



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACION

Tesis monográfica para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Título

**"Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de
Media Tensión Radial "**

Autores:

Br. Douglas Francisco Ayerdis Galán. carnet 2015-0920U

Br. Hansel Ignacio Morales Reyes. carnet 2011-37757

Tutor:

Msc. Ing. Alejandro Hernández Solís.

Managua, Nicaragua, enero de 2022



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Resumen

La presente tesis: "**Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial**", se basó en un proceso investigativo aplicado, donde estudiaron las generalidades y premisas a cumplirse para realizar un estudio de coordinación de protecciones en un sistema de distribución radial de media tensión, que permitiera que no ocurran desconexiones de cargas que perturben la calidad del servicio para los usuarios finales.

En este estudio se modeló una red de distribución radial de forma integrada, considerando sus datos de línea y carga para realizar un estudio de protecciones por sobrecorriente en sus derivaciones, garantizando un margen de protección entre fusibles de la red, su discriminación selectiva y tiempo rápido de respuesta del dispositivo desconector de la falla.

Consideramos que los resultados de esta investigación aportan un valor agregado de cómo debe realizarse técnicamente un estudio de coordinación de protecciones en un circuito de distribución radial de media tensión.

De manera específica tanto los cálculos a detalle y método de simulación en el programa Digsilent están contenidos en este informe a disposición de las personas vinculadas al tema.



Índice de contenido

Dedicatoria	1
Introducción	2
Antecedentes	6
Justificación	10
Objetivos	13
Marco Teórico	14
Hipótesis y variables	24
Metodología de desarrollo de la investigación	25
Capítulo 1.- Modelo de la Red de Media Tensión	26
1.1. Tipo de Red Eléctrica de Media Tensión.....	27
1.2. Características Generales de la Red.....	27
1.3. Estructura de la Red de Media Tensión.	27
1.4. Generalidades de la protección del sistema de distribución primario radial de Nicaragua.	28
1.5. Selección de Fusibles para protección de un sistema de distribución primario radial.....	32
1.6. Coordinación entre dispositivos de protección en un sistema de distribución primario radial.	32
Capítulo 2.- Curvas de tiempo-corriente de los fusibles utilizados en la red de distribución radial.	34
2.1. Características de Fusibles para la red distribución primaria radial.....	35
Capítulo 3.- Corrientes de cortocircuito en Redes de Distribución.	43
3.1 Corriente de cortocircuito.	44
3.2 Tipos de fallas de cortocircuito.	44
3.3 Métodos de Cálculo de las corrientes de cortocircuito.	46
Capítulo 4.- Coordinación entre fusibles en una red de distribución radial, utilizando la curva de tiempo corriente.	54



4.1	Principios de Coordinación.....	55
4.2	Selección del fusible según el elemento a proteger.	58
4.3	Métodos de coordinación de fusibles.	58
4.4	Ejemplo de aplicación de coordinación de fusibles.	59
Capítulo 5.- Estudio de Coordinación de protecciones aplicado a un circuito de distribución radial, utilizando el programa Digsilent V15.1.....		65
5.1	Circuito radial aplicado para la Coordinación integral de protecciones. .	66
5.2	Condiciones de operación de la red radial y premisas del estudio de Coordinación integral de protecciones.	67
5.3	Modelamiento de la red radial IEEE, 13 nodos en el programa Digsilent V15.	72
5.4	Resultados de la simulación de flujo de carga.	74
5.5	Resultados de las simulaciones de cortocircuito en los diferentes nodos de las derivaciones.....	78
5.6	Análisis y verificación de la coordinación integral de fusibles.....	88
Capítulo 6.- Resultados obtenidos de la investigación, coordinación integral de circuitos de distribución radial de media tensión.		110
6.1	Resultados de la investigación.	111
Conclusiones y Recomendaciones.....		113
Conclusiones.....		113
Recomendaciones.....		115
Bibliografía.....		116
ANEXO I		118
Simulación de flujo de potencia -Digsilent.....		118
ANEXO II.....		114
Simulación de Cortocir.en nodo 11 y coord.de Fusibles F711 con F57-Digsilent		114
ANEXO III		117
Simulación de Cortocir.en nodo 9 y coord.de Fusibles F78 con F89-Digsilent		117



ANEXO IV	120
Simulación de Cortocir.en nodo 8 y coord.de Fusibles F78 con F57- Digsilent	120
ANEXO V	123
Simulación de Cortocir.en nodo 10 y coord.de Fusibles F78 con F810- Digsilent	123
ANEXO VI	126
Simulación de Cortocir.en nodo 12 y coord.de Fusibles F711 con F1112- Digsilent	126
ANEXO VII	129
Simulación de Cortocir.en nodo 13 y coord.de Fusibles F713 con F57- Digsilent	129



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Dedicatoria

Primeramente, a Dios sobre todas las cosas, a nuestros padres que nos inculcaron el deseo de superación, amor propio y que infinitamente e incondicionalmente nos han brindado su apoyo, cariño y sustento para llegar hasta este punto en la vida que para nosotros es tan importante, a pesar del camino difícil y arduo que nos ha puesto la vida, les agradecemos por ser las personas que nos han guiado a construir y forjar lo que somos hoy en día.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Introducción

Los sistemas de distribución son parte fundamental del sistema de potencia, por lo cual es importante analizar las características de las protecciones dentro de los sistemas eléctricos, para poder garantizar la continuidad del suministro aun con la ocurrencia de fallas simples que llegaran a aumentar y extenderse sin poder controlarlas, por tal razón los sistemas de protección tienen como función primordial proteger todas aquellas instalaciones eléctricas, equipos e individuos sin que las consecuencias afecten el correcto funcionamiento de las redes eléctricas (Juárez, 1995).

Se debe garantizar un estudio minucioso para la coordinación de protecciones lo cual garantice que no ocurran desconexiones de cargas que perturben la calidad del servicio para los usuarios finales ya sean residenciales, comerciales o industriales. La selección de protecciones cumple un papel importante dentro de un control integral, el cual definirá el sistema como el más eficiente posible.

Se define como estudio de protección integral de un circuito de distribución radial, aquel que toma en consideración todos y cada uno de los equipos y elementos que conforman el circuito, es decir que las protecciones no sean diseñadas en función de los equipos de forma individual, sino en función del sistema eléctrico en su conjunto (de manera integral).

El objetivo final, es el funcionamiento del sistema eléctrico de distribución como un solo conjunto de componentes; es decir, no se trata de que la protección tenga la máxima sensibilidad y la mayor velocidad para detectar y eliminar las condiciones que afectan a los equipos, ya que muchas veces esta actuación de la protección puede comprometer aún más la situación del sistema eléctrico y la salida anticipada de una parte del sistema termine afectando su capacidad para atender la demanda, por tanto se requiere que las protecciones no sean diseñadas en función de los equipos en forma individual, sino en función del sistema eléctrico en su conjunto.



DEFINICIONES

1. **Red de Distribución en Media Tensión**¹: Se define como red de distribución en Media Tensión (MT) la red de tensión nominal superior a 1 kV e inferior a 36 KV.
2. **Arquitectura de Red:** ²La arquitectura de red una red eléctrica está vinculada con su topología e integra todos e los componentes físicos de una red y de su organización funcional y configuración, sus procedimientos y principios operacionales.

Como premisa fundamental, se considera que el estudio de coordinación de protecciones integrales de una red distribución radial en media tensión, mejora la continuidad y calidad del suministro de energía eléctrica a los usuarios, lo cual garantizará que no ocurran salidas de carga anticipadas por disparos no deseados de las protecciones, lo cual afectaría lo continuidad y la calidad del suministro de la energía eléctrica a los usuarios finales.

Para Nicaragua la metodología implementada por la empresa Distribuidora de electricidad DISNORTE/DISSUR, para realizar el estudio de coordinación de protecciones de una red de distribución radial, no toma mucho énfasis ya que el elemento de mayor interés por protección se encuentra situado antes de la barra de media tensión y lo constituye el transformador reductor de alta a media tensión, en el caso de la línea las protecciones están ajustadas en la salida del circuito de distribución en la subestación eléctrica, pero en el caso de los transformadores de



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

distribución situados a lo largo del circuito de distribución sólo se protegen mediante un fusible ajustado a la capacidad de potencia del transformador, seleccionado mediante una tabla de ajuste del fusible y no se realiza ninguna coordinación entre el resto de fusibles tanto de las derivaciones de la red, resto de transformadores o protecciones de cargas a grandes consumidores. De tal manera que no se integra el resto de los elementos de la red de distribución dentro del estudio de protecciones, realizado de forma integrada y tampoco se conoce el margen de protección entre el resto de los fusibles de la red, lo cual permitiría salida de líneas, derivaciones, carga o transformadores de forma intempestiva.

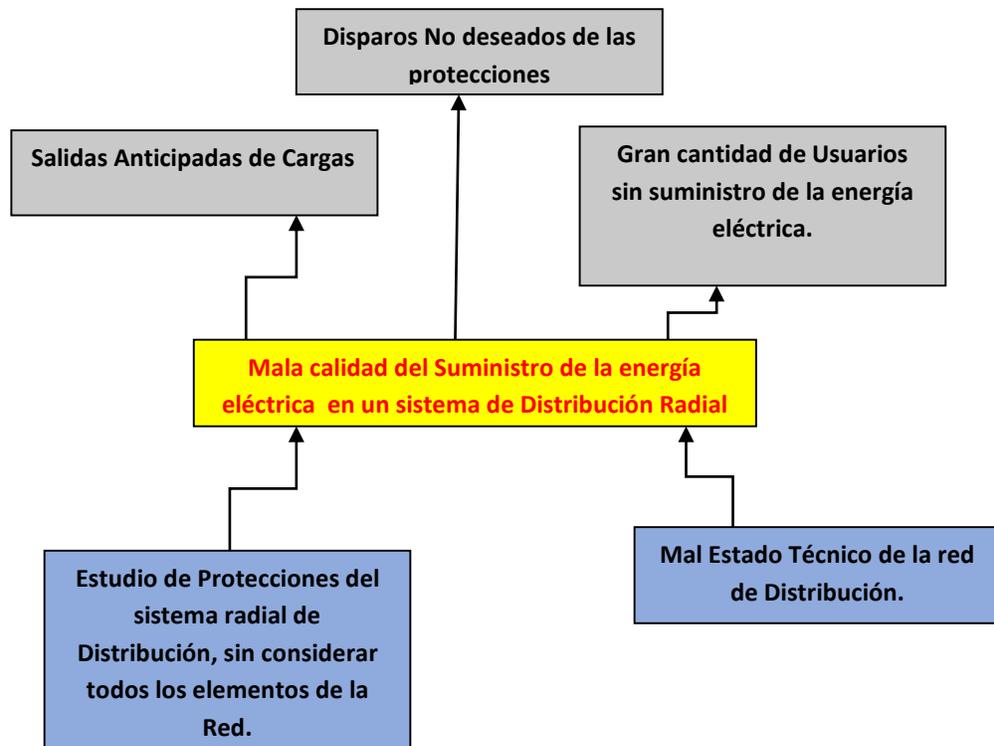
A continuación, presentamos de forma sencilla y clara la identificación del problema resolver con este tema de estudio, mediante un diagrama de causa-efecto:³

³ Fuente Propia



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 1 Diagrama de Causa Efecto



Fuente: Propia.



Antecedentes

Un sistema eléctrico de potencia incluye las etapas de generación, transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica, y su función primordial es la de llevar esta energía desde los centros de generación hasta los centros de consumo y por último entregarla al usuario en forma segura y con los niveles de calidad exigidos (Turrubiates, 2020).

Como ya mencionamos en la introducción la empresa distribuidora de electricidad DISNORTE/DISSUR, se basa en una tabla de selección de fusibles para proteger los transformadores de distribución o las derivaciones de línea, cargas, etc, sin integrar en un estudio de coordinación de protecciones el resto de elementos de la red de distribución, a continuación nos referimos a este problema en particular mediante lo establecido en la norma del Proyecto tipo DISNORTE/DISSUR y su tabla de selección de fusibles (DISNORTE-DISSUR, 2000).

“La siguiente tabla para la selección de fusibles aplica para protección de transformadores de distribución monofásicos con potencia menor a 100 kVA .”

Tabla 1 De selección de fusibles tipo k, para transformadores de distribución

FUSIBLES DE EXPULSIÓN TIPO K PARA LA PROTECCIÓN DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS Y TRIFÁSICOS.			
TRANSFORMADOR MONOFÁSICO 7620 V		TRANSFORMADOR TRIFÁSICO 13200 V	
KVA	Capacidad (A) Fusible K	KVA	Tipo de conexión D - yg
			Capacidad (A) Fusible K
3	0.5	15	1.0
5	1.0	30	2.0
10	2.0	45	3.0
15	3.0	75	5.0
25	5.0	112.5	7.0
37.5	7.0	150	10.0
50	10.0		
75	15.0		
100	20.0		

Fuente: Manual del proyecto Tipo.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Queda evidenciado que cuando se selecciona de forma particular y no integrada la protección mediante un fusible, ya sea para un transformador de distribución en media tensión, una derivación, una carga, etc, el sistema es vulnerable desde el punto de vista de calidad del suministro de la energía eléctrica, lo cual se refleja mediante salidas intempestivas de: transformadores, derivaciones, cargas, etc.

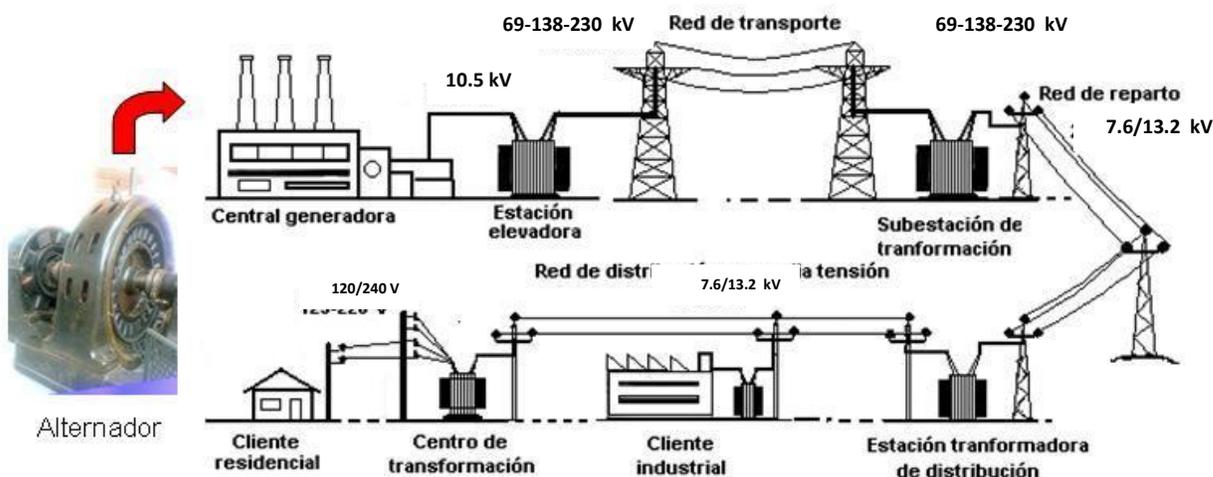
Y como ya sabemos actualmente nuestra normativa de calidad del servicio eléctrico a través de sus indicadores técnicos de frecuencia media de interrupción por capacidad instalada (FMIk) ⁴y tiempo total de interrupción por capacidad instalada (TTik), los cuales son indicadores globales, es decir no registran o contabilizan las interrupciones particulares tanto en transformadores, derivaciones, etc, que afectan a los usuarios finales del suministro de la energía eléctrica y que en el caso particular de redes de distribución en median tensión rurales tienen mayor relevancia, ya que los usuarios muchas veces no reportan la falta de suministro de la energía eléctrica y en el caso de la reparación de la avería, las cuadrillas operativas tardan más tiempo en restablecerla, debido a la distancia a recorrer hasta el punto de localización de la falla. En este caso podríamos estarnos refiriéndonos no sólo a una falla por contingencia de un elemento de la red, sino también a una salida intempestiva de algún elemento por falta de un estudio de coordinación integral de la red de distribución radial.

⁴ Artículo NCS 1.1.4 Normativa de Calidad del Servicio Eléctrico INE



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 2: Cadena de Abastecimiento⁵



Fuente: Libro de Sistemas de Distribución. Samuel Ramírez.

Como marco referencial se hace mención, que existe un estudio previo sobre protecciones a redes de distribución en media tensión, que está orientado hacia la automatización de dichas protecciones, titulado: **“Automatización en el sistema de protección de las líneas de distribución eléctricas de Nicaragua mediante la aplicación de Interruptores Telecontrolados”**, realizado por los diplomantes:

Br. Edwin Antonio Moreno Pérez

Br. Freddy Antonio González López

Elaborado en el año 2014, y está basado en la implementación de Interruptores Tele controlados (ITC) como medio de automatización en el sistema de protección de las líneas de distribución eléctrica en Nicaragua. Cuyo objetivo principal era la disminución del impacto eléctrico que producen los tipos de fallas más comunes en las líneas de distribución eléctrica del país, a fin de garantizar mayor confiabilidad, para los usuarios y estabilidad para el sector energético principalmente en la línea de distribución eléctrica.

⁵OPEX energy, recuperado de :http://opex-energy.com/en/ciclos/sistemas_electricos_CTCC.html



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

En este caso de estudio se consideran integralmente todos los equipos y cargas conectadas a la red de distribución radial en media tensión, a fin de contribuir efectiva y selectivamente, a la coordinación de protecciones.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Justificación

Para cualquier sistema eléctrico su finalidad debe ser actuar de forma conjunta dentro de sus componentes que lo integran, en nuestro caso particular una red de distribución radial tiene mayor vulnerabilidad a dejar gran cantidad de usuarios del servicio eléctrico, sin energía cuando a pesar de contar con un sistema de protección ante fallas eléctricas, que contemple su selectividad y sensibilidad, en dicho estudio no se halla considerado el sistema de distribución en su conjunto con todos sus elementos que lo conforman, lo que ocasionaría salidas de carga anticipadas por disparos no deseados de las protecciones, afectando la continuidad y la calidad del suministro de la energía eléctrica a los usuarios finales.

La importancia de esta investigación es que se realiza un estudio de coordinación de protecciones en un circuito de distribución eléctricos de media tensión radial, tomando en consideración todos y cada uno de los equipos y elementos que conforman el circuito, es decir que las protecciones no sean diseñadas en función de los equipos de forma individual, sino en función del sistema eléctrico en su conjunto (de manera integral), y así evitar salidas de carga anticipadas, afectando la continuidad del suministro de la energía a los usuarios finales, así como su calidad de la energía. Consideramos que esta investigación tendrá propósitos académicos, sin restarle la posibilidad que las empresas distribuidoras de electricidad (DISNORTE-DISSUR), decidan retomar los resultados de esta investigación y aplicarlos. Cuando hablamos de fines académicos en esta propuesta de investigación a realizarse, queremos potencializar de forma práctica la aplicación de conocimientos de la asignatura Sistemas de Protección de Redes eléctricas vinculados con cálculos de redes de distribución.

De manera particular se menciona que, en el caso de los circuitos de distribución radial rurales, las afectaciones ya sea por avería o por salidas intempestivas de algún elemento de la red afecta con mayor tiempo de restablecimiento del



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

suministro de energía a los usuarios finales, también se refiere que muchas de las averías por disparo de fusibles ya sea en transformadores de distribución, derivaciones de línea, etc. no los contabiliza la empresa distribuidora de electricidad por ser indicadores particulares no contemplados en la normativa de calidad del servicio, todas estas averías por salidas intempestivas están asociadas no sólo a fallas propias de la red sino también a una falta de estudio de coordinación integral de la red de distribución radial, precisamente en esta investigación queremos aportar estos criterios a ser considerados como parte de un estudio de coordinación de protecciones que deben realizarse para una red de distribución radial, donde los estudiantes pongan en práctica sus competencias investigativas de las asignaturas de circuitos eléctrico, protección de sistemas eléctricos, etc, y aporten un criterio científico de referencia para realizar estos estudios de coordinación de protecciones en redes de distribución que vincule su aplicación práctica con un software digital como lo es el Digsilent.

Programa computacional DigSilentPower Factory:⁶ El programa computacional "DigSILENTPower factory, GmbH" "Made in Germany"., fue creado por Martin Schmiege en 1985, y se ha convertido en un producto internacional de primera clase como software de análisis de sistemas de energía DigSILENT GmbH es una empresa privada totalmente independiente ubicada en Gomaringen, cerca de Stuttgart, Alemania, donde las nuevas oficinas han estado en funcionamiento desde principios de 2002 (Digsilent GmbH, 1998).

PowerFactory es una aplicación líder de software de análisis de sistemas de energía para su uso en el análisis de sistemas de generación, transmisión, distribución y sistemas industriales. Cubre la gama completa de funcionalidades, desde características estándar hasta aplicaciones altamente sofisticadas y avanzadas que incluyen energía eólica, generación distribuida, simulación en

compañía Digsilent. <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

tiempo real y monitoreo del rendimiento para pruebas y supervisión de sistemas. Power Factory es fácil de usar, totalmente compatible con Windows y combina capacidades de modelado de sistemas confiables y flexibles con algoritmos de vanguardia y un concepto de base de datos único. Además, de su flexibilidad para crear secuencias de comandos e interfaces, PowerFactory se adapta perfectamente a soluciones altamente automatizadas e integradas.



Objetivos

Objetivo General:

- Realizar la coordinación de protección de manera integral en redes de distribución radial de media tensión, aplicada en un circuito real (el cual será seleccionado en el proceso de desarrollo de la investigación) utilizando un software de análisis de redes y sistemas de protección, para garantizar el ajuste adecuado de los dispositivos de protección.

Objetivos específicos:

- Identificar los elementos principales a proteger que se encuentran presentes en las redes radiales de distribución de energía eléctrica en el nivel de media tensión y determinar su respectiva función en el sistema.
- Realizar la coordinación de protecciones aplicando la metodología tradicional correspondiente para redes de distribución, en el circuito real seleccionado (IEEE13 nodos).
- Validar la coordinación de protecciones realizada con la metodología tradicional utilizando un software para el análisis de redes eléctricas, para observar el comportamiento del esquema de protección convencional.
- Realizar recomendaciones que permitan mejorar el funcionamiento de las protecciones en redes eléctricas de distribución radial, considerando la filosofía de protección integral, las condiciones de carga y la arquitectura de la red.

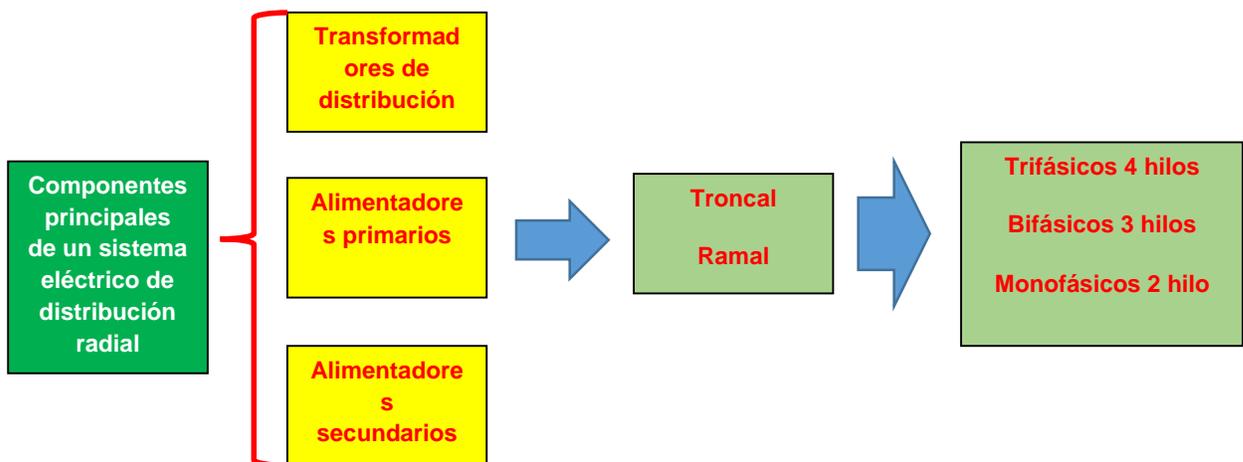


Marco Teórico

Principales componentes del sistema de distribución.

Teniendo en cuenta que la red de distribución de energía eléctrica es el medio por el cual se le suministra a los usuarios y los centros de consumo, desde la central de transformación (subestación), cabe reconocer que los principales elementos que conforman dichas redes son los que se muestran en la Figura

Figura 3: Componentes de un sistema de distribución



Fuente: Libro de Sistemas de Distribución. Samuel Ramírez.

Descripción y función de los componentes de las redes de distribución

(ENDESA, 2001)

Transformadores: Los transformadores de distribución son utilizados para reducir la tensión trifásica en redes de distribución eléctrica a tensión de consumo domiciliaria, principalmente en áreas urbanas y para aplicaciones industriales.

Alimentadores primarios: Son los encargados de llevar la energía eléctrica desde las subestaciones de potencia hasta los transformadores de distribución.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Los conductores van soportados en poste cuando se trata de instalaciones aéreas y en ductos cuando se trata de instalaciones subterráneas.

Troncal: Es el tramo de mayor capacidad del alimentador que transmite la energía eléctrica desde la subestación de potencia a los ramales.

Ramal: Es la parte del alimentador primario energizado a través de un troncal, en el cual van conectados los transformadores de distribución y servicios particulares suministrados en media tensión. Normalmente son de calibre menor al troncal.

Alimentadores secundarios: Los alimentadores secundarios distribuyen la energía desde los transformadores de distribución hasta las acometidas a los usuarios. En la mayoría de los casos estos alimentadores secundarios son circuitos radiales, salvo en los casos de las estructuras subterráneas malladas (comúnmente conocidas como redes automáticas) en las que el flujo de energía no siempre sigue la misma dirección.

Acometidas: Las acometidas son las partes que ligan al sistema de distribución de la empresa suministradora con las instalaciones del usuario. Las acometidas se pueden proporcionar a la tensión primaria (media tensión) o la tensión secundaria (baja tensión), esto depende de la magnitud de la carga que el usuario requiera ante la empresa suministradora.

Sistemas de protección en redes de distribución

Con el tiempo se han desarrollado diferentes tipos de protecciones contra sobrecorriente para las redes eléctricas de distribución, teniendo en cuenta que siempre se debe garantizar que el sistema sea estable y sus fallas sean de menor incidencia dentro del sistema, de lo contrario estaríamos siempre expuestos a



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

interrupciones en el suministro de energía y este sería un servicio ineficiente que no apoyaría el continuo avance (Mayta, 2019).

Los sistemas de protección se encuentran caracterizados por dispositivos presentes en las redes de distribución, los cuales contemplan la primordial función de aislar instantáneamente cada elemento que se encuentre sujeto a una sobrecorriente o a una condición anormal, que comprometa el funcionamiento normal de la red. A partir de ello, será importante resaltar cada uno de los siguientes componentes.

Dispositivos de protección en redes de distribución

Relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso: Los relevadores son principalmente implementados en redes de distribución de topología radial, las cuales no requieren de un esquema sofisticado, ya que estos dispositivos son no direccionales, es decir que no actúan para fallas que se presenten antes del mismo. Su tiempo de operación, es inversamente proporcional a la magnitud de corriente, es decir que, a mayor valor de corriente, el tiempo en el que actúa dicho relevador, es mucho menor, y viceversa (Mayta, 2019).

Fusibles: Los fusibles se implementan esencialmente en redes de distribución de topología radial que generalmente alimenta sus líneas desde un solo extremo. El tiempo de fusión es el presente entre el establecimiento de una sobrecorriente y el instante en que se encuentra el arco. Este tipo de elementos se encuentran estandarizados para facilitar su instalación y reemplazo.

La selección del fusible para proteger líneas aéreas debe hacerse sobre las siguientes bases:



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

1. La corriente nominal del fusible debe ser superior a la máxima carga en el punto en que esté situado.
2. El fusible debe ser capaz de interrumpir la corriente de falla máxima del punto en que estaba situado.
3. El fusible debe operar para falla mínima en el extremo de la sección protegida.
4. El fusible debe coordinar adecuadamente con los restantes dispositivos de protección del circuito de distribución.

Características de dispositivos de protección

La corriente es la variable más utilizada en la detección de anomalías en los elementos del sistema eléctrico, dado el incremento elevado que se registra en su valor cuando se presentan fallas. Se define como sobrecorriente a cualquier valor que excede el valor de la corriente normal de operación de un dispositivo. La función primordial del sistema de protección es aislar instantáneamente del resto del sistema, a cualquier elemento sujeto a una sobrecorriente o una condición anormal que pueda causar un fenómeno que altere el estado normal del sistema. Para analizar los esquemas de protección integral en redes de distribución, se deben tener en cuenta algunos principios básicos en la coordinación de protecciones. Las protecciones de sobrecorriente se diseñan para operar cuando la magnitud de corriente que fluye por el elemento protegido es mayor que la corriente de ajuste. Los valores anormales de corriente pueden ser provocados por sobrecargas en el sistema y por cortacircuitos. Estos niveles excesivos de corriente pueden provocar daño térmico o mecánico a los elementos del sistema e influenciar negativamente en la calidad del servicio eléctrico por caídas de tensión y, en ciertas condiciones, pueden afectar la estabilidad del sistema eléctrico de potencia. En un sistema de protección eficiente y coordinada, las fallas se eliminan en el menor tiempo posible, aislando la parte del sistema que contiene



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

la condición de falla. En un sistema de distribución típico todas las cargas del sistema son alimentadas por un punto de suministro. Para proteger los componentes del sistema y satisfacer los propósitos de seguridad, los dispositivos de protección deben ser instalados a lo largo del alimentador principal y ramales del alimentador (Mayta, 2019).

Las principales razones de la importancia de disponer de una correcta protección eléctrica son:⁷

- *La red eléctrica no es 100% fiable:* aunque las compañías eléctricas inviertan continuamente en la mejora de sus redes de distribución, hay factores externos (tormentas, inundaciones, accidentes,) que influyen directamente en la calidad del suministro. Incluso los propios consumidores son generadores de perturbaciones (motores, fluorescentes) que también distorsionan la calidad de la red.

- *La red eléctrica no es estable:* ya que las empresas suministradoras de electricidad no pueden proveer un nivel excelente de calidad, se ha regulado la posibilidad de que suministren tensión con unos márgenes tanto por encima como por debajo del valor teórico nominal (SALICRU, 2000).

- *Incluso los cortes momentáneos son un problema:* considerando como tales a los cortes inferiores a 2 segundos, sus consecuencias pueden ser la indisponibilidad de los entornos informáticos desde 15 minutos (reinicio rápido) a varias horas. En función de la duración del corte de suministro también podemos encontrarnos con cortes instantáneos (0,5 a 30 ciclos), temporales (2 segundos a 2 minutos) o sostenidos (superiores a 2 minutos).

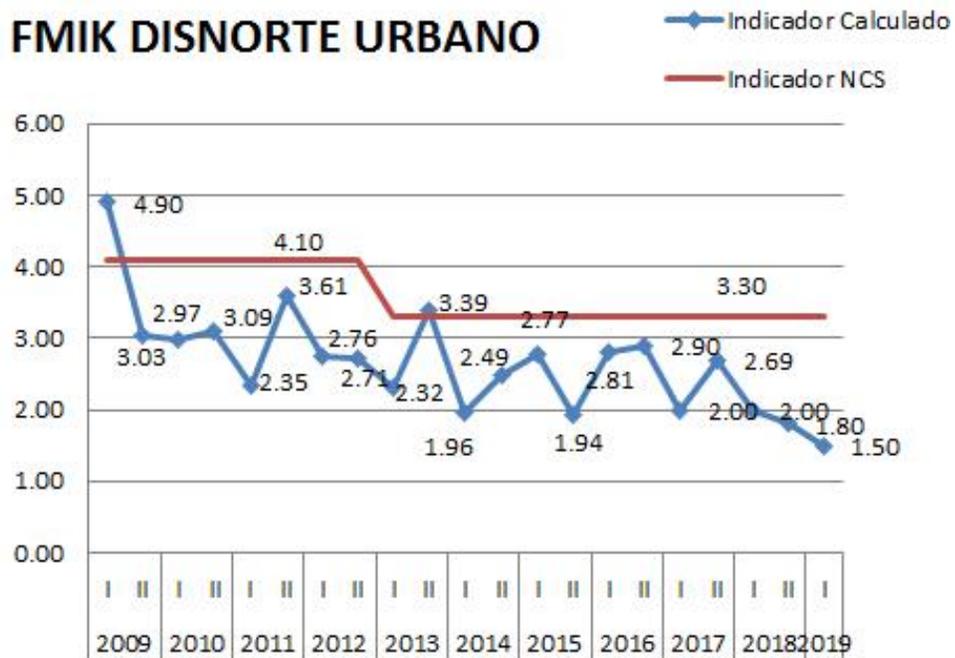
Empresa Salicru, equipamiento de Electrónica, recuperado de:<https://www.salicru.com/7-razones-de-por-que-la-proteccion-electrica-es-importante.html>



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

De acuerdo con la estadística de calidad del suministro de la energía del Instituto Nicaragüense de Energía (INE), se reflejan los siguientes indicadores tipificados como frecuencia media de interrupción (FMik) y Tiempo medio de Interrupción (TTIk) (INE, 2012).⁸

Figura 4 Evolución de la frecuencia de interrupción FMik Urbano



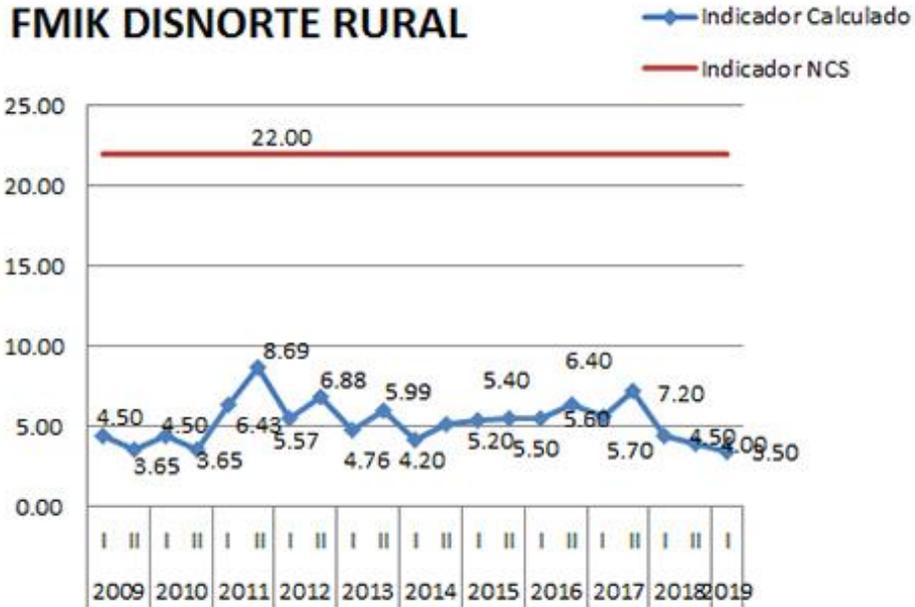
Fuente: Estadística INE, Indicadores de calidad Técnica.

⁸INE, recuperado de :<https://www.ine.gob.ni/index.php/electricidad/indicadores-de-calidad-del-suministro/>



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 5 Evolución de la frecuencia de interrupción FMIK rural



Fuente: Estadística INE, Indicadores de calidad Técnica.

Figura 6 Evolución del Tiempo de interrupción TTIK Urbano

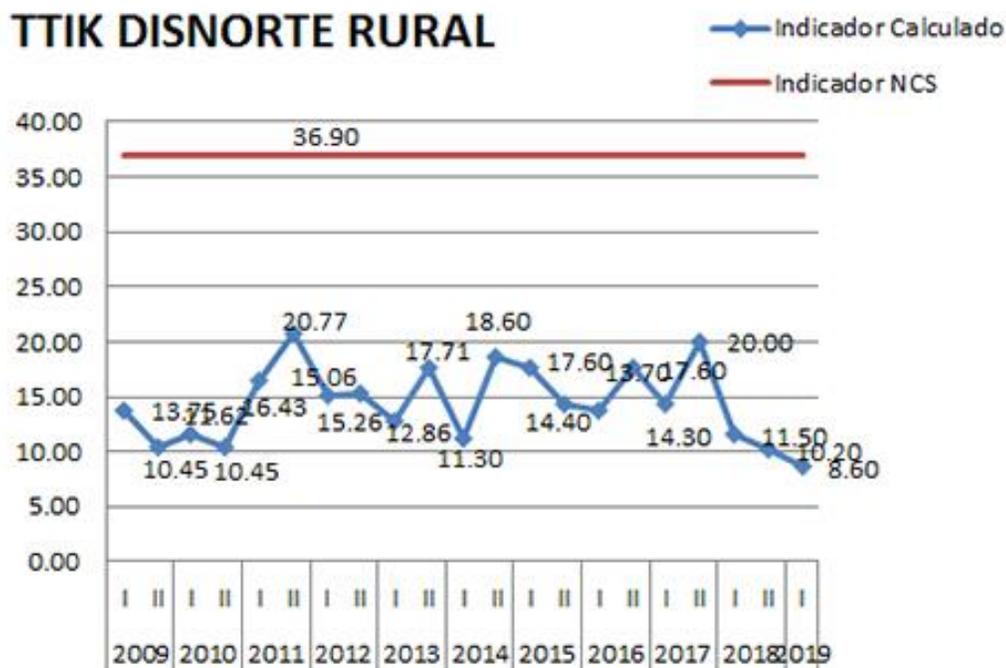


Fuente: Estadística INE, Indicadores de calidad Técnica.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 7 Evolución del tiempo de interrupción TTIk rural



Fuente: Estadística INE, Indicadores de calidad Técnica.

Como en estos gráficos aún, cuando el margen límite de los indicadores FMIk y TTIk, están por encima de los valores presentados, indican que no existe un comportamiento estable sino caótico, demostrando su incidencia en la calidad del suministro de la energía.

Los Sistemas de Protección se utilizan en los sistemas eléctricos ya sea de potencia, media tensión o baja tensión, para evitar la destrucción de equipos o instalaciones por causa de una falla que podría iniciarse de manera simple y después extenderse sin control en forma encadenada. Los sistemas de protección deben aislar la parte donde se ha producido la falla buscando perturbar lo menos posible la red, limitar el daño al equipo fallado, minimizar la posibilidad de un incendio, minimizar el peligro para las personas, minimizar el riesgo de daños de equipos eléctricos adyacentes.⁹

⁹Monografías.com, recuperado de :<https://www.monografias.com/trabajos-pdf5/dispositivos-proteccion-electrica-puesta-tierra-y-disyuntor/dispositivos-proteccion-electrica-puesta-tierra-y-disyuntor.shtml>



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

La función principal de un sistema de protección es fundamentalmente la de causar la pronta remoción del servicio cuando algún elemento del sistema sufre un *cortocircuito*, o cuando opera de manera anormal. Existe además una función secundaria la cual consiste en proveer indicación de la localización y tipo de falla.¹⁰

Los objetivos generales de un sistema de protección se resumen así:

- Proteger efectivamente a las personas y los equipos.
- Reducir la influencia de las fallas sobre las líneas y los equipos.
- Cubrir de manera ininterrumpida el *Sistema de Potencia* (SP), estableciendo vigilancia el 100% del tiempo.
- Detectar condiciones de falla monitoreando continuamente las variables del SP

Elementos de un equipo de protección: Un equipo de protección no es solamente la protección o relé, propiamente dicho, sino que incluye a todos aquellos componentes que permiten detectar, analizar y despejar la falla. Los principales elementos que componen un equipo de protección son:

- Batería de alimentación.
- Transformadores de medida para protección.
- Relé de protección.
- Interruptor automático.

Son cinco los criterios que se aplican en el diseño de la protección (ENDESA, 1995):¹¹

¹⁰Venemedia Comunicaciones C.A, recuperado de :<https://www.definicion.xyz/2018/08/proteccion-de-sistemas-electricos.html>

¹¹ PROTECCIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA A P U N T E S DE CLASES LMV N3Y MARTES N4 recuperado de :https://mafiadoc.com/queue/apuntes-proteccion-de-sistemas-electricos-de-potencia_59c406761723ddcff423f92b.html



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

1.-CONFIABILIDAD

Habilidad de la protección o conjunto de protecciones para operar correctamente cuando se requiere evitando operaciones incorrectas o indebidas.

2.-VELOCIDAD

Debe librar la falla en el tiempo mínimo requerido procurando el menor daño al equipo.

3.-SELECTIVIDAD

Lograr máxima continuidad con la mínima desconexión de circuitos.

4.-SIMPLICIDAD

Utilizar el mínimo equipo y el mínimo alambrado procurando tener un esquema no complicado.

5.-ECONOMÍA

Procurar la máxima protección al mínimo costo manteniendo la confiabilidad del equipo



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Hipótesis y variables

La realización de un estudio integral de la coordinación de las protecciones, en un circuito de distribución radial de media tensión, que considere todos y cada uno de los equipos y elementos que conforman el circuito radial, garantizará que no ocurran salidas de carga anticipadas al no existir un margen de tiempo de coordinación de las protecciones entre todos los elementos de la red de distribución, por lo tanto al coordinar integralmente todos los elementos de la red se mejorará sustancialmente la continuidad y la calidad del suministro de la energía eléctrica a los usuarios finales.

Los parámetros a evaluarse serán las fallas con cortocircuitos en diferentes nodos de la red y su impacto en el sistema integral, mediante el análisis de resultados obtenidos con el software Digsilent versión V15.1.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Metodología de desarrollo de la investigación

La base teórica para poder realizar cualquier estudio de coordinación de protecciones es conocer los principios básicos de cómo se realiza un estudio de coordinación de protecciones, en función de los elementos y equipos principales conectados a la red de distribución.

Debemos conocer la arquitectura de la red de distribución, identificar cada uno de los elementos principales de la red de distribución, como son: su calibre de conductor, longitud de la red, datos de los transformadores instalados, su capacidad en kVA, las características principales o curvas de disparo de los fusibles de protección instalados en la red.

Luego de conocer a detalle estos elementos de la red, se procede a modelar la red de distribución y sus elementos conectados y realizar el cálculo de cortocircuito en los puntos asociados a la red y establecer la correspondiente coordinación de protecciones entre sus elementos.

Como parte del estudio se toman en consideración la norma nacional de la empresa distribuidora de electricidad DISNORTE/DISSUR, las hojas de datos de fusibles referidas a su curva de disparo.

Y finalmente se realiza el estudio de coordinación de protecciones de la red propuesta, utilizando el programa computacional Digsilent V15.1

Debido a lo descrito anteriormente, la investigación que se presenta según su enfoque metodológico se adscribe a una investigación aplicada, ya que su fin es generar conocimiento práctico en la rama de la ingeniería. (Hernandez Sampieri)



Capítulo 1.- Modelo de la Red de Media Tensión.



1.1. Tipo de Red Eléctrica de Media Tensión.

En Nicaragua las redes eléctricas de distribución en media tensión, atiende dos zonas geográficas como son la urbana y la rural.

- Redes de Media Tensión urbanas.
- Redes de Media Tensión rurales.

Definiendo las mismas como:

- Zonas urbanas: Constituidas por un núcleo de población en edificación continua en su casco urbano. La densidad de carga en estos casos es varía desde 50 kwh-mes hasta 1000 kwh-mes, en el caso de clientes residenciales.
- Zonas rurales: Constituidas por pequeños núcleos de población de edificaciones dispersas. En estas zonas existen grandes distancias entre núcleos de población y la densidad de carga es baja, menor a 150 kwh-mes.

1.2. Características Generales de la Red.

Los niveles de voltaje de las redes de distribución en media tensión en Nicaragua, corresponden a 7.6/13.2 kV y 14.4/24.9 kV.¹²

1.3. Estructura de la Red de Media Tensión.

Radial

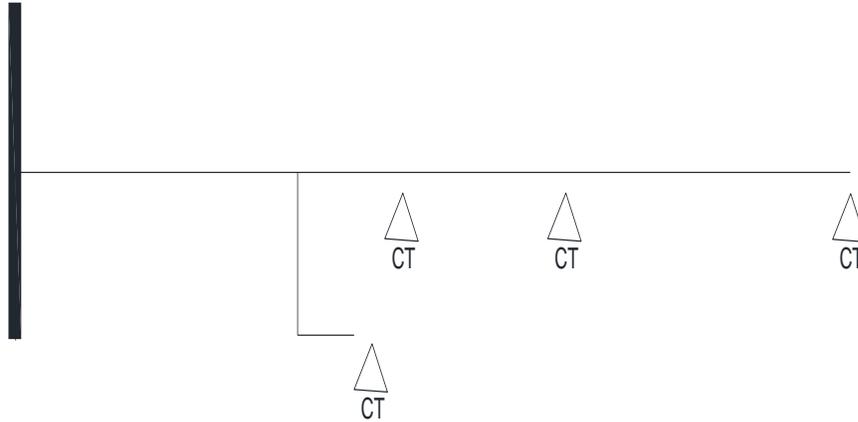
Estructura con un punto de alimentación en uno de sus extremos y abierto en el otro.

¹² <https://www.disnorte-dissur.com.ni/marco-regulatorio/manual-de-construccion-de-redes-de-distribucion.html>



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 8 Red radial



Fuente: Propia.

Su configuración es trifásica.

Desde la salida de media tensión en barra de la subestación, se conectan a lo largo del circuito los centros de transformación. La capacidad máxima de potencia en MVA de cada circuito es de 5 MVA y las longitudes máximas de la red principal(troncal) es de 10 kilómetros.

1.4. Generalidades de la protección del sistema de distribución primario radial de Nicaragua.

Cualquier sistema eléctrico se encuentra expuesto a diversas fallas, debido a esto se implementa el uso de elementos de protección. De manera particular las redes eléctricas de distribución en Nicaragua no están divididas por tipo de carga, así un circuito o su derivación, puede alimentar conjuntamente una carga residencial o una carga industrial. En el caso de las cargas industriales las cuales poseen una alta demanda de carga, estas poseen sistemas de emergencia para abastecerse en caso de avería del circuito primario. Esta es la razón por la cual a largo de todo el circuito primario se utilizan sólo fusibles de protección contra averías. La razón



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

se justifica por el costo al ser más barato la instalación de fusibles ya que el costo de dejar sin suministro de energía una carga residencial es más barato.

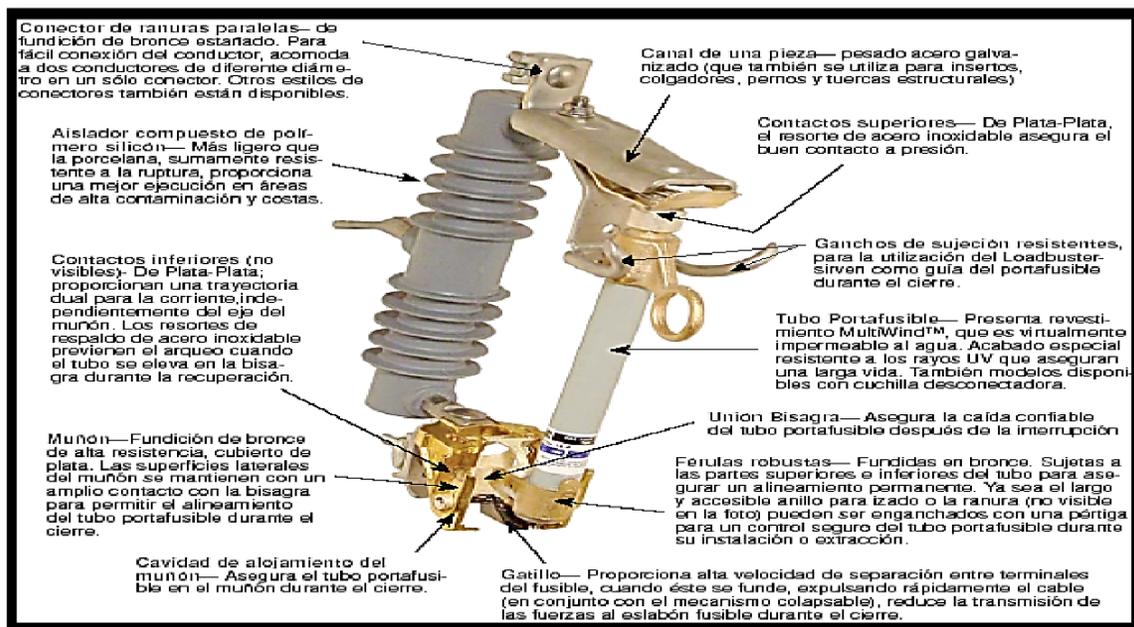
1.4.1 Fusible

Un fusible es un dispositivo empleado para proteger un circuito eléctrico mediante la fusión de uno o varios elementos destinados para este efecto, interrumpiendo el flujo de la corriente eléctrica cuando esta sobrepasa el valor de la corriente de fusión del elemento dentro de un tiempo determinado (EATON, 2002).

La parte que sirve como elemento de protección para la desconexión del cortocircuito es el elemento fusible, el cual se construye de una sección transversal determinada hecha de una aleación metálica, que tiene como función principal fundirse al paso de una magnitud de corriente superior para la que fue diseñado

La siguiente figura muestra un cortacircuito fusible, así como sus componentes.

Figura 9: Corta circuito Fusible



Fuente:

https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/7119/2/IV_FIN_109_TE_Mayta_Roque_2019.pdf



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Los fusibles MT (Media Tensión) son utilizados como elementos de protección en equipos de media tensión. La gran ventaja es la rapidez de actuación en caso de cortocircuito. En consecuencia, protegen eficazmente los equipos contra los efectos dinámicos y térmicos del cortocircuito.

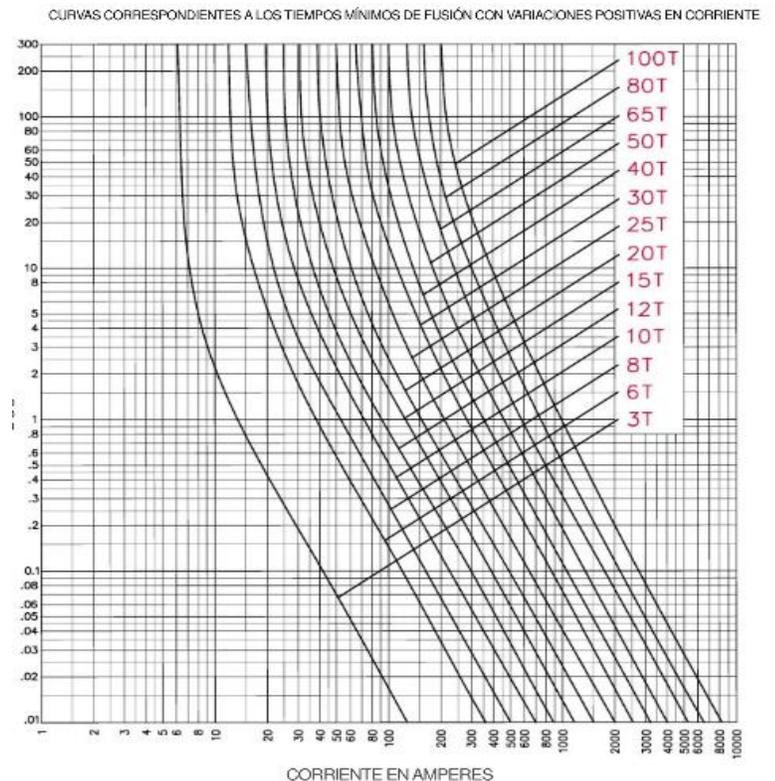
Los parámetros principales de los fusibles son:

Intensidad Nominal: Es la intensidad que un fusible puede transportar de forma continua sin alterar la curva característica tiempo corriente.

Tensión de servicio: Es la tensión empleada en el circuito con los fusibles.

Características tiempo/corriente: Curvas de fusión. Las características tiempo/corriente, curvas de fusión, muestran la relación entre el tiempo de fusión virtual T_s y la intensidad eficaz de cortocircuito I_k . Están expresados en valores medios. Estas características tiempo/corriente tienen una tolerancia de +/- 10% en dirección de la intensidad.

Figura 10 Curva de tiempo corriente del fusible



Fuente: <http://www.janelec.com/marcas/SIBA/Catalogo%20HHD%20Espanol.pdf>



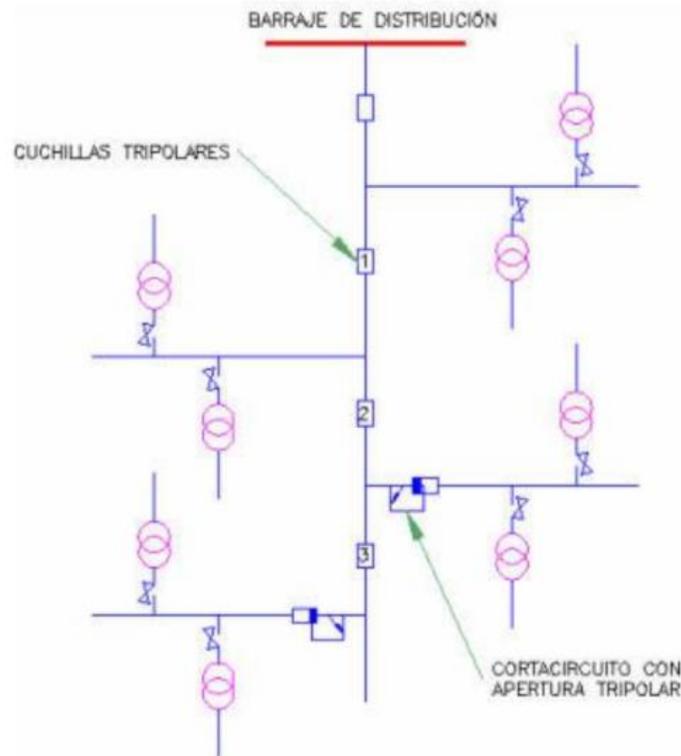
" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Tiempo/corriente, curvas de fusión, muestran la relación entre el tiempo de fusión y la corriente de cortocircuito.

La topología de tipo radial es la más empleada en la actualidad, se caracteriza porque la corriente eléctrica circula en una sola dirección (red convencional), desde la subestación hasta las cargas (aguas abajo en el sistema), razón por la cual presenta baja confiabilidad.

En la Figura 11 se muestra un sistema de distribución eléctrica radial.

Figura 11 Red Radial



Fuente: (Caldas, 2006)



1.5. Selección de Fusibles para protección de un sistema de distribución primario radial.

Según (Molina Conde, 2002), la selección del fusible para proteger líneas aéreas debe hacerse sobre las siguientes bases:

- ✓ La corriente nominal del fusible debe ser superior a la máxima carga en el punto en que esté situado.
- ✓ El fusible debe ser capaz de interrumpir la corriente de falla máxima del punto en que estaba situado.
- ✓ El fusible debe operar para falla mínima en el extremo de la sección protegida.
- ✓ El fusible debe coordinar adecuadamente con los restantes dispositivos de protección del circuito de distribución.

1.6. Coordinación entre dispositivos de protección en un sistema de distribución primario radial.

Para un correcto funcionamiento del sistema de protecciones en las líneas de distribución es necesaria la coordinación entre todos los elementos que la componen, incluyendo no solo a los dispositivos que brindan protección, sino también los equipos pasivos como: transformadores de potencia y bancos de condensadores.

Para la correcta coordinación de las características tiempo-corriente de los distintos tipos de dispositivos de protección han tenerse en cuenta los siguientes criterios básicos: (Gers & Holmes, Protection of Electricity Distribution Networks 2nd Edition, 2004).



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

1. Las fallas tienen la posibilidad de ser temporales.
2. La protección principal debe despejar una falla permanente o temporal antes de que opere la protección de respaldo, o continuar operando hasta que el circuito sea desconectado.
3. La pérdida de suministro causada por una falla permanente debería restringirse a la menor parte posible del sistema, por el menor tiempo posible.

Teniendo claro los tres puntos preliminares la coordinación entre elementos puede ser realizada mediante el uso de las curvas de tiempo corriente, asociadas a cada dispositivo.

Para lograr esta coordinación, es importante el conocimiento de la corriente máxima de falla que se puede presentar en el punto de la red que se está analizando, por lo tanto cuando se dice que dos o más equipos están coordinados significa que para corrientes de cortocircuito iguales o menores a la corriente máxima de falla, los dispositivos van a funcionar como es debido; pero para sobrecorrientes mayores no necesariamente se mantiene dicha coordinación. Para la coordinación de algunos equipos, se requiere tomar en consideración el tipo de falla que se pueda presentar.



Capítulo 2.- Curvas de tiempo- corriente de los fusibles utilizados en la red de distribución radial.



2.1. Características de Fusibles para la red distribución primaria radial.

2.1.1 Las principales características de los fusibles son:

- Sensar la condición de corriente en el circuito a proteger. Una sobrecorriente debe causar en el elemento fusible un aumento de temperatura suficiente para que este se fusione en una parte (para baja corriente), o en varias partes (para alta sobrecorriente).
- Producir la interrupción de la sobrecorriente y soportar el transiente de voltaje durante y siguiente de la interrupción (Pinos, 1992).

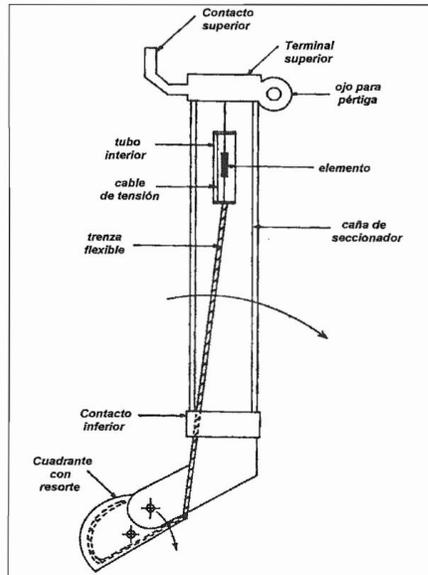
Una función secundaria y de gran importancia es que el fusible debe estar en coordinación con otros dispositivos de protección de la red de distribución. El tipo de fusible utilizado en las redes eléctricas de distribución en Nicaragua es el fusible de expulsión.

Un fusible de expulsión es un fusible ventilado en el que el efecto de expulsión de los gases producidos por el arco interno, por su cuenta o con la ayuda de otros mecanismos, provoca la interrupción de la corriente. Un fusible de expulsión no es limitador de corriente y, por consiguiente, limita la duración de una falla en el sistema eléctrico, no la magnitud.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 12: Fusible de Expulsión colocado en un corta circuito.



Fuente: <http://www.eaton.cl/conosur/ProductosSoluciones/Energia/ProductosyServicios/ProtecciondeCircuitos/FusiblesdeMediaTension/FusiblesdeExpulsion/index.htm>

2.1.2 Clasificación de fusibles para media tensión.

Históricamente debido a la diferencia en las características de tiempo – corriente, entre fabricantes y con el fin de permitir la intercambiabilidad entre fusibles, la National Electrical Manufacturers Association ,NEMA y la Edison Electrical Institute, EEI, trabajaron en conjunto para desarrollar normas conjuntas que especificaran valores nominales de corriente y características de tiempo-corriente con el fin de hacer posible la intercambiabilidad mecánica entre todos los fabricantes de fusibles (SIBA FUSES, 2000).

Los valores nominales de corriente de los fusibles se dividen en las categorías mostradas en la siguiente tabla.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Tabla 2: Valores de corriente de fusibles

Valores preferidos	Valores no preferidos	Valores bajo 6 A
6,10,15,25,40,65,100,140,200	8,12,20,30,50,80	1,2,3,5

Fuente: <https://crushtymks.com/es/energy-and-power/812-rating-definitions-applied-to-medium-voltage-fuses.html>

De acuerdo con las normas señaladas anteriormente, los fusibles de expulsión se dividen en dos tipos fundamentales:

El tipo "k" para características rápidas (relaciones de velocidad bajas) y el tipo "T" para características lentas (relaciones de velocidad altas).

2.1.3 Fusibles tipo k para media tensión.

Este tipo de fusible comúnmente utilizado en la protección de elementos y redes de distribución se rigen bajo la norma ANSI C 37.42 y ANSI C 37.47.

El fusible tipo K es de fusión rápida y deberá soportar un 150% de su intensidad nominal con un funcionamiento normal.

Se encuentran disponibles en valores de 1-200 Amperios. Son fusibles rápidos con relación de velocidad de las características de fusión desde 6 para los fusibles de 6 amperios, hasta 8 para los fusibles de 200 amperios.

Estos tipos de fusible son fabricados de acuerdo con las normas ANSI C 37-41 y C 37-42; las curvas deben contener información para 3 intervalos de tiempo para los valores máximos y mínimos de:

- ✓ 300 s para hilos fusibles de 1 a 100 Amperios nominales;
- ✓ 10 s;
- ✓ 0.1 s.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Los fusibles tipo K son de alta velocidad cuya relación de velocidad varía de 6.0 a 8.1 segundos, como se puede observar en la Tabla 3.5. Por ejemplo, un fusible tipo K de 40 A tiene en 0,1 segundos una corriente mínima de fusión de 565 A, y en 300 segundos una corriente mínima de fusión de 80 A. La relación de velocidad es:

$$\text{Relación de velocidad} = \frac{I \text{ de fusión a } 0,1 \text{ s}}{I \text{ de fusión a } 300 \text{ s}} = \frac{565 \text{ A}}{80 \text{ A}} = 7,1 \quad \text{Ec.(1)}$$

Tabla 3 Relación de Velocidad de fusibles tipo K.

Corriente nominal permanente (A)	Corriente de fusión 300 o 600 segundos		Corriente de fusión 10 segundos		Corriente de fusión 0,1 segundos		Relación de velocidad
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
Valores preferidos							
6	12	14,4	13,5	20,5	72	86	6
10	19,5	23,4	22,5	34	128	154	6,6
15	31	37,2	37	55	215	258	6,9
25	50	60	60	90	350	420	7
40	80	96	96	146	565	680	7,1
65	128	153	159	237	918	1100	7,2
100	200	240	258	388	1520	1820	7,6
140	310	372	430	650	2470	2970	8
200	480	576	760	1150	3888	4650	8,1

Fuente: <https://crushtymks.com/es/energy-and-power/812-rating-definitions-applied-to-medium-voltage-fuses.html>



2.1.4 Fusibles tipo T para media tensión.

Se encuentran disponibles en valores de 1-100 Amperios. Son fusibles lentos con relación de velocidad de las características de fusión desde 10 para los fusibles de 6 amperios, hasta 13 para los fusibles de 100 amperios.

TIPO K y T: Para la característica de operación de estos fusibles se definieron tres puntos correspondientes a los tiempos de 0,1 s, 10 s y 300 s adicionalmente se normalizó que estos fusibles serían capaces de llevar el 150% de su capacidad nominal continuamente para fusibles de estaño y del 100% para fusibles de plata.

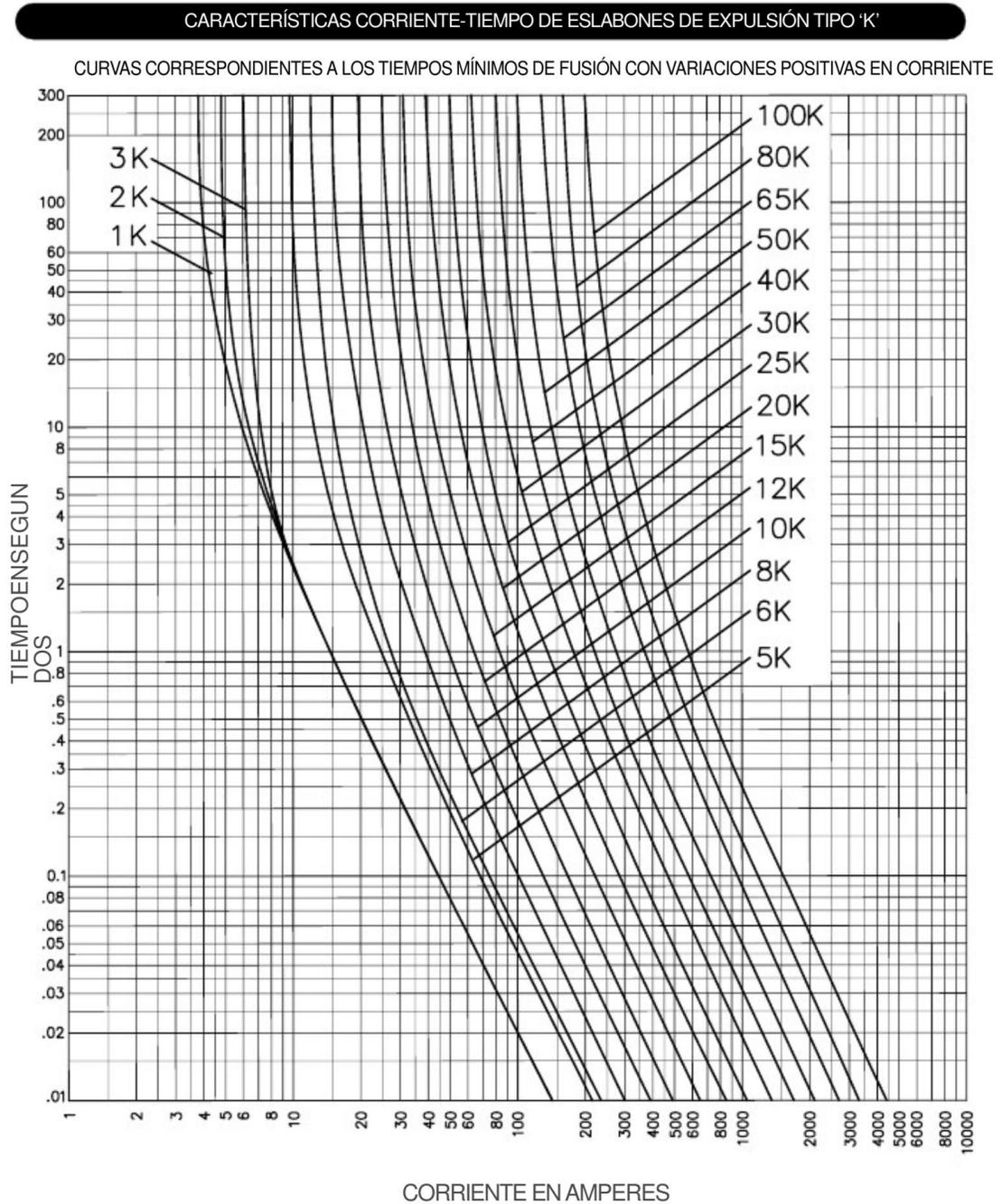
2.1.5 Curvas de tiempo corriente de fusibles tipo k y tipo T para media tensión.

Las siguientes gráficas muestran las curvas de tiempo-corriente para fusibles tipo k y tipo T de la marca Cooper.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 13: Curva de Tiempo-Corriente fusible tipo k

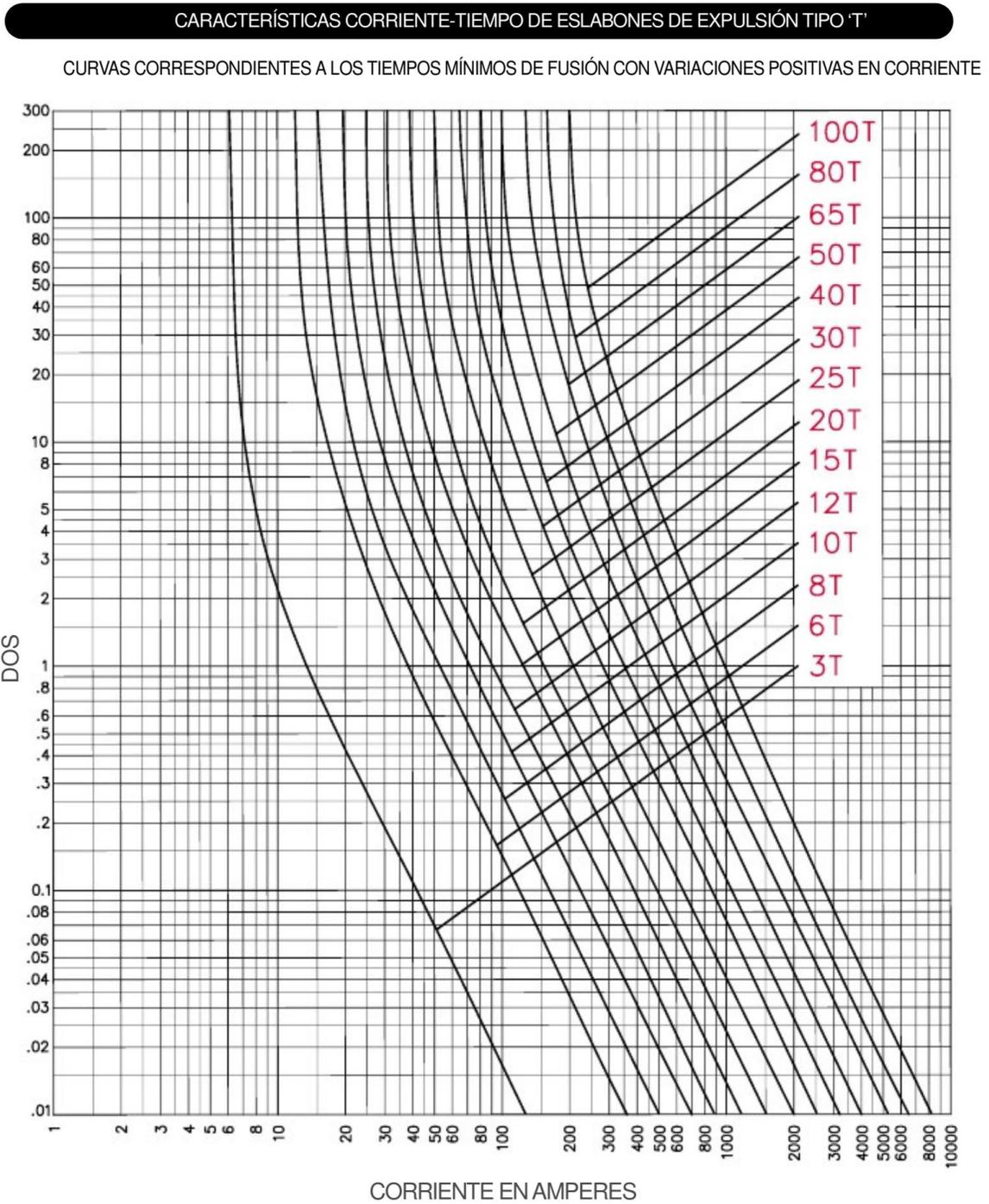


Fuente: Catálogo de Fusibles Cooper.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 14: Curva de tiempo-corriente fusible tipo T.



Fuente: Catálogo de Fusibles Cooper.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

A continuación, se inserta la tabla de corrientes de cortocircuito y tiempos de despeje para las corrientes nominales de fusibles tipo k, de la marca Cooper.

Tabla 4: Corrientes de cortocircuito y tiempos de despejes de fusibles tipo k.

Tiempo (Seg)	CORRIENTE NOMINAL (AMPERIOS)																		
	1	2	3	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	65	80	100	140	200	
600																		372	576
300	2,4	4,8	7,2	14,4	18	23,4	30	37,2	47	60	76	96	121	153	192	240	420	650	
240	2,5	4,9	7,2	15	18,5	24,4	32	39	50	62	80	102	128	160	200	255	430	680	
120	2,5	5,1	7,6	16	20	26	33	41	54	68	87	110	138	172	220	275	480	760	
60	2,6	5,4	7,8	17	22	28	36	45	58	73	95	120	150	190	240	300	520	840	
30	2,8	5,6	8,2	18,5	24	30	39	49	62	80	103	134	163	205	270	330	580	950	
10	3	6	9	20,5	27	34	44	55	71	90	115	146	188	237	307	388	650	1150	
4	3,6	7	11	24	31	40	52	64	85	102	131	168	220	280	360	460	760	1320	
1	6	12	17	34	43	58	73	96	125	156	200	240	325	410	500	720	1180	1900	
0,5	8,5	17,5	24	44	56	78	94	130	164	210	268	330	420	530	680	950	1550	2400	
0,1	22	45	58	94	127	170	215	280	360	460	560	700	910	1200	1550	2000	3080	4700	
0,08	26	53	70	108	145	195	250	320	410	530	650	800	1050	1380	1750	2300	3500	5400	
0,06	32	62	84	130	172	230	300	380	500	630	780	960	1250	1650	2100	2800	4000	6600	
0,04	43	81	115	170	230	310	400	500	660	840	1020	1300	1700	2150	2800	3700	5400	8800	
0,03	55	101	146	220	290	390	520	650	850	1080	1300	1600	2120	2750	3400	4500	6500	&	
0,02	78	150	220	340	460	600	800	1000	1300	1600	2000	2600	3300	4000	5000	6700	9000	&	
0,014	100	200	300	500	700	900	1150	1500	1900	2300	3000	4000	4600	5600	7200	9000	&	&	

Fuente: Catálogo de Fusibles Cooper.



**Capítulo 3.- Corrientes de
cortocircuito en Redes de
Distribución.**



3.1 Corriente de cortocircuito.

Una corriente de cortocircuito es aquella que circula en un circuito eléctrico cuando existe el contacto entre dos o más líneas de la red eléctrica, sometidos a diferentes potenciales (circuito trifásico), ó entre potencial y tierra (cortocircuito monofásico), esto sucede al perderse el aislamiento entre ellos (González & Luna , 2010).

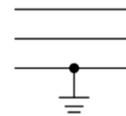
3.2 Tipos de fallas de cortocircuito.

En la mayor parte de los sistemas eléctricos, se obtiene la máxima corriente de cortocircuito cuando se produce una falla trifásica. En cambio, en un cortocircuito entre fase y neutro, la magnitud de la corriente de cortocircuito depende de la forma en que se conecte el neutro.

Desde el punto de vista estadístico, el mayor porcentaje de fallas por cortocircuito están representadas por las fallas denominadas de línea a tierra (del orden del 85%), y por ejemplo el menor porcentaje de las fallas correspondiente a las denominadas fallas trifásicas (del 2 al 3% máximo), la mayoría de las veces la causa de estas es accidental, no obstante, como análisis de un sistema se deben estudiar todos los tipos de fallas (González & Luna , 2010).

En un sistema eléctrico trifásico pueden ocurrir las fallas siguientes:

1. Falla de una fase a tierra, llamada también falla monofásica, de esta se puede dar cualquiera de las siguientes:
 - a. Fase a y tierra.
 - b. Fase b y tierra.
 - c. Fase c y tierra.



Fuente: González & Luna, 2010



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

2. Falla entre dos fases, llamada también falla bifásica que también puede presentarse en las siguientes combinaciones:

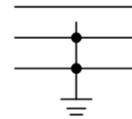
- a. Fase a y b.
- b. Fase b y c.
- c. Fase c y a.



Fuente: González & Luna, 2010

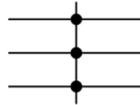
3. Falla de dos fases a tierra, llamada también falla bifásica a tierra en donde se cuentan los siguientes casos:

- a. Fases a y b con tierra.
- b. Fases b y c con tierra.
- c. Fases c y a con tierra.



Fuente: González & Luna, 2010

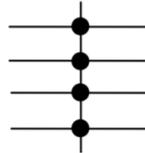
4. Falla entre fases, llamada también falla trifásica en donde las fases a, b y c se conectan entre sí.



Fuente: González & Luna, 2010



5. Falla entre fases y neutro, llamada también falla trifásica con neutro en donde las fases a, b, c y el neutro se conectan entre sí.



Fuente: González & Luna, 2010

Este último caso se presenta, por ejemplo, cuando la falla se establece a través de un arco eléctrico. Un cortocircuito trifásico en un sistema produce una falla trifásica balanceada. Las fallas de una fase a tierra, entre dos fases y de dos fases a tierra producen fallas desequilibradas.

El cálculo de las corrientes de cortocircuito es extenso y requiere del manejo de complejos modelos matemáticos, por lo tanto, ya que la presente investigación no corresponde como objetivo fundamental su estudio, sólo se mencionarán de manera general los métodos de cálculo de las corrientes de cortocircuito.

De manera particular estas serán calculadas con el programa computacional Digsilent v15.1.

3.3 Métodos de Cálculo de las corrientes de cortocircuito.

Existen diferentes métodos para el cálculo de las corrientes de cortocircuito, unos extensamente conocidos y algunos otros poco populares y más bien desarrollados para satisfacer las necesidades de empresas particulares, sin ser ampliamente difundidos. Dentro de estos métodos matemáticos se han seleccionado cuatro, por su amplio empleo en el análisis de sistemas y las diferencias que presentan a lo largo del desarrollo del análisis, siendo los siguientes (González & Luna , 2010):

1. Método del Equivalente de Thévenin.



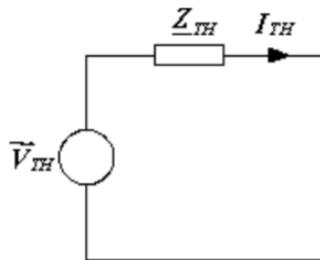
2. Método de los MVA.
3. Método de las Componentes Simétricas.

Por la índole de los valores de análisis requeridos, estos métodos son empleados de forma específica en problemas de sistemas eléctricos, ya que dentro de estos existen algunos que permiten efectuar estudios más detallados que otros, con ciertas ventajas en sus procedimientos que facilitan además la obtención de los valores requeridos, siendo el empleo de cada uno práctico para el análisis de problemas específicos. A continuación, se describe el procedimiento requerido por cada uno de los métodos antes mencionados, que permiten obtener los valores de corrientes y potencias de cortocircuito.

3.3.1. Método del Equivalente de Thévenin.

Con el fin de poder efectuar los cálculos de cortocircuito en los sistemas eléctricos, se hace necesario transformar la representación del sistema original (diagrama unifilar), a un sistema equivalente en el cual las impedancias de todos los elementos queden referidas a una base común de tensión, o bien a una base común de potencia. Según enuncia el teorema de Thévenin, cualquier sistema se puede reducir a una sola impedancia en el punto de falla por combinaciones sucesivas serie o paralelo o por transformaciones delta-estrella alimentada por una fuente de tensión en serie como se muestra en la figura No.15.

Figura 15 Circuito de Thévenin



Fuente: Sistemas Eléctricos de Potencia. Stevenson



3.3.2. Método de los MVA.

Es básicamente una modificación del método óhmico en el cual la impedancia de un circuito es la suma de las impedancias de sus componentes, y en virtud de que por definición la admitancia es la reciproca de la impedancia se tiene que la reciproca de la admitancia del sistema es la suma de las reciprocas de las admitancias componentes.

Bajo este método, cada elemento en el circuito se convierte a un valor en MVA y la red se reduce tratando cada valor como una admitancia.

Para utilizar este método se deben seguir los siguientes pasos:

- 1) Convertir la impedancia de los equipos, de las líneas y alimentadores directamente a MVA de cortocircuito mediante las ecuaciones presentadas en la tabla No.5

Tabla 5 Ecuaciones de Cálculo, método de los MVA

<i>Magnitud a determinar</i>	<i>Expresión de la ecuación</i>	<i>Descripción de las variables</i>
Mega Volt-Amperes de cortocircuito.	$MVA_{CC} = \frac{MVA_{equipo} \times 100}{X\% \text{ del equipo}}$	<ul style="list-style-type: none"> - MVA_{equipo} Potencia del equipo. - X% Porcentaje de reactancia del equipo.
Mega Volt-Amperes de cortocircuito.	$MVA_{CC} = \frac{MVA_{equipo} \times 100}{X_{pu} \text{ del equipo}}$	<ul style="list-style-type: none"> - MVA_{equipo} Potencia del equipo. - X_{pu} Reactancia del equipo en por unidad.
Mega Volt-Amperes de cortocircuito.	$MVA_{CC} = \frac{kV_L^2}{X_{\Omega}}$	<ul style="list-style-type: none"> - kV_L^2 Tensión de línea del conductor. - X_{Ω} Reactancia en Ohms por kilometro.

Fuente: Sistemas Eléctricos de Potencia. Stevenson



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

- 2) Dibujar dentro de rectángulos o círculos todos los MVA de cortocircuito de equipos, alimentadores y líneas siguiendo el mismo arreglo que éstos tienen en el diagrama unifilar.
- 3) Sucesivamente combinar los MVA de cortocircuito del sistema hasta encontrar un valor equivalente en el punto de falla.
 - a. Los valores en paralelo se suman directamente.
 - b. Los valores en serie se combinan como si fueran impedancias en paralelo.
- 4) Calcular la corriente de cortocircuito trifásica, en amperes, para el punto de falla.

3.3.3. Método de las componentes Simétricas.

El método de las componentes simétricas es ampliamente utilizado en el cálculo de corrientes de falla en sistemas de media y alta tensión, y a diferencia de los métodos de equivalente de Thévenin y los MVA, este permite efectuar el cálculo de fallas desbalanceadas en los sistemas eléctricos, también proporciona un punto muy explícito que permite apreciar perfectamente; porque en ocasiones las corrientes de falla monofásicas pueden ser más grandes y por lo tanto más peligrosas y potencialmente destructivas en un sistema eléctrico, que las fallas trifásicas. Esto se observa una vez que el diagrama de secuencia cero se elabora (Martínez, 2014).

El procedimiento para obtener valores de corrientes y potencias de falla, empleando este método de cálculo se describe a continuación:

1. Expresar los valores de reactancia de los elementos considerados en el cálculo en el sistema en por unidad estableciendo magnitudes base de tensión y potencia.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

2. Dibujar las redes de secuencia positiva, negativa y cero, tomando especial atención en el tipo de conexión de las máquinas eléctricas para la elaboración del diagrama de secuencia cero.
3. Reducir las redes de secuencia a su equivalente de Thévenin, en el punto de falla.
4. Aplicar la ecuación correspondiente para obtener el valor de corriente de falla.

Para dibujar las redes de secuencia es necesario tomar en cuenta consideraciones como el tipo de conexión de las máquinas eléctricas que se contemplaran en los cálculos.

A continuación, se muestra una tabla de los diagramas de secuencia de las máquinas eléctricas:



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Tabla 6 Diagramas de secuencia de las máquinas eléctricas.

Maquina y tipo de conexión	Símbolo Sec. (+)	Símbolo Sec. (-)	Símbolo Sec. (0)

Fuente: **Sistemas Eléctricos de Potencia. Stevenson**



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

El método de las componentes simétricas es una herramienta matemática para la solución práctica de problemas en circuitos trifásicos bajo condiciones de asimetría. Con este método, un conjunto de variables asimétricas (corrientes, voltajes, o flujos magnéticos) puede resolverse, descomponiéndoles en varios sistemas simétricos cuyo número será igual al número de fases del sistema. Estos sistemas simétricos que comprenden al sistema asimétrico original se denominan sus componentes simétricos.

Este método fue desarrollado en 1918 por D. L. Fortescue en "Método de las coordenadas simétricas", y se aplica a la resolución de redes polifásicas, para soluciones analíticas o analizadores de redes. Sirve para cualquier sistema polifásico desequilibrado: en el cual n fasores relacionados entre sí pueden descomponerse en n sistemas de vectores equilibrados (componentes simétricos).

Básicamente el método consiste en determinar las componentes simétricas de las corrientes en la falla, y luego encontrar las corrientes y tensiones en diversos puntos del sistema.

De acuerdo con el teorema de Fortescue, tres fasores desbalanceados de un sistema trifásico se pueden descomponer en tres sistemas balanceados de fasores. Los conjuntos balanceados de componente son:

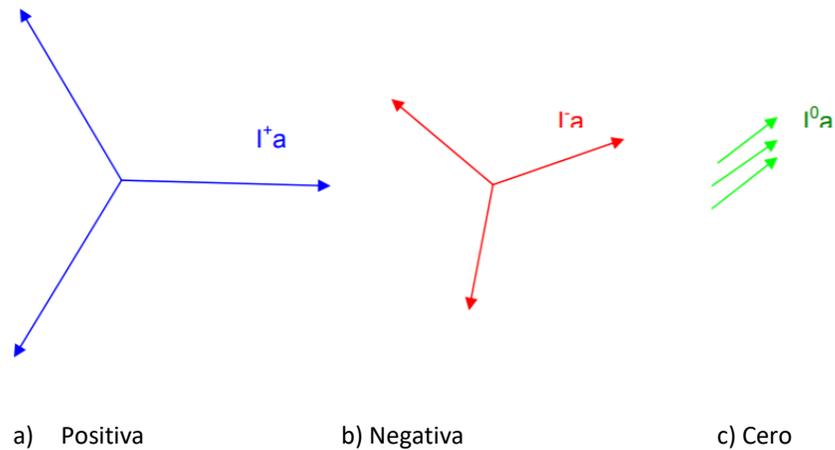
1. Componentes de secuencia positiva que consisten en tres fasores de igual magnitud desfasados uno de otro por una fase de 120° y que tienen la misma secuencia de fase que las fases originales.
2. Componentes de secuencia negativa que consiste en tres fasores iguales en magnitud, desplazados en fase uno de otro en 120° y que tienen una secuencia de fase contraria a las fases originales.
3. Componentes de secuencia cero (homopolares) que consisten en tres fasores iguales en magnitud y con un desplazamiento de fase cero uno de



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

otro. Se acostumbra a designar a las tres fases de un sistema con A, B, C de modo que la secuencia directa sea ABC.

Figura 16 Vectores de componentes de secuencia



Fuente: Sistemas Eléctricos de Potencia. Stevenson

De tal manera que un sistema de corrientes desbalanceados puede ser descompuesto en una terna de vectores balanceados, bajo método de las componentes simétricas.



Capítulo 4.- Coordinación entre fusibles en una red de distribución radial, utilizando la curva de tiempo corriente.



4.1 Principios de Coordinación.

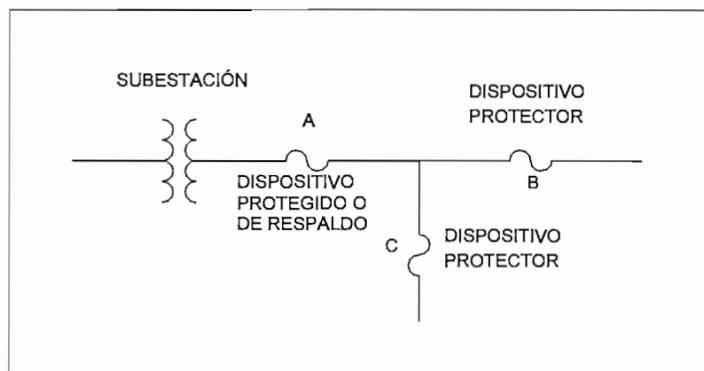
Como nuestra red de distribución radial de media tensión, es una red compuesta sólo por protecciones de fusibles a lo largo de toda su trayectoria, se establece a continuación el principio fundamental de coordinación entre dos o más fusibles, esta se realiza en pares (Guzmán , 2012).

De acuerdo con la topología de la red de distribución radial, los fusibles de protección se ubican en secuencia a partir de la fuente hacia la carga. De tal manera que existe una sobre posición de zonas de protección, la cual debemos de coordinar específicamente.

Para la coordinación de fusibles en serie, el dispositivo más cercano a la carga se denomina fusible protector (B) y el fusible que se encuentra aguas arriba o hacia la fuente de energía se lo llama fusible protegido (A).

De tal manera que el dispositivo más cercano a la falla del lado de la carga, al cual llamaremos (dispositivo protector) opere antes que el siguiente dispositivo más cercano a la falla en dirección hacia la fuente (dispositivo protegido) pueda funcionar.

Figura 17 Definición dispositivos de protección



Fuente: Redes de Distribución Samuel Ramírez



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

El criterio indispensable para una adecuada coordinación al emplear fusibles es; que el tiempo máximo de despeje del fusible protector, no debe superar el 75% del tiempo mínima de fusión del fusible protegido.

Esto asegura que el fusible protector despeje la falla sin que se vea afectado el fusible protegido.

El mecanismo inicial de operación del fusible es la fusión del elemento y depende de la magnitud y duración de la corriente, así como de las propiedades eléctricas del fusible.

Las características del fusible se definen por dos curvas, la de mínimo tiempo de fusión (mtf) y la de tiempo total de despeje (ttt), estas curvas se las obtiene mediante pruebas eléctricas y representan los extremos de las características del fusible.

Para realizar la coordinación entre fusibles, en esta investigación utilizaremos las curvas tiempo-corriente, el criterio a cumplir es:

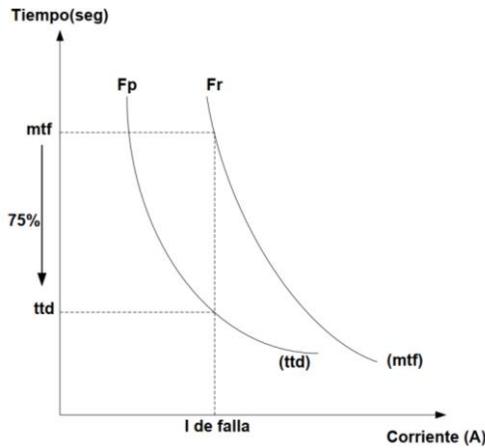
$$\left[\frac{ttt(\text{fusible principal})}{mtf(\text{fusible respaldo})} \right] \leq 0.75 \quad \text{Ec.(2)}$$

Que se muestra representativamente en la siguiente gráfica:



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 18 Coordinación Fusible-Fusible

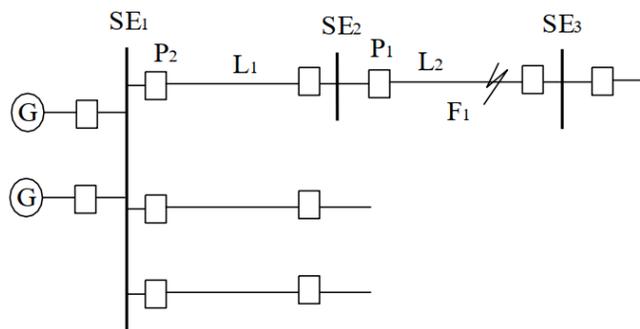


Fuente: Redes de Distribución. Samuel Ramírez.

Por experiencia internacional, tanto por empresas distribuidoras como por fabricantes se ha establecido como criterio de coordinación que se asegure que el valor máximo del tiempo de despeje del fusible protector para la corriente de falla no sea mayor a un 75% del tiempo mínimo de fusión del fusible protegido, para esa misma corriente.

Cuando no existe una correcta, una correcta coordinación de protecciones en un sistema de distribución radial, que opere bajo criterios de selectividad y confiabilidad, se presentará un caso como el mostrado en la figura No.17

Figura 19 Confiabilidad ante una falla



Fuente: Redes de Distribución. Samuel Ramírez



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Si con la falla F1 no opera la protección P1 tendrá que operar la protección P2, con la consecuencia de desconectar la línea L1 y la SE2. En caso de que opere P1 sólo se desconecta la línea L2, como debe de ser.

4.2 Selección del fusible según el elemento a proteger.

Para la selección del fusible se debe considerar el trabajo de protección que este va a realizar:

1. Protección de un equipo específico.
2. Protección de un alimentador.

En el primer caso, la elección depende de las características del equipo a proteger, ya sea por ejemplo la curva de daño del transformador o del banco de capacitores.

En el segundo caso cada fusible se debe coordinar con los otros dispositivos de protección de la red eléctrica.

En el caso de Nicaragua, las empresas distribuidoras de electricidad DISNORTE/DISSUR, utilizan fusibles tipo k (rápidos), ya que despejan la falla en el menor tiempo posible.

4.3 Métodos de coordinación de fusibles.

Existen tres métodos de coordinación de fusibles en una red de distribución, los cuales consisten en la aplicación de;

1. Las curvas de tiempo corriente (CTC's).
2. El uso de tablas de coordinación.
3. El uso de constantes convenientemente establecidas.

Los métodos decrecen en exactitud y crecen en facilidad de aplicación de acuerdo con el orden pre-establecido anteriormente, y pueden ser usados tomando en cuenta los siguientes criterios:



El método de las curvas de tiempo corriente (CTC's), se aplica en áreas donde la coordinación de protecciones es crítica.

Las tablas que se derivan de las curvas de tiempo corriente (CTC's), son relativamente exactas y pueden ser usadas en situaciones repetitivas.

El método de constantes sólo dará resultados satisfactorios para limitadas aplicaciones donde los fusibles se usen todos de una sola serie.

Durante la aplicación del estudio de coordinación de protecciones, referidas en la presente tesis, utilizamos el método de las curvas de tiempo corriente (CTC's).

4.4 Ejemplo de aplicación de coordinación de fusibles.

A continuación, se presenta un diagrama sencillo de una red radial, con las siguientes características:

Cantidad de Nodos 3

Cargas 2

Líneas 2

Carga del Nodo 2: P = MW; Q = MVAR

Carga del Nodo 3: P = MW; Q = MVAR

Línea 12 = $Z = 0.242 + j 0.428 \ \Omega/\text{km}$, Longitud 2.0= km

Línea 23 = $Z = 0.242 + j 0.428 \ \Omega/\text{km}$, Longitud 6.0= km

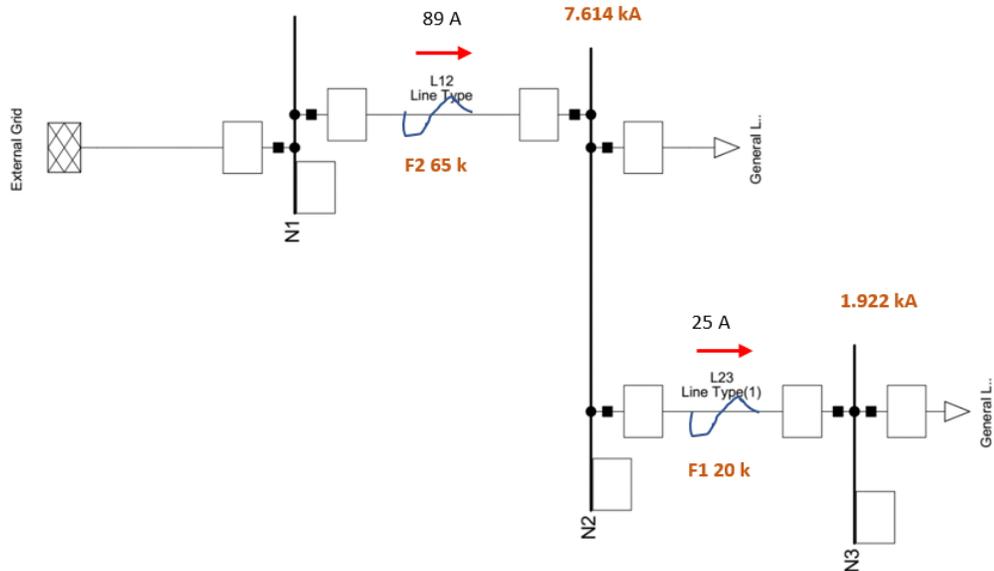
Fusible F1 Protector

Fusible F2 Protegido

Nivel de Voltaje: 13.2 kV



Diagrama Unifilar



Fuente: Propia

Utilizando el programa computacional Digsilent V15.1, realizado el análisis de flujo de potencia de la red, para determinar las corrientes nominales circulantes por cada tramo de la red de distribución, a fin de determinar la capacidad para los fusibles F1 y F2, los cuales se indican en la siguiente tabla y que fueron calculados, de acuerdo al apartado 2.1.3 del presente documento (El fusible tipo K es de fusión rápida y deberá soportar un 150% de su intensidad nominal con un funcionamiento normal).

Para calcular la capacidad del fusible se divide la corriente nominal entre el factor 1.5m luego se selecciona el valor comercial más cercano.



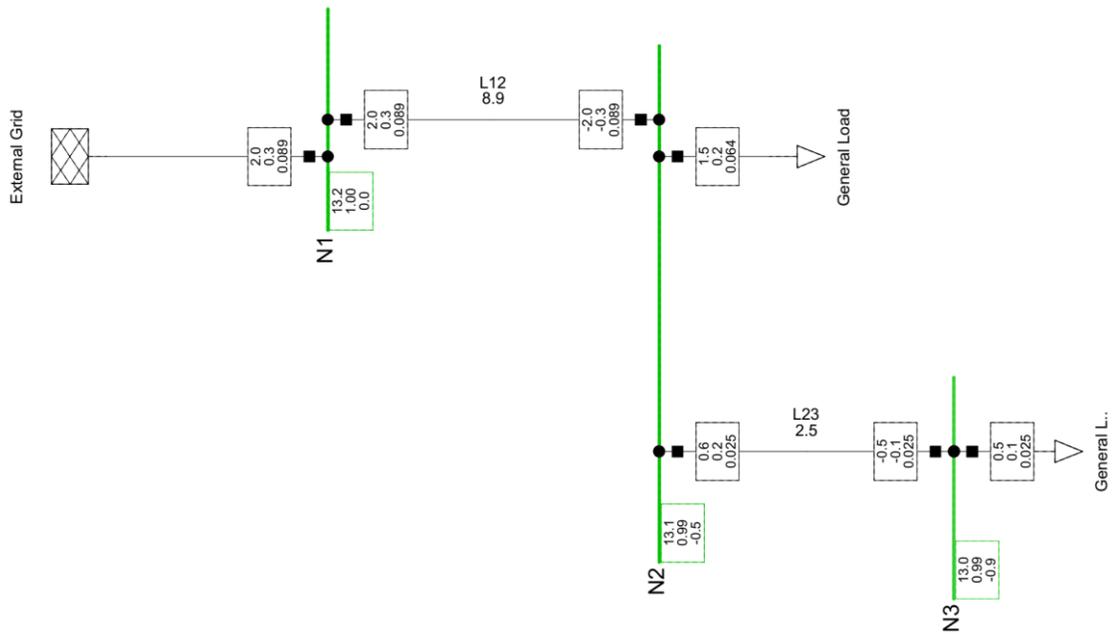
" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Tabla 7: De corrientes circulantes

TRAMO	CARGA (A)	CÁLCULO DEL FUSIBLE	FUSIBLE SELECCIONADO
L12	89	59	60
L23	25	17	20

Fuente: Propia

Resultados del análisis de flujo con Digsilent.



Como vemos si seleccionamos fusibles tipo k, obtenemos los valores de:

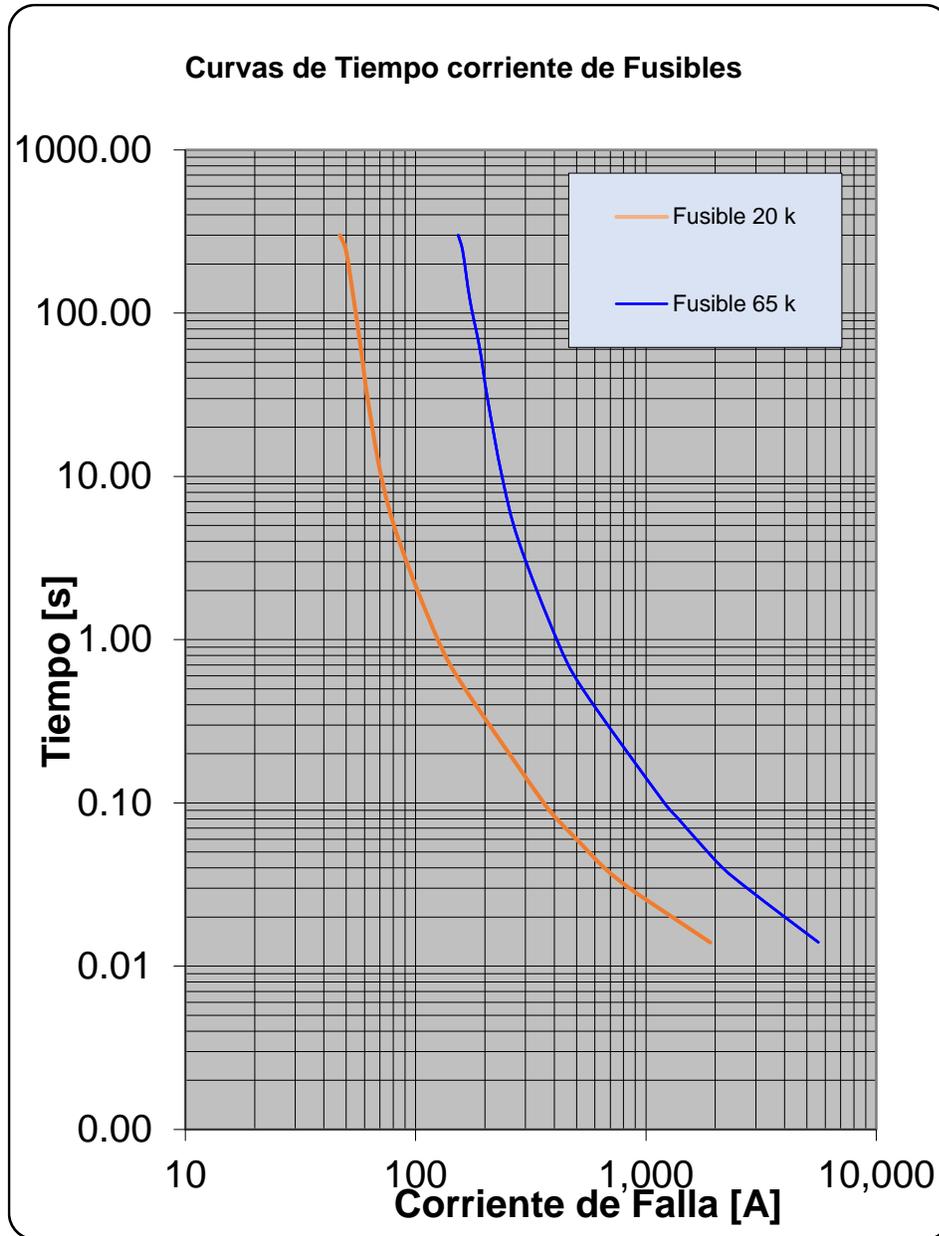
F1 = 20 amperios, y

F2 = 60 amperios

Cuyas gráficas de tiempo corriente se muestran a continuación:



Figura 20 Curva de disparo de los fusibles



Fuente: Propia con datos del fabricante COOPER.

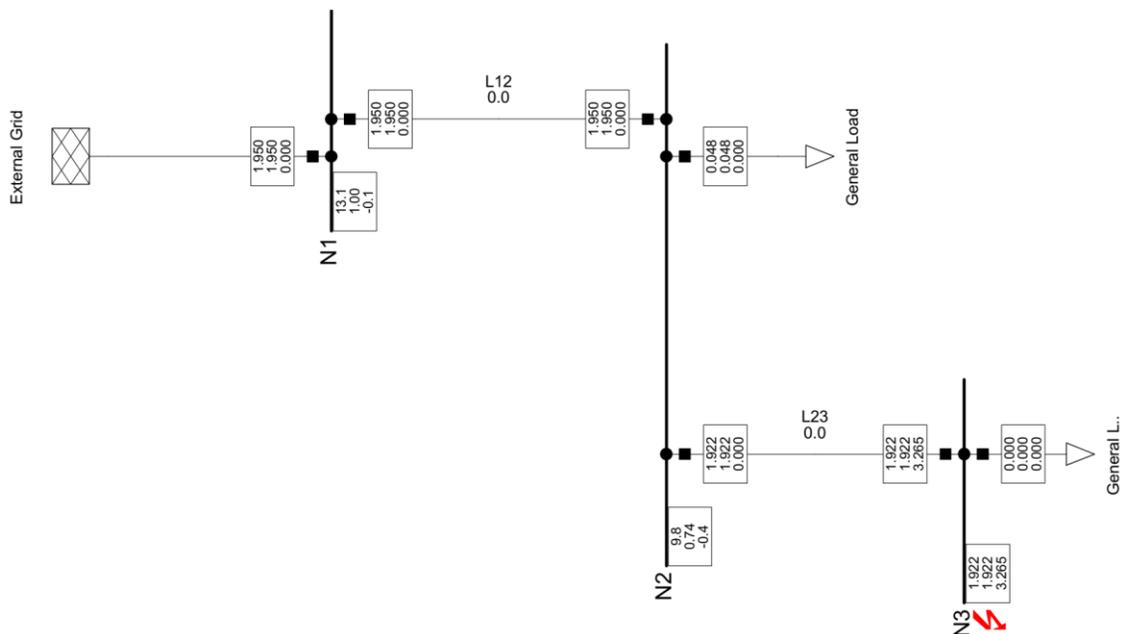
Para poder realizar la correcta coordinación entre los fusibles F1 y F2, debemos primero realizar el cálculo de cortocircuito trifásico en el nodo No.3, de tal manera que ante una eventualidad de falla que haga circular una corriente de cortocircuito por la línea L12, se dispare primero selectivamente el fusible F1 y no el fusible F2,



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

para ello debemos cumplir con el criterio de coordinación establecido en el apartado 4.3 del presente documento (que asegure que el valor máximo del tiempo de despeje del fusible protector para la corriente de falla no sea mayor a un 75% del tiempo mínimo de fusión del fusible protegido, para esa misma corriente).

Lo cual se verifica a continuación, una vez obtenida la corriente de cortocircuito en el Nodo 3.



El cálculo de la corriente de cortocircuito en el nodo 3, utilizando el método completo en Digsilent resultó en un valor de 1.922 kA = 1,922 Amperios, valor al cual se determina que en la curva de tiempo corriente (fig.20) para el fusible F1 (protector) de 20 amperios, tipo k, el tiempo de fusión es de 0.014 segundos y para el fusible F2 (protegido) de 65 amperios tipo k, es de 0.04912 segundos. A fin de determinar la correcta relación de coordinación, se determinó el margen de tiempo de la coordinación entre estos:

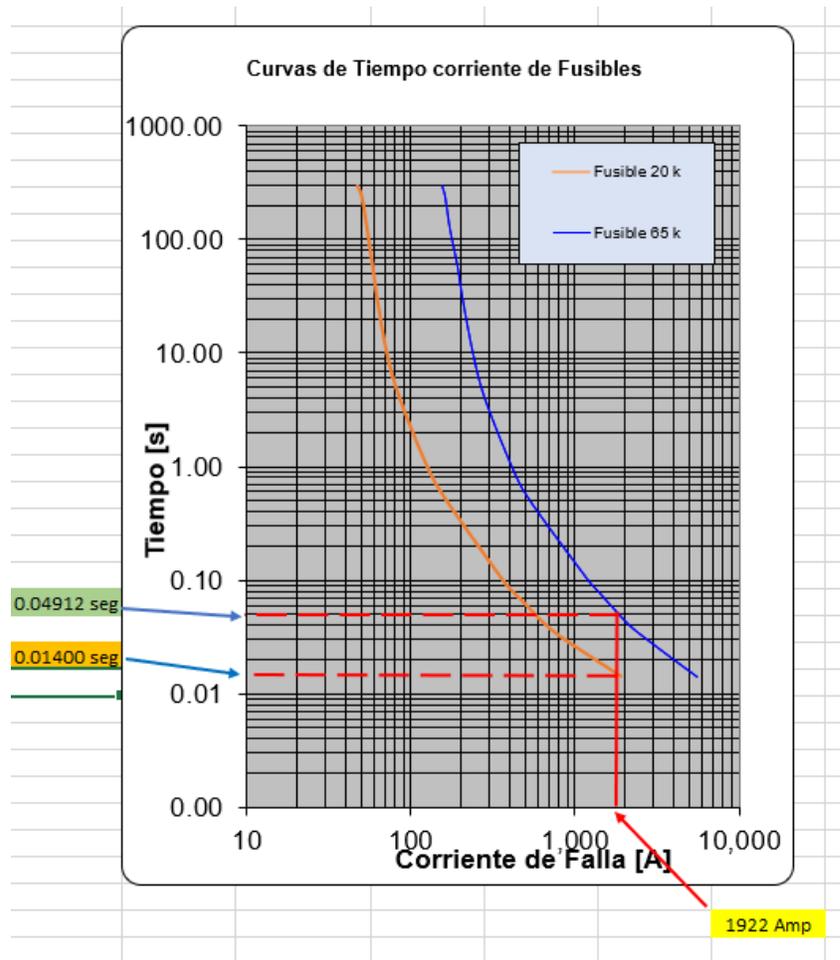
$Mt = \text{Tiempo despeje fusible protector} / \text{Tiempo despeje fusible protegido}$.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

$Mt = 0.014 \text{ seg} / 0.04912 \text{ seg} = 0.285 = 28.5\%$ es decir cumple con el criterio de coordinación siendo su valor menor al 75%. Ver gráfico.

Figura 21 Margen de coordinación de fusibles



Fuente: Propia



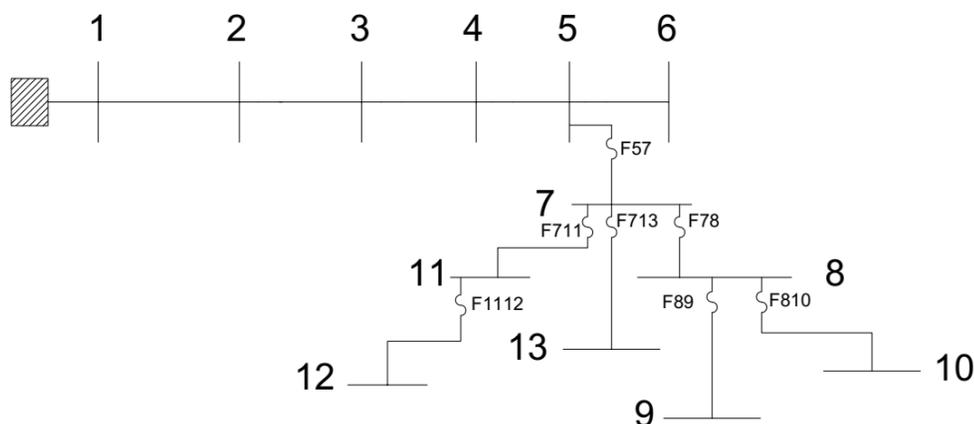
Capítulo 5.- Estudio de Coordinación de protecciones aplicado a un circuito de distribución radial, utilizando el programa Digsilent V15.1.



5.1 Circuito radial aplicado para la Coordinación integral de protecciones.

El circuito aplicado en esta investigación para realizar el estudio de la coordinación de protección de manera integral en redes de distribución radial de media tensión, es el modelo IEEE de 13 nodos (Ali Aref, 2012), el cual se muestra en la figura No.22.

Figura 22 Red radial IEEE 13 nodos



Fuente: Propia a partir del Modelo de Red IEEE-13

En este diagrama de red de distribución radial se observa la red principal o troncal, que corresponde a los tramos: 1-2, 2-3, 3-4, 4-5 y 5-6. El resto de los tramos interconectados a partir del nodo 5; corresponden a las derivaciones del circuito donde aplicaremos el estudio de coordinación integral de las protecciones, siendo que en estos tramos se propone instalarles fusibles tipo "k".

De acuerdo con este diagrama tendremos la propuesta de fusibles indicada por tramo, según la siguiente tabla No.8:



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Tabla 8: Nomenclatura de Fusibles por tramo de red

TRAMO	NOMENCLATURA DE FUSIBLE UTILIZADA
L57	F57
L78	F78
L711	F711
L713	F713
L89	F89
L810	F810
L1112	F1112

Fuente: Propia.

5.2 Condiciones de operación de la red radial y premisas del estudio de Coordinación integral de protecciones.

1. Las condiciones de operación serán basadas en un esquema de protección convencional por sobre-corriente, utilizando fusibles tipo "k" en las derivaciones, y se procede a simular la falla de cortocircuito más severa, la falla trifásica en los nodos vinculantes donde se realiza la coordinación integral de protecciones, tomando en cuenta las cargas conectadas en cada nodo.
2. Las premisas fundamentales utilizadas en el estudio realizado corresponden a las descritas en el capítulo No.4 de la presente investigación, siendo la estrategia de coordinación la siguiente:
 - ✓ Se establece la coordinación entre el fusible protector y el fusible protegido, por pares.
 - ✓ Basado en el estudio de flujo de carga de la red radial de distribución bajo estudio, se determina la corriente nominal circulante en cada tramo de las derivaciones, para luego calcular la capacidad nominal del fusible, tomando en consideración que el fusible tipo K es de



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

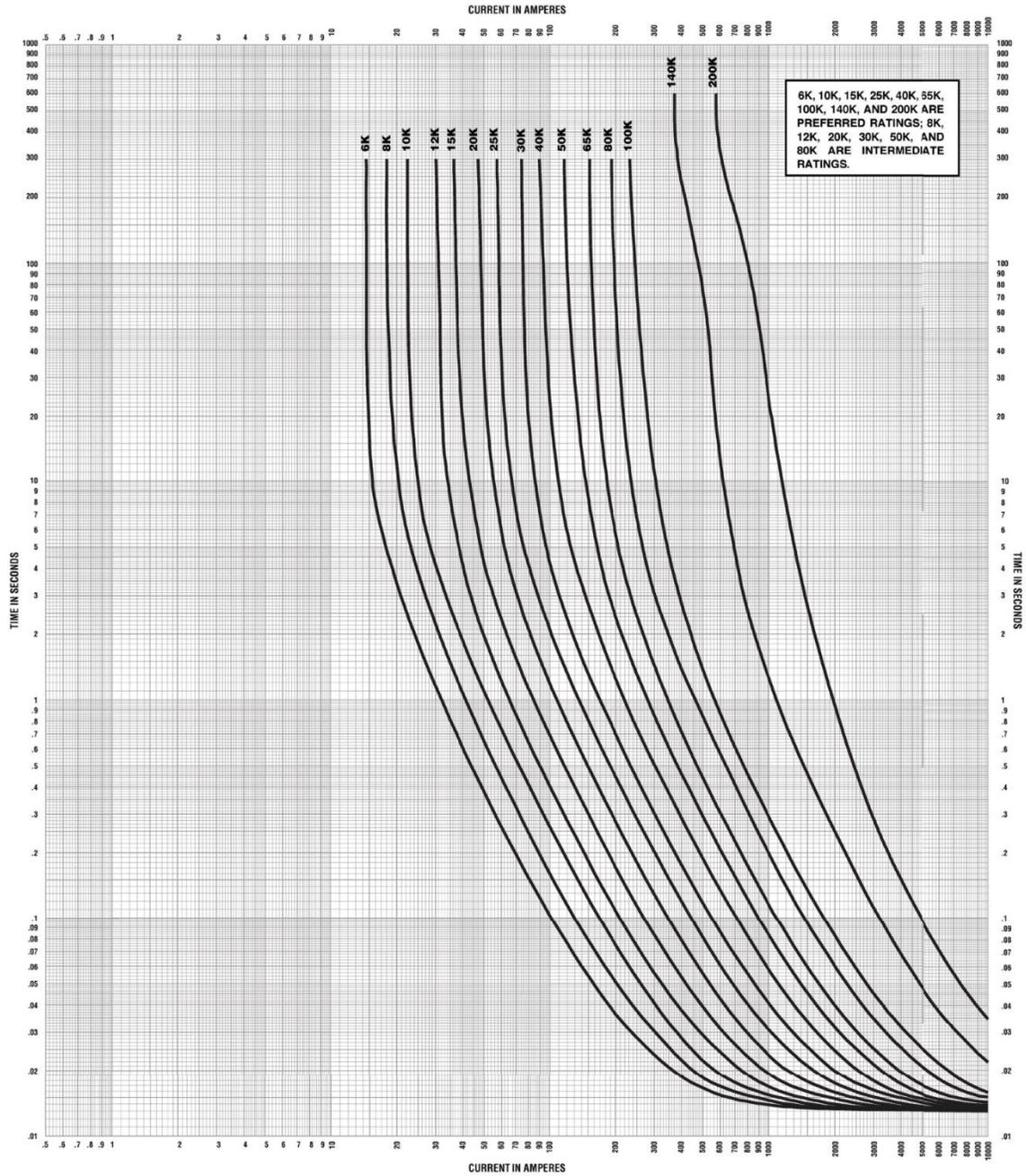
- ✓ fusión rápida y deberá soportar un 150% de su intensidad nominal con un funcionamiento normal.
- ✓ Realizar el estudio integral de coordinación por sobre corriente de la red radial de distribución, a partir de la carga hacia la fuente.
- ✓ Conforme lo ya establecido en el capítulo No,4, de la presente investigación se utiliza como criterio de coordinación que se asegure que el valor máximo del tiempo de despeje del fusible protector para la corriente de falla no sea mayor a un 75% del tiempo mínimo de fusión del fusible protegido, para la misma corriente de falla.

Las curvas de fusibles tipo “k”, utilizados en la propuesta de coordinación de protecciones de esta investigación, para el circuito radial de 13 nodos IEEE, así como sus bases de datos tabulados se muestran en la siguiente figura No. 23, y tablas de datos correspondientes.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 23 Curva de Disparo de Fusibles tipo K



Fuente: S&C Electric Company.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Tablas de datos de fusibles tipo "k". (Fuente S&C Electric Company).

8K	
Current	Time
17.9098	174.138
17.9277	247.361
17.9456	301.826
17.9636	119.205
17.9995	86.388
18.0898	65.5523
18.2533	49.9413
18.4367	39.2459
18.622	30.2303
18.8092	23.9231
19.0935	19.0457
19.4208	15.3458
19.8528	12.5014
20.2944	10.2763
20.663	8.69584
21.1226	7.47709
21.7224	6.47432
22.3616	5.69076
23.135	4.99702
24.007	4.38348
25.3644	3.64677
27.122	2.96786
28.6842	2.52147
30.4884	2.12514
32.18	1.8383
33.9655	1.59974
36.2829	1.35912
39.4623	1.11387
43.0063	0.913785
47.2922	0.739219
52.1094	0.596211
57.3599	0.484731
62.4487	0.406911
68.9475	0.335155
74.8395	0.282758
84.2127	0.223988
94.7598	0.177966
105.672	0.14527
117.842	0.119175
130.757	0.099742
144.076	0.08474
160.187	0.071635
176.857	0.061472
193.126	0.053979
214.507	0.046553
236.357	0.040837
262.787	0.035823
296.588	0.031237
323.223	0.028377
349.794	0.026065
372.912	0.024278
402.761	0.022524
434.564	0.02098
474.539	0.019542
508.947	0.018589
548.585	0.01786
591.312	0.017315
645.06	0.016686
703.694	0.016177
781.6	0.015683
869.869	0.015311
964.242	0.014963
1070.99	0.014608
1167.17	0.014348
1271.99	0.014162
1391.78	0.013993
1524.37	0.013854
1652.99	0.013744
1803.24	0.013662
2086.7	0.013566
2385.92	0.013512
2763.74	0.013485
10000	0.013298

10K	
Current	Time
22.2723	233.656
22.2946	300.621000
22.3169	121.613000
22.3393	91.821800
22.4288	59.314200
22.4512	73.688700
22.5187	48.854600
22.6089	40.643800
22.7905	33.476600
22.9966	26.176100
23.2509	21.452600
23.5787	17.476300
23.8634	15.087100
24.1756	12.985600
24.6394	10.977400
25.0869	9.495750
25.5426	8.271730
25.9286	7.329030
26.5584	6.519800
27.3672	5.753700
28.5697	4.888290
29.9745	4.169690
31.5428	3.570990
33.2264	3.058240
34.9999	2.645450
37.0900	2.270140
39.5018	1.926760
42.1126	1.641870
44.7614	1.423100
47.7198	1.221200
51.6942	1.021050
55.6647	0.869219
61.0899	0.713794
67.1780	0.583821
74.5407	0.472763
81.5606	0.394490
89.2415	0.328518
98.0371	0.273033
110.43	0.218239
123.76	0.175492
139.26	0.141117
154.37	0.117400
171.29	0.098356
192.93	0.080446
213.44	0.068415
242.83	0.056125
268.10	0.048501
294.52	0.042376
324.19	0.037099
353.31	0.033168
381.97	0.030253
410.49	0.027732
453.20	0.024893
493.41	0.022887
530.25	0.021426
564.16	0.020421
599.05	0.019562
643.13	0.018739
684.95	0.018076
742.00	0.017437
797.39	0.016905
862.08	0.016454
949.89	0.015936
1037.26	0.015527
1138.35	0.015189
1236.87	0.014888
1349.30	0.014623
1486.74	0.014348
1630.01	0.014120
1783.51	0.013951
1959.29	0.013813
2167.52	0.013689
2393.09	0.013566
2802.70	0.013472
10000.00	0.013298

12K	
Current	Time
30.0345	303.946
30.1247	270.657
30.2152	229.4880
30.3971	178.19
30.58	141.012
30.764	114.76
30.9492	93.7704
31.1043	76.0088
31.3228	58.7827
31.4798	46.8451
31.5744	36.301
31.7009	30.1398
31.7962	24.6763
31.9875	20.902
32.18	17.9905
32.471	15.7658
32.8301	13.5833
33.2597	12.0112
33.8638	10.4839
34.5133	9.07791
35.2811	7.84475
36.0298	6.90222
37.1271	5.90526
38.2195	5.08779
39.5018	4.3442
40.6235	3.84911
42.0284	3.37313
43.6999	2.95011
45.3471	2.62175
47.1506	2.32528
49.5185	2.02555
52.266	1.75039
55.0557	1.52629
57.9944	1.33621
60.7244	1.19344
64.222	1.05005
67.7176	0.926668
72.6277	0.791235
77.8938	0.677625
84.8891	0.566
92.8835	0.470875
99.6183	0.407318
109.218	0.338523
120.102	0.281348
131.807	0.236179
144.654	0.197274
159.388	0.163464
174.748	0.137495
195.849	0.112797
214.937	0.096215
241.856	0.07909
267.56	0.067531
297.182	0.057546
326.798	0.050128
357.217	0.044238
397.559	0.038459
434.999	0.034522
481.229	0.030802
536.648	0.027511
586.6	0.025244
644.415	0.023141
713.615	0.02117
766.123	0.020037
828.273	0.018965
896.361	0.018058
966.173	0.017402
1024.89	0.016922
1114.7	0.016356
1212.38	0.015888
1309.42	0.015527
1415.64	0.01525
1544.32	0.014948
1718.73	0.014637
1901.39	0.014348
2145.96	0.014092
2400.28	0.013882
2615.84	0.013771
2902.54	0.013662
3191.8	0.013634
3798.42	0.013593
10000	0.013298



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

140K	
Current	Time
370.311	533.71
370.681	605.984
371.052	463.985
372.167	411.929
373.285	382.547
375.908	353.489
379.685	329.261
381.589	307.616
385.038	287.968
389.297	266.36
394.391	246.374
401.554	227.204
411.308	204.558
422.565	180.341
430.67	163.506
441.573	145.162
451.847	128.876
463.749	112.939
472.644	102.293
482.192	92.282
492.425	82.0107
500.368	73.1015
508.947	65.4868
517.155	58.1978
524.971	51.4108
532.372	45.0533
539.338	39.2852
543.67	33.9146
549.684	29.249
556.32	25.4788
563.036	22.1502
570.974	18.9508
582.508	15.9561
592.495	13.8162
604.465	11.7147
617.293	10.0527
629.133	8.90706
639.92	7.93151
652.847	6.92989
671.385	5.94674
682.896	5.37545
697.389	4.80109
715.759	4.20318
733.145	3.72789
747.208	3.38327
763.828	3.05213
787.878	2.69889
817.575	2.37225
849.241	2.08306
887.442	1.80009
929.217	1.56493
971.987	1.3673
1015.71	1.20664
1076.36	1.02823
1146.35	0.873576
1212.38	0.754907
1282.21	0.660234
1361.5	0.57398
1428.44	0.513677
1507.7	0.456502
1599.33	0.402459
1715.29	0.345707
1858.16	0.29283
2037.22	0.242158
2235.77	0.201662
2405.08	0.173919
2569.18	0.152108
2741.72	0.133565
2922.93	0.11858
3106.77	0.106122
3302.19	0.095736
3461.09	0.087934
3704.64	0.078225
3886.8	0.072283
4118.9	0.065667
4382.35	0.059656
4634.76	0.05463
4882.15	0.05038
5127.33	0.047068
5444.39	0.043232
5740.72	0.04035
5998.95	0.038038
6275.07	0.035931
6603.4	0.033804
6976.76	0.031645
7393.38	0.029743
7788.01	0.028207
8113.95	0.02702
8512.92	0.025728
8994.24	0.024351
9617.5	0.02291
10000	0.022144

200K	
Current	Time
572.689	532.644
574.985	468.18
578.445	415.238
586.014	373.849
593.682	340.649
605.069	303.339
615.443	278.621
631.023	249.847
646.351	225.394
664.04	204.558
681.532	188.077
701.586	170.008
732.412	145.162
756.985	126.576
783.948	109.273
807.823	95.1876
829.102	83.7511
850.941	73.1746
872.483	62.4177
899.953	51.5652
921.813	44.0289
941.376	38.0479
960.393	33.0112
971.987	30.0796
985.691	26.3863
1000.58	23.3324
1017.74	20.9438
1035.19	19.3336
1053.99	17.1989
1080.67	14.4666
1115.81	11.8206
1160.19	9.42009
1191.94	8.0675
1225.79	6.96462
1255.56	6.12785
1287.35	5.42405
1319.94	4.80589
1345.26	4.37035
1371.06	4.02628
1394.57	3.70559
1438.48	3.21183
1488.22	2.80062
1538.16	2.44694
1600.93	2.08515
1672.94	1.77507
1741.22	1.5324
1810.47	1.32689
1871.21	1.18038
1930.12	1.06698
1984.93	0.972233
2039.26	0.888554
2070.07	0.84353
2114.01	0.792026
2156.71	0.73848
2229.07	0.666203
2334	0.575704
2441.43	0.503002
2569.18	0.434673
2714.44	0.373005
2873.66	0.320407
2984.96	0.291953
3141.14	0.256619
3302.19	0.228741
3447.28	0.207181
3656.79	0.182106
3949.48	0.155959
4252.83	0.134638
4584.06	0.116581
4950.98	0.101149
5320.59	0.088818
5655.25	0.079885
6023	0.071923
6344.48	0.065996
6730.07	0.060135
7068.05	0.05579
7610.93	0.050028
8162.78	0.045449
8780.95	0.041289
9398.82	0.037848
10000	0.035149



5.3 Modelamiento de la red radial IEEE, 13 nodos en el programa Digsilent V15.

A partir de los datos de carga y datos de tramos de línea del modelo de red de distribución radial IEEE-13, los cuales se indican en las tablas No.9 y No.10.

Tabla 10 Datos de carga Red radial IEEE-13

Nodo	P (kW)	Q (kVAR)
2	89	468
3	128	170
4	112	64
5	217	178
6	560	310
7	175	78
8	220	140
9	266	198
10	262	280
11	290	186
12	292	54
13	124	180

Tabla 9 Datos de tramos de línea red radial IEEE-13

TRAMO		IMPEDANCIA	
Nodo	Nodo	R (Ω)	X (Ω)
1	2	0.176	0.138
2	3	0.176	0.138
3	4	0.045	0.035
4	5	0.089	0.069
5	6	0.045	0.035
5	7	0.116	0.091
7	8	0.073	0.073
8	9	0.074	0.058
8	10	0.093	0.093
7	11	0.063	0.050
11	12	0.068	0.053
7	13	0.062	0.053

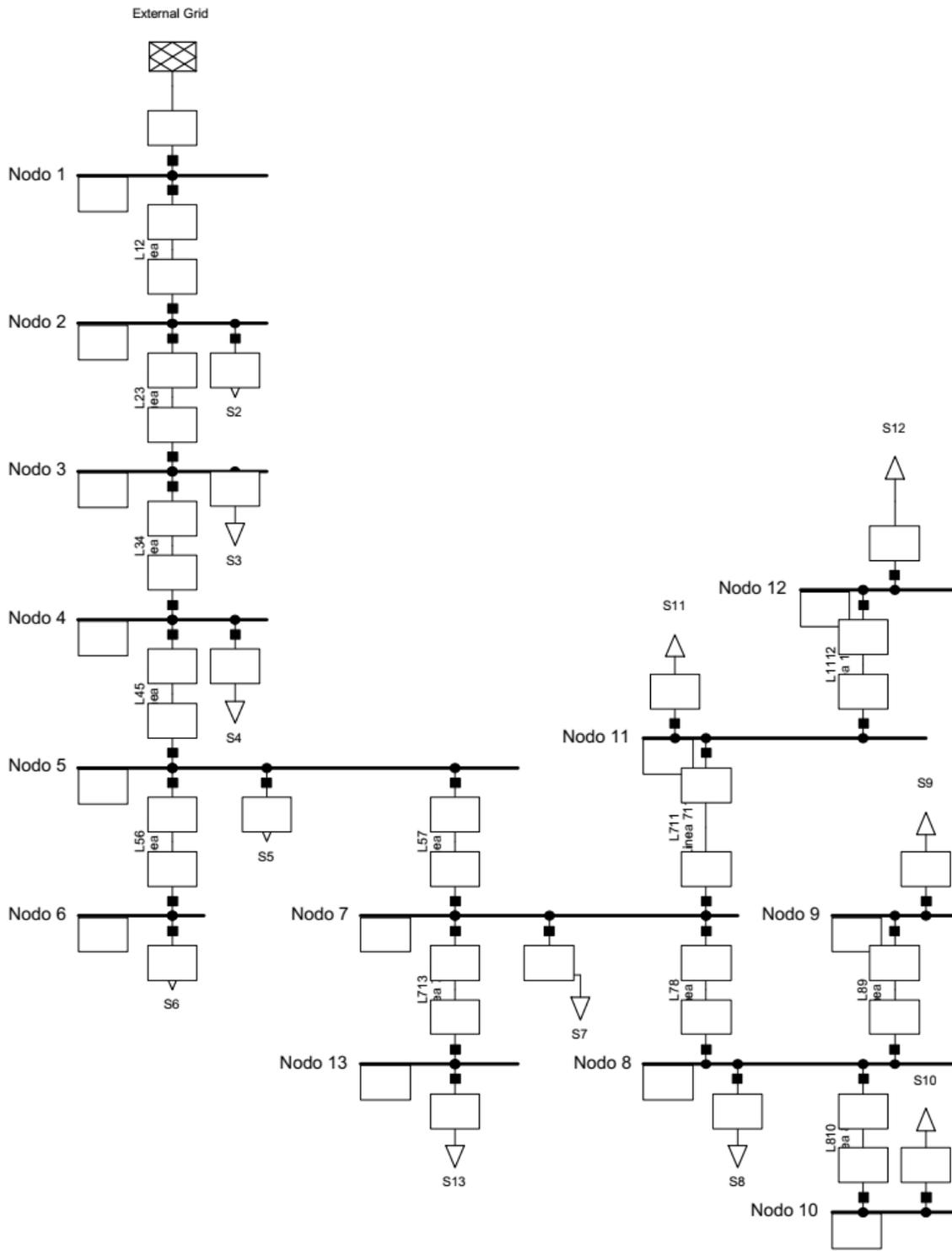
Fuente: (Ali Aref, 2012)

Se procedió a realizar las diferentes simulaciones (flujo de carga y falla por cortocircuito en los diferentes nodos de la red radial IEEE-13), para el estudio de coordinación integral de las protecciones del sistema de prueba de 13 nodos, se utilizó el programa computacional DlgSILENTPower factory V15.1, en el cual se ejecutaron distintas combinaciones de fallas en los nodos vinculantes de las derivaciones con fusibles a coordinar. El sistema de prueba modelado en DlgSILENT V15.1 se puede observar en la Figura No.24.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 24 Circuito radial IEEE-13, modelado en Digsilent



Fuente: Elaboración Propia digsilent



5.4 Resultados de la simulación de flujo de carga.

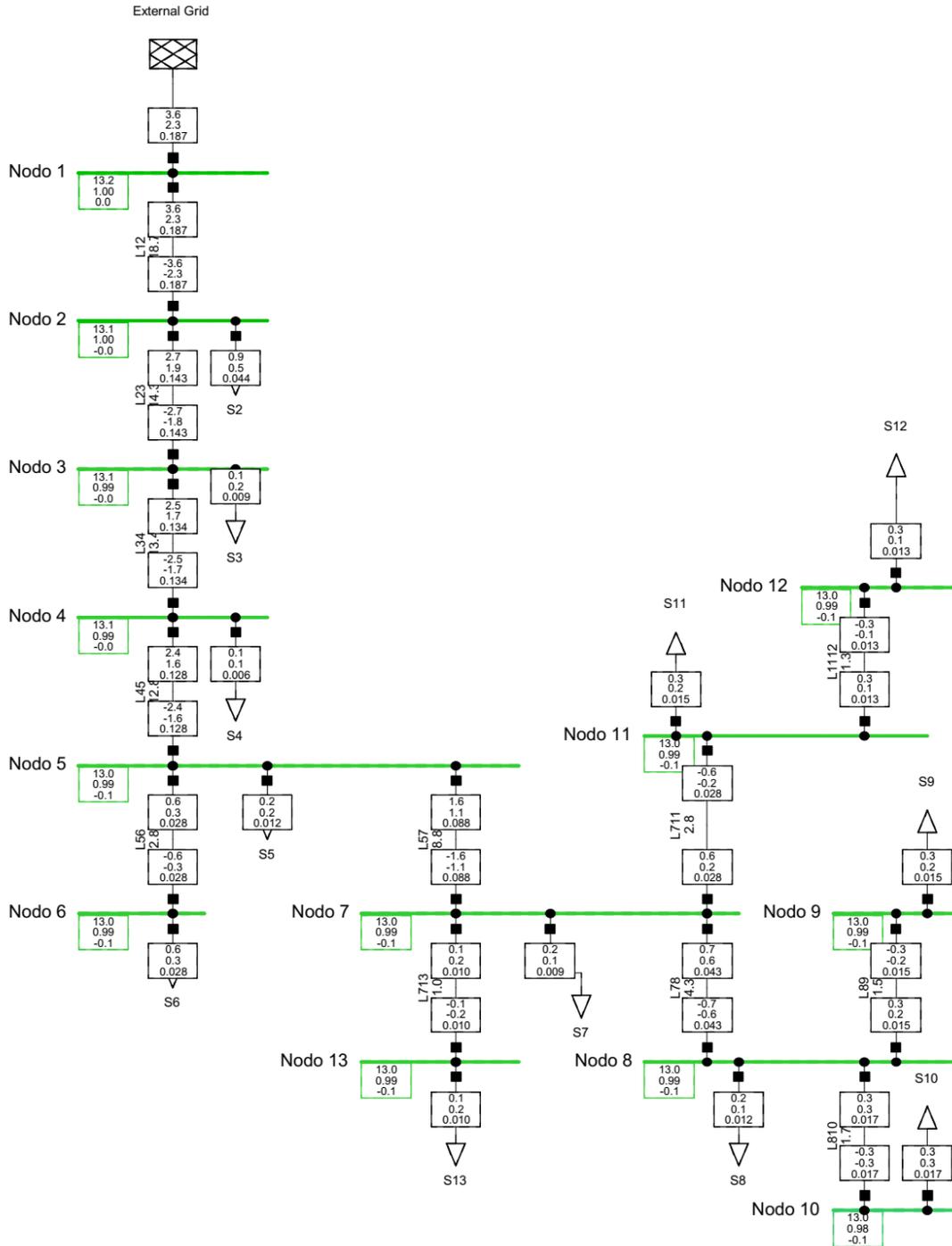
Para calcular como primera aproximación la capacidad nominal de los fusibles en las derivaciones indicadas en la tabla No.8, tomando en consideración que el fusible tipo K es de fusión rápida y deberá soportar un 150% de su intensidad nominal con un funcionamiento normal; se procedió a realizar el cálculo de flujo de carga en el modelo de red radial IEEE-13, mediante el programa Digsilent V15.1, para determinar las corrientes nominales circulantes en cada tramo de red y dividir esta corriente entre 1.5 para determinar la capacidad del fusible en cada tramo. Los resultados de esta simulación se presentan en la figura No.25 y en las tablas de resultados No.11 al No.13

Como voltaje nominal de la red se establecido el valor de 13.2 kV.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 25 Resultados del Flujo de carga Red radial IEEE-13



Fuente: Elaboración Propia digsilent



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Tabla 11 Resumen del Flujo de Carga

		DigSILENT PowerFactory 15.1.7	Project: Date: 7/19/2021		
Load Flow Calculation			Total System Sum		
AC Load Flow, balanced, positive sequence		Automatic Model Adaptation for Convergence		No	
Automatic Tap Adjust of Transformers		Max. Acceptable Load Flow Error for Nodes		1.00	
Consider Reactive Power Limits		Model Equations		0.10	
Total System Summary			Study Case: Study Case		
Annex:					
No. of Substations	0	No. of Busbars	13	No. of Terminals	0
No. of 2-w Trfs.	0	No. of 3-w Trfs.	0	No. of syn. Machines	0
No. of Loads	12	No. of Shunts	0	No. of SVS	0
Generation	= 0.00	MW	0.00	Mvar	0.00
External Infeed	= 3.58	MW	2.34	Mvar	4.27
Load P(U)	= 3.54	MW	2.31	Mvar	4.22
Load P(Un)	= 3.54	MW	2.31	Mvar	4.22
Load P(Un-U)	= 0.00	MW	0.00	Mvar	0.00
Motor Load	= 0.00	MW	0.00	Mvar	0.00
Grid Losses	= 0.04	MW	0.03	Mvar	0.00
Line Charging	=		0.00	Mvar	0.00
Compensation ind.	=		0.00	Mvar	0.00
Compensation cap.	=		0.00	Mvar	0.00
Installed Capacity	= 0.00	MW			
Spinning Reserve	= 0.00	MW			
Total Power Factor:					
Generation	= 0.00	[-]			
Load/Motor	= 0.84 / 0.00	[-]			

Fuente: Elaboración Propia digsilent

Tabla 12 Potencias y Corrientes en cada tramo de la Red

		DigSILENT PowerFactory 15.1.7	Project: Date: 7/19/2021					
Grid: 13n		System Stage: 13n	Study Case: Study Case					
		Annex:						
Name	Type	Loading [%]	Busbar	Active Power [MW]	Reactive Power [Mvar]	Power factor [-]	Current [kA]	Current [p.u.]
S10	Lod		Nodo 10	0.262	0.280	0.68	0.017	1.01
S11	Lod		Nodo 11	0.290	0.186	0.84	0.015	1.01
S12	Lod		Nodo 12	0.292	0.054	0.98	0.013	1.01
S13	Lod		Nodo 13	0.124	0.180	0.57	0.010	1.01
S2	Lod		Nodo 2	0.890	0.468	0.89	0.044	0.99
S3	Lod		Nodo 3	0.128	0.170	0.60	0.009	1.01
S4	Lod		Nodo 4	0.112	0.064	0.87	0.006	1.01
S5	Lod		Nodo 5	0.217	0.178	0.77	0.012	1.01
S6	Lod		Nodo 6	0.560	0.310	0.87	0.028	1.01
S7	Lod		Nodo 7	0.175	0.078	0.91	0.009	1.01
S8	Lod		Nodo 8	0.220	0.140	0.84	0.012	1.01
S9	Lod		Nodo 9	0.266	0.198	0.80	0.015	1.01
External Grid	Xnet		Nodo 1	3.576	2.337	0.84	0.187	0.00
L1112	Lne	1.32	Nodo 12	-0.292	-0.054	-0.98	0.013	0.01
			Nodo 11	0.292	0.054	0.98	0.013	0.01
L12	Lne	18.68	Nodo 1	3.576	2.337	0.84	0.187	0.18
			Nodo 2	-3.557	-2.323	-0.84	0.187	0.18
L23	Lne	14.29	Nodo 2	2.667	1.855	0.82	0.143	0.14
			Nodo 3	-2.656	-1.846	-0.82	0.143	0.14
L34	Lne	13.40	Nodo 3	2.528	1.676	0.83	0.134	0.13
			Nodo 4	-2.526	-1.674	-0.83	0.134	0.13
L45	Lne	12.83	Nodo 4	2.414	1.610	0.83	0.128	0.12
			Nodo 5	-2.410	-1.607	-0.83	0.128	0.12
L56	Lne	2.84	Nodo 5	0.560	0.310	0.87	0.028	0.02
			Nodo 6	-0.560	-0.310	-0.87	0.028	0.02
L57	Lne	8.77	Nodo 5	1.632	1.119	0.82	0.088	0.08
			Nodo 7	-1.630	-1.117	-0.82	0.088	0.08
L711	Lne	2.79	Nodo 11	-0.582	-0.240	-0.92	0.028	0.02
			Nodo 7	0.582	0.240	0.92	0.028	0.02

Fuente: Elaboración Propia digsilent



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Tabla 13 Voltajes en cada punto de la Red

Grid: 13n	System Stage: 13n				Study Case: Study Case			Annex:
	rtd.V [kV]	Bus - voltage [p.u.]	[kV]	[deg]	-10	-5	Voltage - Deviation [%]	+10
Nodo 1	13.20	1.000	13.20	0.00				
Nodo 2	13.10	1.002	13.13	-0.03				
Nodo 3	13.20	0.990	13.07	-0.04			█	
Nodo 4	13.20	0.989	13.06	-0.05			█	
Nodo 5	13.20	0.987	13.03	-0.05			█	
Nodo 6	13.20	0.987	13.03	-0.06			█	
Nodo 7	13.20	0.986	13.01	-0.06			█	
Nodo 13	13.20	0.986	13.01	-0.06			█	
Nodo 11	13.20	0.985	13.01	-0.06			█	
Nodo 8	13.20	0.985	13.00	-0.06			█	
Nodo 9	13.20	0.985	13.00	-0.06			█	
Nodo 10	13.20	0.985	13.00	-0.06			█	
Nodo 12	13.20	0.985	13.01	-0.07			█	

Fuente: Elaboración Propia digisilent

De acuerdo los resultados obtenidos de la simulación de flujo de carga, se resumió en la siguiente tabla las corrientes nominales de las derivaciones a proteger y su primera aproximación de capacidad de fusible.

Tabla 14 Corrientes nominales por tramo y capacidad de fusible

TRAMO	CARGA (A)	CÁLCULO DEL FUSIBLE
L12	186	
L23	143	
L34	134	
L45	128	
L56	28	
L57	88	59
L78	43	29
L711	28	19
L713	10	7
L89	15	10
L810	17	11
L1112	13	9

Fuente: Elaboración Propia



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

A partir de esta tabla de valores de capacidades de fusibles, se escoge el valor comercial apropiado, para posteriormente verificar la correspondiente coordinación por pares.

La primera aproximación con valores de fusibles normalizados comercialmente se indica en la tabla No.15

Tabla 15 Valores de fusibles Normalizados

TRAMO	CARGA (A)	CÁLCULO DEL FUSIBLE	FUSIBLE SELECCIONADO	NOMENCLATURA DE FUSIBLE UTILIZADA
L12	186			
L23	143			
L34	134			
L45	128			
L56	28			
L57	88	59	65	F57
L78	43	29	30	F78
L711	28	19	20	F711
L713	10	7	8	F713
L89	15	10	10	F89
L810	17	11	12	F810
L1112	13	9	10	F1112

Fuente: Elaboración Propia

Para poder realizar la correspondiente coordinación de protecciones Fusible-Fusible en las derivaciones, se procedió a realizar las simulaciones de cortocircuito trifásico en los nodos vinculantes de las derivaciones los resultados se indican a continuación.

5.5 Resultados de las simulaciones de cortocircuito en los diferentes nodos de las derivaciones.

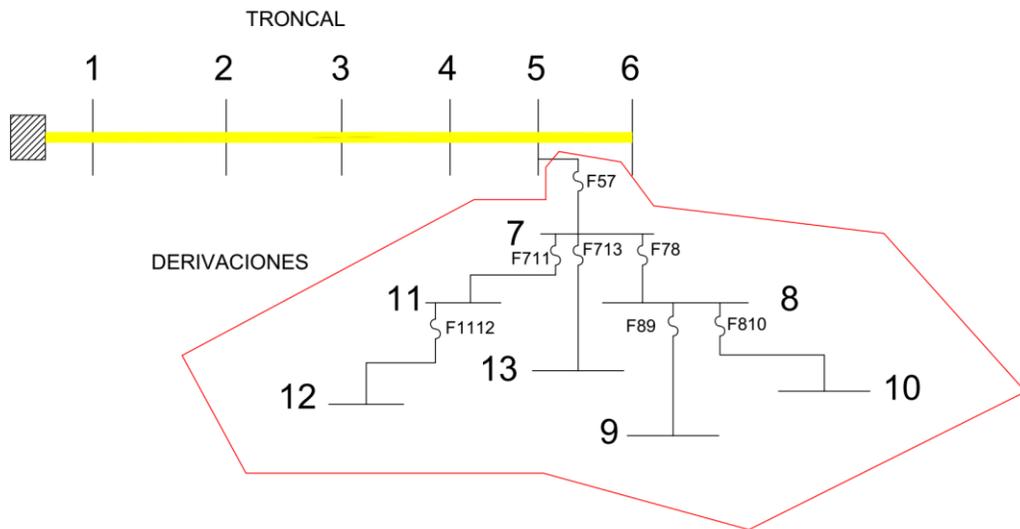
Conforme lo indicado en las premisas referidas en el acápite 5.2, del presente documento, se establece la coordinación entre el fusible protector y el fusible protegido, por pares, a partir de la carga hacia la fuente.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

En este se planteó la escogencia del siguiente gráfico, a partir del cual se realizó el estudio integral de coordinación fusible protector-fusible protegido.

Figura 26 Diagrama de derivaciones para coordinación de protecciones



Fuente: Elaboración Propia dgsilent

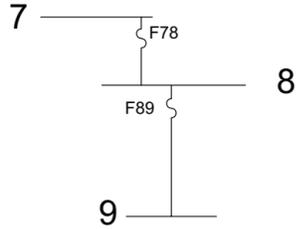
A partir de este diagrama la escogencia de pares de fusibles a coordinar se establece en la siguiente figura No.27



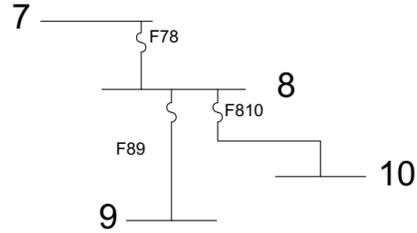
" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 27 Pares de fusibles a coordinar, Protector-Protegido.

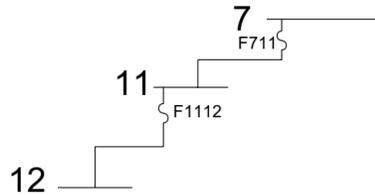
COORD. FUSIBLE F78 y F89



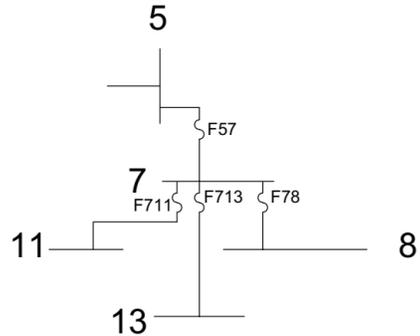
COORD. FUSIBLE F78, F810 y F89



COORD. FUSIBLE F711 CON F1112



COORD. FUSIBLE F57, F711, F173 y F78



Fuente: Elaboración Propia digsilent

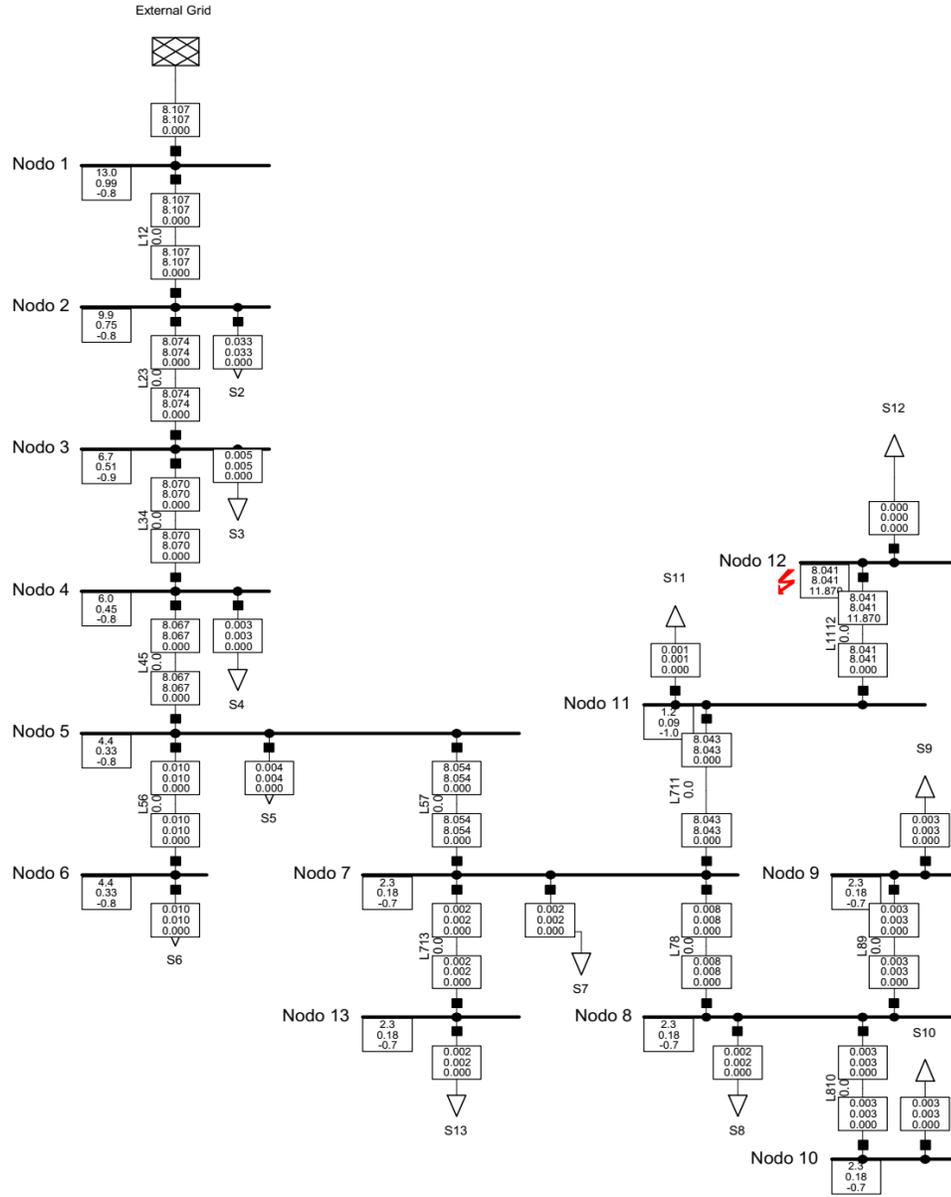
Los resultados de simulaciones de cálculo de cortocircuito en estos nodos se resumen a continuación:

Cálculo de cortocircuito en Nodo 12 para coordinación de Fusibles F711 con F1112.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 26 Resultados del corto circuito en nodo 12 Red radial IEEE-13



Fuente: Elaboración Propia digilent

El valor de la corriente de cortocircuito trifásica obtenida es de 8,041 amperios.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Cálculo de cortocircuito en Nodo 11 para coordinación de Fusibles F711 con

F57.

Figura 27 Resultados del corto circuito en nodo 11 Red radial IEEE-13



Fuente: propia digilent

El valor de la corriente de cortocircuito trifásica obtenida es de 8,858 amperios.

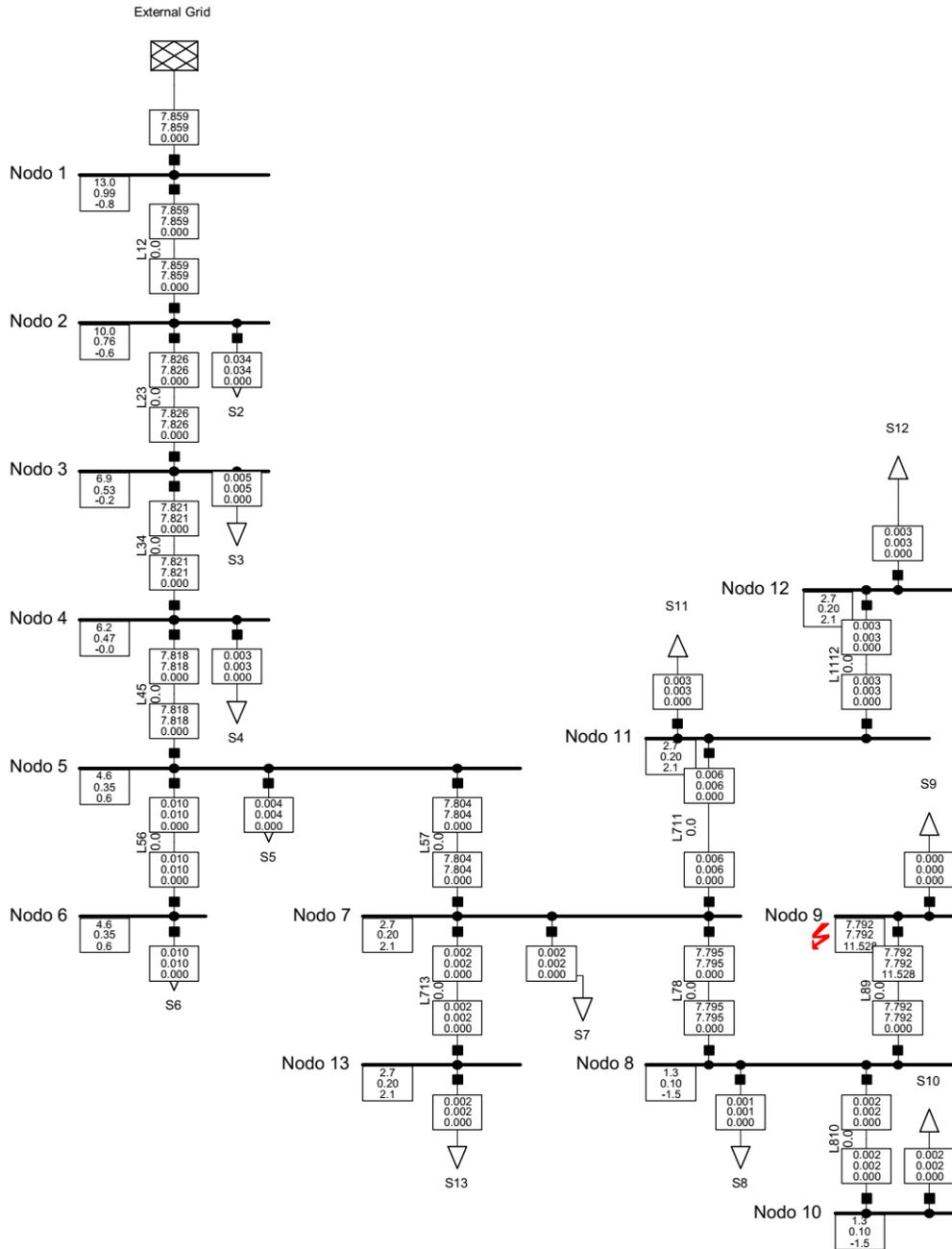


" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Cálculo de cortocircuito en Nodo 9 para coordinación de Fusibles F78 con

F89.

Figura 28 Resultados del corto circuito en nodo 9 Red radial IEEE-13



Fuente: propia digsilent

El valor de la corriente de cortocircuito trifásica obtenida es de 7,792 amperios.

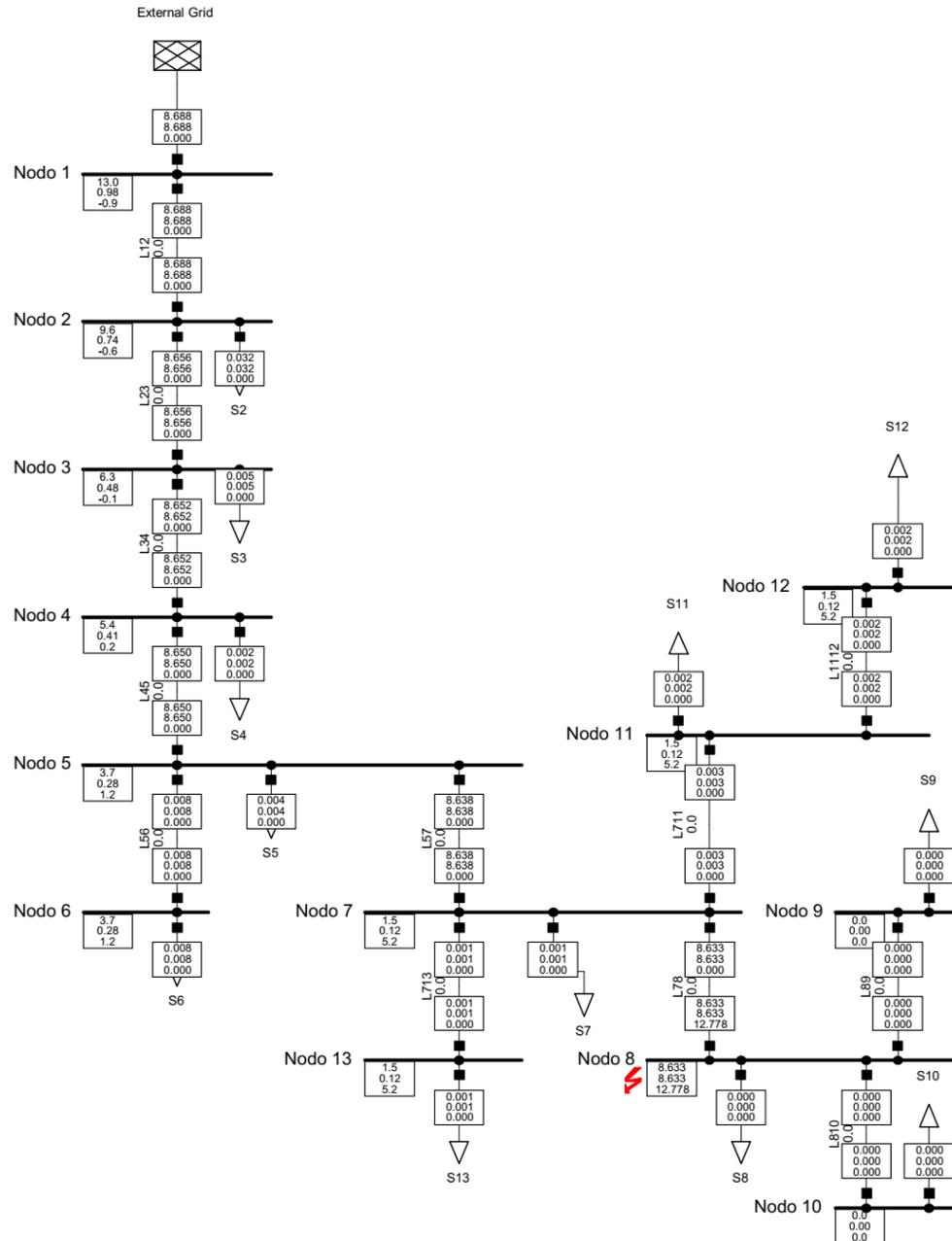


" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Cálculo de cortocircuito en Nodo 8 para coordinación de Fusibles F78 con

F57.

Figura 29 Resultados del corto circuito en nodo 8 Red radial IEEE-13



Fuente: propia digilent

El valor de la corriente de cortocircuito trifásica obtenida es de 8,633 amperios.

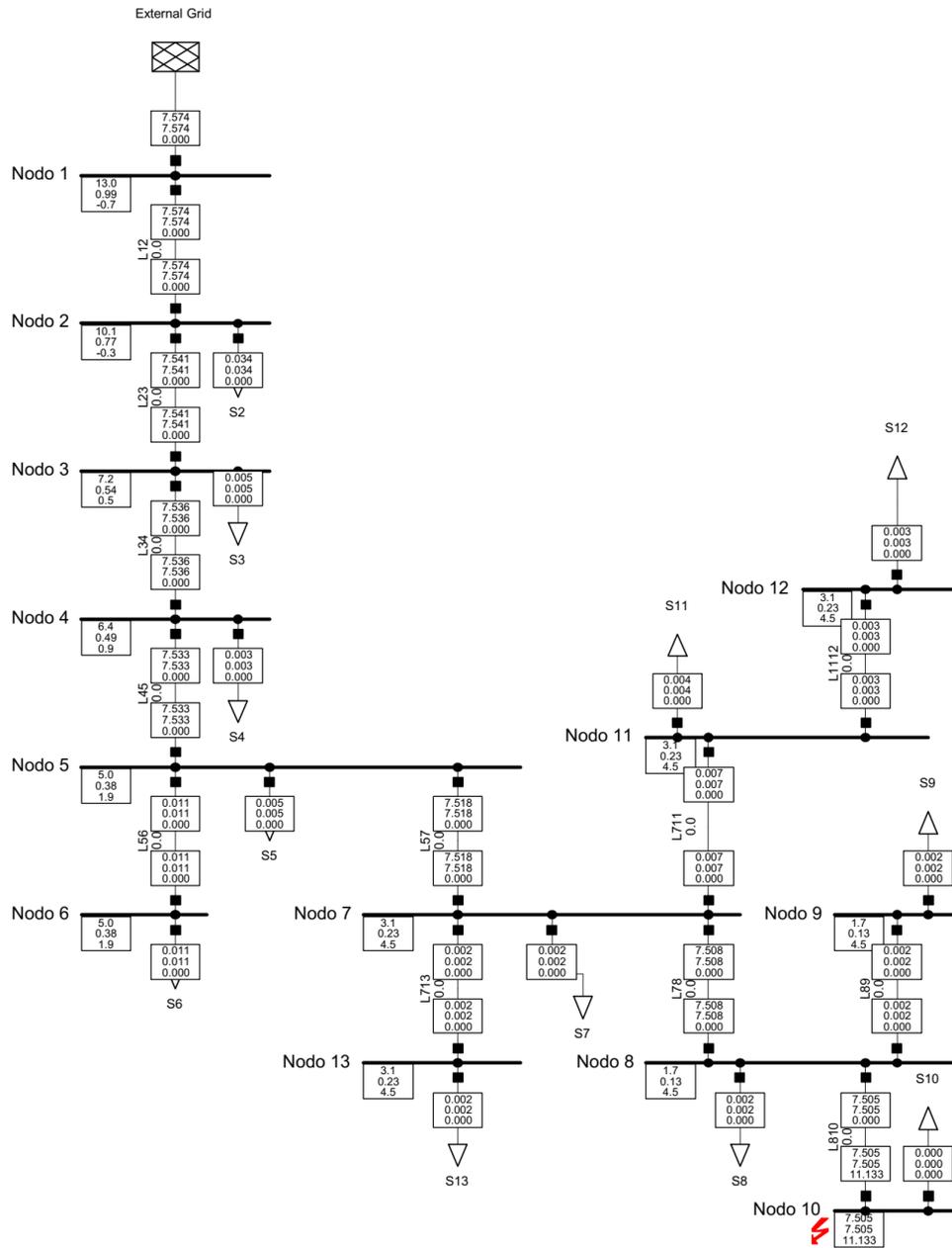


" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Cálculo de cortocircuito en Nodo 10 para coordinación de Fusibles F78 con

F810.

Figura 30 Resultados del corto circuito en nodo 10 Red radial IEEE-13



Fuene: propia digsilent.

El valor de la corriente de cortocircuito trifásica obtenida es de 7,505 amperios.

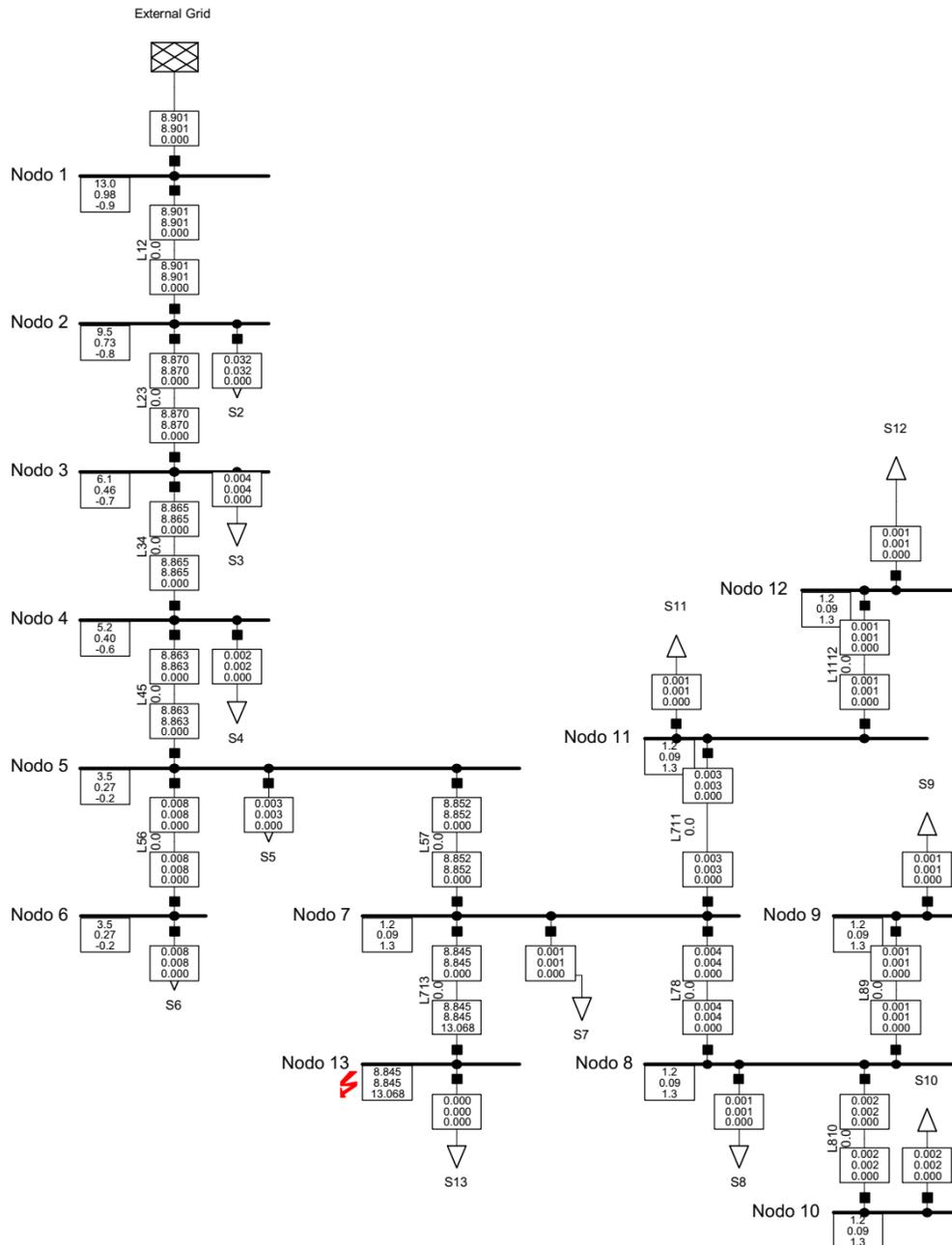


" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Cálculo de cortocircuito en Nodo 13 para coordinación de Fusibles F13 con

F57.

Figura 31 Resultados del corto circuito en nodo 13 Red radial IEEE-13



Fuente: propia digisilent

El valor de la corriente de cortocircuito trifásica obtenida es de 8,845 amperios.

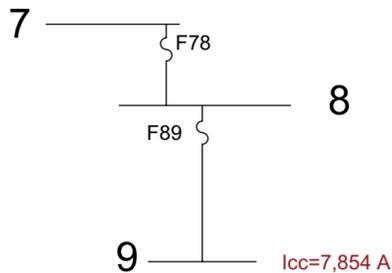


" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

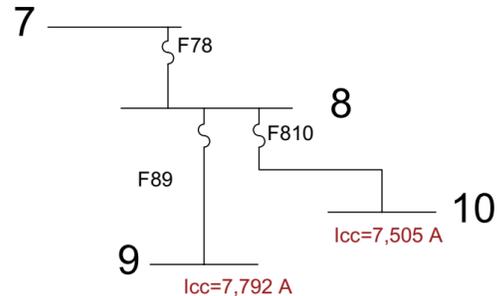
Los resultados obtenidos de las simulaciones de corrientes de cortocircuito por pares de fusibles a coordinar se muestran en la figura No.28

Figura 28 Pares de fusibles a coordinar y corrientes de cortocircuito

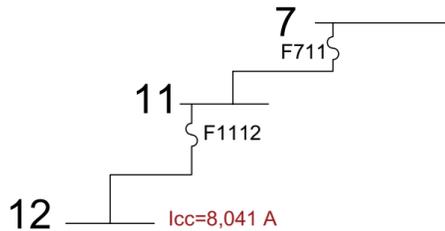
COORD. FUSIBLE F78 y F89



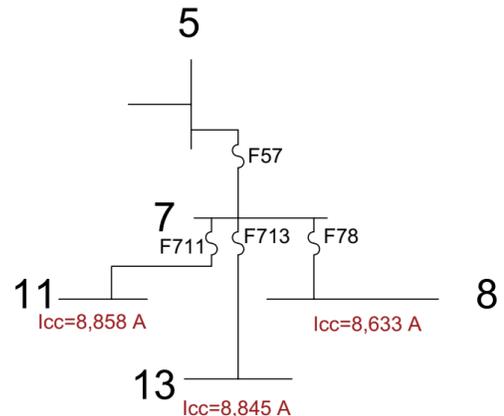
COORD. FUSIBLE F78, F810 y F89



COORD. FUSIBLE F711 CON F1112



COORD. FUSIBLE F57, F711, F173 y F78



Fuente: propia digsilent

A partir de estos datos de corrientes de cortocircuito, se procedió a validar la coordinación de fusibles propuestos en la tabla No. 15, por pares (Fusible protector y Fusible protegido), utilizando como criterio de coordinación que se asegure que el valor máximo del tiempo de despeje del fusible protector para la corriente de falla no sea mayor a un 75% del tiempo mínimo de fusión del fusible protegido, para la misma corriente de falla.



5.6 Análisis y verificación de la coordinación integral de fusibles.

Para verificar el cumplimiento del criterio del 75% de la relación de tiempo de despeje del fusible protector y del fusible protegido se utilizaron los datos de las curvas de corriente versus tiempo de los fusibles tipo k. Como los datos de estas curvas son discretos, hemos utilizado la interpolación lineal para verificar el cumplimiento de este criterio.

En este caso la interpolación lineal consiste en:

Estimar la ubicación de un punto dentro de un intervalo numérico, suponiendo que los valores extremos de dicho intervalo están unidos por una recta. Conocida la ecuación de esta recta, es posible ubicar el punto desconocido.

$$Y = Y_0 + \frac{(Y_1 - Y_0)}{(X_1 - X_0)}(X - X_0) \quad \text{Ec. 04}$$

Para la interpolación, los valores de "X" corresponden a los datos de amperaje de cortocircuito de la curva de tiempo corriente de los fusibles tipo "k" y los valores de "Y" a los datos de tiempo de despeje de la curva.

A fin de validar rápidamente la relación de tiempo entre el fusible protector y el fusible protegido, se elaboró una tabla de interpolación en EXCEL con los datos de los pares de fusible a validar.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

1. Coordinación de Fusibles F1112 protector y F711 protegido o de respaldo.

Tabla 16 Cálculo de tiempos de despeje para fusibles 10k, 20k y 25 k

FUSIBLE F1112 = 10K PROTECTOR				FUSIBLE F711 = 20K PROTEGIDO				FUSIBLE F711 = 25K PROTEGIDO			
Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)	Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)	Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)
X ₀	2802.70	Y ₀	0.013472	X ₀	5117.09	Y ₀	0.013539	X ₀	6256.27	Y ₀	0.013607
X	8041	Y	0.013345	X	8041	Y	0.013395	X	8041	Y	0.013510
X ₁	10000.00	Y ₁	0.013298	X ₁	10000	Y ₁	0.013298	X ₁	10000	Y ₁	0.013404
							99.6%				98.8%

Tabla 17 Cálculos de tiempos de despejes para fusibles 30k, 40k y 50k

FUSIBLE F711 = 30K PROTEGIDO				FUSIBLE F711 = 40K PROTEGIDO				FUSIBLE F711 = 50K PROTEGIDO			
Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)	Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)	Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)
X ₀	7363.86	Y ₀	0.01373	X ₀	7641.43	Y ₀	0.014064	X ₁	7913.62	Y ₁	0.014348
X	8041	Y	0.013654	X	8041	Y	0.014015	X	8041	Y	0.014327
X ₁	8336.01	Y ₁	0.013621	X ₁	8658.87	Y ₁	0.013938	X ₂	8789.74	Y ₂	0.014205
			97.7%				95.2%				93.1%

Tabla 18 Cálculos de tiempos de despejes para fusibles 65k, 80k y 100k

FUSIBLE F711 = 65K PROTEGIDO				FUSIBLE F711 = 80K PROTEGIDO				FUSIBLE F711 = 100K PROTEGIDO			
Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)	Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)	Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)
X ₀	7527.66	Y ₀	0.015144	X ₀	7772.44	Y ₀	0.016356	X ₁	7595.72	Y ₁	0.018404
X	8041	Y	0.014957	X	8041	Y	0.016168	X	8041	Y	0.017815
X ₁	8105.84	Y ₁	0.014933	X ₁	8419.79	Y ₁	0.015904	X ₂	8113.95	Y ₂	0.017718
			89.2%				82.5%				74.9%

Tabla 19 cálculo de tiempo de despeje para fusible 140k

FUSIBLE F711 = 140K PROTEGIDO			
Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)
X ₀	7788.01	Y ₀	0.028207
X	8041	Y	0.02729
X ₁	8113.95	Y ₁	0.02702
			48.9%

Fuente: propia

Al calcular la relación entre el tiempo de despeje del fusible protector (F1112) t_{fp} = 0.013345 segundos y el tiempo despeje del fusible protegido (F711) t_{fp}g = 0.02702 segundos, se obtiene:

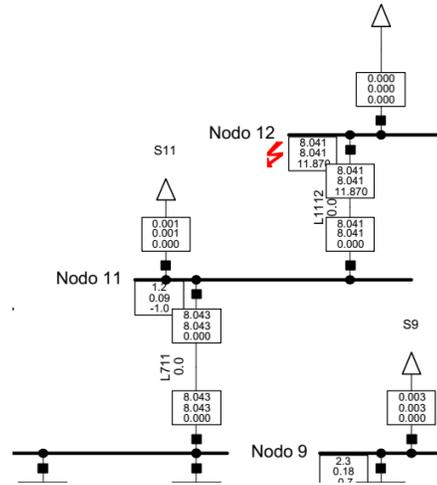
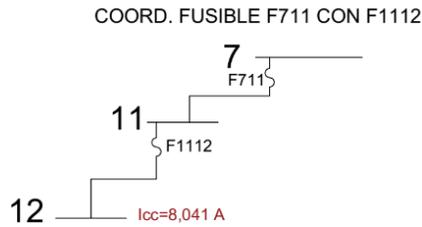
$$Relación = \frac{0.013345 \text{ seg}}{0.02702 \text{ seg}} = 48.9\% \text{ Cumple } \leq 75\%$$

Por lo tanto, se seleccionan: Fusible protector F1112= 10k; Fusible protegido F711 = 140 k.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Veamos la validación con la curva de coordinación en Digsilent para los fusibles F1112 y F711. Diagrama 29, cortocircuito nodo 12



Curva de coordinación obtenida en Digsilent.

Figura 30 Curva de coord.F1112 con F711

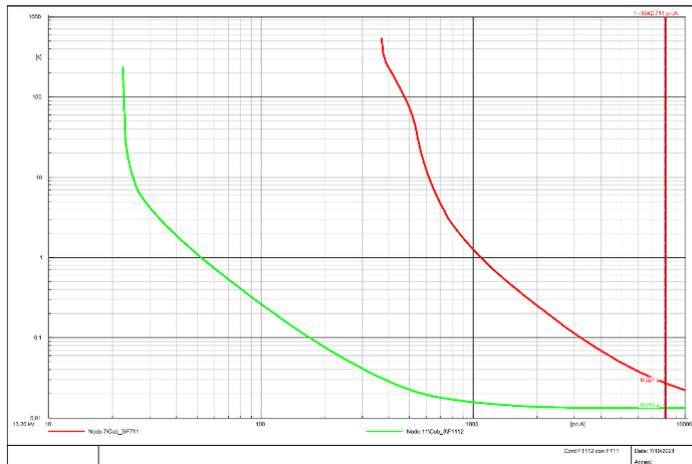
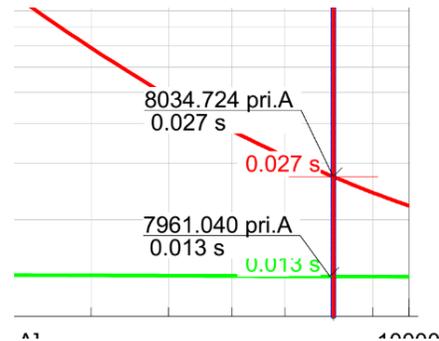


Figura 29 Curva ampliada de coord. F112 con F711



F1112 con F711	Date: 7/19/2021
	Annex:

Como se determina del análisis de coordinación integral entre los fusibles F1112=10k protector del fusible F711= 140 k (respaldo o protegido), se dispara primero ante un evento por cortocircuito el fusible F1112 en un tiempo de 0.013

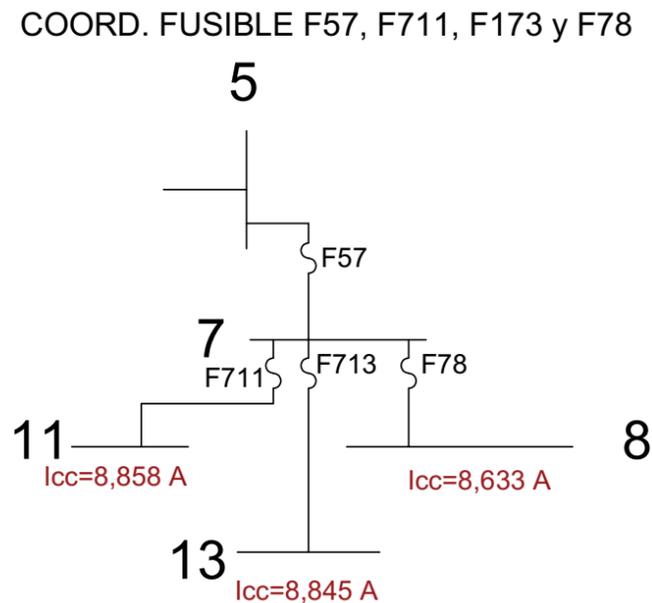


segundos y en caso de no actuar se dispara el fusible de respaldo F711 en un tiempo de 0.02277 segundos.

2. Coordinación de Fusibles F711 protector y F57 protegido o de respaldo.

De los resultados de anteriores en el ítem No.1, se determinó que el fusible F711= 140k, ahora realizaremos la coordinación entre pares de los fusibles F711 y F57, de acuerdo con el siguiente diagrama.

Figura 31 Diagrama de fusibles a coordinar



Fuente: Digsilent

Como vemos en este diagrama el fusible F57 se convierte en fusible de respaldo para los fusibles F711, F713 y F78, por lo tanto, debemos evaluar el criterio de



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

coordinación del 75%, entre pares de fusible, empezaremos primero con los fusibles F711 protector (140k) y F57 protegido o de respaldo.

En este caso como el fusible F711 protector ya está definido, debemos seleccionar para el fusible F57 un fusible de mayor capacidad en este caso el de 200k.

Tabla 20 Cálculo del tiempo de despejes para fusibles de 140k y 200k

FUSIBLE F711 = 140K PROTECTOR				FUSIBLE F57 = 200K PROTEGIDO			
Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)	Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)
X ₀	8512.92	Y ₀	0.025728	X ₀	8780.95	Y ₀	0.041289
X	8858	Y	0.024741	X	8858	Y	0.040860
X ₁	8994.24	Y ₁	0.024351	X ₁	9398.82	Y ₁	0.037848
							32.7%

Fuente: propia

Al calcular la relación entre el tiempo de despeje del fusible protector (F711) $t_{fpr} = 0.024741$ segundos y el tiempo despeje del fusible protegido (F57) $t_{fpg} = 0.040860$ segundos, se obtiene:

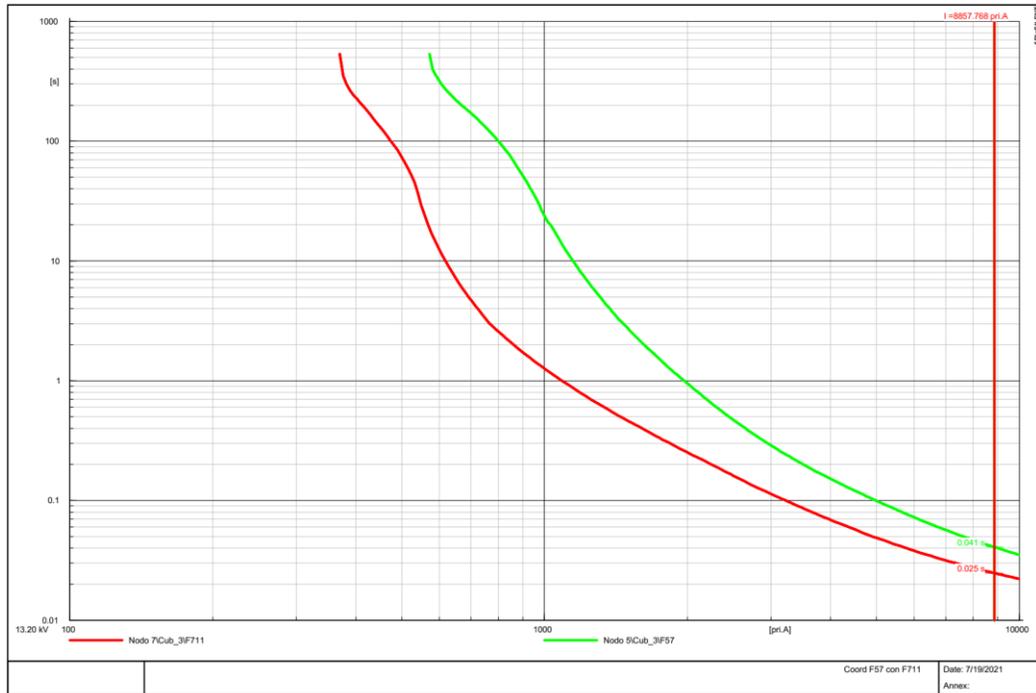
$$Relación = \frac{0.024741 \text{ seg}}{0.040860 \text{ seg}} = 32.7\% \text{ Cumple } \leq 75\%$$

Por lo tanto, se seleccionan: Fusible protector F711= 140k; Fusible protegido F57 = 200 k.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 32 Curva de coord. F711 con F57

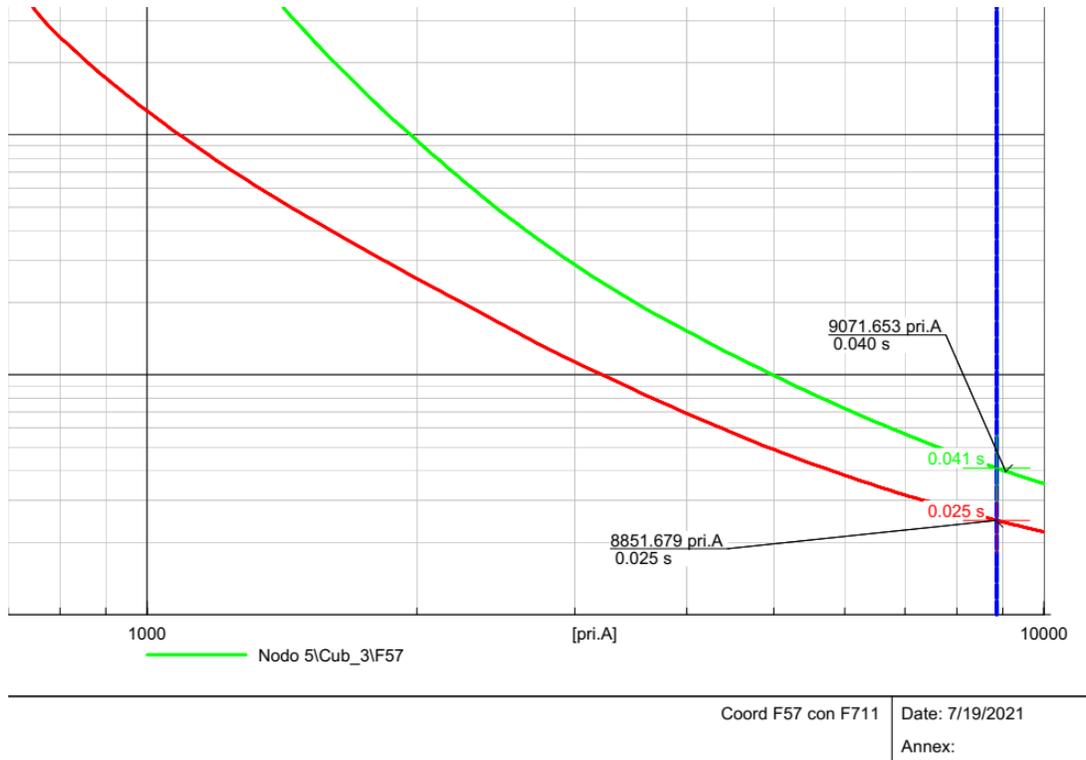


Fuente: Digsilent



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 33 Curva de coord. F711 con F57 aumentada



Fuente: Digsilent

Como se determina del análisis de coordinación integral entre los fusibles F711=140k protector del fusible F57= 200 k (respaldo o protegido), se dispara primero ante un evento por cortocircuito el fusible F711 en un tiempo de 0.025 segundos y en caso de no actuar se dispara el fusible de respaldo F57 en un tiempo de 0.041 segundos.



3. Coordinación de Fusibles F713 protector y F57 protegido o de respaldo.

De los resultados de anteriores en el ítem No.2, se determinó que el fusible F57= 200k, ahora realizaremos la coordinación entre pares de los fusibles F713 y F57, de acuerdo con el diagrama de la figura No.31. Debemos sólo la coordinación entre los fusibles F57 = 200k y F713 = 8k.

Tabla 21 Cálculo de tiempo de despeje de fusibles 8 k y 200 k

FUSIBLE F713 = 8K PROTECTOR				FUSIBLE F57 = 200K PROTEGIDO			
Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)	Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)
X ₀	2763.74	Y ₀	0.013485	X ₀	8780.95	Y ₀	0.041289
X	8845	Y	0.013328	X	8845	Y	0.040932
X ₁	10000	Y ₁	0.013298	X ₁	9398.82	Y ₁	0.037848
							32.6%

Fuente: propia

Al calcular la relación entre el tiempo de despeje del fusible protector (F713) $t_{fpr} = 0.013328$ segundos y el tiempo despeje del fusible protegido (F57) $t_{fpg} = 0.040932$ segundos, se obtiene:

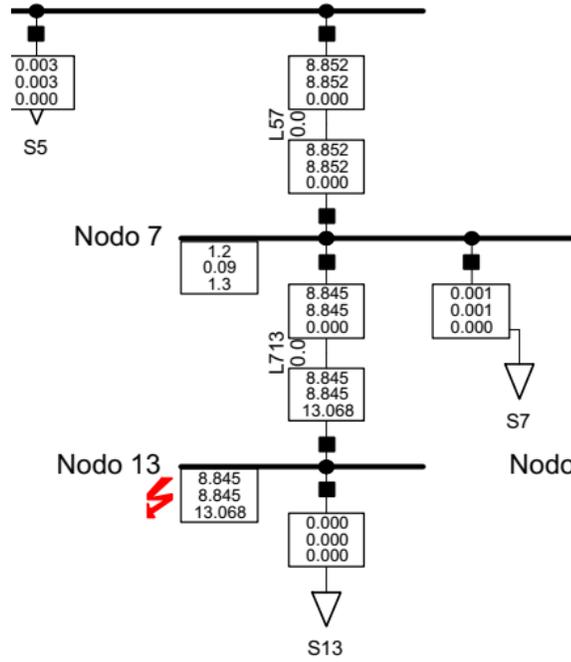
$$Relación = \frac{0.013328 \text{ seg}}{0.040932 \text{ seg}} = 32.6\% \text{ Cumple } \leq 75\%$$

Por lo tanto, se seleccionan: Fusible protector F13= 8k; Fusible protegido F57 = 200 k.

Veamos la validación con la curva de coordinación en Digsilent para los fusibles F713 y F57.



Diagrama 31, cortocircuito nodo 13



Fuente: propia



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 34 Curva de coord.F713 con F57

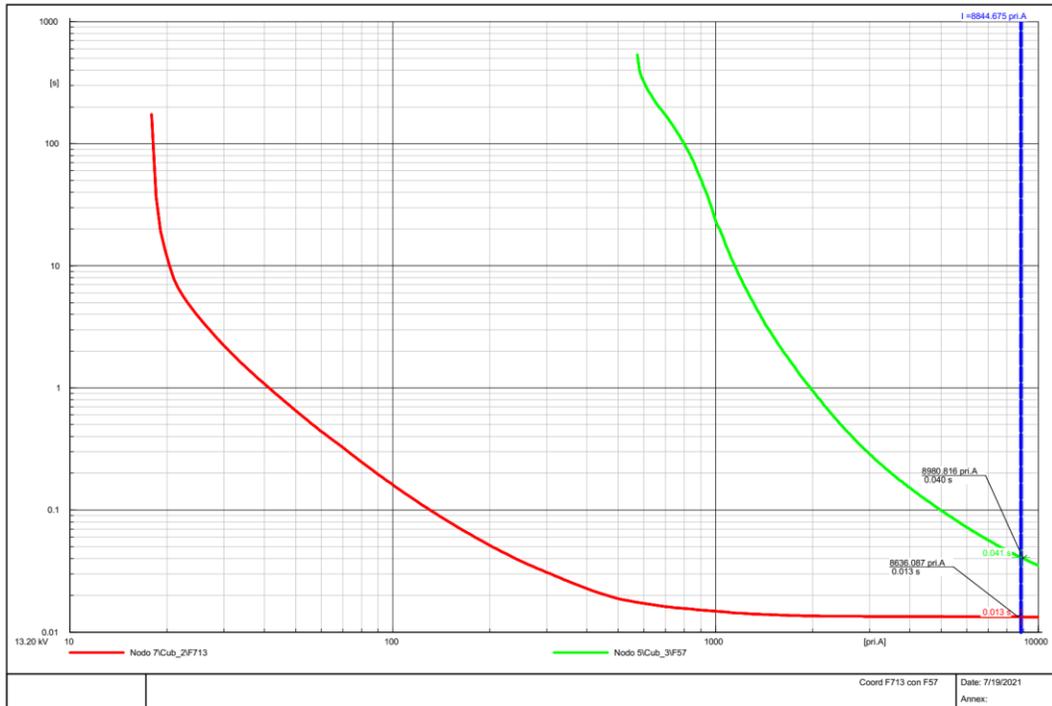
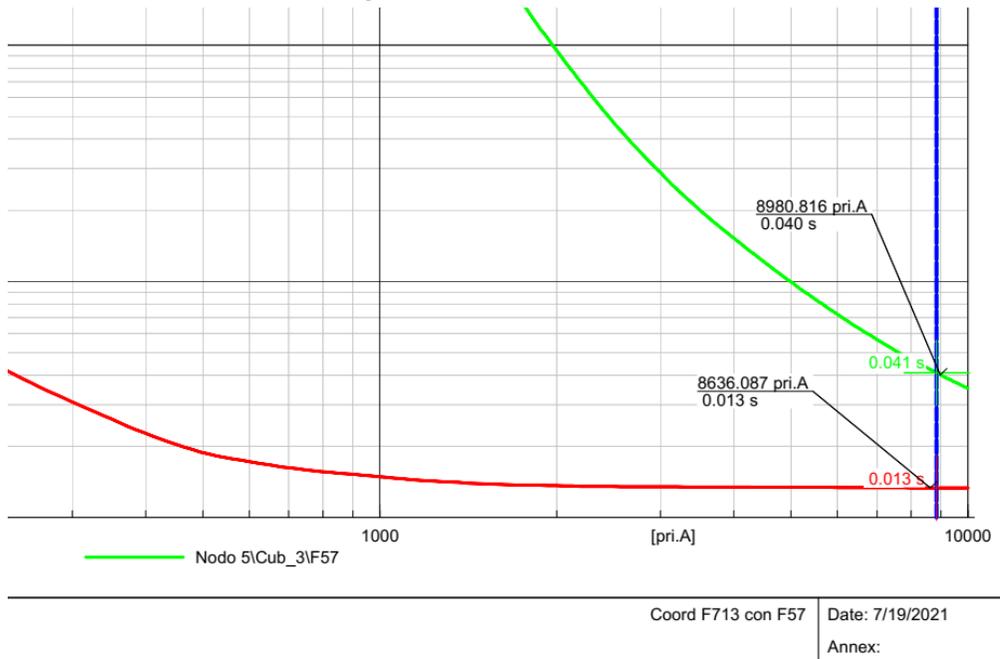


Figura 35 Curva de coord. F713 con F57 aumentada



Fuente: Digsilent.



Como se determina del análisis de coordinación integral entre los fusibles F713=8k protector del fusible F57= 200 k (respaldo o protegido), se dispara primero ante un evento por cortocircuito el fusible F713 en un tiempo de 0.013 segundos y en caso de no actuar se dispara el fusible de respaldo F57 en un tiempo de 0.041 segundos.

4. Coordinación de Fusibles F78 protector y F57 protegido o de respaldo.

De los resultados de anteriores en el ítem No.2, se determinó que el fusible F57= 200k, se escoge el fusible F78(protector) de un valor inferior = 140 k; ahora realizaremos la coordinación entre pares de los fusibles F78 y F57, de acuerdo con el diagrama de la figura No.31. Debemos sólo validar la coordinación entre los fusibles F57 = 200k y F78 = 140k.

Tabla 22 Cálculo de despeje de fusibles 140k y 200k

FUSIBLE F78 = 140K PROTECTOR				FUSIBLE F57 = 200K PROTEGIDO			
Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)	Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)
X ₀	8512.92	Y ₀	0.025728	X ₀	8162.78	Y ₀	0.045449
X	8633	Y	0.025384	X	8633	Y	0.042285
X ₁	8994.24	Y ₁	0.024351	X ₁	8780.95	Y ₁	0.041289
							31.6%

Fuente: propia

Al calcular la relación entre el tiempo de despeje del fusible protector (F78) $t_{fpr} = 0.025384$ segundos y el tiempo despeje del fusible protegido (F57) $t_{fpg} = 0.042285$ segundos, se obtiene:

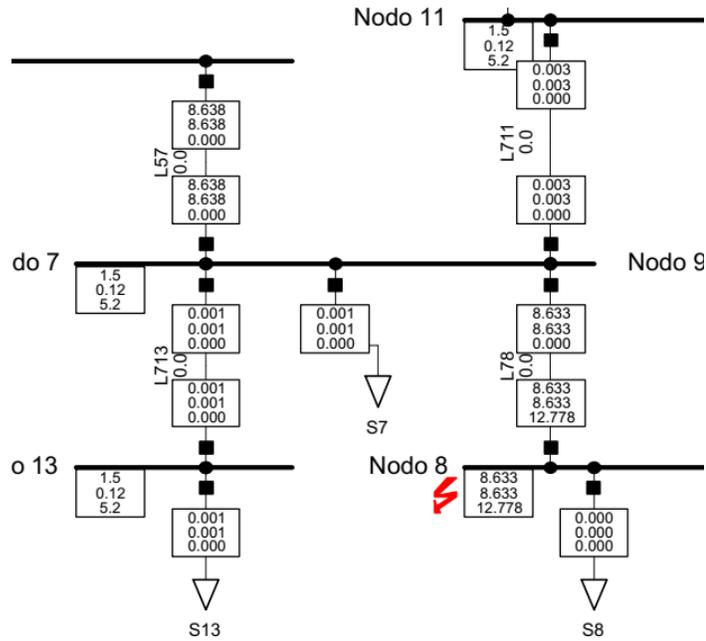
$$Relación = \frac{0.025384 \text{ seg}}{0.042285 \text{ seg}} = 31.6\% \text{ Cumple } \leq 75\%$$

Por lo tanto, se seleccionan: Fusible protector F78= 140k; Fusible protegido F57 = 200 k.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Veamos la validación con la curva de coordinación en Digsilent para los fusibles F78 y F57.
Diagrama N°32, corto circuito nodo 8

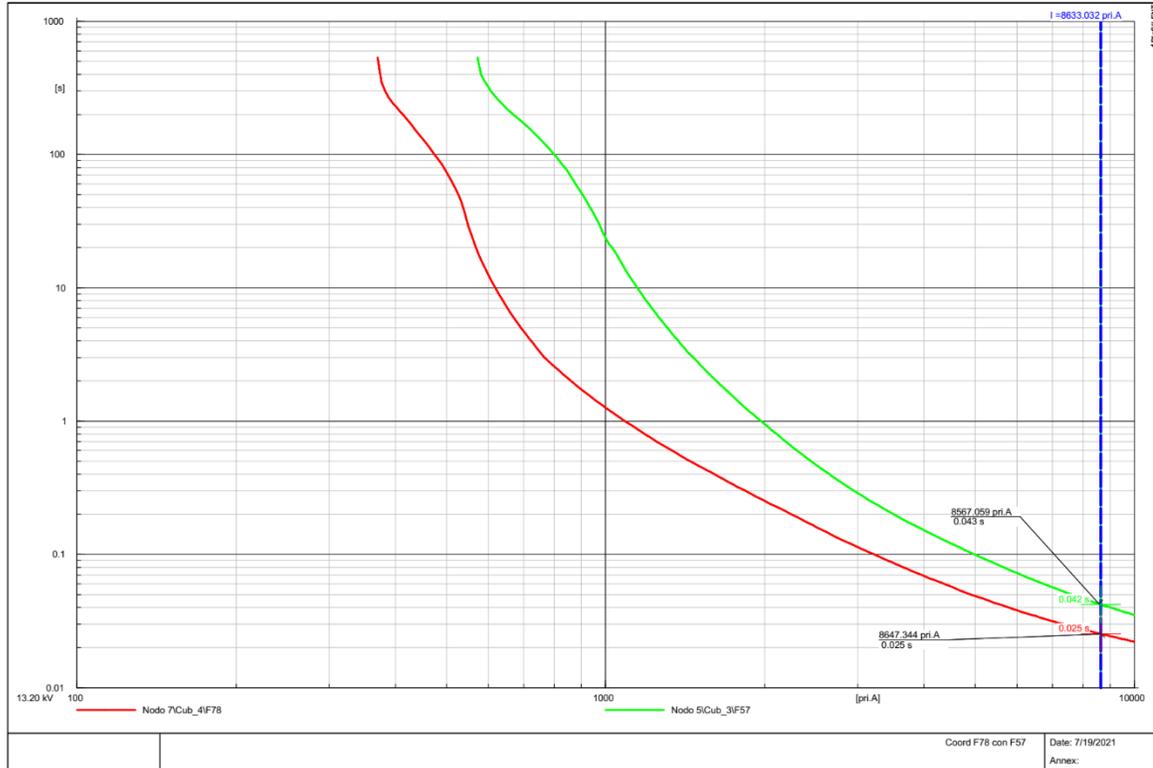


Fuente: Digsilent



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 36 Curva de coord. F78 con F57

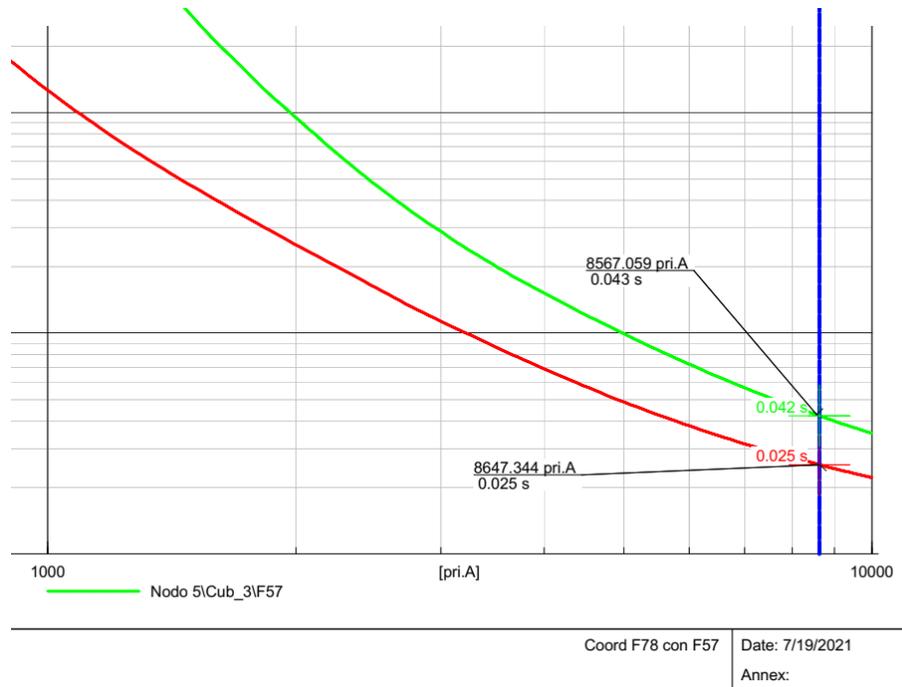


Fuente: Digsilent



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 37 Curva de coord. F78 con F57 aumentada



Fuente: Digsilent

Como se determina del análisis de coordinación integral entre los fusibles F78=30k protector del fusible F57= 200 k (respaldo o protegido), se dispara primero ante un evento por cortocircuito el fusible F78 en un tiempo de 0.025 segundos y en caso de no actuar se dispara el fusible de respaldo F57 en un tiempo de 0.042 segundos.

5. Coordinación de Fusibles F89 protector y F78 protegido o de respaldo.

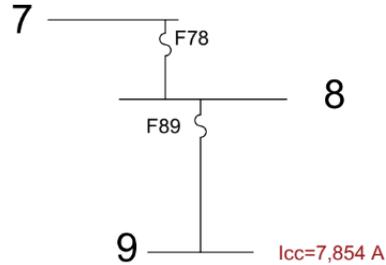
De los resultados de anteriores en el ítem No.4, se determinó que el fusible F78= 140k, ahora realizaremos la coordinación entre pares de los fusibles F78 y F89, de acuerdo con el siguiente diagrama.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 38 Coord. de fusibles F78 y F89

COORD. FUSIBLE F78 y F89



Fuente: Digsilent

Por lo tanto, vamos a verificar sólo el cumplimiento del criterio del 75% de la relación de tiempo de despeje del fusible protector F89= 10k y del fusible protegido F78=140k.

Tabla 23 Cálculo de tiempos de despeje fusibles F89 y F78

FUSIBLE F89 = 10K PROTECTOR				FUSIBLE F78 = 140K PROTEGIDO			
Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)	Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)
X ₀	2802.70	Y ₀	0.013472	X ₀	7788.01	Y ₀	0.028207
X	7854	Y	0.013350	X	7854	Y	0.027967
X ₁	10000.00	Y ₁	0.013298	X ₁	8113.95	Y ₁	0.02702
							47.7%

Fuente: Propia

Al calcular la relación entre el tiempo de despeje del fusible protector (F89) $t_{fpr} = 0.013350$ segundos y el tiempo despeje del fusible protegido (F78) $t_{fpg} = 0.027967$ segundos, se obtiene:

$$Relación = \frac{0.013350 \text{ seg}}{0.027967 \text{ seg}} = 47.7\% \text{ Cumple } \leq 75\%$$

Veamos la validación con la curva de coordinación en Digsilent para los fusibles F89 y F78.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

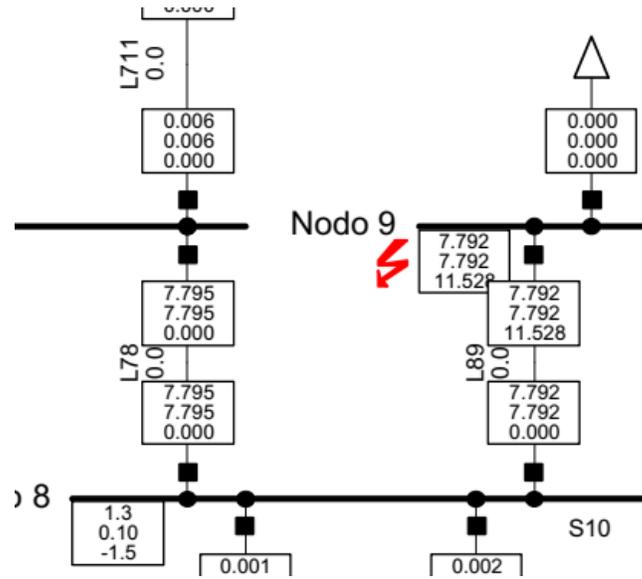
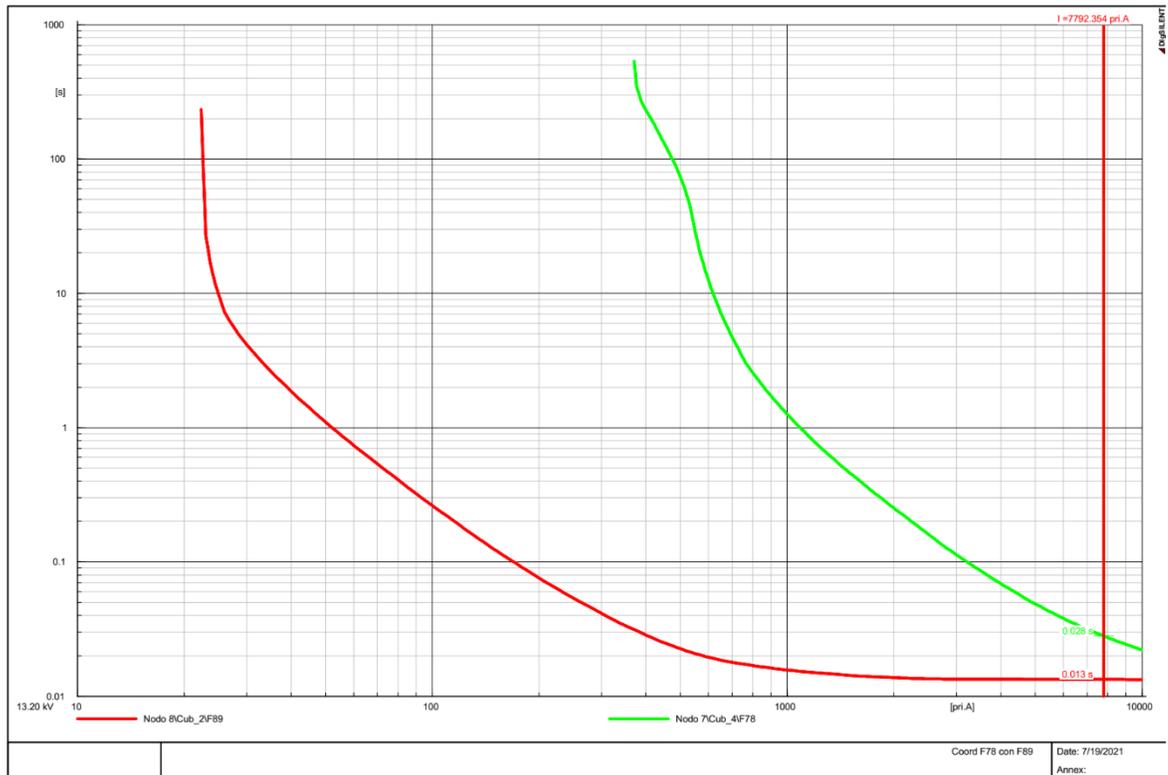


Figura 39 Curva de coord.F89 con F78

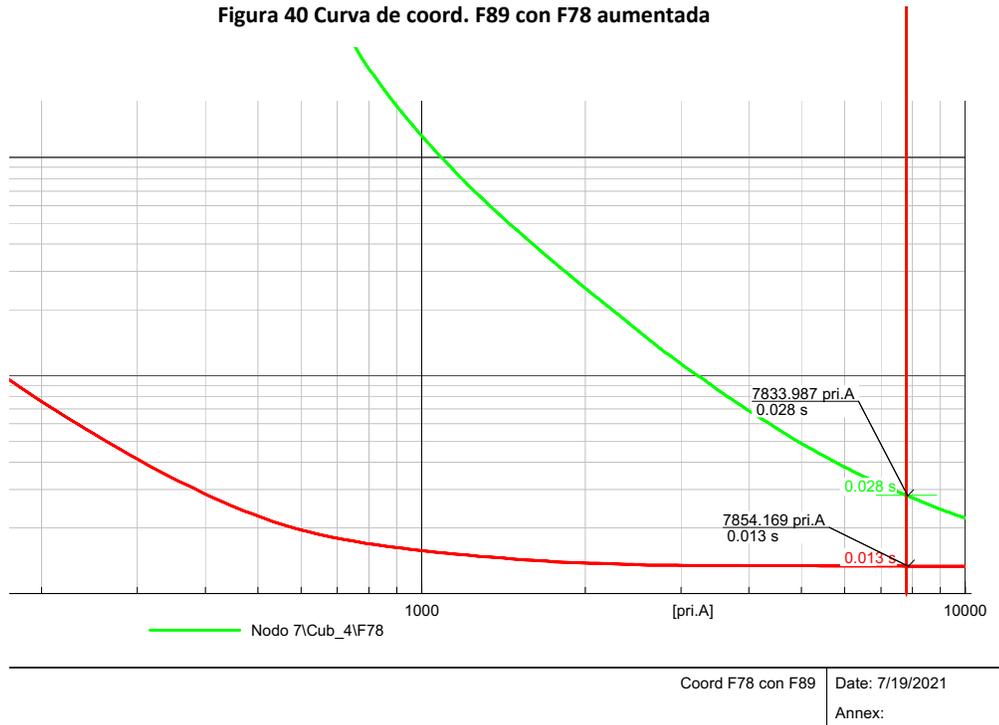


Fuente: Digsilent



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 40 Curva de coord. F89 con F78 aumentada



Fuente: Digsilent

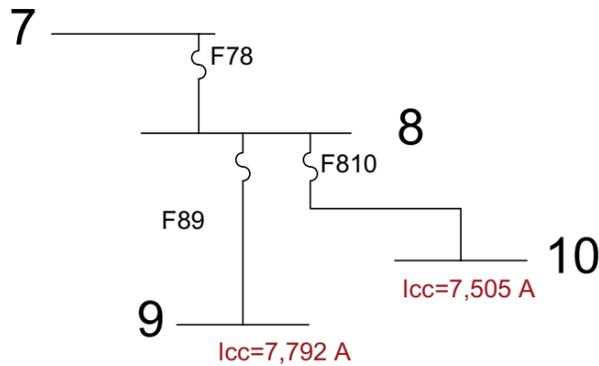
6. Coordinación de Fusibles F810 protector y F78 protegido o de respaldo.

Ya en el ítem No.5, se realizó la coordinación de fusibles F89 = 10k protector y F78 =140 k protegido, ahora vamos a realizar la coordinación entre el fusiles F810 = 12k fusible protector (Ver tabla No.15) y el fusible F78 = 140 k protegido, de acuerdo con el siguiente diagrama.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

COORD. FUSIBLE F78, F810 y F89



Fuente: Digsilent

Tabla 24 Cálculo del tiempo de despejes para fusibles de 12k y 140k

FUSIBLE F810 = 12K PROTECTOR				FUSIBLE F78 = 140K PROTEGIDO			
Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)	Variable	Corriente(A)	Variable	Tiempo(seg)
X ₀	3798.42	Y ₀	0.013593	X ₀	7393.38	Y ₀	0.029743
X	7505	Y	0.013417	X	7505	Y	0.029309
X ₁	10000	Y ₁	0.013298	X ₁	7788.01	Y ₁	0.028207
							45.5%

Fuente: Propia

Al calcular la relación entre el tiempo de despeje del fusible protector (F810) $t_{fpr} = 0.013417$ segundos y el tiempo despeje del fusible protegido (F78) $t_{fpg} = 0.029309$ segundos, se obtiene:

$$Relación = \frac{0.013417 \text{ seg}}{0.029309 \text{ seg}} = 45.5\% \text{ Cumple } \leq 75\%$$



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Veamos la validación con la curva de coordinación en Digsilent para los fusibles F810 y F78.

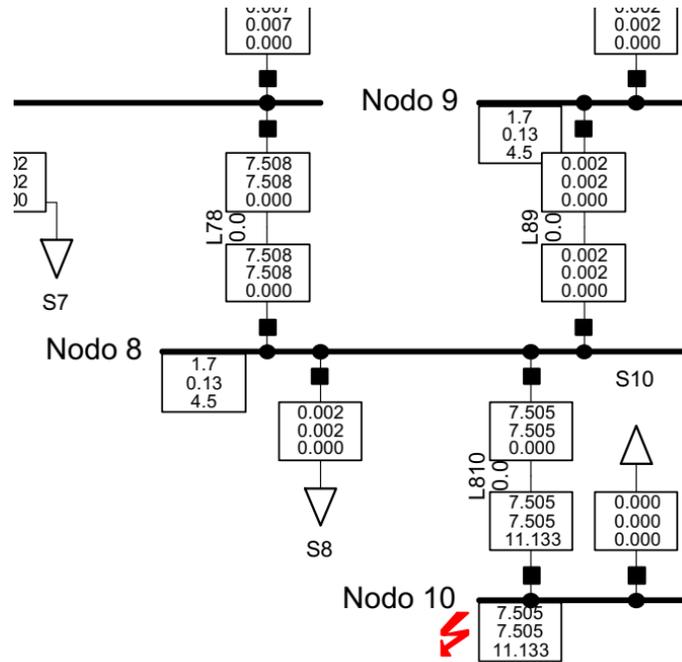
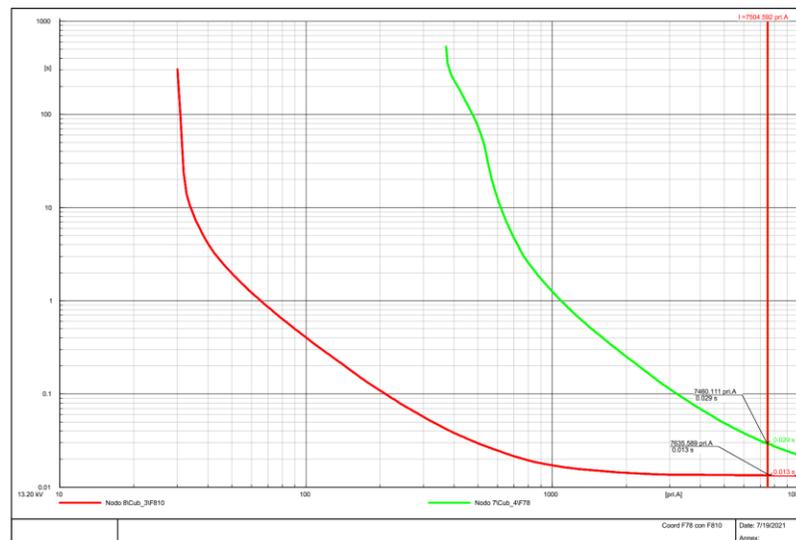


Figura 41 Curva de coord. F810 con F78

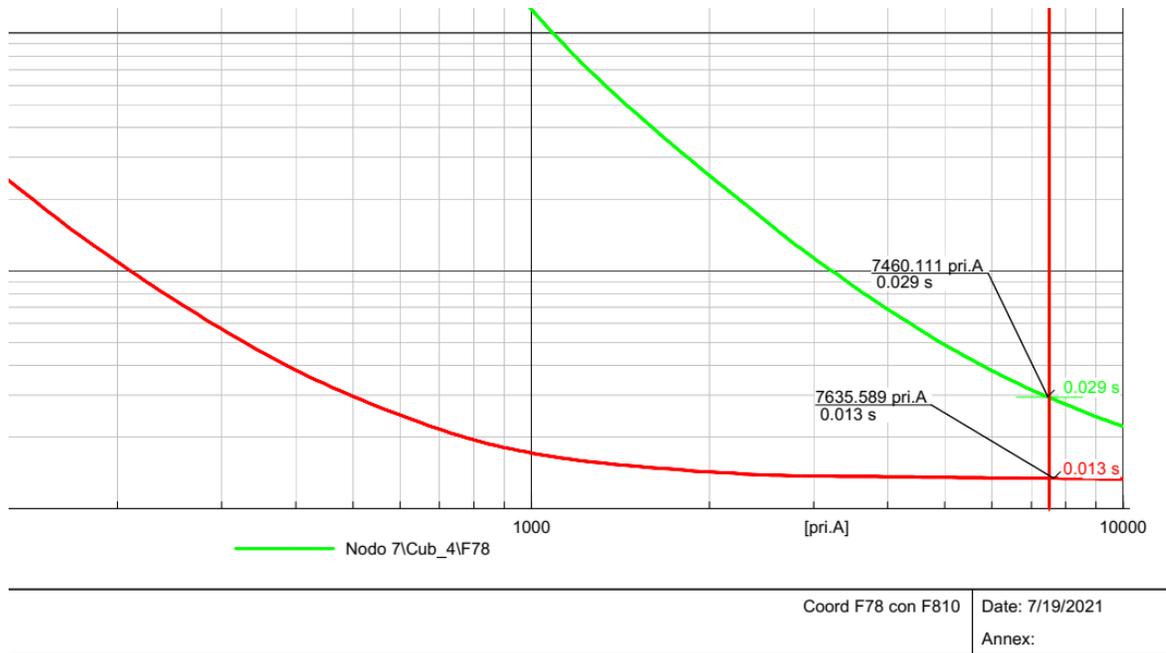


Fuente: Digsilent



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Figura 42 Curva de coord. F810 con F78 aumentada



Fuente: Digsient

Como se determina del análisis de coordinación integral entre los fusibles F78 protegido de los fusibles F810 y F89, que disparan primero los fusibles protectores F810 y F78.

De esta forma se establece la coordinación de los fusibles de las derivaciones indicadas en la siguiente tabla No.25, con los valores ya validados previamente.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Tabla 25 Fusibles validados con Digsilent para coordinación de protecciones

TRAMO	CARGA (A)	CÁLCULO DEL FUSIBLE	NOMENCLATURA DE FUSIBLE UTILIZADA	FUSIBLE VALIDADO POR COORDINACIÓN
L12	186			
L23	143			
L34	134			
L45	128			
L56	28			
L57	88	59	F57	200
L78	43	29	F78	140
L711	28	19	F711	140
L713	10	7	F713	8
L89	15	10	F89	10
L810	17	11	F810	12
L1112	13	9	F1112	10

Fuente: propia



Capítulo 6.- Resultados obtenidos de la investigación, coordinación integral de circuitos de distribución radial de media tensión.



6.1 Resultados de la investigación.

En este capítulo resumimos todos los resultados obtenidos en esta investigación, donde se realizó un estudio integral de protecciones en las derivaciones de red, de un circuito de distribución radial (modelo IEEE-13 nodos), utilizando el programa computacional Digsilent V15.1.

Los resultados se resumen a continuación:

1. El estudio de protección integral de un circuito de distribución radial bajo un esquema de protección convencional, bajo el esquema de coordinación fusible-fusible por pares, tomando como parámetro de coordinación la falla de cortocircuito más severa, la falla trifásica en los nodos vinculantes a coordinar.
2. Durante el proceso de coordinación por sobrecorriente entre fusibles, que el valor máximo del tiempo de despeje del fusible protector para la corriente de falla no sea mayor a un 75% del tiempo mínimo de fusión del fusible protegido, para la misma corriente de falla. Esto se validó en los gráficos de coordinación entre fusibles obtenidos en el programa Digsilent V15.1
3. El estudio integral de protecciones de las derivaciones de un circuito radial de distribución en media tensión, se pudo verificar que al existir una correcta coordinación de protecciones de forma selectiva, en donde el dispositivo fusible que debe de actuar primero (protector) lo hace y que no actuar este actuaría su respaldo(protegido), lógicamente los resultados obtenidos de la coordinación nos permitieron determinar que existe un margen de coordinación entre el fusible protegido y el fusible protector el cual no es inferior al 25% del tiempo de despeje entre el fusible protector y el fusible protegido.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

4. El estudio integral de protecciones de las derivaciones de un circuito radial de distribución en media tensión, se pudo verificar que no habrá desconexiones de carga inapropiadas, mejorando la calidad y continuidad del servicio eléctrico

5. El estudio integral de protecciones de las derivaciones de un circuito radial de distribución en media tensión, se pudo validar la rapidez de los tiempos de despeje de las fallas, la cual se encuentra en rangos de milisegundo. (13.33 mSeg hasta 40.93 mSeg)



Conclusiones y Recomendaciones.

Conclusiones

- Que cuando se realiza técnicamente mediante un análisis riguroso un estudio de coordinación de protecciones en un circuito de distribución radial de media tensión, que corresponda a derivaciones con fusibles de protección y se garantice tanto la premisa de relación de tiempo de despeje de la falla entre el fusible protector y del fusible protegido, menor o igual 75%, y de la rapidez de tiempo de despeje de la falla, se garantizará que no existan salidas de líneas intempestivas no vinculadas a las fallas, garantizando así la calidad y continuidad del servicio eléctrico a los usuarios finales . El modelamiento de la red de distribución radial en el programa computacional Digsilent, nos permitió identificar los diferentes elementos del circuito, tales como líneas, nodos y cargas, facilitando el proceso de simulación ya sea de flujo de carga como de cortocircuito.
- Que se logró utilizar la metodología tradicional aplicada a la coordinación de protecciones para luego mediante la utilización del programa computacional Digsilent V15.1 realizar el estudio de coordinación de protecciones integral de un circuito de distribución, que nos permitió simularla no sólo ahorrar tiempo de desarrollo del estudio sino garantizar la selectividad y tiempo de aislamiento de la falla por los dispositivos involucrados, la cual se visualiza gráficamente mediante el software.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

- Que al realizar el estudio de coordinación integral de protecciones con el programa computacional Digsilent V15.1, se logró validar gráficamente la correcta coordinación de protecciones entre el fusible protector y el fusible protegido, evaluando el cumplimiento de las premisas establecidas para su coordinación.



Recomendaciones

Recomendamos:

- Aplicar las condiciones evaluadas en esta investigación para coordinar de relé ubicados al inicio de la red troncal y en el caso de los clientes grandes consumidores.
- Que se integre en el programa de la asignatura de redes eléctricas de distribución, de la carrera de ingeniería eléctrica la metodología de coordinación de protecciones presentada en esta investigación.
- Realizar un estudio de coordinación de protecciones de fusibles en redes de distribución evaluando diferentes curvas de fabricantes de fusibles para generalizar su estado de comportamiento: Tiempo de respuesta y selectividad conforme fabricante.
- Es importante denotar que todo lo establecido en esta investigación, debería ser parte integral de la memoria de cálculo de los proyectos de coordinación de protecciones en las redes de distribución de media tensión, que se implementan en Nicaragua, y debería ser agregadas sus partes principales en la Norma del proyecto Tipo de las empresas distribuidoras de electricidad, DISNORTE-DISSUR.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Bibliografía

- Ali Aref, M. D. (2012). University, Takestan, Iran. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/268366532_Optimal_DG_Placement_in_Distribution_Networks_Using_Intelligent_Systems/link/54b78f8a0cf2bd04be33a30e/download
- Digsilent GmbH. (1998). Obtenido de <https://es.linkedin.com/company/digsilent-gmbh>
- DISNORTE-DISSUR. (2000). DISNORTE. Obtenido de <https://www.disnorte-dissur.com.ni/images/normas-procesos/distribucion/auditoria-tecnica/normalizacion-y-procedimientos/manuales/2manual-const-redes/2-5/1Generalidades-del-Manual.pdf>
- EATON. (2002). Euroeléctrica. Obtenido de <https://euroelectrica.com.mx/wp-content/uploads/2019/04/Fuseolog%C3%ADa-Fundamentos-de-la-protecci%C3%B3n-contra-sobrecorriente.pdf>
- ENDESA. (1995). Criterios Generales de Protección del Sistema Peninsular Español. España. Obtenido de https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/criterios_proteccion_sistema_1995.pdf
- ENDESA. (2001). Obtenido de <https://www.fundacionendesa.org/es/recursos/a201908-red-de-distribucion>
- González, G., & Luna, E. O. (2010). Análisis de Cortocircuito en Sistemas Eléctricos. México.
- Guzmán, G. (2012). Manual para coordinación de fusibles en la red de media tensión. Costa Rica.
- Hernandez Sampieri, R. (s.f.). Metodología de la Investigación (6ta Edición ed.). Mc Graw Hill.
- INE. (2012). Instituto Nicaraguense de Energía-INE. Obtenido de <https://www.ine.gob.ni/index.php/electricidad/indicadores-de-calidad-del-suministro/>
- Juárez, J. D. (1995). Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica. México: Univer. Autónoma Metropolitana.
- Martínez, A. (2014). Método de las Componentes Simétricas. Argentina.
- Mayta, C. A. (2019). Universidad Continental del Perú. Obtenido de Protección del sistema eléctrico de distribución :



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/71119/2/IV_FIN_109_TE_Mayta_Roque_2019.pdf

Pinos, M. (1992). Coordinación gráfica de protecciones en sistemas radiales de distribución. Quito.

SALICRU. (2000). SALICRU. Obtenido de <https://www.salicru.com/7-razones-de-por-que-la-proteccion-electrica-es-importante.html>

SIBA FUSES. (2000). Fusibles de Media tensión. México.

Turrubiates, V. (2020). Expo Enerhía. Obtenido de https://www.exposolucionesenenergia.com/blog/Redes_distribucion_aereas_subterraneas_Part1.php?m=

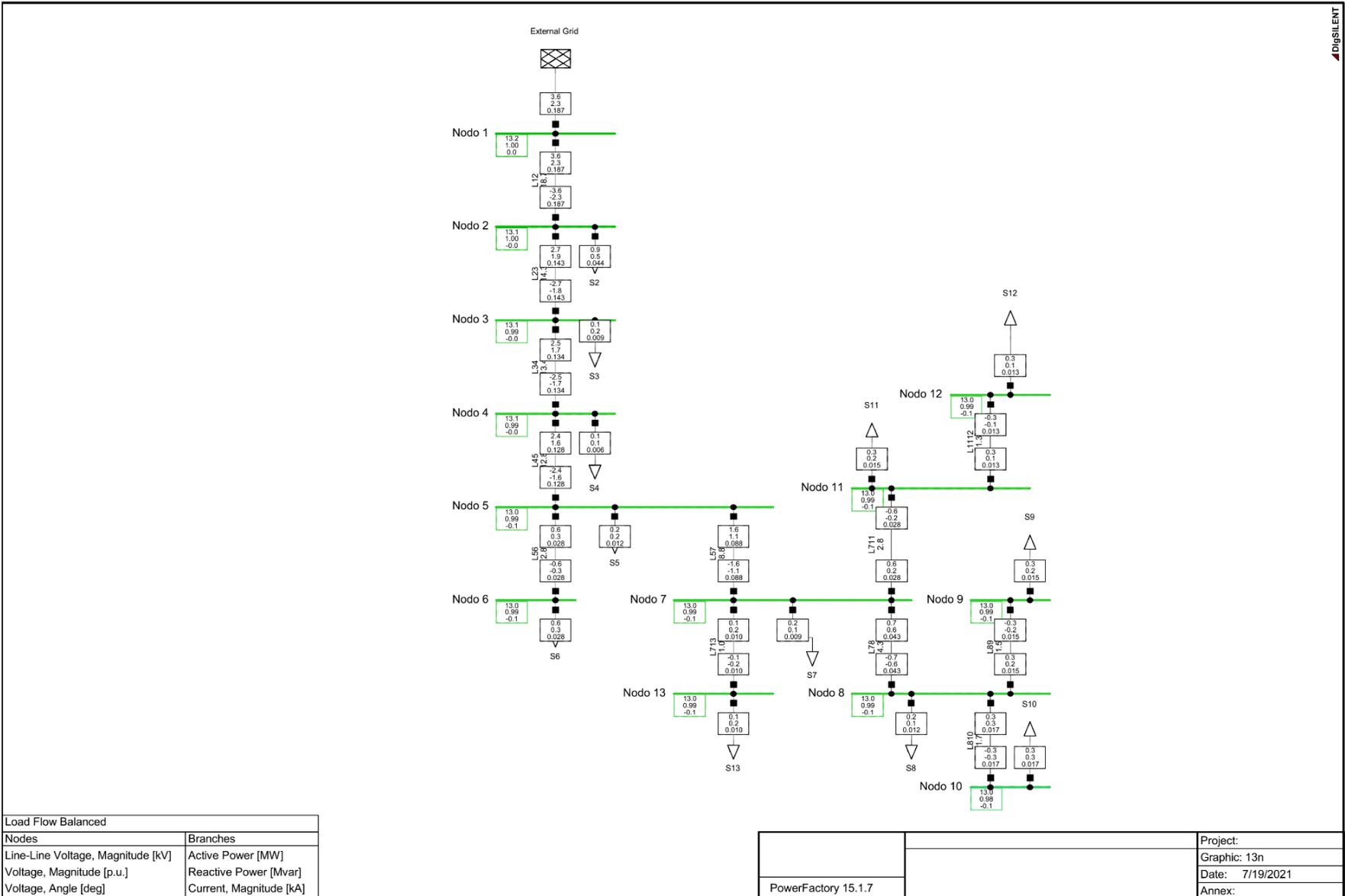


ANEXO I

Simulación de flujo de potencia -Digsilent.



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "





" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

	DIGIESTMNT PowerFactory 15.1.7	Project: Date: 7/19/2021
--	--------------------------------------	-----------------------------

Load Flow Calculation		Total System Sum	
AC Load Flow, balanced, positive sequence	No	Automatic Model Adaptation for Convergence	No
Automatic Tap Adjust of Transformers	No	Max. Acceptable Load Flow Error for Nodes	1.00
Consider Reactive Power Limits	No	Model Equations	0.10

Total System Summary		Study Case: Study Case		Annex:	
No. of Substations	0	No. of Busbars	13	No. of Terminals	0
No. of 2-w Trfs.	0	No. of 3-w Trfs.	0	No. of syn. Machines	0
No. of Loads	12	No. of Shunts	0	No. of asyn. Machines	1
Generation	=	0.00 MW	0.00 MVA		
External Infeed	=	3.58 MW	4.27 MVA		
Load P (U)	=	3.54 MW	4.22 MVA		
Load P (Un)	=	0.00 MW	4.22 MVA		
Load P (Un-U)	=	0.00 MW	0.00 MVA		
Motor Load	=	0.00 MW			
Grid Losses	=	0.04 MW			
Line Charging	=				
Compensation ind.	=				
Compensation cap.	=				
Installed Capacity	=	0.00 MW			
Spinning Reserve	=	0.00 MW			
Total Power Factor:					
Generation	=	0.00	[-]		
Load/Motor	=	0.84	/ 0.00	[-]	



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

Load Flow Calculation				Edge Elem				
AC Load Flow, balanced, positive sequence Automatic Tap Adjust of Transformers Consider Reactive Power Limits		No	Automatic Model Adaptation for Convergence Max. Acceptable Load Flow Error for Nodes		No	1.00 0.10		
		Model Equations		DISIEMT PowerFactory 15.1.7		Project: Date: 7/19/2021		
Grid: 13n		System Stage: 13n		Study Case: Study Case		Annex:		
Name	Type	Loading [%]	Busbar	Active Power [MW]	Reactive Power [Mvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	p.u.
S10	Lod		Nodo 10	0.262	0.280	0.68	0.017	1.01
S11	Lod		Nodo 11	0.290	0.186	0.84	0.015	1.01
S12	Lod		Nodo 12	0.292	0.054	0.98	0.013	1.01
S13	Lod		Nodo 13	0.124	0.180	0.57	0.010	1.01
S2	Lod		Nodo 2	0.890	0.468	0.89	0.044	0.99
S3	Lod		Nodo 3	0.112	0.170	0.60	0.009	1.01
S4	Lod		Nodo 4	0.112	0.064	0.87	0.006	1.01
S5	Lod		Nodo 5	0.217	0.178	0.77	0.012	1.01
S6	Lod		Nodo 6	0.560	0.310	0.87	0.028	1.01
S7	Lod		Nodo 7	0.175	0.078	0.91	0.009	1.01
S8	Lod		Nodo 8	0.220	0.140	0.84	0.012	1.01
S9	Lod		Nodo 9	0.266	0.198	0.80	0.015	1.01
External Grid	Xnet		Nodo 1	3.576	2.337	0.84	0.187	0.00
L1112	Line	1.32	Nodo 12	-0.292	-0.054	-0.98	0.013	0.01
			Nodo 11	0.292	0.054	0.98	0.013	0.01
L12	Line	18.68	Nodo 1	3.576	2.337	0.84	0.187	0.18
			Nodo 2	-3.557	-2.323	-0.84	0.187	0.18
L23	Line	14.29	Nodo 2	2.667	1.855	0.82	0.143	0.14
			Nodo 3	-2.656	-1.846	-0.82	0.143	0.14
L34	Line	13.40	Nodo 3	2.528	1.676	0.83	0.134	0.13
			Nodo 4	-2.528	-1.674	-0.83	0.134	0.13
L45	Line	12.83	Nodo 4	2.414	1.610	0.83	0.128	0.12
			Nodo 5	-2.410	-1.607	-0.83	0.128	0.12
L56	Line	2.84	Nodo 5	0.560	0.310	0.87	0.028	0.02
			Nodo 6	-0.560	-0.310	-0.87	0.028	0.02
L57	Line	8.77	Nodo 5	1.632	1.119	0.82	0.088	0.08
			Nodo 7	-1.630	-1.117	-0.82	0.088	0.08
L711	Line	2.79	Nodo 11	-0.582	-0.240	-0.92	0.028	0.02
			Nodo 7	0.582	0.240	0.92	0.028	0.02

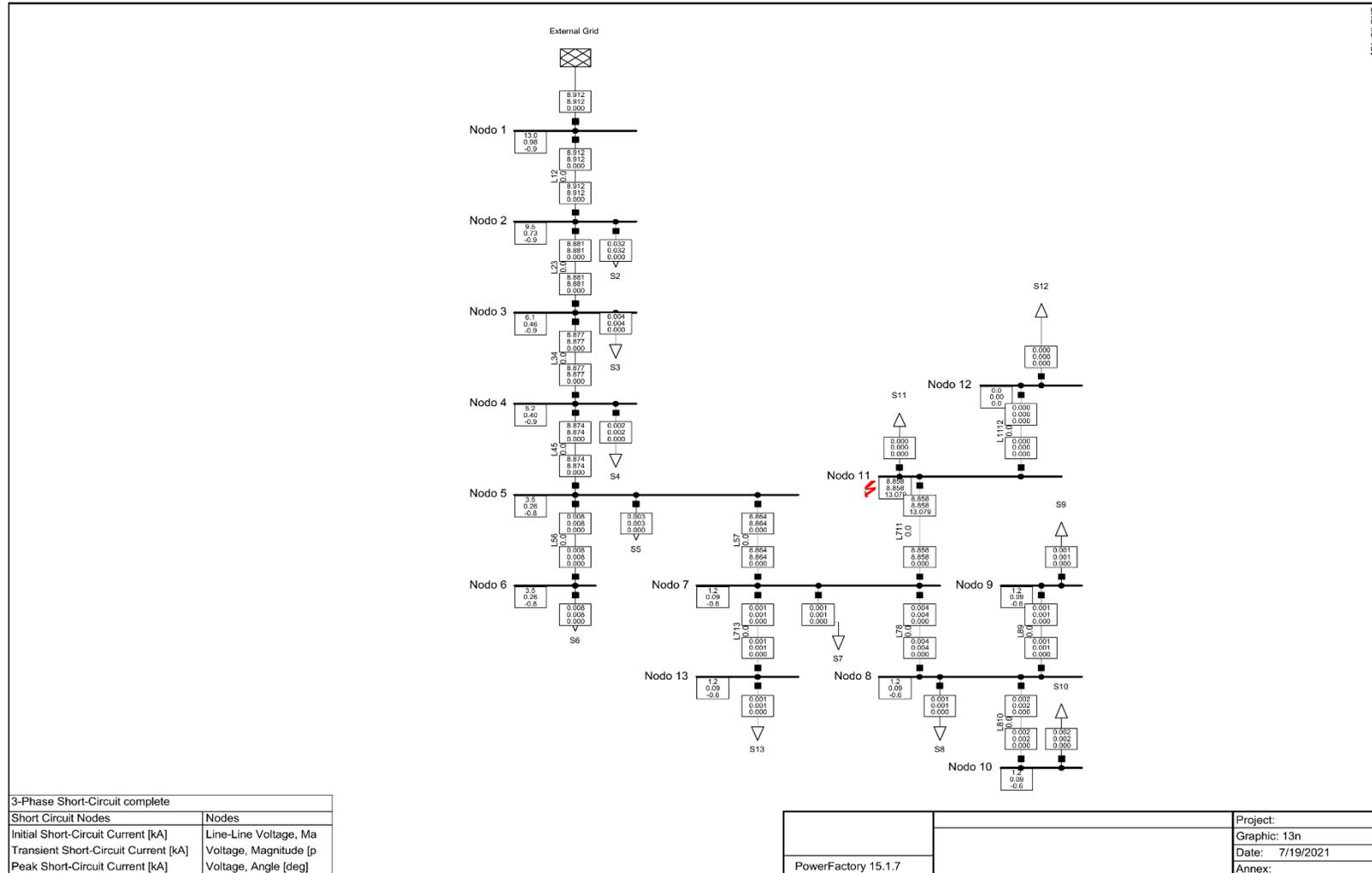


ANEXO II

**Simulación de Cortocir.en nodo 11 y coord.de Fusibles F711 con F57-
Digsilent**

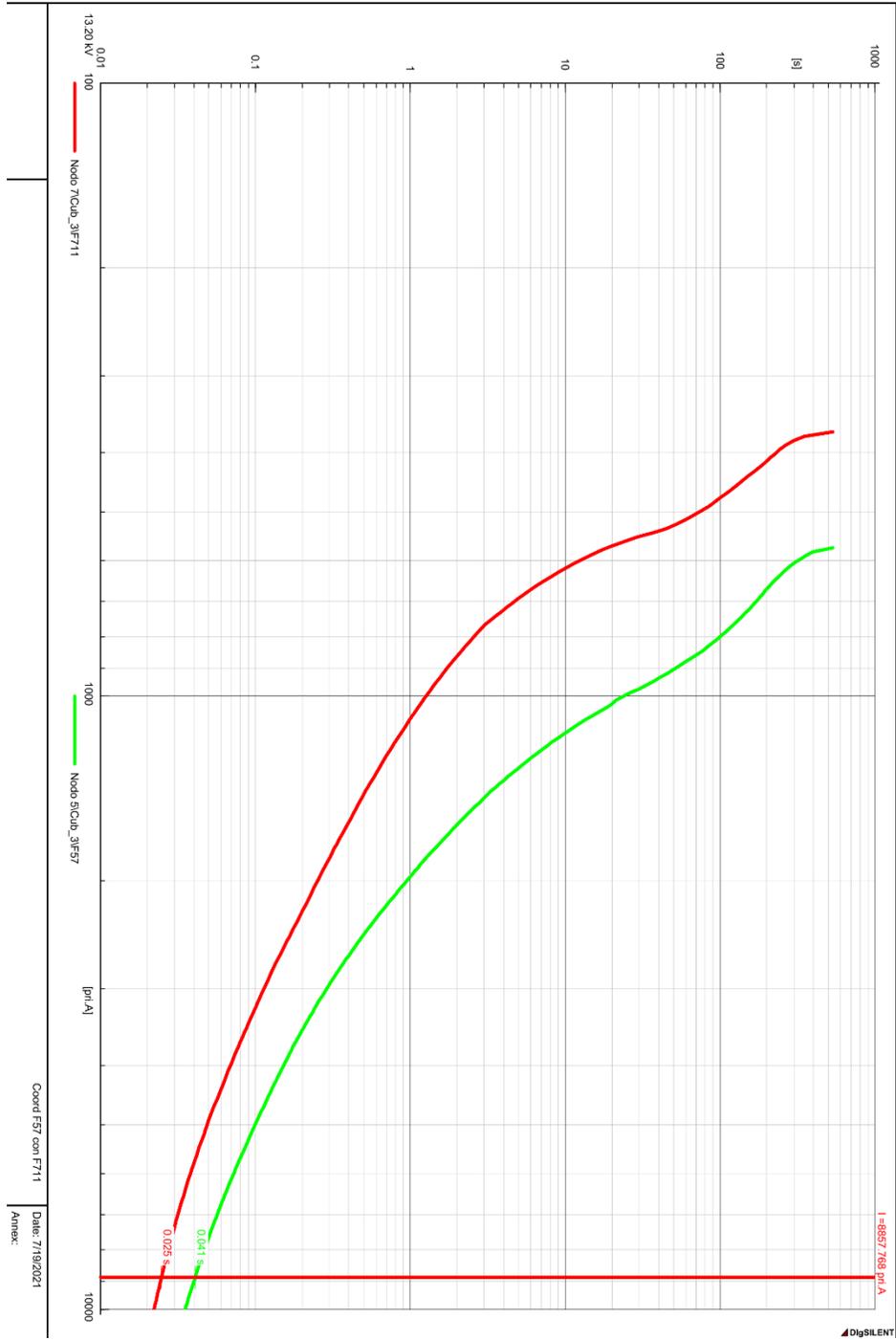


" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "





" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "





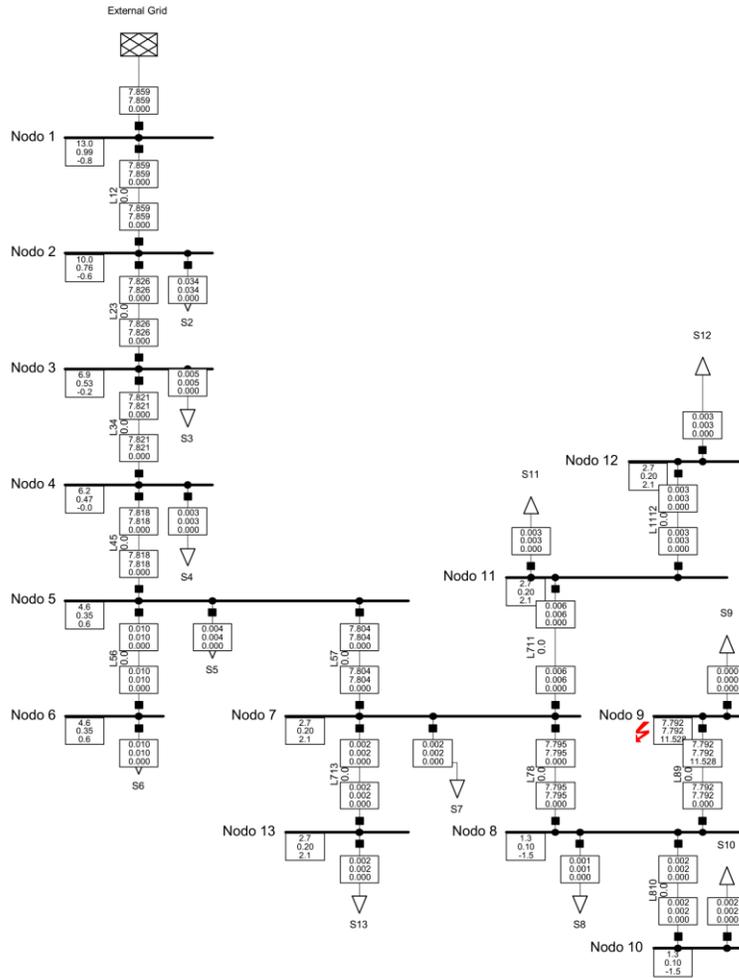
ANEXO III

**Simulación de Cortocir.en nodo 9 y coord.de Fusibles F78 con F89-
Digsilent**



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

4 DIGISILENT

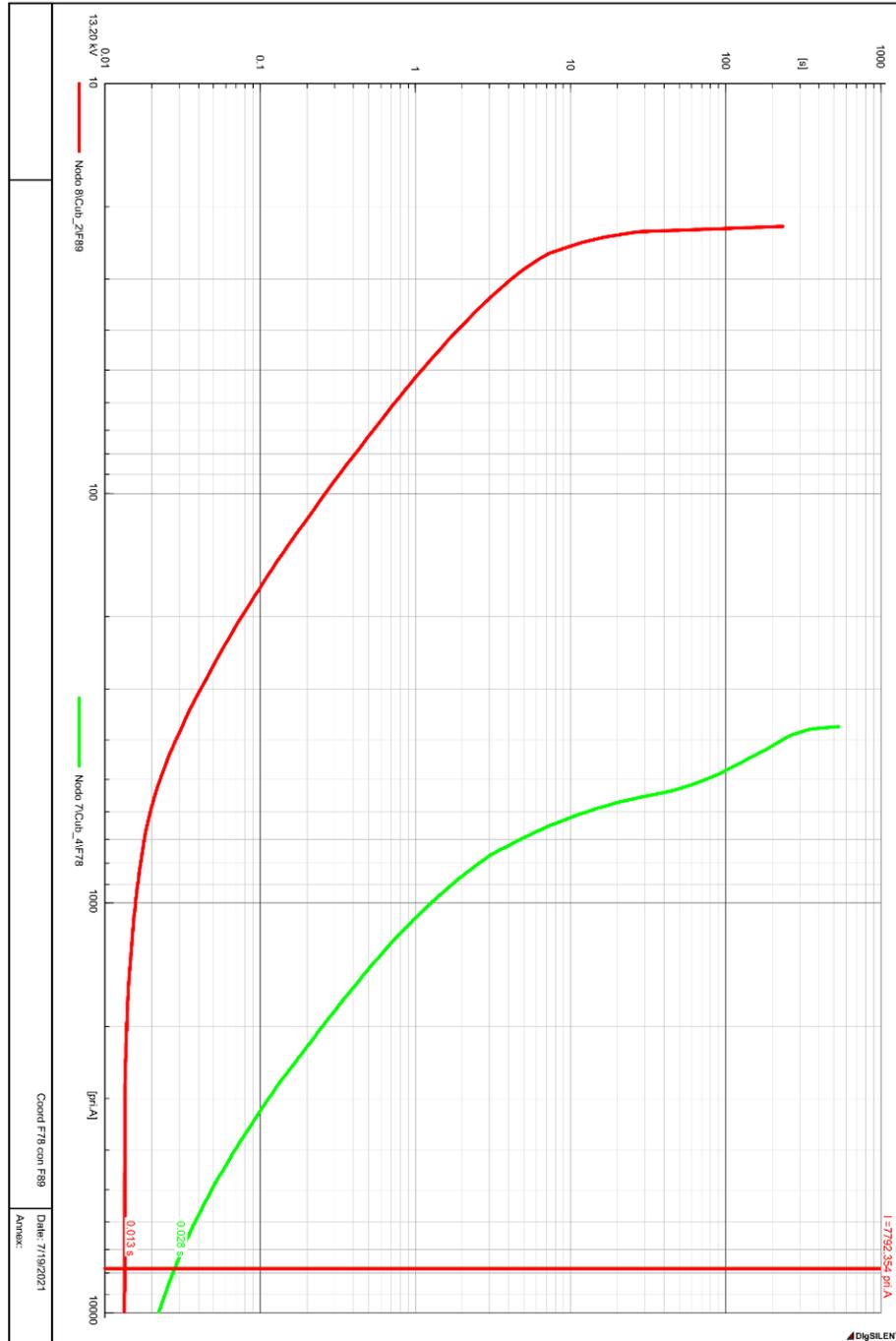


3-Phase Short-Circuit complete	
Short Circuit Nodes	Nodes
Initial Short-Circuit Current [kA]	Line-Line Voltage, Ma
Transient Short-Circuit Current [kA]	Voltage, Magnitude [p
Peak Short-Circuit Current [kA]	Voltage, Angle [deg]

PowerFactory 15.1.7	Project:
	Graphic: 13n
	Date: 7/19/2021
	Annex:



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "



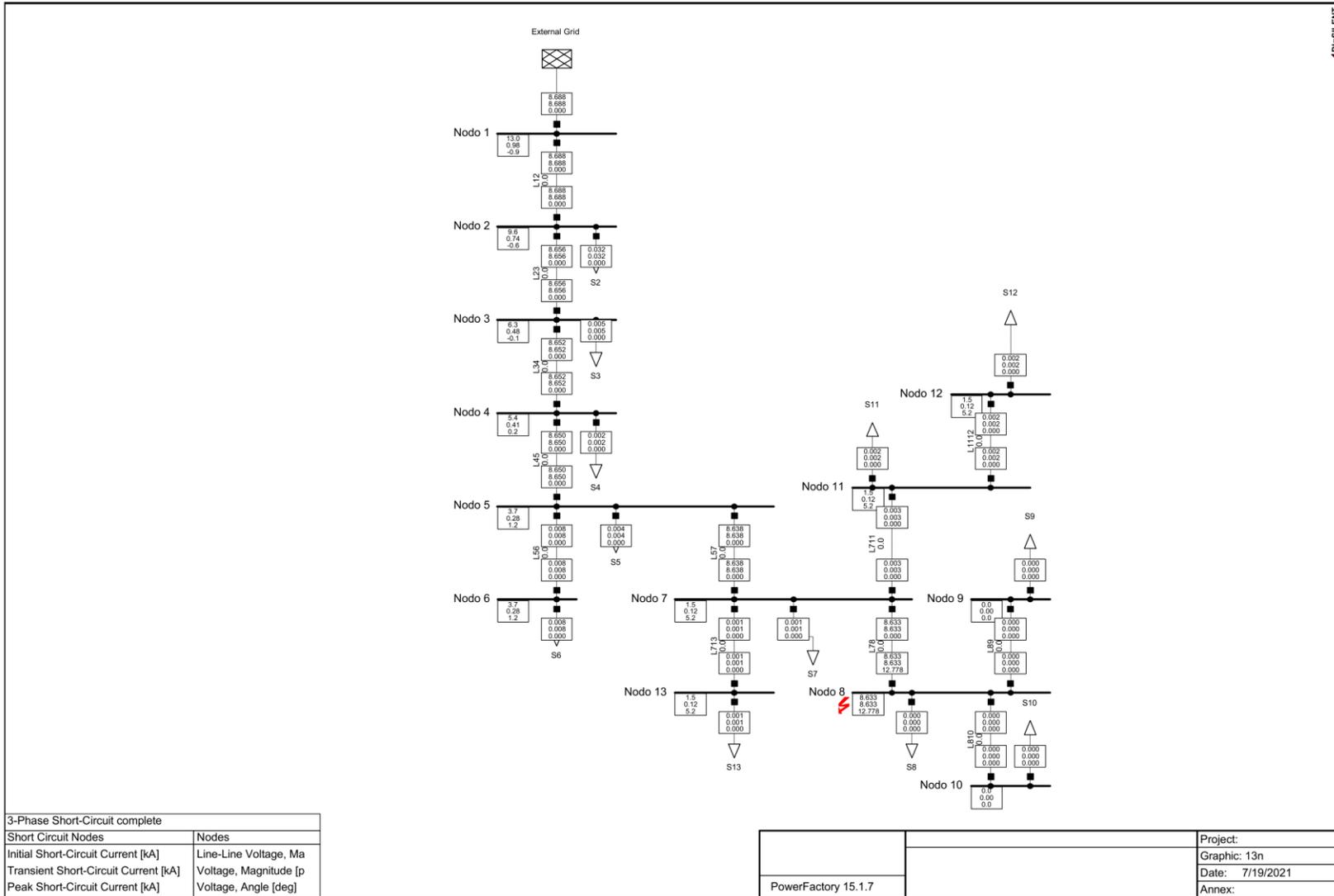


ANEXO IV

**Simulación de Cortocir.en nodo 8 y coord.de Fusibles F78 con F57-
Digsilent**

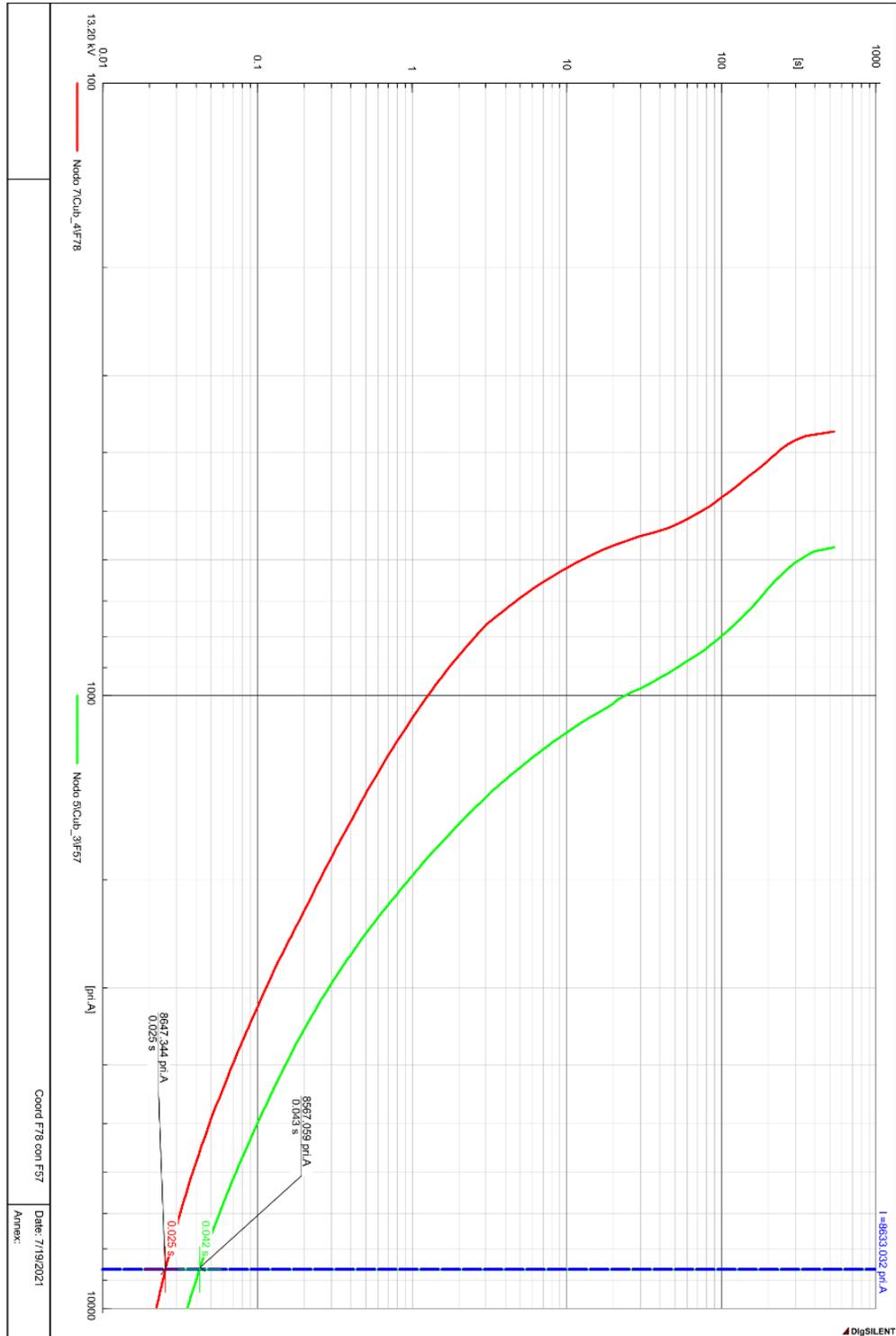


" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "





" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "



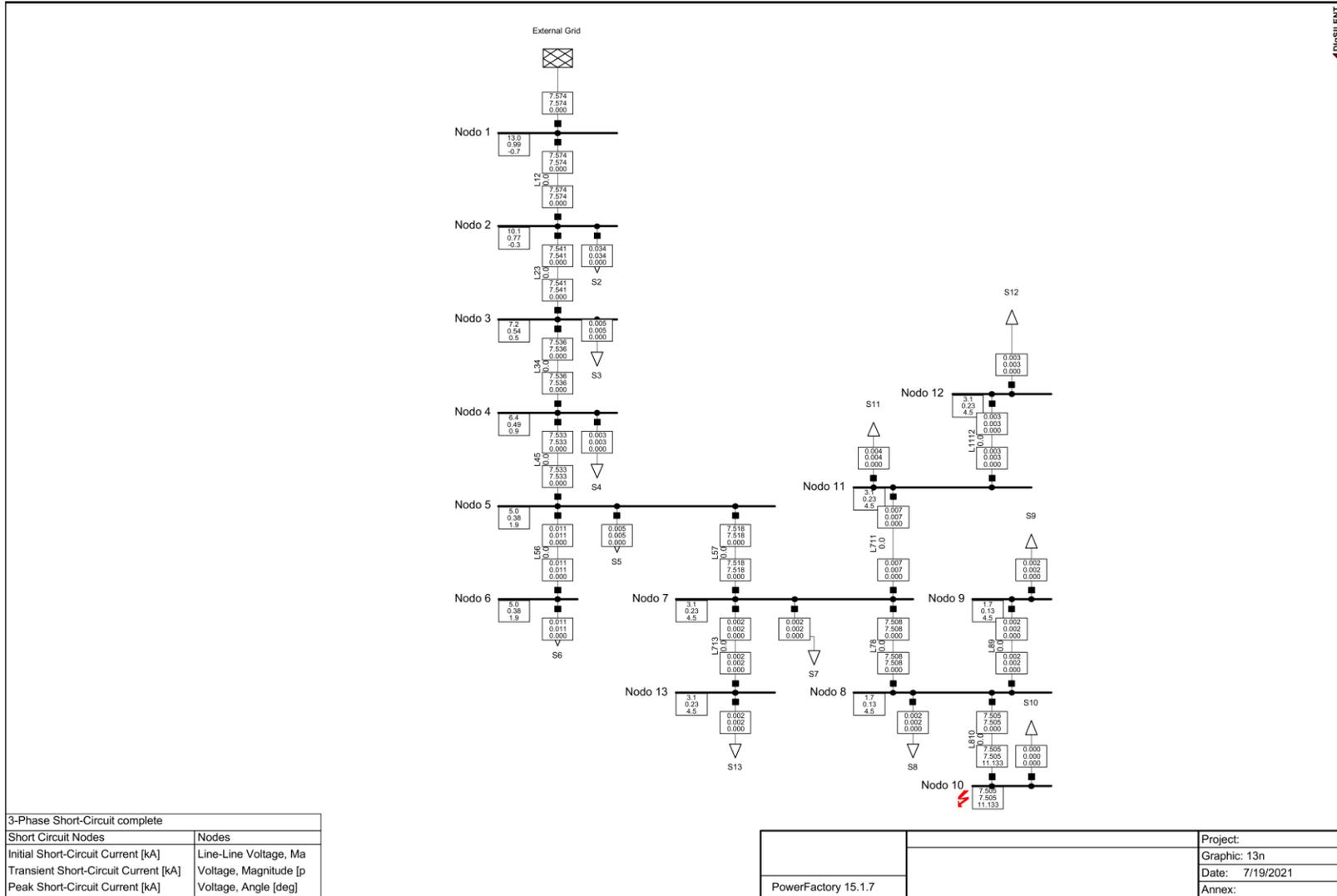


ANEXO V

**Simulación de Cortocir.en nodo 10 y coord.de Fusibles F78 con F810-
Digsilent**

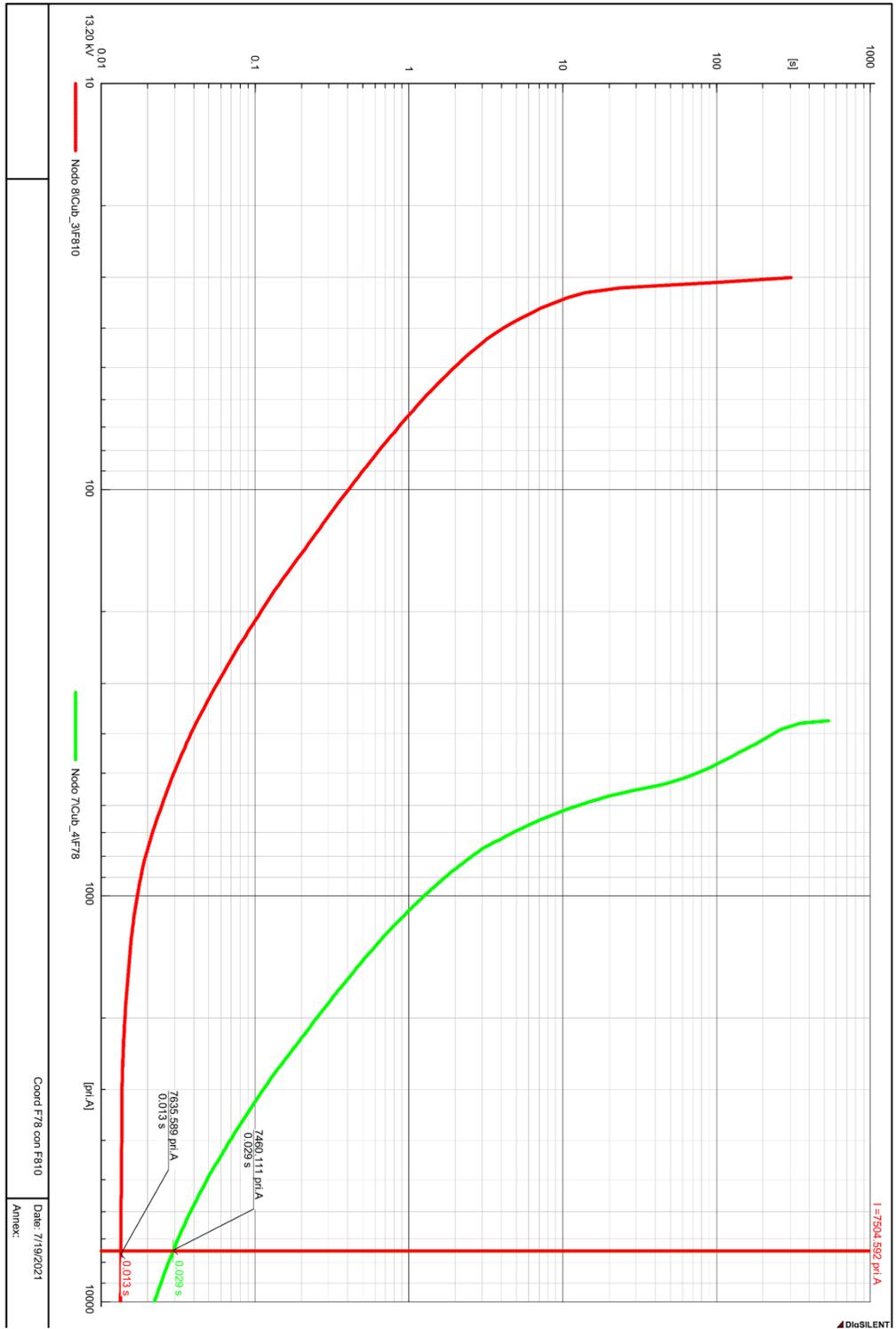


" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "





" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "





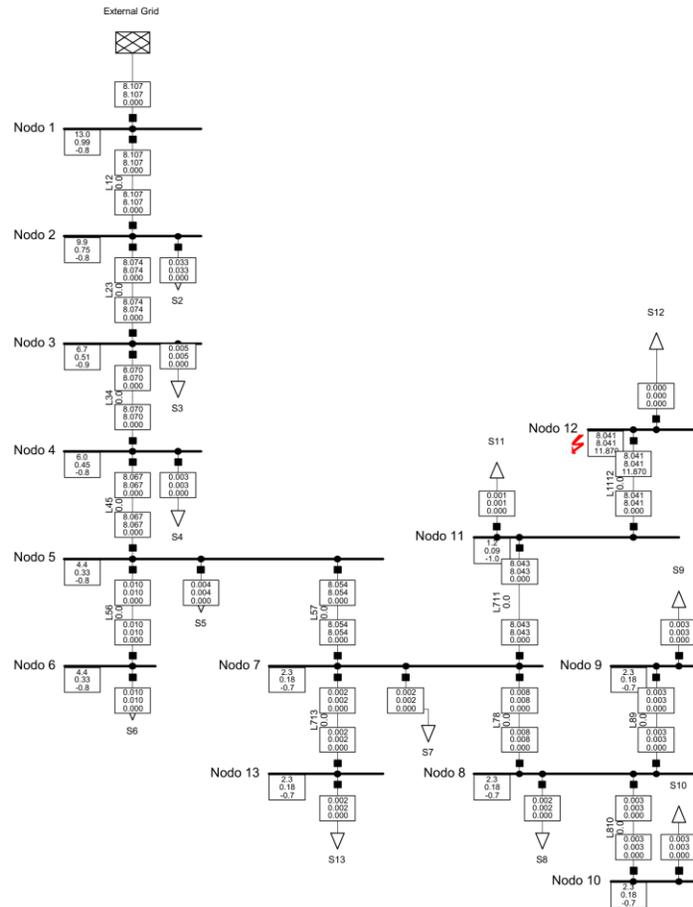
ANEXO VI

**Simulación de Cortocir.en nodo 12 y coord.de Fusibles F711 con F1112-
Digsilent**



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

DIGISILENT

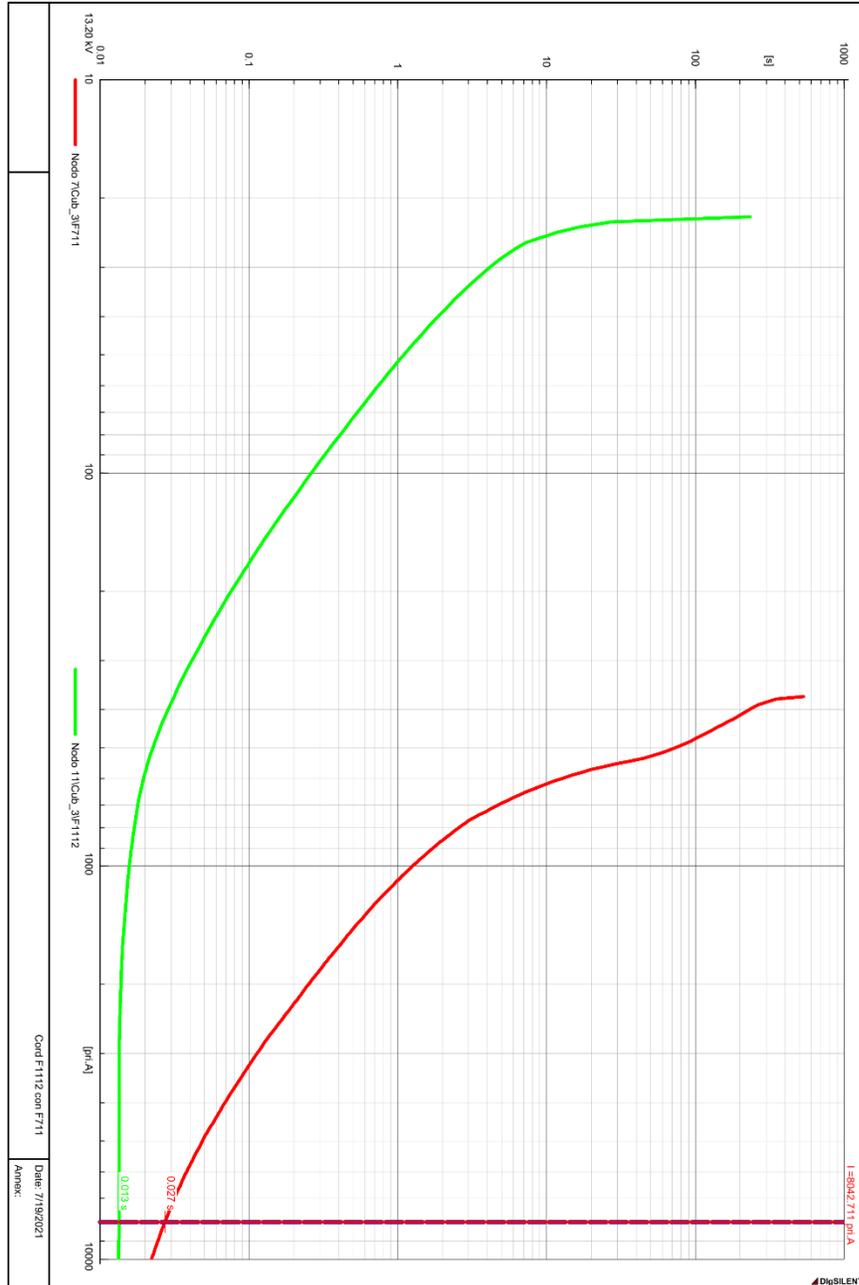


3-Phase Short-Circuit complete	
Short Circuit Nodes	Nodes
Initial Short-Circuit Current [kA]	Line-Line Voltage, Ma
Transient Short-Circuit Current [kA]	Voltage, Magnitude [p
Peak Short-Circuit Current [kA]	Voltage, Angle [deg]

PowerFactory 15.1.7	Project:
	Graphic: 13n
	Date: 7/24/2021
	Annex:



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "



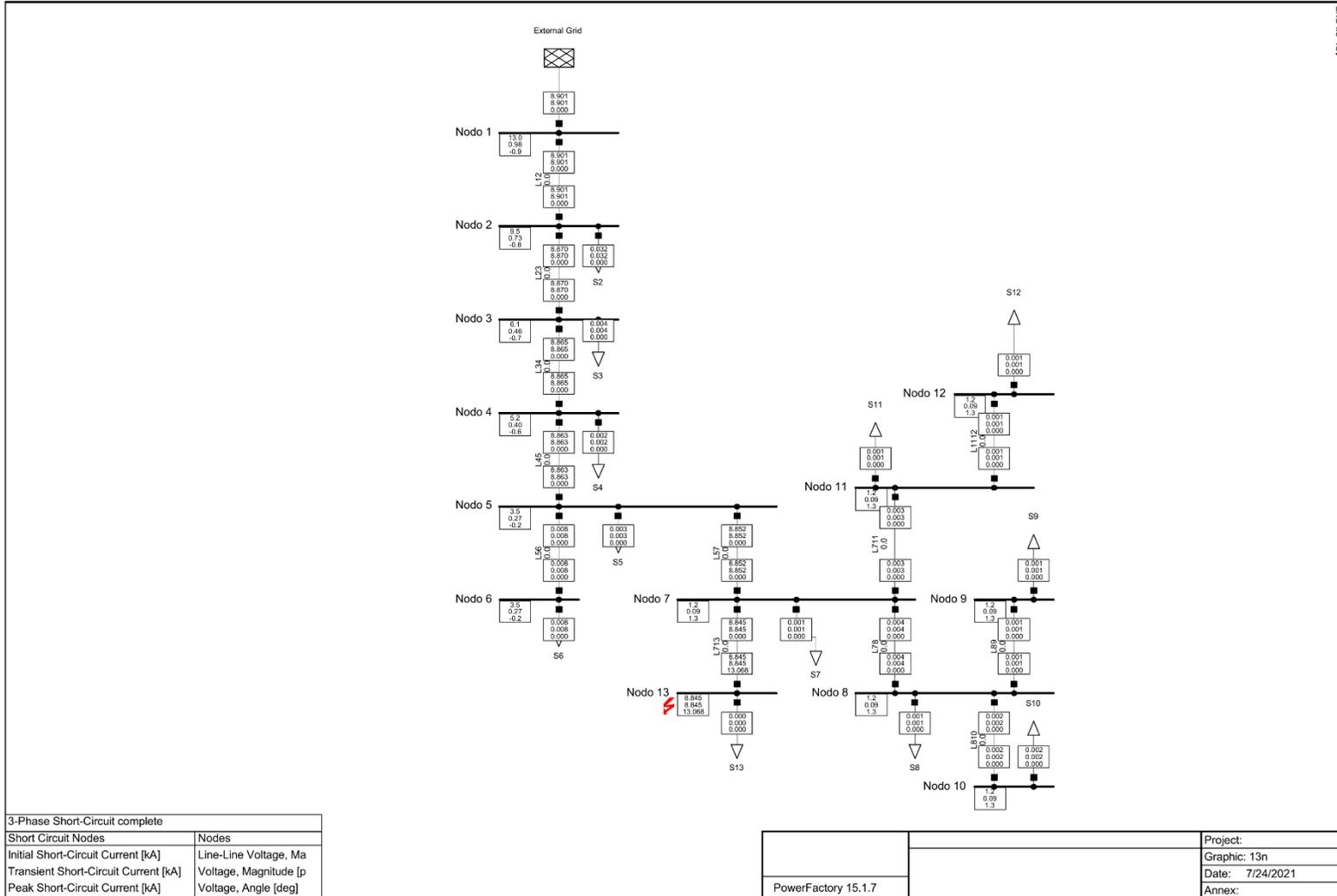


ANEXO VII

**Simulación de Cortocir.en nodo 13 y coord.de Fusibles F713 con F57-
Digsilent**



" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "





" Estudio de Protección Integral de Circuitos de Distribución Eléctrica de Media Tensión Radial "

