



**UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA
CAMPUS HEREDIA**

**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO
ACADÉMICO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

Tema:

“Análisis de cortocircuito y coordinación de protecciones en el condominio horizontal
Residencial Malinches”

Sustentante:

Diego Armando Gutiérrez Rodríguez

HEREDIA, AGOSTO

2017



TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: Análisis de cortocircuito y coordinación de protecciones en el condominio horizontal residencial Malinches, elaborado por el estudiante: Diego Armando Gutiérrez Rodríguez, fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Electromecánica.

Lic. Jonathan Hernández Hernández

Tutor

Ing. Luis Andrés Brenes Oses, MRT

Lector

Ing. Andre Tabash Matamotros, MRT

Representante

DECLARACIÓN JURADA

Yo, **Diego Armando Gutiérrez Rodríguez**, cédula de identidad número: 503550493, alumno de la Universidad Latina de Costa Rica, declaro bajo la fe de juramento y consciente de las responsabilidades penales de este caso, que soy el autor intelectual del presente Trabajo Final de Graduación (o Proyecto) titulado: **“Análisis de cortocircuito y coordinación de protecciones en el condominio horizontal Residencial Malinches”**.

Por lo tanto, libero a la Universidad Latina de Costa Rica ante cualquier responsabilidad en caso de que mi declaración sea falsa.

Dada en San José, Costa Rica, a los 25 días del mes de agosto del año dos mil diez y siete



SUSTENTANTE

Diego Armando Gutiérrez Rodríguez

503550493

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa Yajaira Briceño Chavarría, por su apoyo incondicional para el desarrollo y crecimiento de mi carrera profesional.

Al ingeniero Jonathan Hernández Hernández, por compartir sus conocimientos y experiencia para la elaboración de este trabajo.

Al ingeniero Carlos Andrés Cascante Sánchez, miembro del Departamento de Mantenimiento Técnico de Coopoguanacaste R.L., quien me facilitó gran parte de la información necesaria para la realización del análisis propuesto.

¡Muchas gracias!

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo y toda mi carrera de Ingeniería Electromecánica, a Dios y a mi hijo Abraham Gutiérrez Briceño.

A mis padres Pastor Gutiérrez Cascante y Betty Rodríguez Ruiz, quienes han sido mis maestros para crecer como persona y como profesional, siendo primero Dios y después ellos mi guía para alcanzar mi meta de ser ingeniero electromecánico.

TABLA DE CONTENIDOS

| Contenido | Página |
|---|---------------|
| Hoja del Tribunal Examinador | ii |
| Declaración jurada | iii |
| Agradecimientos | iv |
| Dedicatorias | v |
| Tabla de contenidos | vi |
| ÍNDICE DE FIGURAS | viii |
| | |
| Capítulo I | |
| 1. Introducción | 2 |
| 1.1 Resumen ejecutivo | 4 |
| 1.2 Formulación o planeamiento del problema | 4 |
| 1.2.1 Síntesis del problema | 4 |
| 1.2.2 Enfoque de la solución | 4 |
| 1.2.3 Resultados esperados | 5 |
| 1.3 Objetivo general | 5 |
| 1.4 Objetivos específicos | 5 |
| 1.5 Justificación del proyecto | 6 |
| 1.6 Alcances y limitaciones | 6 |
| | |
| Capítulo II | |
| 2. Marco teórico | 8 |
| 2.1 Análisis de fallas | 8 |
| 2.2 Corrientes de cortocircuito | 9 |
| 2.3 Tipos de fallas de cortocircuito | 12 |

| | |
|--|----|
| 2.4 Método de las componentes simétricas | 14 |
|--|----|

Capítulo III

| | |
|---|----|
| 3. Marco metodológico | 19 |
| 3.1 Utilización del <i>software</i> ETAB | 19 |
| 3.2 Inspección visual en sitio y recolección de datos | 28 |
| 3.3 Cálculo de corriente de cortocircuito | 31 |
| 3.4 Selección de elementos de protección | 32 |
| 3.5 Análisis de las corrientes de cortocircuito encontradas mediante la utilización del <i>software</i> ETAP | 39 |
| 3.6 Coordinación de protecciones | 41 |
| 3.7 Análisis de las curvas tiempo corriente (TCC) generadas mediante la utilización del <i>software</i> ETAP. | 42 |

Capítulo IV

| | |
|---------------------|----|
| 4.1 Conclusiones | 48 |
| 4.2 Recomendaciones | 59 |

Capítulo V

| | |
|-----------------|----|
| 5. Bibliografía | 51 |
|-----------------|----|

Capítulo VI

| | |
|-----------|----|
| 6. Anexos | 53 |
|-----------|----|

ÍNDICE DE FIGURAS

| Contenido | Página |
|--|---------------|
| Figura 1: Analogía entre sistema hidráulico y sistema eléctrico en condiciones normales. | 10 |
| Figura 2: Operación correcta del elemento de protección. | 11 |
| Figura 3: Operación incorrecta del elemento de protección. | 11 |
| Figura 4: Falla trifásica. | 12 |
| Figura 5: Falla monofásica a tierra. | 13 |
| Figura 6: Falla línea a línea. | 13 |
| Figura 7: Falla bifásica a tierra. | 14 |
| Figura 8: Niveles de impedancia y corrientes de cortocircuito en el punto de conexión. | 20 |
| Figura 9: Curva tiempo-corriente de fusible 10K. | 21 |
| Figura 10: Curvas de tiempo mínimo de fundido de fusibles tipo K,T,N y S. | 22 |
| Figura 11: Comportamiento de corriente de cortocircuito. | 23 |
| Figura 12: Acción de fusible limitador de corriente. | 24 |
| Figura 13: Protecciones internas de corrientes de cortocircuito de transformadores eléctricos. | 25 |
| Figura 14: Efecto de corrientes de cortocircuito en conductores eléctricos. | 26 |
| Figura 15: Curvas típicas de magnetización y daño de transformador. | 27 |
| Figura 16: Transformador eléctrico monofásico de 250 KVA de módulo 3. | 39 |
| Figura 17: Termografía de transformador eléctrico monofásico de 250 KVA de módulo 3. | 30 |
| Figura 18: Barra de herramientas ETAP, Norma ANSI/IEEE. | 31 |
| Figura 19: Interruptor automático principal de paneles de medición. | 32 |
| Figura 20: Capacidad interruptiva de interruptores automáticos instalados. | 33 |
| Figura 21: Curvas para selección de fusible limitador de corriente. | 36 |
| Figura 22: Coordinación entre fusibles de expulsión y limitadores de corriente. | 37 |
| Figura 23: Catálogo de fusibles de expulsión internos, de transformadores eléctricos. | 37 |

| | |
|--|----|
| Figura 24: Capacidad de fusibles de expulsión internos, de transformadores eléctricos. | 38 |
| Figura 25: Capacidades de fusibles limitadores de corriente internos, de transformadores. | 38 |
| Figura 26: Corrientes de cortocircuito en acometida eléctrica primaria, fase A. | 49 |
| Figura 27: Corrientes de cortocircuito en acometidas eléctricas primaria, fases B y C. | 40 |
| Figura 28: Curva de fusible de expulsión tipo T seleccionado para ubicar en el poste de la transición aéreo subterráneo. Fase A. | 44 |
| Figura 29: Curva de fusible de expulsión tipo T preseleccionado para ubicar en el poste de la transición aéreo subterráneo. Fases B y C. | 45 |
| Figura 30: Curva de fusible de expulsión tipo T propuesto para ubicación en el poste de la transición aéreo subterráneo. Fases B y C. | 46 |
| Figura 31: Curva tiempo - corriente 01, fusible de expulsión tipo T. | 53 |
| Figura 32: Curva tiempo - corriente 02, fusible de expulsión tipo T. | 54 |
| Figura 33: Punto de conexión eléctrica del Condominio Malinches. | 55 |
| Figura 34: Limitaciones del <i>software</i> ETAP 16.0.0 en su versión de demostración. | 56 |

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

En el año 2001, dio inicio el desarrollo de uno de los proyectos inmobiliarios más importantes de la costa norte de Costa Rica, con tres kilómetros de playa en la provincia de Guanacaste, de manera específica en el cantón de Santa Cruz. Hacienda Pinilla cuenta con un área total de 1800 hectáreas y es un complejo turístico dedicado básicamente al desarrollo y venta de bienes raíces. Su posición geográfica lo convierte en un lugar privilegiado para el desarrollo de dicha actividad.

Uno de los proyectos desarrollados por Hacienda Pinilla es el condominio Los Malinches, el cual comprende un área total de 22,7 hectáreas, que incluyen zonas verdes, una capilla, un pequeño lago, un gimnasio, una casa club con piscina, entre otras áreas comunes y 23 villas completamente terminadas y equipadas, listas para ofrecer, tanto a inversionistas nacionales, como a extranjeros.

Dicho desarrollo requirió la instalación de infraestructura eléctrica importante para su servicio, dentro de lo que se pueden mencionar transformadores eléctricos, generadores eléctricos, paneles de medición, tableros de distribución, entre otros, los cuales requieren ser protegidos de manera correcta para salvaguardar la integridad física de los habitantes del condominio y de sus bienes.

El objetivo de este trabajo es elaborar un análisis de coordinación de las distintas protecciones eléctricas instaladas en el condominio, lo cual comprende desde la transición aéreo-subterránea de media tensión, hasta los paneles de distribución de baja tensión que dan servicio a las distintas cargas eléctricas ubicadas en los cuartos eléctricos de área común. Esto permitiría determinar si cumplen de manera efectiva con las normativas correspondientes de diseño eléctrico residencial. Para la elaboración de dicho estudio, se utilizará el *software* de diseño, análisis y cálculo de redes eléctricas ETAP.

Este análisis se realizará en coordinación con los departamentos de Servicios Técnicos y de Diseño de Hacienda Pinilla, y con la cooperación del Departamento de Mantenimiento de COOPEGUANACASTE R.L., los cuales se encargan de gestionar la distribución de la energía eléctrica en la zona.

1.1 RESUMEN EJECUTIVO

En el presente estudio, se determinaron las distintas falencias y los riesgos existentes en el desarrollo de proyectos residenciales de esta magnitud al no realizar o realizar de manera errónea la selección de los elementos de protección de la red eléctrica desde su etapa de diseño, ejecución de obra y mantenimiento, según los datos obtenidos mediante la implementación de la herramienta tecnológica ETAP.

Al respecto, se solicitaron a COOPEGUANACASTE las corrientes de falla de cortocircuito tanto trifásica como monofásica en la red de distribución a la entrada del condominio, por lo cual se determinaron inconsistencias importantes en la coordinación de las distintas protecciones eléctricas instaladas.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, la administración del condominio no cuenta con la información necesaria para garantizar la protección adecuada de la infraestructura eléctrica ante una eventual falla de corriente de cortocircuito. De presentarse una falla eléctrica de este tipo en la actualidad, no es posible determinar cuáles consecuencias podría esto tener sobre las personas o sobre los distintos bienes tanto comunes como privativos del condominio.

1.2.1 SÍNTESIS DEL PROBLEMA

SÍNTESIS DEL PROBLEMA

Un correcto análisis del estado actual de los elementos de protección en la instalación eléctrica existente podría garantizar el buen estado de los activos comunes y privados. Asimismo, se podrían detectar inconsistencias que comprometan el correcto funcionamiento de los distintos equipos eléctricos instalados y tomar acciones para mantener debidamente protegida la instalación eléctrica ante posibles fallas de corrientes de cortocircuito.

Para la realización del estudio, será necesario preliminarmente realizar un levantamiento de las condiciones actuales en cuanto a equipos instalados, ubicación, cantidad, distancias, etc. Esto para poder contar con información real, que pueda ser evaluada cuando se puedan comparar los resultados obtenidos del *software* de diseño ETAP con las condiciones actuales.

Adicionalmente, el estudio tomará en consideración distintos elementos que también forman parte de la infraestructura eléctrica, como por ejemplo canalizaciones eléctricas y conductores eléctricos de media y baja tensión, los cuales son necesarios de agregar cuando se realice la simulación con el *software* utilizado para tal fin.

1.2.2 ENFOQUE DE LA SOLUCIÓN

ENFOQUE DE LA SOLUCIÓN

Posterior al análisis propuesto y por la falta de información actualizada, se podrá contar con documentación veraz para que se tomen las decisiones según correspondan, ya sea por parte

de la administración del condominio o por la compañía a cargo de brindar el servicio de energía eléctrica. En ese sentido, se indicarían los procedimientos por seguir para corregir a la mayor brevedad posible las inconsistencias encontradas. Además, se podrían plantear correcciones adicionales que mejoren las condiciones actuales de la infraestructura eléctrica del condominio.

1.2.3 RESULTADOS ESPERADOS

- Conocer el estado actual de la infraestructura eléctrica general del condominio.
- Saber la magnitud de la corriente de cortocircuito en la infraestructura eléctrica interna del condominio.
- Informar de manera oportuna a quien corresponda acerca de las acciones que se deben seguir para garantizar el óptimo desempeño de las protecciones eléctricas existentes.
- Aumentar la seguridad de los bienes y de las personas que habitan el condominio.

1.3 OBJETIVO GENERAL

Analizar la corriente de cortocircuito según protecciones y demás infraestructura eléctrica existente en el condominio horizontal Residencial Malinches.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer la capacidad interruptiva de cortocircuito de los elementos de protección existentes tanto de media como de baja tensión.
- Calcular la corriente de cortocircuito en los devanados secundarios de los transformadores eléctricos del condominio.
- Comparar los resultados obtenidos del *software* ETAB según los elementos de protección existentes.
- Informar correctamente con respecto a las mejoras que se deban ejecutar.

1.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El presente análisis de la corriente de cortocircuito en el condominio horizontal Residencial Malinches permitirá determinar si las protecciones eléctricas instaladas en dicha red se encuentran debidamente coordinadas, o si por lo contrario, se deben realizar ajustes ya sea por parte de los administradores del condominio o por la compañía a cargo de gestionar la energía eléctrica que brinda servicio a este proyecto.

1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES

ALCANCES

- En el trabajo realizado, se plantea la metodología de selección de elementos de protección acorde con las recomendaciones técnicas de los fabricantes.
- Se pretende corregir errores en la selección de los elementos de protección actualmente instalados para así evitar posibles daños provocados por corrientes de falla de cortocircuito.
- El presente trabajo abarca únicamente los tramos de infraestructura eléctrica que comprenden, desde el poste de la transición aéreo subterráneo, hasta los paneles de medición.

LIMITACIONES

- Este trabajo se limita netamente a los resultados generados mediante la utilización del *software* ETAP 16.0.0 en su versión de demostración.
- La base de datos incompleta del programa informático limita la simulación y consecuentemente el análisis del comportamiento de algunos elementos de protección.
- El periodo de tiempo de utilización del *software* ETAP 16.0.0 en su versión de demostración está limitado a un periodo de 30 días después de su instalación.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Análisis de fallas

Una *falla en un circuito eléctrico* se puede definir como cualquier evento que interfiere con el flujo normal de corriente en forma temporal o permanente. En líneas de transmisión, la mayoría de las fallas son originadas por descargas atmosféricas (rayos), cuya trayectoria es a tierra. Asimismo, la baja impedancia a tierra permite el flujo de corriente desde el conductor hasta la tierra, y a través de la tierra, al neutro aterrizado de un transformador o generador, y se completa de esta manera el circuito.

Las fallas línea a línea no involucran a la tierra y requieren la apertura de interruptores para ser aisladas. Generalmente, los interruptores automáticos se reconectan (cierre de contactos) en intervalos de tiempo muy cortos (20 ciclos aproximadamente) para que se lleve a cabo la deionización sin que restablezca el arco eléctrico. Este tipo de reconexiones en los interruptores resulta exitosa después de ocurrir la mayoría de las fallas, exceptuando las fallas permanentes, en las cuales no es posible la reconexión. Estas fallas se producen por causa de líneas que caen a tierra. Un alto porcentaje de fallas en las líneas de transmisión son fallas monofásicas a tierra (línea a tierra), aunque también se dan fallas en donde intervienen las tres fases. A estas fallas, se les llama **fallas trifásicas simétricas**.

Una falla línea a línea en la que la tierra no interviene y las fallas línea a línea y a tierra (doble línea a tierra), con excepción del caso trifásico, originan un desbalance entre fases, por tanto, se les llama **fallas asimétricas**.

Dos factores importantes de los que depende la selección apropiada de los interruptores son la corriente que fluye inmediatamente después de ocurrida la falla y la corriente que el interruptor debe interrumpir. Un análisis de fallas debe calcular los valores de esas corrientes para los diferentes tipos de falla y en los distintos puntos del sistema eléctrico por analizar. Estos datos son necesarios para determinar los valores de operación de los interruptores por instalar.

2.2 Corrientes de cortocircuito

Se puede definir como *fallas por cortocircuito* a un conglomerado de defectos provocados por un contacto, ya sea entre un elemento conductor y tierra o cualquier pieza metálica unida a ella, o bien, entre elementos conductores, en redes eléctricas de media y alta tensión. Estos tipos de defectos pueden tener diferentes orígenes, por ejemplo:

- **Eléctrico.** Alteración del aislante del o de los conductores eléctricos siendo incapaces de soportar la tensión eléctrica.
- **Mecánico.** Ruptura de los conductores o de los aisladores por interferencia de un cuerpo extraño o ajeno al sistema.
- **Atmosférico.** Un rayo que alcanza los conductores eléctricos, tempestades, niebla o hielo, que provoca efectos mecánicos, lo cual genera aproximación entre conductores o alteración en la superficie de los aisladores.
- **Falsas maniobras.** Apertura o cierre de un equipo de seccionamiento en la red con carga.

La corriente de cortocircuito se determina por los voltajes internos de las máquinas sincrónicas y por las impedancias del sistema entre los voltajes de máquina y la falla. Los estudios de cortocircuito deben realizarse desde la etapa de diseño del sistema eléctrico, ya que las corrientes de cortocircuito pueden ser mucho más elevadas que las corrientes de operación normal del sistema eléctrico. Una falla permanente podría provocar daños térmicos y destructivos a los distintos equipos conectados a dicha red eléctrica.

Para efectos de diseño, la red de media tensión que energizará al nuevo proyecto va a ser acoplada a la red de distribución existente a cargo de la compañía que gestiona la energía eléctrica en ese lugar. El determinar la capacidad de cortocircuito para la selección de los equipos de protección no debería ser ningún problema, pues la misma distribuidora brinda la información referente a la potencia de cortocircuito en el punto de conexión del nuevo proyecto.

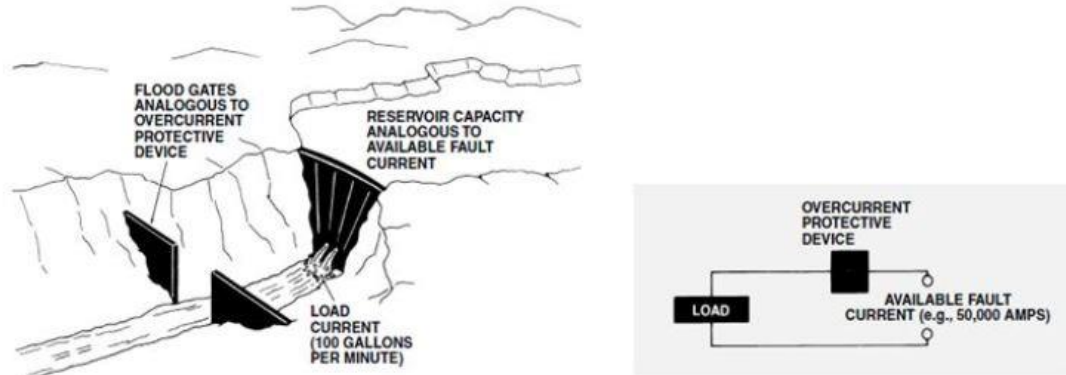
Una manera muy utilizada para explicar el concepto de la capacidad de cortocircuito o potencia de cortocircuito es mediante una analogía entre un sistema hidráulico y un sistema eléctrico, el cual cuando opera de manera normal se podría representar como un caudal nominal

de 100 galones por minuto. Esto correspondería a una corriente demandada por la carga y el caudal contenido por la represa corresponde a la capacidad de cortocircuito del sistema, que en este caso se representa como 50,000 amperios.

Figura 1.

Analogía entre sistema hidráulico y sistema eléctrico en condiciones normales

Normal Current Operation

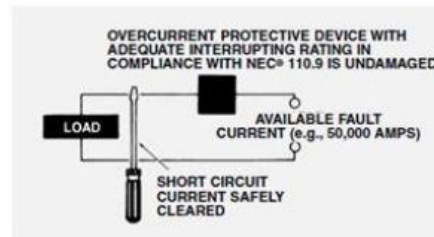
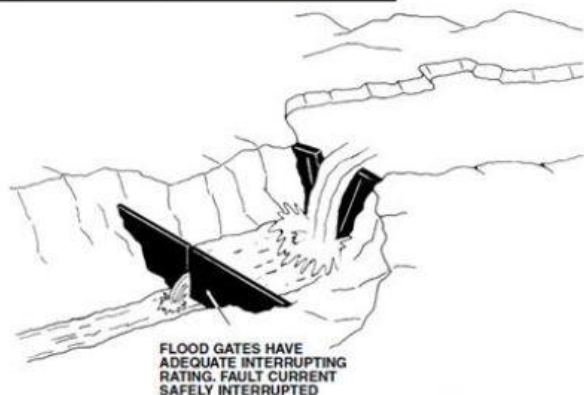


Fuente: <http://slideplayer.es/slide/5566711/>

De igual manera, según la selección de los distintos equipos de protección, los cuales pueden ser un fusible de expulsión, un fusible limitador de corriente de rango total o parcial o un interruptor, su capacidad de cortocircuito deberá ser acorde con la magnitud de corriente que deberá interrumpir tal como se muestra a continuación:

Figura 2.
Operación correcta del elemento de protección

Short-Circuit Operation with Adequate Interrupting Rating

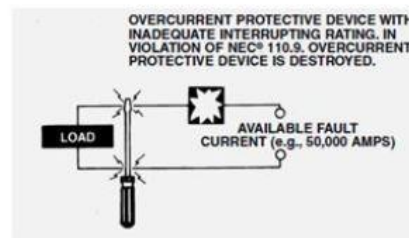
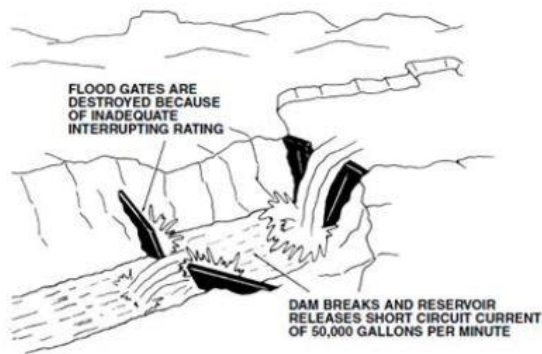


Fuente: <http://slideplayer.es/slide/5566711/>

De no realizarse el cálculo de manera correcta e instalar las protecciones indebidas, los equipos de protección no actuarán adecuadamente:

Figura 3.
Operación incorrecta del elemento de protección

Short-Circuit Operation with Inadequate Interrupting Rating

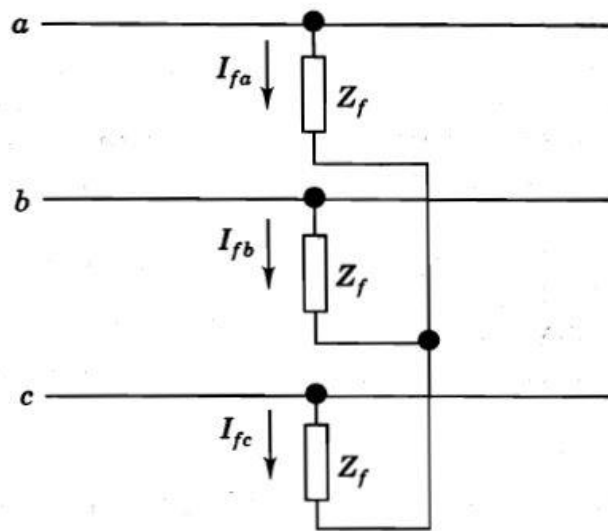


Fuente: <http://slideplayer.es/slide/5566711/>

2.3 Tipos de fallas de cortocircuito

Fallas simétricas: una falla simétrica trifásica es una falla en la cual se ven afectadas las tres fases al mismo tiempo. Además, las tres fases tienen cargas simétricas, lo cual tiene como consecuencia el mayor flujo de corriente de falla a la que se puede verse sometido el sistema (figura 4, Grainger & Steverson Jr., 1996). Estas fallas representan solo el 5% del total de eventos:

Figura 4.
Falla trifásica

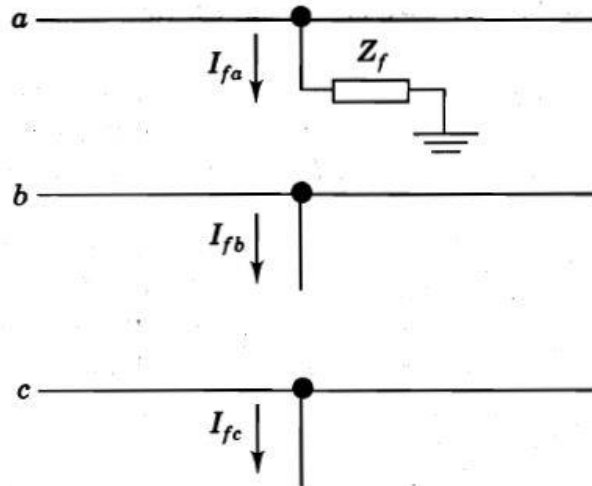


Fuente: Grainger, & Steverson Jr., 1996

Fallas asimétricas: la mayoría de fallas que ocurren en los sistemas de potencia son fallas asimétricas y producen desbalances en circuitos balanceados.

Las fallas asimétricas que pueden ocurrir son las siguientes: fallas de línea a tierra o monofásicas a tierra, las cuales representan un 70% del total de fallas:

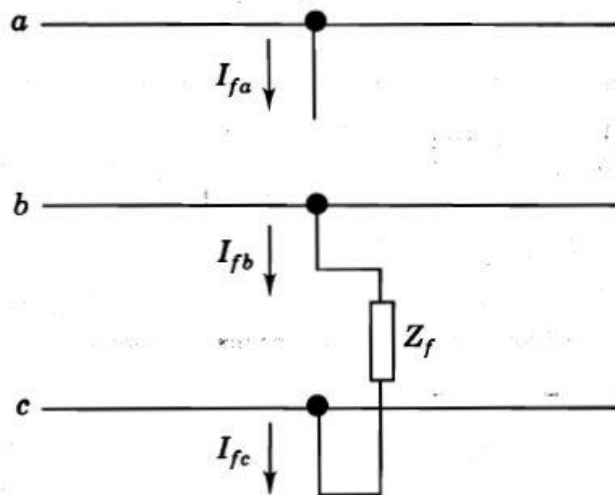
Figura 5.
Falla monofásica a tierra



Fuente: Grainger, & Steverson Jr., 1996

También, están las fallas línea a línea o bipolares, las cuales se presentan en un 15% de los casos:

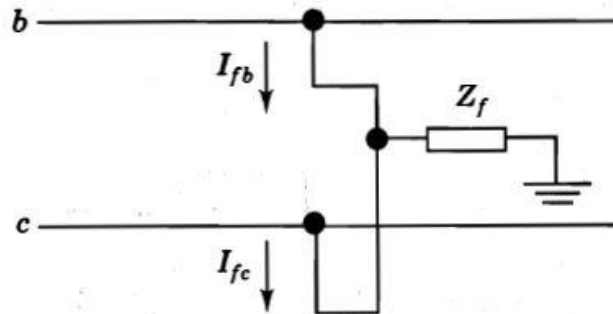
Figura 6.
Falla monofásica a tierra



Fuente: Grainger, & Steverson Jr., 1996

Por último, pueden ser fallas entre línea a línea y a tierra los cuales representan el 10% de las fallas:

Figura 7.
Falla bifásica a tierra



Fuente: Grainger, & Steverson Jr., 1996

2.4 Método de las componentes simétricas

El método de las componentes simétricas es útil en un análisis para determinar las corrientes y los voltajes en todas las partes del sistema después de que ha ocurrido la falla, ya que cualquier falla asimétrica genera corrientes desbalanceadas en el sistema. Por medio de los componentes simétricos, tres fasores desbalanceados de un sistema trifásico se pueden descomponer en tres sistemas balanceados. La ventaja de estos sistemas es que permiten ser analizados con base en una sola fase. En cualquier punto, las corrientes en las tres fases son iguales en magnitud y separadas un ángulo de fase de 120° .

Las impedancias que representan los distintos elementos del sistema de potencia como: transformadores, generadores, motores y líneas de transmisión y distribución se desacoplan entre sí en componentes simétricos, lo cual da como resultado redes independientes del sistema para cada componente.

Componentes de secuencia positiva. Consisten en tres fasores de igual magnitud desfasados 120° y tienen la misma secuencia de fase que las fases originales.

Componentes de secuencia negativa. Consisten en tres fasores de igual magnitud desfasados 120° y tienen la secuencia de fase contraria a las fases originales.

Las impedancias de secuencia positiva pueden determinarse mediante la expresión:

$$Z_1 = Z_2 = RC + j2 \times \pi \times f \times 4,6052 \times 10^{-4} \times \log \frac{DMG}{RMG} \quad (2.1)$$

Donde:

Z_1 : impedancia de secuencia positiva, en ohmios/kilómetro.

Z_2 : impedancia de secuencia negativa, en ohmios/kilómetro.

DMG: distancia media geométrica, en metros.

Rc: resistencia del conductor, según el tipo y el calibre (anexo).

f : frecuencia del sistema (60 ciclos/segundos).

RMG: radio medio geométrico del conductor, en metros (anexo).

Componentes de secuencia cero. También se les conoce como *homopolares* y consisten en tres fasores de igual magnitud y con desplazamiento de fase de 0° . La impedancia de secuencia cero es mucho mayor que la impedancia de secuencia positiva y negativa.

La impedancia de secuencia cero está dada por:

$$Z_0 = 3 \times \left(Z_{aa} - \frac{Z_{ax}^2}{Z_{xx}} \right) \times L \quad (2.2)$$

Donde:

L: longitud de la sección en metros.

Z_{aa} , Z_{ax} y Z_{xx} : son distintos niveles de impedancia que deben ser calculados.

Para circuitos monofásicos: $Z_0 = Z_1$.

Finalmente, se concluye que todo sistema de media tensión tiene distintos valores de Z_0, Z_1 y Z_2 , los cuales son suministrados en forma directa o indirecta por parte del proveedor del servicio de energía eléctrica. Por lo tanto, los valores de corriente de cortocircuito según sea el caso son el resultado de las siguientes expresiones:

Falla trifásica:

$$|I| = \left| \frac{V_f}{Z_1 + Z_f} \right| \quad (2.3)$$

Falla línea a línea:

$$|I| = \left| \pm j \frac{\sqrt{3}V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \right| \quad (2.4)$$

Falla monofásica a tierra:

$$|I| = \left| \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \right| \quad (2.5)$$

Falla bifásica a tierra:

$$|I| = \left| -j\sqrt{3}V_f \frac{Z_0 + 3Z_f - aZ_2}{Z_1Z_2 + (Z_1 + Z_2)(Z_0 + 3Z_f)} \right| \quad (2.6)$$

Y, la otra fase asociada con esta falla:

$$|I| = \left| +j\sqrt{3}V_f \frac{Z_0 + 3Z_f - a^2Z_2}{Z_1Z_2 + (Z_1 + Z_2)(Z_0 + 3Z_f)} \right| \quad (2.7)$$

Donde:

Z_f : corresponde a una impedancia de falla y su valor oscila entre los 5Ω y 40Ω , a menor impedancia de falla, mayor corriente de cortocircuito.

La determinación de la corriente de cortocircuito en determinado punto de la red dependerá de la sumatoria de las diferentes impedancias y la aplicación de las ecuaciones anteriores en función del tipo de cortocircuito que se quiera calcular.

Los valores de Z_0 , Z_1 y Z_2 dependerán de si se trata de una línea aérea o subterránea y de la geometría de construcción de dicha línea, además de la resistividad del terreno.

CAPÍTULO III

MARCO

METODOLÓGICO

3. Marco metodológico

Obtenidos los valores de Z_0 , Z_1 y Z_2 para los tramos de línea ya sea aérea y/o subterránea según el tipo de proyecto, se procede a ir sumando dichos tramos a la de Z_0 , Z_1 y Z_2 que la fuente tiene en el inicio del proyecto, los cuales son valores facilitados por la distribuidora correspondiente para finalmente conocer el nuevo valor de cortocircuito.

3.1 Utilización del software ETAB

Para el análisis de corriente de cortocircuito mediante la utilización del *software*, se implementará el método ANSI/IEEE, y por ser un sistema monofásico, se realizará el cálculo de fallas desbalanceadas. Según la necesidad, el *software* ofrece la posibilidad de realizar el análisis de las corrientes momentáneas (1/2 ciclo, red subtransitoria), de interrupción (De 1.5 – 4 ciclos, red transitoria) y red de estado estacionario (30 ciclos).

Según la información brindada por COOPEGUANACASTE, la corriente de cortocircuito pico asimétrica es de 1391 amperios. A partir de este dato, se analizarán las capacidades interruptivas de los elementos de protección de baja tensión, así como la de los elementos de media tensión.

Figura 8.

Niveles de impedancia y corrientes de cortocircuito en el punto de conexión

| | | |
|-------------------------------------|---------------------|-------------------|
| Proyecto: Red de media tensión | ETAP | Página: 2 |
| Ubicación: Coopeguanacaste RL | 14.1.0C | Fecha: 27-06-2017 |
| Contrato: | | SN: COOPEGUANA |
| Ingeniero: Carlos Cascante | Caso de Estudio: SC | Revisión: Base |
| Nombre de Archivo: Modelo_Etap_2017 | | Config: Normal |

| Falta en Barra: Base 2+3km | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|-----------------|-------------|---------------------------|----------------------|--------|-------------|-------|---|-----------|-----------|-----------|
| kV Nominal = 24.940 | | | | | | | | | | | | |
| Factor c Tensión = 1.10 (Definido por el Usuario) | | | | | | | | | | | | |
| Contribución | | Falta Trifásica | | | Falta Línea-a-Tierra | | | | Impedancias de Secuencia Positiva y Cero Observando en "Barra Origen" | | | |
| Barra Origen ID | Barra Destino ID | % V Barra | kA rms Sim. | % Tensión en Barra Origen | | | kA Sum. rms | | % Impedancia en Base 100 MVA | | | |
| | | | | Va | Vb | Vc | Ia | 3I0 | R1 | X1 | R0 | X0 |
| Base 2+3km | Total | 0.00 | 1.528 | 0.00 | 133.88 | 134.37 | 0.727 | 0.727 | 7.04E+001 | 1.51E+002 | 3.11E+002 | 6.47E+002 |
| Base 2 Pimilla | Base 2+3km | 17.17 | 1.176 | 13.82 | 129.75 | 129.71 | 0.615 | 0.727 | 1.12E+002 | 1.86E+002 | 3.11E+002 | 6.47E+002 |
| + Malinches | Base 2+3km | 100.00 | 0.039 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 0.012 | 0.000 | 9.69E+002 | 6.46E+003 | | |
| + Pimilla2 | Base 2+3km | 100.00 | 0.341 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 0.108 | 0.000 | 7.44E+001 | 7.44E+002 | | |
| C. Hernandez | Base 2 Pimilla | 23.73 | 1.176 | 20.51 | 127.02 | 127.27 | 0.615 | 0.727 | 8.14E+001 | 1.64E+002 | 2.59E+002 | 5.74E+002 |
| Subest+5km | C. Hernandez | 68.60 | 1.176 | 76.85 | 99.25 | 110.06 | 0.615 | 0.727 | 7.58E+001 | 1.49E+002 | 2.42E+002 | 5.28E+002 |
| | | Trifásico | | L-T | | L-L | | L-L-T | | | | |
| Corriente Simétrica Inicial (kA, rms) | | : | 1.528 | : | 0.727 | : | 1.323 | : | 1.347 | | | |
| Corriente Pico (kA), Método C | | : | 2.923 | : | 1.391 | : | 2.531 | : | 2.577 | | | |
| Corriente de Corte (kA, rms, symm) | | : | | : | 0.727 | : | 1.323 | : | 1.347 | | | |
| Corriente de Estado Permanente (kA, rms) | | : | 1.153 | : | 0.727 | : | 1.323 | : | 1.347 | | | |

Indica contribución a corriente de falta desde transformador de tres devanados.
* Indica una contribución a la corriente de falta de secuencia cero (3I0) desde un transformador Delta-Y conectado a tierra.

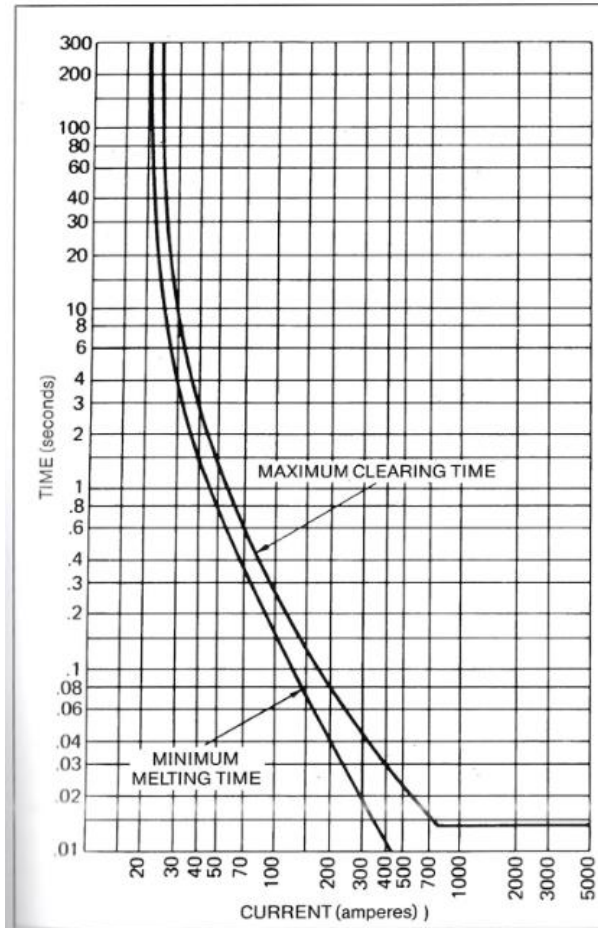
Fuente: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo

Elaboración del diagrama unifilar eléctrico

Seguidamente, se procederá a armar el diagrama unifilar eléctrico al colocar los distintos equipos de protección para la simulación de la red. Por lo tanto, se procederá a hacer una **Fusibles de expulsión**: el fusible de expulsión es quizás el elemento más antiguo y económico que ofrece la industria. Son construidos siguiendo la norma IEE C37.42 y responden a curvas tiempo corriente (TCC). El tiempo que tarda un fusible en interrumpir una corriente de falla depende del valor de ésta. Las características de operación de cada fusible se representan a través de curvas en el plano TCC.

Los fusibles tienen dos curvas asociadas en el plano TCC, las cuales son el tiempo mínimo de fundido (*minimum melting time*) y la curva de tiempo total de despeje (*total clearing time*).

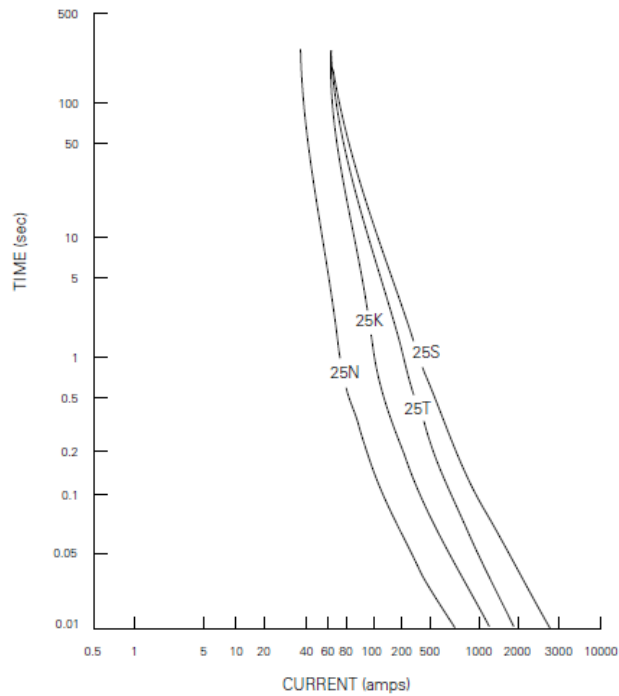
Figura 9.
Curva tiempo-corriente de fusible 10K



Fuente: COOPER Power Systems, 2005. Electrical Distribution-System Protection.
Wisconsin, U.S.A.

Figura 10.

Curvas de tiempo mínimo de fundido de fusibles tipo K,T,N y S



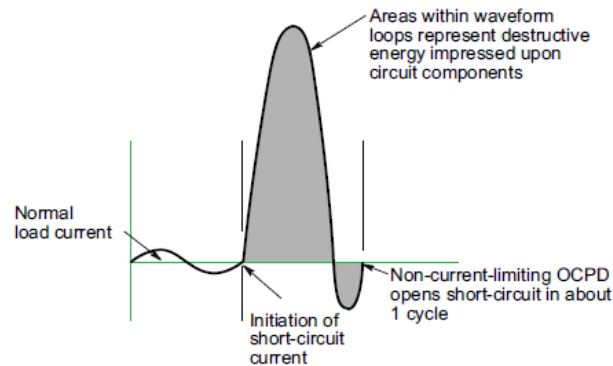
Fuente: <http://www.eaton.cl/conosur/index.htm>

Un fusible de expulsión es un elemento de protección que corta el paso de la corriente progresivamente al paso por cero, lo cual limita la duración de una falla en el sistema eléctrico y no la magnitud.

Figura 11.

Comportamiento de falla de corriente de cortocircuito

Current-Limitation — Component Protection



A non-current-limiting protective device, by permitting a short-circuit current to build up to its full value, can let an immense amount of destructive short-circuit heat and magnetic energy through before opening the circuit.

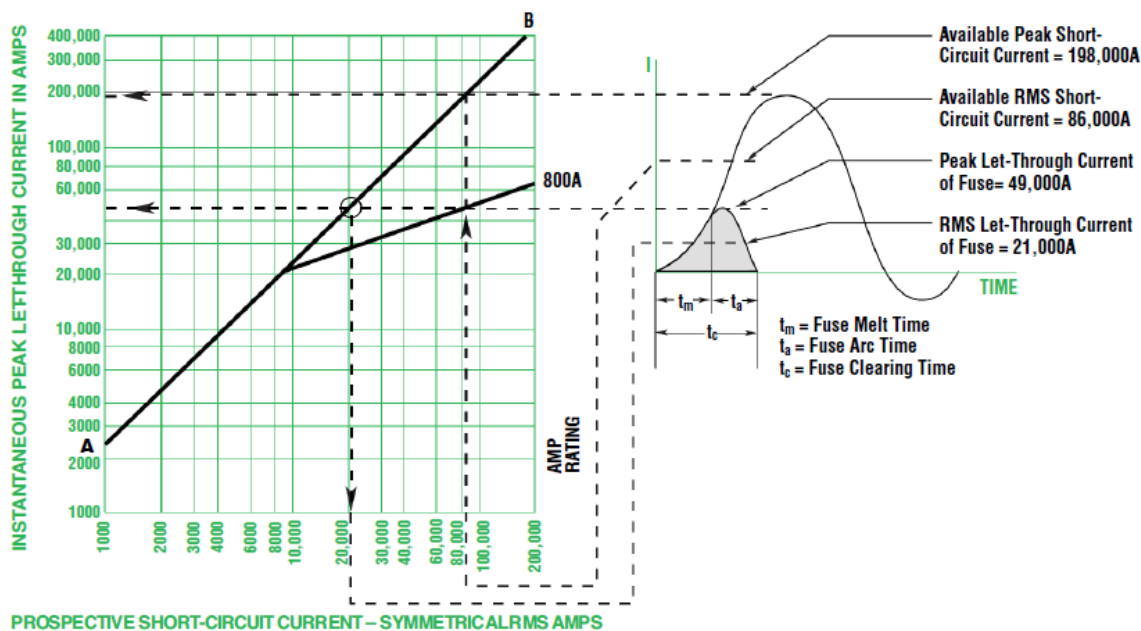
Fuente: <http://www.cooperindustries.com/content/public/en.html>

Hay otra clase de fusibles de expulsión que son diseñados especialmente para transformadores de uso subterráneo, ya sean del tipo pedestal o sumergibles. Este tipo de fusibles son conocidos como fusibles bayoneta (*Bay-O-Net Fuse Link*) y tienen la función de proteger el sistema de distribución en el caso de falla interna del transformador, falla en el secundario o sobrecarga excesiva.

Fusible limitador de corriente: un fusible limitador de corriente es un fusible que cuando su elemento de respuesta a la corriente se funde por acción de una corriente dentro del rango de limitación, presenta una alta resistencia para reducir la magnitud y la duración de la corriente interrumpiéndola abruptamente. Tienen la capacidad de interrumpir corrientes a tiempos menores a medio ciclo. Dicho efecto limita la energía pasante, por tanto, minimiza las consecuencias desastrosas que pueda generar un cortocircuito.

Figura 12.

Operación de fusible limitador de corriente

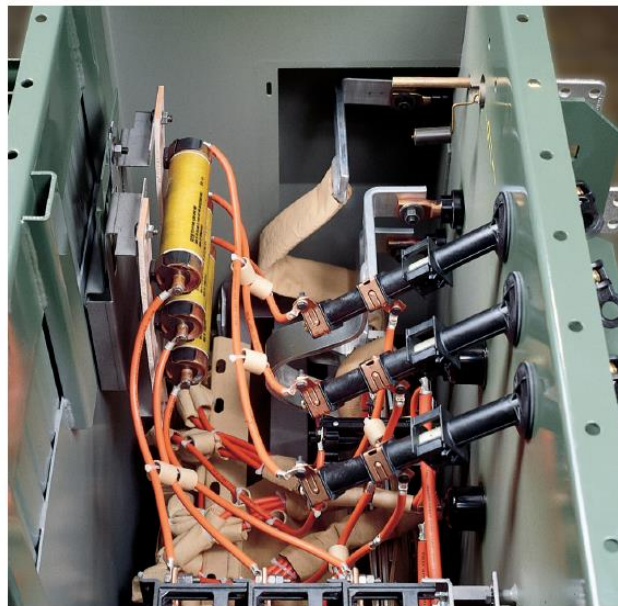


Fuente: <http://www.cooperindustries.com/content/public/en.html>

De igual manera que los fusibles de expulsión, los fusibles limitadores de corriente responden a curvas de tiempo – corriente y también pueden ser para uso externo o inmersos en aceite. Dentro de los distintos fusibles de este tipo, se encuentran los fusibles de rango parcial, los cuales son comúnmente utilizados en conjunto con un fusible de expulsión o algún otro dispositivo, por su capacidad de interrumpir corrientes por encima de un nivel específico.

Figura 13.

Protecciones internas de corrientes de cortocircuito de transformadores eléctricos



Bay-O-Net and ELSP backup current-limiting fuse combination working together for optimal protection of a three-phase transformer.

Fuente: <http://www.cooperindustries.com/content/public/en.html>

Asimismo, están los fusibles de alcance completo, los cuales interrumpen todas las sobrecargas y corrientes de falla. Además, tienen la capacidad de despejar todas las corrientes suficientemente altas para fundir el elemento y controlan los niveles del arco de voltaje, limitando los niveles de corriente y **energía específica pasante (I^2t)** durante la operación de despeje de fallas de alta corriente.

Conductores para media tensión: los conductores de potencia para media tensión deben poseer una serie de características técnicas y requisitos de calidad para cumplir correctamente con su función de transporte de energía eléctrica. Estas características son:

- Tipo de conductor.
- Sección transversal del conductor.
- Material del conductor.
- Aislamiento
- Temperaturas máximas de operación.

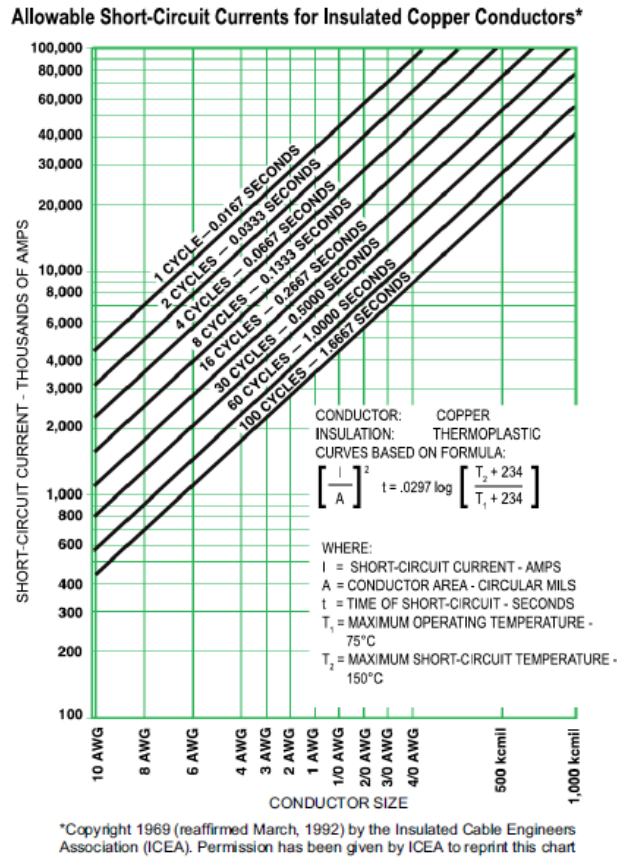
- Identificación.

La fabricación, pruebas de calidad y aceptación de los conductores eléctricos deben cumplir con las normativas correspondientes y vigentes a su última revisión.

De igual manera, los conductores eléctricos de potencia deben ser protegidos de corrientes de acuerdo con sus distintos niveles de ampacidad. Adicionalmente, deben ser protegidos de corrientes de falla de cortocircuito por elementos de protección que salvaguarden su integridad ante condiciones de falla.

Figura 14.

Efecto de corrientes de cortocircuito en conductores eléctricos

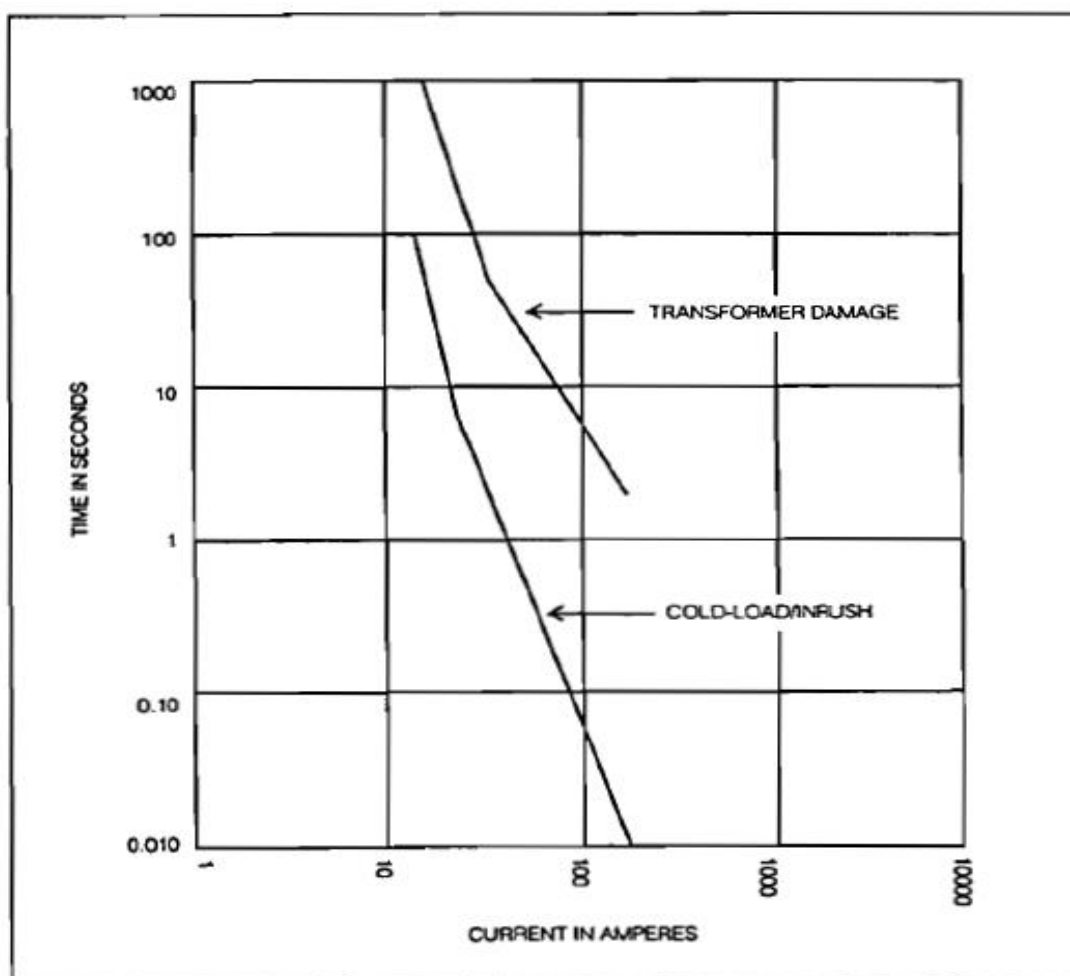


Fuente: <http://www.cooperindustries.com/content/public/en.html>

Transformadores: es uno de los elementos de mayor costo en un sistema de distribución eléctrico. Existen diferentes tipos de transformadores en función del tipo de servicio por brindar, por ejemplo tipo poste, pedestal, sumergibles y secos, para los cuales existen también diferentes esquemas de protección.

Todos los transformadores tienen límites térmicos, tanto por sobrecarga, como por cortocircuito, y deben ser salvaguardados mediante la colocación de las protecciones eléctricas correctas.

Figura 15.
Curvas típicas de magnetización y daño de transformador



Fuente: <http://www.cooperindustries.com/content/public/en.html>

Para transformadores de uso subterráneo (pedestal o sumergible), se da una combinación de fusible de expulsión y fusible limitador de corriente en el esquema de protección. Esto porque si la falla es a lo interno del transformador, aplica la corriente de cortocircuito del sistema de distribución en el punto de conexión. Mientras tanto, para una falla pasante (fuera del transformador en el lado de baja tensión), dicho valor será determinado por la potencia e impedancia del transformador.

3.2 Inspección visual en sitio y recolección de datos

En coordinación con COOPEGUANACASTE y con el Departamento de Servicios Técnicos de Hacienda Pinilla, se realiza una inspección general a la infraestructura eléctrica del proyecto para confirmar algunos datos de la red de distribución interna del condominio, como por ejemplo, distribución de cargas entre fases, calibre y distancia de conductores eléctricos, capacidad interruptiva de interruptores automáticos de baja tensión y de elementos de protección de media tensión, etc. De manera adicional, se aprovecharía dicha inspección para identificar cualquier inconsistencia que pudiese estar presente en la red existente.

Mediante dicha inspección, se ubicó un posible recalentamiento en uno de los terminales secundarios del transformador monofásico de 250 KVA del módulo 3, lo cual representaría una alerta que se debía atender a la mayor brevedad posible.

Figura 16.

Transformador eléctrico monofásico de 250 KVA de módulo 3

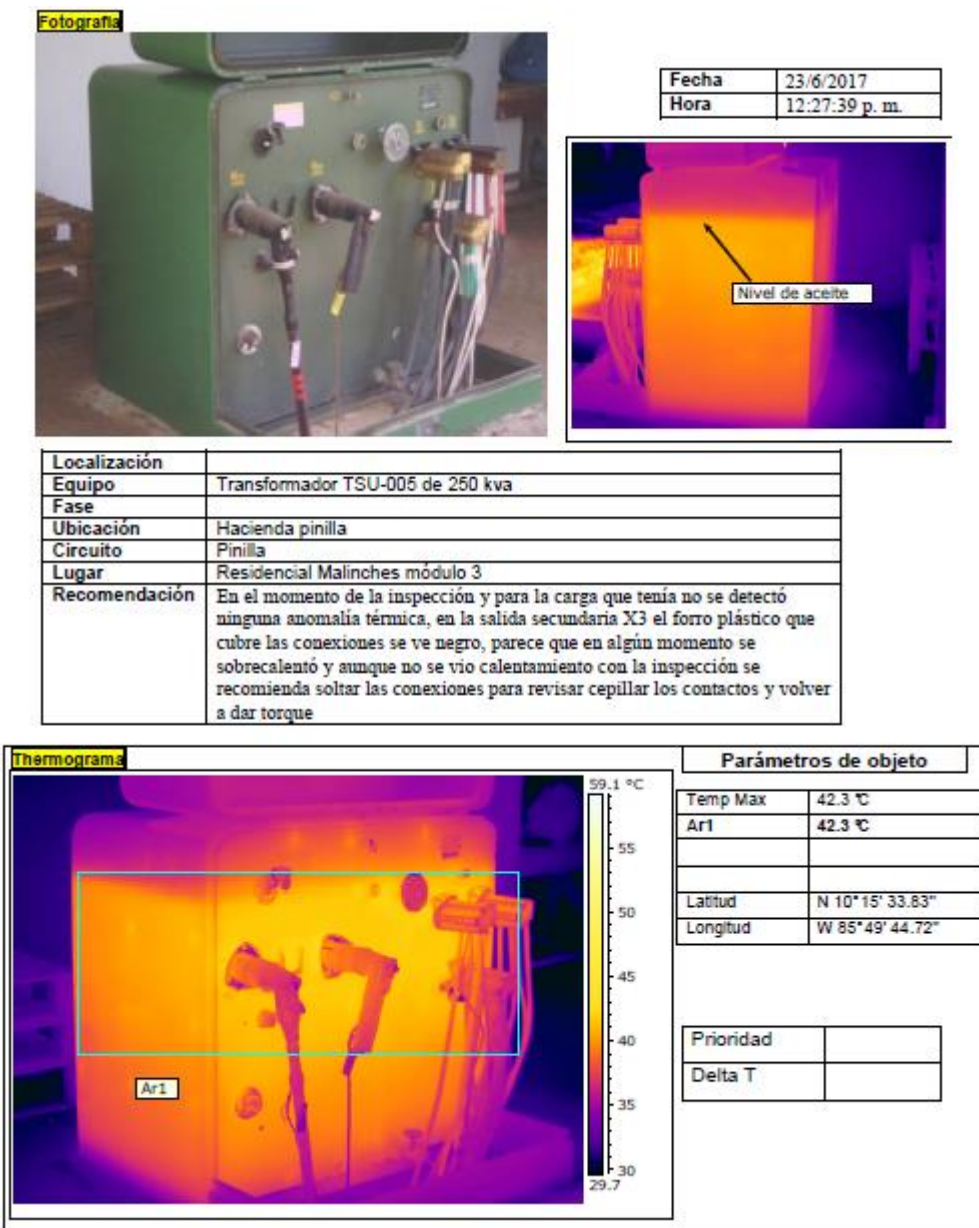


Fuente: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo

Aprovechando la cooperación de COOPEGUANACASTE, se gestionó con dicha cooperativa darle seguimiento a esta posible falla, por lo cual se determinó que era necesario realizarles una termografía a los equipos para confirmar o descartar cualquier tipo de inconveniente. Mediante ello, se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 17.

Termografía de transformador eléctrico monofásico de 250 KVA de módulo 3



Fuente: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo

Posterior a la inspección realizada, se logró determinar que pese a que los equipos no están sometidos a una carga eléctrica importante, los niveles de temperatura registrados fueron aceptables, por lo tanto, no se detectó ninguna anomalía térmica. No obstante, se le recomienda

al Departamento de Servicios Técnicos de Hacienda Pinilla el realizar mantenimiento preventivo a los terminales secundarios de dicho transformador eléctrico.

3.3 Cálculo de corriente de cortocircuito

Mediante la utilización del *software* ETAP, se procede a analizar las corrientes de falla para lo cual en este caso en particular sería falla monofásica de línea a tierra. El condominio Residencial Malinches al ser un proyecto residencial no posee grandes cargas inductivas, por lo tanto, su aporte a la corriente total de cortocircuito no es realmente considerable.

Para la realización del estudio de las corrientes de falla de cortocircuito, se realizará según el estándar ANSI/IEEE, pues el *software* también ofrece la opción de realizar el estudio según estándar IEC.

Para la realización del cálculo de cortocircuito, se procede a ingresar los datos ya conocidos, por ejemplo voltaje de la fuente y niveles de impedancia del sistema. Por ser un proyecto monofásico en su totalidad, se deben trabajar las impedancias desbalanceadas del sistema. Para el análisis en mención, se procederá a calcular las corrientes de falla momentánea, red de ½ ciclo (red subtransitoria). De igual manera, el *software* brinda la opción de realizar el análisis para red de 1.5 a 4 ciclos (red transitoria) y red de 30 ciclos (red de estado estacionario).

Figura 18.

Barra de herramientas ETAP, Norma ANSI/IEEE



Fuente: ETAP 16.0.0 Demo

Según los resultados obtenidos de las corrientes máximas de cortocircuito para la red de ½ ciclo, se revisarán las capacidades interruptivas de los elementos de protección de baja tensión y de los fusibles de media tensión.

3.4 Selección de elementos de protección

Seguidamente, se procederá a analizar las capacidades de interrupción de los interruptores de baja tensión, así como la de los fusibles de media tensión.

Para efectos de analizar la capacidad interruptiva de los distintos interruptores automáticos de baja tensión de cada módulo de medición, este trabajo investigativo se limitará a revisar la capacidad máxima de interrupción de dichos elementos.

Figura 19.

Interruptor automático principal típico de paneles de medición del condominio



Fuente: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo

Estos elementos tienen una capacidad nominal de 1200 amperios ajustables, y una capacidad interruptiva variable según su voltaje de operación, de 65 KA a 240 V, de 50 KA a 480 V y de 25 KA a 600 V. Por lo tanto, la corriente de falla en las barras de los módulos de medición (secundario del transformador) no representaría ningún inconveniente para los elementos instalados, ya que tendrían la capacidad de interrumpir sin mayor problema dicha corriente de falla.

Figura 20.
Capacidad interruptiva de interruptores automáticos existentes



Para efectos del dimensionamiento del fusible de expulsión ubicado en el poste de la transición aéreo subterráneo, se realizará en función de la corriente a plena carga (IFL) del transformador instalado. Dado que al proyecto le dan servicio las tres fases del sistema, cada fase alimenta de manera simple dos transformadores de pedestal.

Entiéndase por *alimentar* como la manera de brindar el servicio de energía eléctrica a los elementos en mención.

- La fase A alimenta dos transformadores monofásicos de pedestal de 50 KVA cada uno.
- La fase B alimenta dos transformadores monofásicos de pedestal de 250 KVA cada uno.
- La fase C alimenta dos transformadores monofásicos de pedestal de 250 KVA cada uno.

Según lo anterior, se procederá a simular un “transformador virtual” por cada fase para determinar, tanto la corriente a plena carga (IFL), como la corriente de magnetización (IIN) por fase para la correcta selección del fusible de expulsión de cada fase ubicado en el poste.

$$P = V * I \quad (3.1)$$

$$I = \frac{P}{V} \quad (3.2)$$

Donde:

P: potencia nominal instalada.

V: voltaje nominal.

I: corriente a plena carga.

- Para la fase A, $IFL = \frac{100 \text{ KVA}}{14400 \text{ V}} = 6.94$ amperios.
- Para la fase B, $IFL = \frac{500 \text{ KVA}}{14400 \text{ V}} = 34.72$ amperios.
- Para la fase C, $IFL = \frac{500 \text{ KVA}}{14400 \text{ V}} = 34.72$ Amperios.

Ver anexos recuperados de <http://www.eaton.cl/conosur/index.htm>. Se muestran las curvas tiempo – corriente según tiempo mínimo de fundido (*minimum melting time*) de distintos tipos de fusibles de expulsión tipo T, modelo R240-91-2 de COOPER Power System. Por lo tanto, se procede a realizar la siguiente selección según este modelo:

- Para la fase A, fusible de expulsión 6T.
- Para la fase B, fusible de expulsión 25T.
- Para la fase C, fusible de expulsión 25T.

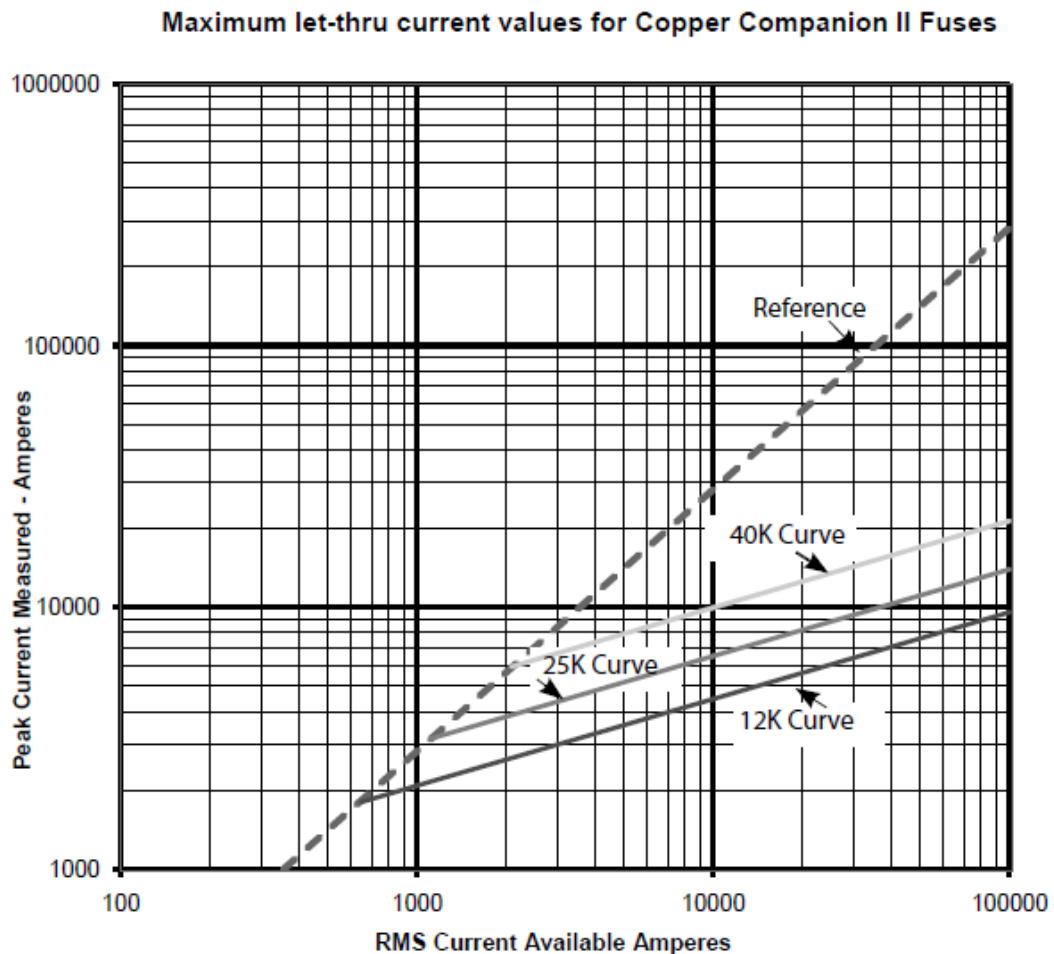
La selección anterior se da en función de los valores recomendados por el fabricante (6, 10, 15, 25, 40, 65, 100, 140, 200). Dicha selección, para los fusibles de expulsión ubicados en el poste es correcta o no, se confirmará posteriormente mediante la coordinación de protecciones.

Para efectos de la selección del fusible limitador de corriente por ubicar en el poste, se debe realizar en función de la zona en la cual este fusible comienza a operar como limitador de corriente, en vistas de que dicha zona está demarcada por las curvas de energía pasante.

En la figura 21, se muestran dichas curvas para el fusible limitador de corriente Companion II de COOPER Power System.

Figura 21.

Curvas para selección de fusible limitador de corriente



Fuente: <http://www.eaton.cl/conosur/index.htm>

Según la curva anterior, queda demostrado que no siempre se puede colocar un fusible limitador de corriente. Esto se debe a que la corriente de falla no es suficiente para que lo haga actuar como tal. Para este modelo en particular, se requiere una corriente de falla RMS mínima de 650 amperios para que este fusible actúe como limitador de corriente.

Adicionalmente, el fabricante presenta opciones de coordinación de este fusible limitador con un fusible de expulsión, por lo tanto, resulta ser un dato adicional por considerar. Entonces, la selección de este tipo de elemento no solo depende de la corriente de falla, sino también de la coordinación con otro fusible, en este caso, un fusible de expulsión.

Figura 22.

Coordinación entre fusibles de expulsión y limitadores de corriente

Companion II Fuse-Fuse Link Coordination
Coordinates With Fuse Links Up Through

| Companion II Fuse Rating | Type K | Type T | Edison™ Type N | Edison Type S | Edison Type H | Edison Type D |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| 12 K | 12 | 8 | 20 | 5 | 8 | 1.5 |
| 25 K | 25 | 15 | 30 | 7 | 8 | 20 |
| 40 K | 40 | 20 | 50 | 15 | 8 | 20 |
| | Kearney™ Type X™ | Kearney Type QA™ | Kearney Type 200™ | Kearney Type KS™ | | |
| 12 K | 2.5 | 15 | 10 | 3 | | |
| 25 K | 10 | 30 | 20 | 7 | | |
| 40 K | 15 | 50 | 30 | 15 | | |

Fuente: <http://www.eaton.cl/conosur/index.htm>

Seguidamente, se procede a conocer los valores de los fusibles de expulsión y limitadores que vienen desde la fábrica de los transformadores de pedestal, y su respectiva coordinación. El fusible de expulsión que viene incorporado dentro de los transformadores del tipo pedestal es comúnmente llamado como fusible bayoneta por su nombre en inglés (*Bay-Of-Net fuse link*).

Figura 23.

Catálogo de fusibles de expulsión internos de transformadores eléctricos

Correlation Information
Single-Phase Transformer (Phase-to-Ground) Applications

| Transformer kVA | Transformer Primary Voltage (kV) | | | | | | | | | | |
|-----------------|----------------------------------|------|-----|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| | 2.4 | 4.16 | 4.8 | 7.2 | 7.62 | 8.32 | 12.0 | 12.47 | 13.2 | 13.8 | 14.4 |
| 5 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 |
| 10 | C05 | C05 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 |
| 15 | C08 | C05 | C05 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 |
| 25 | C10 | C08 | C08 | C05 | C05 | C05 | C03 | C03 | C03 | C03 | C03 |
| 37.5 | C12 | C10 | C08 | C08 | C08 | C08 | C05 | C05 | C05 | C05 | C05 |
| 50 | C12 | C10 | C10 | C08 | C08 | C08 | C05 | C05 | C05 | C05 | C05 |
| 75 | C14 | C12 | C12 | C10 | C10 | C10 | C08 | C08 | C08 | C08 | C08 |
| 100 | C14 | C12 | C12 | C10 | C10 | C10 | C08 | C08 | C08 | C08 | C08 |
| 167 | C18 | C14 | C14 | C12 | C12 | C12 | C10 | C10 | C10 | C10 | C10 |
| 250 | - | C16 | C18 | C14 | C14 | C14 | C12 | C12 | C12 | C12 | C12 |
| 333 | - | C18a | C18 | C14a | C14a | C14a | C12 | C12 | C12 | C12 | C12 |
| 500 | - | - | - | C18 | C18 | C18 | C14 | C14 | C14 | C14 | C14 |

Fuente: <http://www.eaton.cl/conosur/index.htm>

Según la figura 23, cada transformador eléctrico, según su tipo de conexión y voltaje primario, tendrá un fusible de expulsión interno indicado por la figura 24.

Figura 24.

Capacidad de fusibles de expulsión internos, de transformadores eléctricos

| Bay-O-Net Fuse Link | |
|-------------------------------|-----------------|
| Continuous Current Rating (A) | Catalog Number* |
| 3 | 4000358C03 |
| 8 | 4000358C05 |
| 15 | 4000358C08 |
| 25 | 4000358C10 |
| 50 | 4000358C12 |
| 65 | 4000358C14 |
| 100 | 4000358C16CB** |
| 140 | 4000358C18CB** |

* Add suffix "B" to order individual fuse; add "M" to order bag of 50.

** Catalog number is an integral element/cartridge/end plug design.

Fuente: <http://www.eaton.cl/conosur/index.htm>

Finalmente, los fusibles limitadores internos de los transformadores eléctricos del tipo pedestal también están especificados en los manuales de cada fabricante. Seguidamente, se ilustra en la figura 25 con el fusible limitador de corriente ELSP de COOPER Power System utilizado para esta aplicación.

Figura 25.

Capacidades de fusibles limitadores de corriente internos, de transformadores eléctricos

| Recommended Single-Phase Transformer Bay-O-Net and ELSP Combinations (continued) | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------------------|-------------|-----------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|
| Single-Phase Transformer (kVA) | 15.5 kV | | | | | | 23 kV | | | | | |
| | Nominal Single-Phase Voltage (kV) | | | Phase-to-Ground | | | Nominal Single-Phase Voltage (kV) | | | Phase-to-Ground | | |
| | 12 - 12.47 | 13.2 - 14.4 | 16 - 17.2 | 19.92 | Assumed Transformer Impedance (%) | ELSP Rating (A) | Link Cat. No. | Assumed Transformer Impedance (%) | ELSP Rating (A) | Link Cat. No. | Assumed Transformer Impedance (%) | ELSP Rating (A) |
| ELSP and Current Sensing Bay-O-Net Fuse Combinations ^a | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 1.90 | 30 | C04 | 1.90 | 30 | C04 | 1.90 | 30 | C04 | 1.90 | 30 | C04 |
| 10 | 1.90 | 30 | C04 | 1.90 | 30 | C04 | 1.90 | 30 | C04 | 1.90 | 30 | C04 |
| 15 | 1.90 | 30 | C04 | 1.90 | 30 | C04 | 1.90 | 30 | C04 | 1.90 | 30 | C04 |
| 25 | 1.90 | 30 | C04 | 1.90 | 30 | C04 | 1.90 | 30 | C04 | 1.90 | 30 | C04 |
| 37.5 | 1.90 | 30 | C06 | 1.90 | 30 | C06 | 1.90 | 30 | C04 | 1.90 | 30 | C04 |
| 50 | 1.90 | 30 | C06 | 1.90 | 30 | C06 | 1.90 | 30 | C06 | 1.90 | 30 | C06 |
| 75 | 1.90 | 40 | C08 | 1.90 | 40 | C08 | 1.90 | 30 | C06 | 1.90 | 30 | C06 |
| 100 | 2.00 | 50 | C08 | 2.00 | 50 | C08 | 2.02 | 40 | C08 | 2.00 | 40 | C08 |
| 167 | 2.60 | 80 | C10 | 2.60 | 80 | C10 | 2.60 | 80 | C10 | 2.60 | 80 | C10 |
| 250 | 4.00 | 100 | C12 | 4.00 | 100 | C12 | 4.00 | 80 | C10 | 4.00 | 80 | C10 |
| 333 | 5.00 | 150 | C14 | 5.00 | 150 | C14 | 5.00 | 80 | C12 | 5.00 | 80 | C12 |
| 500 | 5.00 | 150 | C14 | 5.00 | 150 | C14 | 5.00 | 125 | C14 | 5.00 | 150 | C14 |

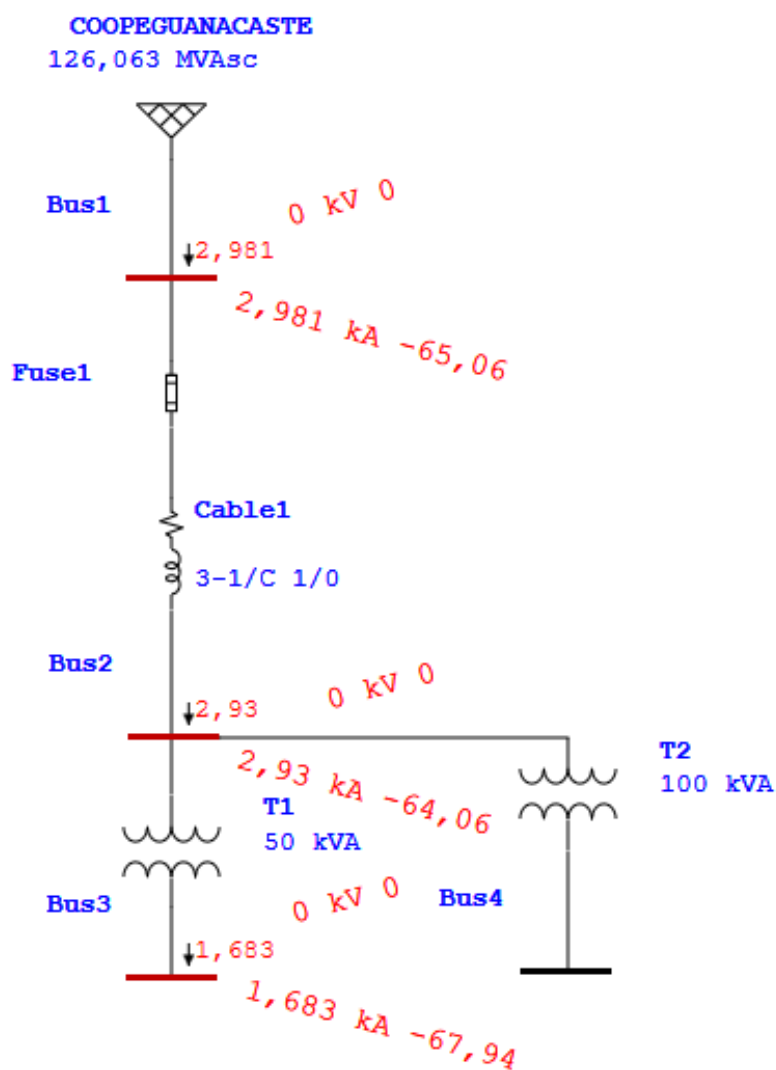
Fuente: <http://www.eaton.cl/conosur/index.htm>

3.5 Análisis de las corrientes de cortocircuito encontradas mediante la utilización del software ETAP

Según los resultados obtenidos mediante la utilización del *software*, se confirma que la capacidad interruptiva de los interruptores automáticos de los cuatro módulos de medición de las villas del condominio deberían soportar la corriente de falla de cortocircuito sin mayor inconveniente.

Figura 26.

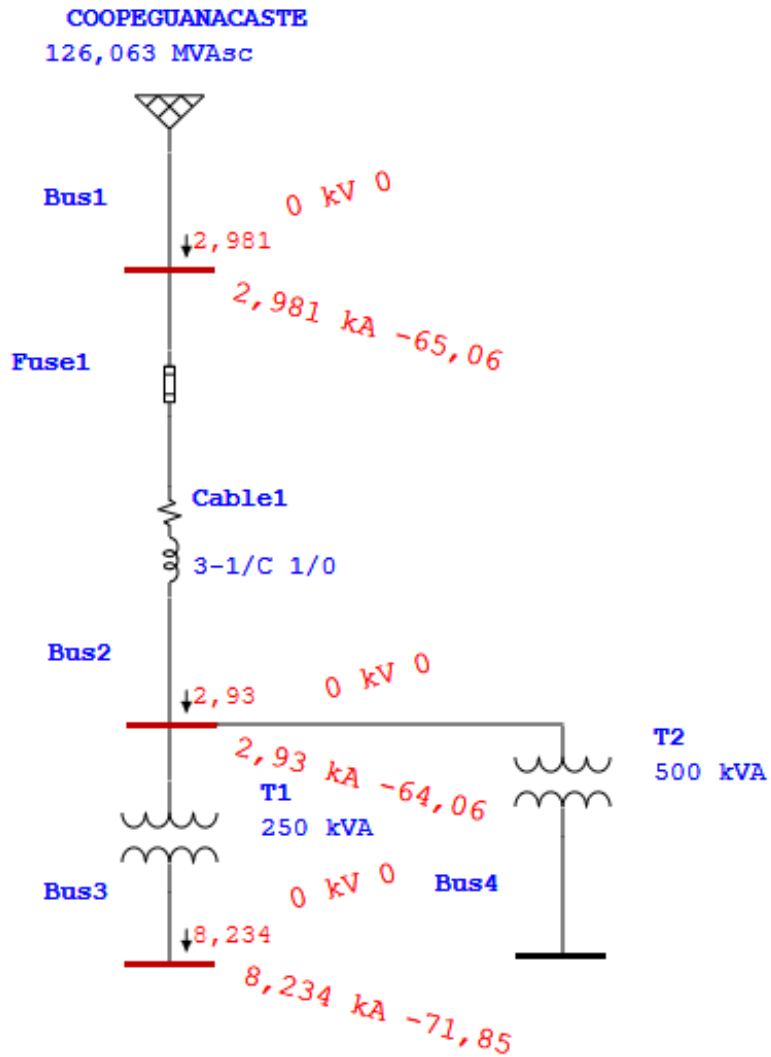
Corrientes de cortocircuito en acometida eléctrica primaria, fase A



Fuente: ETAP 16.0.0 Demo

Figura 27.

Corrientes de cortocircuito en acometidas eléctricas primaria, fases B y C



Fuente: ETAP 16.0.0 Demo

Para efectos de este análisis, se omitió la impedancia de los conductores de baja tensión.

3.6 Coordinación de protecciones

La intención de desarrollar la coordinación de protecciones eléctricas es analizar las capacidades de los elementos de protección de la red de media tensión del condominio, así como su relación con las protecciones internas de los transformadores eléctricos del mismo. Ello con el fin de que ante una posible condición de falla, dichos elementos sirvan de protección para los habitantes del condominio en cuestión y para sus distintos activos, además de garantizar la continuidad del servicio eléctrico si es el caso y provocar la menor afectación posible.

Es muy probable que a nivel de infraestructura eléctrica se realicen ajustes en las distintas protecciones eléctricas por una u otra razón, por lo cual se puede ver afectada la efectividad de las protecciones inicialmente diseñadas. Por lo tanto, la realización de este tipo de estudios puede confirmar o descartar que en proyectos existentes su infraestructura eléctrica se mantenga protegida en forma debida.

El objetivo de esta coordinación es contar con información veraz para evaluar las condiciones de protección actuales del condominio, evitar constantes interrupciones innecesarias del servicio eléctrico y procurar que ante condiciones de falla los elementos de protección actúen de manera correcta.

Para efectos de los elementos de protección seleccionados a nivel de *software*, este estudio se limitará a utilizar las opciones disponibles en la librería del *software* de esta herramienta. Es probable que existan algunas variaciones en los resultados que brinden ciertos elementos de algún fabricante con respecto a otro. Todos los elementos por analizar corresponderán a la red de media tensión.

Adicionalmente, se analizarán las curvas de daño térmico y magnetización de los transformadores eléctricos. Se omite la curva de daño térmico del conductor eléctrico de baja tensión. Además de las curvas tiempo – corriente, se representará de manera paralela el diagrama unifilar eléctrico de media tensión.

En vistas de que el análisis se realizará a un proyecto residencial, no hay presencia de cargas inductivas realmente considerables, por lo tanto, no formarán parte de este análisis.

Finalmente, según los resultados obtenidos se solicitará realizar los ajustes considerados necesarios, ya sea a la administración encargada de gestionar los bienes comunes del condominio o a la compañía a cargo de la administración del servicio de energía eléctrica local (COOPEGUACASTE R.L.)

3.7 Análisis de las curvas tiempo corriente (TCC) generadas mediante la utilización del software ETAP

El criterio utilizado para la selección de los distintos fusibles de protección se realizó en función de la regla del 75% según el libro de texto *Electrical Distribution System Protection* de COOPER Power Systems en su sección *Fuse Coordination*. En dicho texto, se indica que este 75% corresponde al valor máximo de la división del tiempo total de despeje (TCT) del fusible protector, entre el tiempo mínimo de fusión (MMT) del fusible protegido.

Es muy importante distinguir si la falla por interrumpir es dentro o fuera del transformador eléctrico, es decir, si es una falla interna o una falla pasante. Para una falla interna, aplicará la capacidad de cortocircuito del sistema en el punto de conexión, mientras que para una falla pasante (fuera del transformador, en el lado de baja tensión), el valor de falla máxima estaría dado por la potencia e impedancia del transformador.

$$S \text{ de falla} = \frac{S \text{ nom}}{Z (\%)}. \quad (3.3)$$

$$I_{cc, \text{ sec}} = \frac{S \text{ de falla}}{V \text{ sec}} \quad (3.4)$$

Donde:

S de falla: potencia de falla.

S nom: potencia nominal.

Z (%): porcentaje de impedancia del transformador.

V sec: voltaje nominal en el secundario del transformador.

I_{cc, sec}: corriente de falla en el lado secundario del transformador.

La I_{cc} del lado primario del transformador sería:

$$I_{cc, pri} = \frac{I_{cc, sec}}{m} \quad (3.5)$$

Donde:

$I_{cc, pri}$: corriente de falla en el lado primario del transformador.

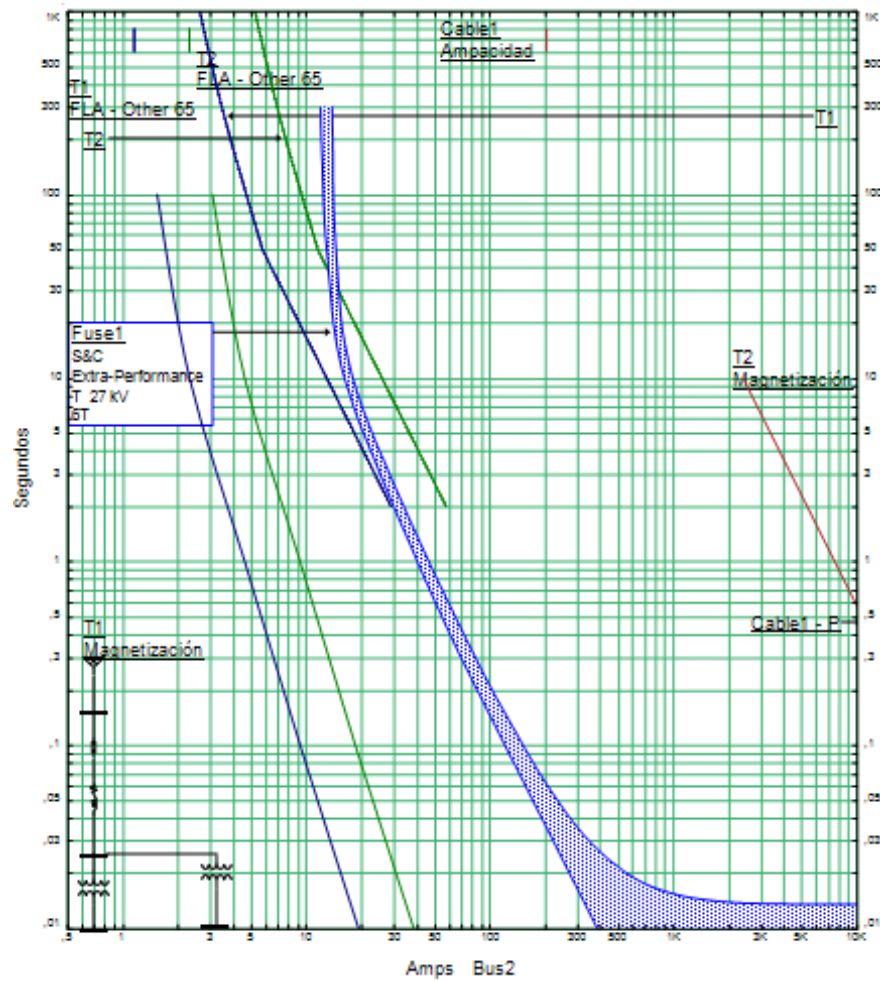
$I_{cc, sec}$: corriente de falla en el lado secundario del transformador.

m : relación de transformación del transformador.

A nivel de coordinación de protecciones, es esencial que el fusible de protección opere antes de que el fusible protegido inicie su etapa de fusión. Los fusibles de expulsión, por su condición normal de operación, actúan cuando la corriente de falla realiza el cruce por cero. Por lo tanto, 0,8 ciclos es considerado como el tiempo mínimo de interrupción, y el rango de coordinación será limitado como resultado de lo anterior.

Figura 28.

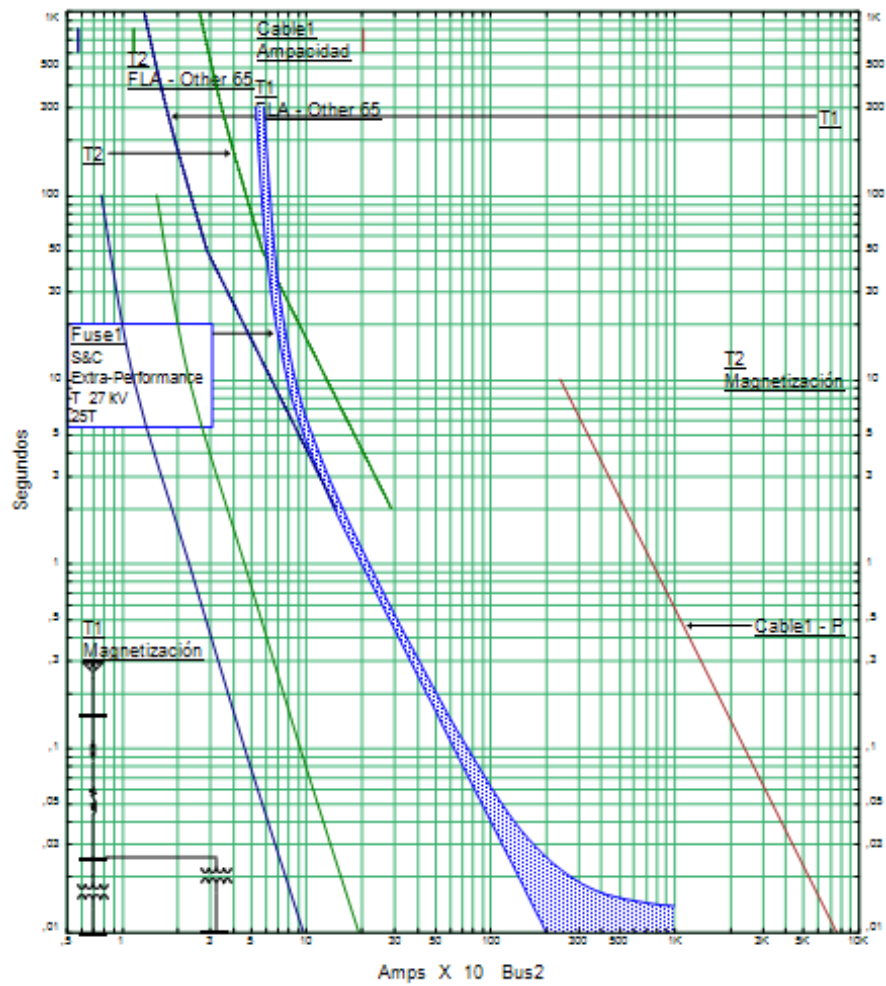
Curva de fusible de expulsión tipo T seleccionado para ubicar en el poste de la transición aéreo subterráneo. Fase A



Fuente: ETAP 16.0.0 Demo

Figura 29.

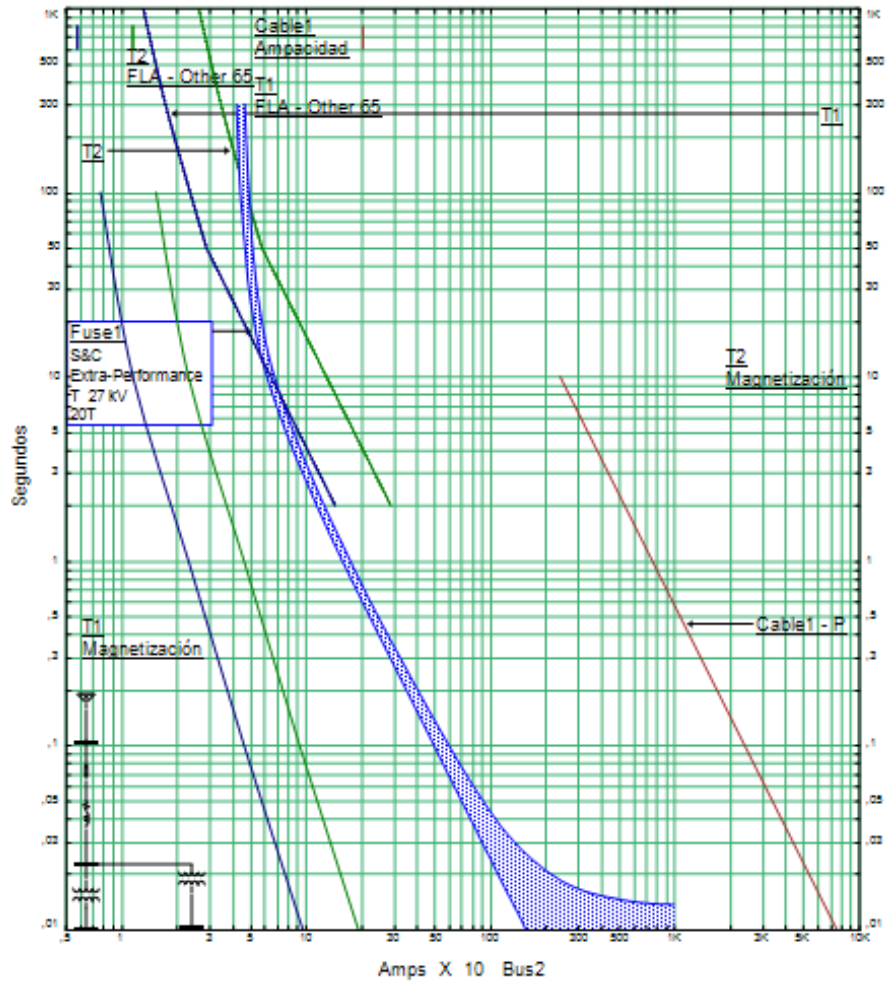
Curva de fusible de expulsión tipo T preseleccionado para ubicar en el poste de la transición aéreo subterráneo. Fases B y C



Fuente: ETAP 16.0.0 Demo

Figura 30.

Curva de fusible de expulsión tipo T propuesto para ubicación en el poste de la transición aéreo subterráneo. Fases B y C



Fuente: ETAP 16.0.0 Demo

CAPÍTULO IV

4.1 Conclusiones

Mediante el recorrido de inspección visual en coordinación con personal técnico de COOPEGUANACASTE R.L., se confirma el buen estado general de la infraestructura eléctrica del condominio.

Según los datos obtenidos en campo, se confirma que las capacidades interruptivas de los interruptores automáticos existentes es apropiada según la corriente de cortocircuito calculada mediante la utilización del *software* ETAP.

Para la realización del diseño, construcción y mantenimiento de la infraestructura eléctrica de proyectos de este tipo, es completamente necesario realizar el estudio de las corrientes de cortocircuito, ya sean simétricas o asimétricas, para determinar las capacidades interruptivas de las distintas protecciones eléctricas instaladas o por instalar. Herramientas tecnológicas como el *software* ETAP facilitan considerablemente la realización de este tipo de estudios, ya que se pueden realizar los ajustes considerados necesarios de manera inmediata, obteniendo así los resultados deseados.

Según los datos de corriente de cortocircuito obtenidos, se descartó la necesidad de instalar fusibles limitadores de corriente en el poste de la transición aéreo subterráneo, pues dicha corriente de falla no sería suficiente para que el fusible que se debiera instalar actúe como tal.

En ese sentido, se consultaron las capacidades de los elementos de protección de media tensión existentes y no fue posible obtener una respuesta concreta por parte de COOPEGUANACASTE R.L. Por lo tanto, se procedió a informar al Departamento Técnico de Mantenimiento de dicha cooperativa que las cargas instaladas en cada fase del sistema de alimentación del proyecto no son exactamente iguales. Debido a esto, se debe procurar que estén instalados los fusibles de expulsión adecuados según la carga eléctrica conectada a cada fase.

4.2 Recomendaciones

Se le recomienda al Departamento de Servicios Técnicos de Hacienda Pinilla realizar mantenimiento preventivo a los transformadores eléctricos del condominio, ya que se ubicaron indicios de recalentamiento en uno de los terminales secundarios del transformador eléctrico del módulo 3. Sin embargo, se descartan posibles daños de dicho transformador mediante la realización de una termografía llevada a cabo en coordinación con COPEGUANACASTE R.L.

En vistas de que el proyecto tiene más de diez años de haberse construido y dada la carencia de información de análisis de corrientes de cortocircuito y coordinación de protecciones, se recomienda realizar este tipo de análisis cada cierto tiempo en procura de que siempre se encuentren instaladas las protecciones eléctricas correctas. Se le solicita a la administración de Hacienda Pinilla considerar como proyecto de inversión a corto plazo, la adquisición de una licencia del software ETAP para la realización de análisis más completos.

Por último, se le sugiere al Departamento Técnico de Mantenimiento de COOPEGUACASTE R.L. confirmar y comparar las capacidades interruptivas de los fusibles de expulsión actualmente instalados en la transición aéreo subterráneo con los resultados obtenidos mediante la implementación del *software* ETAP, para que así tomen las medidas correctivas consideradas necesarias.

CAPÍTULO V

5. Referencias bibliográficas

Textos consultados

Grainger, J. & Steverson Jr., W. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*. México: Mc Graw Hill.

COOPER Power Systems (2005). *Electrical Distribution-System Protection*. Wisconsin, U.S.A.

Páginas de Internet consultadas

<http://www.cooperindustries.com/content/dam/public/bussmann/Electrical/Resources/technical-literature/bus-ele-an-3002-spd.pdf>

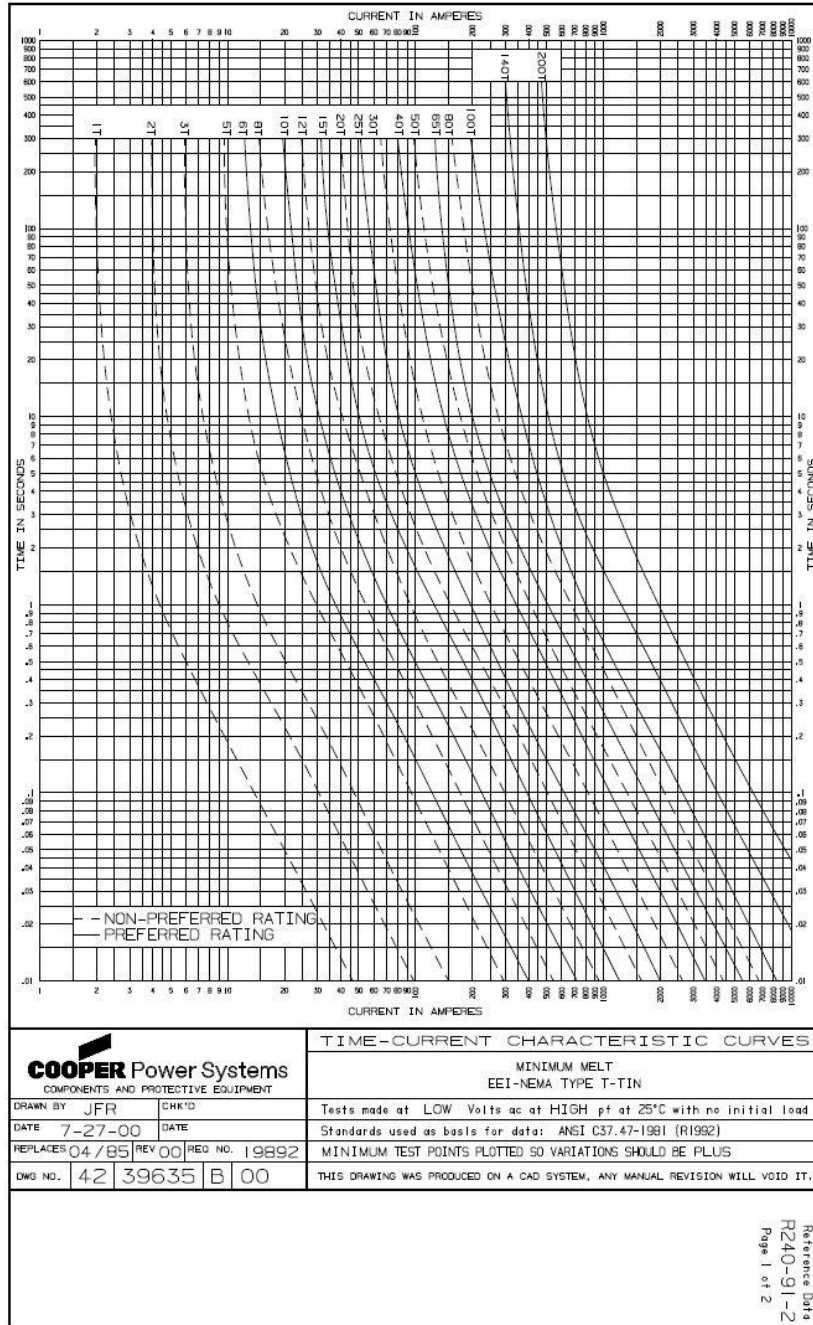
<http://slideplayer.es/slide/5566711/>

http://www.cooperindustries.com/content/dam/public/powersystems/resources/library/240_Fusing/R240912.pdf

<http://www.eaton.cl/conosur/index.htm>

CAPÍTULO VI

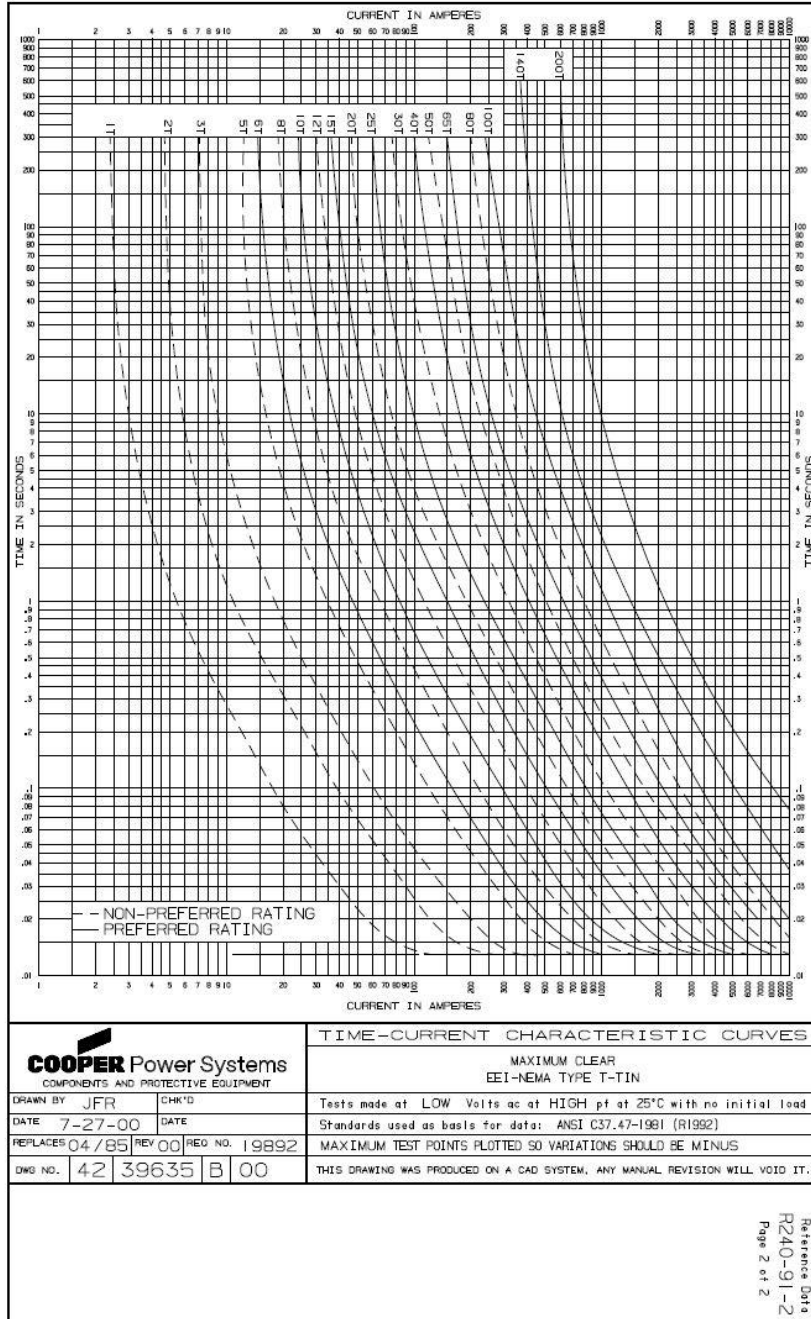
Figura 31.
Curva tiempo - corriente 01, fusible de expulsión tipo T



Fuente: <http://www.eaton.cl/conosur/index.htm>

Figura 32.

Curva tiempo - corriente 02, fusible de expulsión tipo T



Fuente: <http://www.eaton.cl/conosur/index.htm>

Figura 33.
Punto de conexión eléctrica del Condominio Malinches



Fuente: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo

Figura 34.

Limitaciones del software ETAP 16.0.0 en su versión de demostración



Limitaciones de Versión Demo

La versión de prueba de Etap tiene, como toda versión de este tipo, una serie de limitaciones.

- Periodo de prueba de 30 días, prorrogable bajo petición directa.
- Los unifilares tienen un máximo de doce (12) buses de CA y diez (10) de CC.
- Hasta cinco (5) presentaciones STAR.
- No hay opción de guardar un proyecto
- La apertura de proyectos está limitada a la selección de los mismos que ofrece ETAP.
- La impresión de informes está limitada a los ejemplos incluidos en el Demo, aunque los resultados reflejan las modificaciones introducidas por el usuario.
- Están deshabilitadas las funciones de importación, exportación y fusión de proyectos.
- Se pueden insertar nuevos componentes en el unifilar salvo cuadros/tableros y adaptadores de fase.
- Los cuadros/paneles existentes en algunos ejemplos tienen deshabilitada las ventanas de resumen, gestión de informes, impresión y editor de lógica.
- Las librerías no pueden modificarse ni copiarse.
- La librería de energías renovables (Aerogeneradores y paneles solares) está deshabilitada.
- Carece de calculadora de radiación solar.

Fuente: <http://www.etapesp.es/assets/limitaciones-de-versi%C3%B3n-demo2.pdf>

Heredia, 18 de agosto de 2017

Sres.

Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación


SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: Análisis de cortocircuito y coordinación de protecciones en el condominio horizontal residencial Malinches, elaborado por el estudiante para que pueda optar por el grado de licenciatura en ingeniería electromecánica.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,



Lic. Jonathan Jesús Hernández Hernández

Tutor

Heredia, 18 de agosto de 2017

Sres.

Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación

SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: Análisis de cortocircuito y coordinación de protecciones en el condominio horizontal residencial Malinches, elaborado por el estudiante para que pueda optar por el grado de licenciatura en ingeniería electromecánica.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,



Ing. Luis Andrés Brenes Oses, MRT

Lector

CARTA DE APROBACIÓN DEL FILÓLOGO

San José, miércoles 23 de agosto de 2017

Señores
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
Escuela de Ingeniería
Universidad Latina de Costa Rica

Yo, **Edin Mauricio Buzano Barrantes**, en mi condición de filólogo graduado en la Universidad de Costa Rica, certifico que leí y corregí el Proyecto Final de Graduación denominado: **“ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES EN EL CONDOMINIO HORIZONTAL RESIDENCIAL MALINCHES”**, el cual fue elaborado por el estudiante **Diego Armando Gutiérrez Rodríguez**, como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado académico de **Licenciatura en Ingeniería Electromecánica**.

Se hizo la corrección del trabajo en aspectos tales como: construcción de párrafos, vicios del lenguaje que se trasladan a lo escrito, concordancia, coherencia, ortografía, puntuación y otros relacionados con el campo filológico, por lo tanto, desde ese punto de vista considero que está listo para ser presentado como Proyecto Final de Graduación por cuanto cumple con los requisitos establecidos por la Universidad.

Suscribe de ustedes cordialmente,



Lic. Edin Mauricio Buzano Barrantes

No. de adscripción a COLYPRO 0502760638



“Carta Autorización del autor(es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación”

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016

Instrucción: Complete el formulario en PDF, imprima, firme, escanee y adjunte en la página correspondiente del Trabajo Final de Graduación.

Yo (Nosotros):

Escriba Apellidos, Nombre del Autor(a). Para más de un autor separe con " ; "

Gutiérrez Rodríguez Diego Armando

De la Carrera / Programa: Licenciatura en Ingeniería Electromecánica
autor (es) del (de la) (Indique tipo de trabajo): Trabajo Final de Graduación
titulado:

Análisis de cortocircuito y coordinación de protecciones en el condominio horizontal residencial Malinches.

Autorizo (autorizamos) a la Universidad Latina de Costa Rica, para que exponga mi trabajo como medio didáctico en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI o Biblioteca), y con fines académicos permita a los usuarios su consulta y acceso mediante catálogos electrónicos, repositorios académicos nacionales o internacionales, página web institucional, así como medios electrónicos en general, internet, intranet, DVD, u otro formato conocido o por conocer; así como integrados en programas de cooperación bibliotecaria académicos dentro o fuera de la Red Laureate, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo con lo dispuesto en la Ley No. 6683 sobre derechos de autor y derechos conexos de Costa Rica, permita copiar, reproducir o transferir información del documento, conforme su uso educativo y debiendo citar en todo momento la fuente de información; únicamente podrá ser consultado, esto permitirá ampliar los conocimientos a las personas que hagan uso, siempre y cuando resguarden la completa información que allí se muestra, debiendo citar los datos bibliográficos de la obra en caso de usar información textual o paráfrasis de esta.

La presente autorización se extiende el día (Día, fecha) del mes del año a las . Asimismo declaro bajo fe de juramento, conociendo las consecuencias penales que conlleva el delito de perjurio: que soy el autor(a) del presente trabajo final de graduación, que el contenido de dicho trabajo es obra original del (la) suscrito(a) y de la veracidad de los datos incluidos en el documento. Eximo a la Universidad Latina; así como al Tutor y Lector que han revisado el presente, por las manifestaciones y/o apreciaciones personales incluidas en el mismo, de cualquier responsabilidad por su autoría o cualquier situación de perjuicio que se pudiera presentar.

Firma(s) de los autores Según orden de mención al inicio de ésta carta: