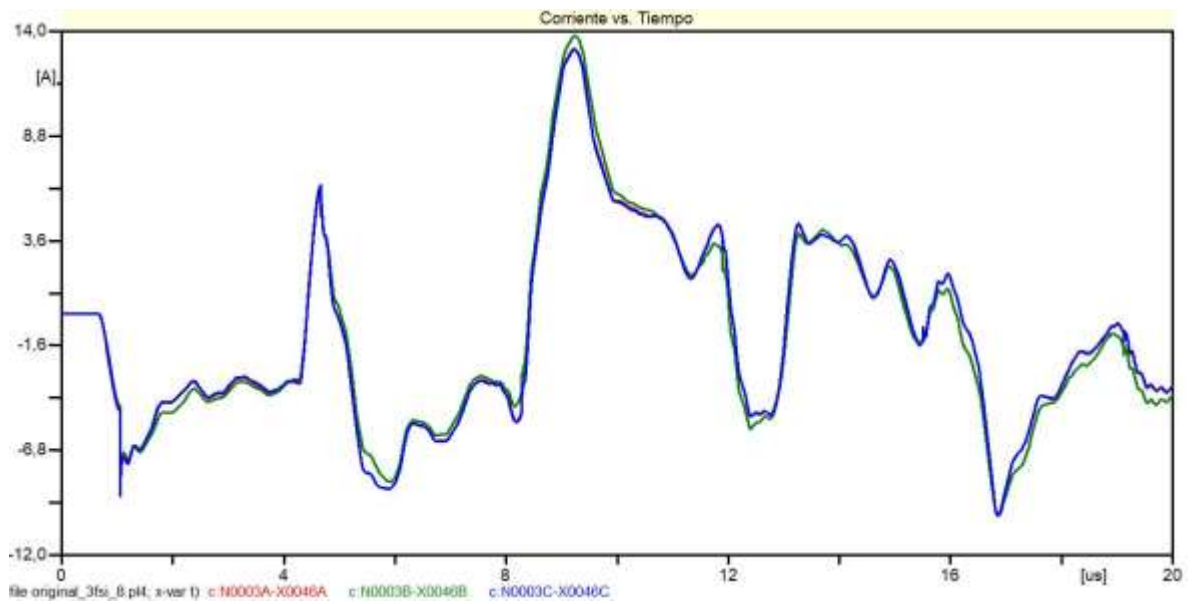


Figura 49. Gráfica Corriente vs. Tiempo, sistema con reconector, nodo 2.



3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Una vez se ha realizado el análisis del impacto de una descarga atmosférica en ambos sistemas, se busca estimar la tasa de fallas provocadas por estas descargas en un sistema protegido por reconectador, por ello, siguiendo el estándar IEEE 1410-Anexo B¹⁸, serán usados los scripts de Matlab “*correr_estadístico.m*”, “*Calculo_flameos.m*” y la aplicación Leer_Datos proporcionados por E. Soto¹⁹.

El archivo “*correr_estadístico.m*” se encargará de hacer un enlace entre ATPDraw, YalukDraw y Matlab, de modo que, ingresando el número de líneas (numlin), la cantidad de casos a simular (maxcase) y el nombre del archivo configurado en ATP (case_name), se obtendrán la cantidad de archivos .LIS donde se encuentra disponible la información de tensiones y corrientes resultantes de los impactos de rayos cuyo número dependerá de la cantidad de casos simulados. Para realizar este análisis, se usa el sistema de diez tramos configurado anteriormente en el archivo identificado con el nombre “original_3fsi_8” y 200 impactos de rayo, lo que arrojará 200 archivos .LIS.

Al ejecutar la aplicación Leer_Datos, esta solicita el ingreso del nombre del archivo .LIS y el número de registros generados por “*correr_estadístico.m*”, arrojando dos archivos “Estadística_Tmax” y “Estadística_Vmax” que recopilan tiempo y tensión respectivamente de todos los registros. En este caso se ingresa el nombre de archivo “original_3fsi_8” y 200 como número de archivos, obteniendo como resultado los archivos “Estadística_Tmax_original_3fsi_8” y “Estadística_Vmax_original_3fsi_8”.

Finalmente, en “*Calculo_flameos.m*” se trabaja con la ecuación:

¹⁸ Ibíd.

¹⁹ SOTO. E. Coautor. Grupo de investigación GISEL, Universidad Industrial De Santander, Colombia.

Ecuación 3. Ecuación para obtención de fallas. Fuente: Ieee Std (Ieee 1410)

$$Fallas (i) = 200 * \left(\frac{nsup}{nind}\right) * Ng * \frac{Ymax}{1000}$$

Donde:

nsup: número de simulaciones que superaron el nivel de CFO

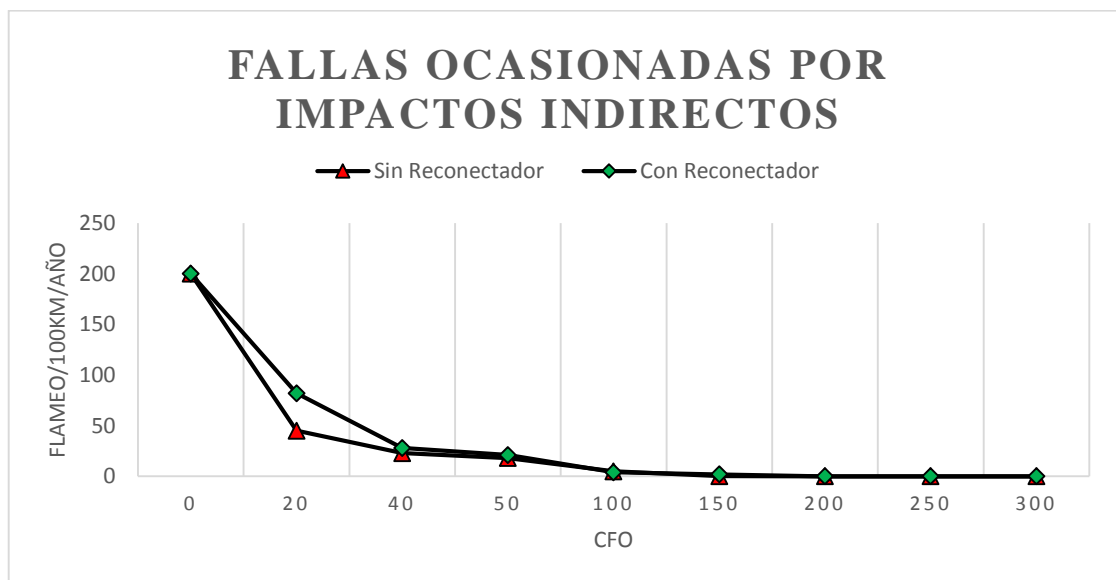
nind: número total de simulaciones

Ng: densidad de Fallas a tierra

Ymax: distancia máxima desde la línea.

Ingresando las coordenadas del sistema creado en YalukDraw, así como el valor constante ($Ng=1$), el nivel máximo y mínimo de CFO con el que se quiere hacer el estudio, y el nombre del archivo "Estadística_Vmax", consecutivamente arrojará una gráfica de CFO vs. Flashovers/100km/año con la información obtenida. Ingresando el nombre de archivo "Estadística_Vmax_original_3fsi_8" se obtienen los datos que permiten la construcción de la figura 50.

Figura 50. Índice de fallas (Flashovers/100km/año vs. CFO).



Para analizar la anterior imagen, se procede a descartar los CFO de mayor valor (>200) dado que no corresponden a un valor típico establecido para una línea del nivel de tensión seleccionado. De acuerdo con esto, se observa que el efecto del reconectador sobre la tasa de fallas de la línea resulta ser ambiguo tras su instalación, el rendimiento positivo esperado solo es posible conseguirlo mientras se instale acompañado de más elementos de protección. Se recomienda entonces el uso de reconectores en zonas aisladas o de difícil acceso donde representará un mayor beneficio respecto a una zona urbana tradicional donde su utilidad y beneficios no serán tan notorios.

4. EVALUACIÓN

- Se presenta un modelo de reconectador en lenguaje MODELS totalmente funcional, listo para añadirse a la librería de ATPDraw y con posibilidad de incorporarse a la librería de programas externos como en este caso lo fue YalukDraw.
- Se llevó a cabo el modelado de una línea de distribución en ATP, convirtiéndose en el escenario principal para el desarrollo de simulaciones donde, a través de la variación de puntos de impacto de rayos se realiza la obtención de tasas de fallas. Así mismo se realizó la comparación individual de las fallas obtenidas, tanto para descargas directas como indirectas.
- El análisis puntual de las fallas encontradas para descargas directas permite inferir no solo la eficacia de la instalación de este sistema de reconexión automática, sino que evidencia que el punto óptimo donde debe realizarse esta instalación para obtener los mejores resultados es aguas abajo de los alimentadores.
- La eficacia de cualquier reconectador instalado como sistema de protección en la cabecera de circuitos ramales y principales es mayor, debido a la posibilidad de aislar la parte del sistema afectada por la descarga atmosférica.
- En el estudio anteriormente desarrollado, en todo momento se plantearon situaciones para poner a prueba la eficacia del reconectador en distintos entornos y bajo diferentes tipos de evento atmosférico, dejando como resultado que la incorporación de un reconectador si puede presentar un efecto positivo

en la reducción de la tasa de fallas provocadas por rayos en líneas de distribución, condicionado a la incorporación de otros elementos de protección.

5. RECOMENDACIONES

- En el momento del modelado de los sistemas de trabajo es ideal utilizar una configuración uniforme, de modo que los conductores seleccionados no representen una alteración en los resultados a analizar. En este estudio se observó que la línea de distribución se modeló con conductores de diferente calibre para cada tramo, lo que posiblemente genera una interferencia en la variable a observar.
- El uso de otros sistemas de protección combinados con el uso del reconector sería otro escenario interesante por evaluar en futuras investigaciones.
- La implementación de otros métodos estadísticos para corroborar los resultados aquí obtenidos sentaría una base más amplia y sólida para futuras investigaciones, dado que hasta el momento no existe abundante material de consulta pertinente al tema.
- Con base en la información plasmada en esta evaluación, sería interesante observar el comportamiento de índices estadísticos como SAIDI y SAIFI ante la instalación de otros elementos de protección para la línea a parte del reconector.
- Se recomienda fuertemente el desarrollo de un estudio con enfoque económico que permita observar más específicamente la relación costo-beneficio de la instalación de reconectores en líneas de distribución.

BIBLIOGRAFÍA

DUNCAN GLOVER J., MULUKUTLA S. SARMA, y OVERBYE Thomas J., Sistemas de Potencia Análisis y Diseño, 3ra edición, PWS Publishers, 1994.

ESCAMILLA J., CANDIA F., ALBINO I., CASTILLO M.. Modelado de Líneas Monofásicas Aplicando el Método de Bergeron, Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, Blvd. Valsequillo y Av. Sn. Claudio, Col. San Manuel, Puebla, México.

ESCAMILLA J., CANDIA F., ALBINO I., LÓPEZ M.. Modelado De Líneas Monofásicas Aplicando El Método De Bergeron, Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

JIGUPARMAR, "Electrical Engineering Portal", February 2013, [online] Available Julio 2018: <http://electrical-engineering-portal.com/types-and-applications-of-overcurrent-relay-1>.

MCFADYEN S., "Electromechanical Relays", April 2012, [online] Available: <https://myelectrical.com/notes/entryid/159/electromechanical-relays#myID1310033>

PEREZ E., SOTO E., Yaluk Draw: Software especializado para análisis del desempeño de líneas de distribución ante impacto de rayos, Colombia, 2013.

POWER, I., & SOCIETY, IEEE Std 1410 - 2010. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines. vol. 2010. 2011.

SOTO E., PÉREZ E., DEL RÍO D., Calculation of indirect-lightning flashover rate on distribution lines from indirect lightning in tropical zones, Revista UIS Ingenierías, Colombia, 2018.

VASQUEZ K., Cálculo De Sobrevoltajes Originados Por Descargas Atmosféricas En Líneas De Transmisión Utilizando El Atp (Alternative Transients Program) Aplicado A La Línea De Transmisión Santa Rosa - Pomasqu1 a 230 Kv, Escuela de Ingeniería, Quito, 2003.